



HAL
open science

FORMATION DE GELS ET D'ÉMULSIONS DANS LE CIRCUIT DE BLOW-BY DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE

Mirindra Tsitohaina Randimbisoa

► **To cite this version:**

Mirindra Tsitohaina Randimbisoa. FORMATION DE GELS ET D'ÉMULSIONS DANS LE CIRCUIT DE BLOW-BY DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE. Autre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011. Français. NNT: . tel-00808240

HAL Id: tel-00808240

<https://theses.hal.science/tel-00808240>

Submitted on 5 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

Génie des procédés et hautes technologies

Présentée par

M. Mirindra Tsitohaina RANDIMBISOA

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

**FORMATION DE GELS ET D'ÉMULSIONS DANS LE CIRCUIT DE BLOW-BY DES
MOTEURS A COMBUSTION INTERNE**

Soutenue le 22 septembre 2011

Composition du JURY:

Directeur de thèse

Mme. Mireille TURMINE, Maître de conférences, HDR - Université Pierre et Marie Curie

Rapporteurs

M. Stéphane VINCENT, Maître de conférences, HDR - TREFLE Université Bordeaux 1

M. Agilio PADUA, Professeur - Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand

Examineurs

M. Farzaneh KHONSARI AREFI, Professeur - Université Pierre et Marie Curie

M. François HUET, Professeur - Université Pierre et Marie Curie

M. Gabriel CAVALLARO, Docteur Ingénieur - PSA Peugeot Citroën

Examineurs invités

M. Marc MICHEL, Ingénieur - PSA Peugeot Citroën

M. Fabrice VIDAL, Ingénieur - PSA Peugeot Citroën

M. Thibaut VITSE, Ingénieur - PSA Peugeot Citroën

M. Mehdi EL FASSI Ingénieur - PSA Peugeot Citroën

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur le Docteur Daniel LINCOT, directeur de l'UMR 7575, ainsi qu'à Monsieur le Professeur François HUET, Directeur de l'UPR 15, pour avoir bien voulu accepter que j'effectue ma thèse dans leurs laboratoires respectifs.

J'adresse ma profonde gratitude à Mme le Docteur Mireille TURMINE, qui a dirigé ces travaux de thèse. Elle a su me faire bénéficier de son expérience. Je la suis reconnaissant de la confiance qu'elle m'a accordée et de la liberté qu'elle m'a laissée pour explorer mon sujet de thèse.

Toute ma reconnaissance à Marc MICHEL, ainsi qu'à Thibaut VITSE, Ingénieurs à PSA à la DCTC pour le temps qu'ils ont pu me consacrer, pour les nombreuses réunions d'avancement et les remarques enrichissantes qu'ils ont formulées. Un grand merci pour leurs disponibilités tout au long de la réalisation, le déploiement et le rapatriement du banc d'essai.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Fabrice VIDAL, ainsi qu'à Mehdi EL FASSI, Ingénieurs à PSA à la DRIA au pour leurs disponibilités et leurs conseils. Ils m'ont apporté leurs visions de la thèse et ont contribué indéniablement à l'avancement de mon travail.

Je tiens à remercier Victor DA SILVA, ainsi que Jean-Christophe MYOUX, Ingénieurs à PSA à la DCTC, pour leurs remarques et leurs participations aux différentes réunions d'avancement.

Je remercie également le Docteur Carlo COSSU, pour m'avoir fourni des conseils précieux pour la mise en place des essais préliminaires qui ont été décisifs pour la planification de mes essais sur banc.

Je voudrais exprimer ma gratitude envers mes deux rapporteurs, M. le Professeur Agilio PADUA et M. le Docteur Stéphane VINCENT, pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie également Mme le Professeur Farzaneh Khonsari AREFI, Directeur de l'ED390, M le Professeur François HUET, Directeur de l'UPR 15, M le Docteur Gabriel CAVALLARO, Ingénieur à PSA qui m'ont fait l'honneur de siéger au jury de cette thèse.

Mes sincères remerciements à M le Professeur Francis MEUNIER, Directeur de l'IFFI CNAM pour avoir accepté d'héberger le banc d'essais, ainsi qu'à Mme Marie-France TERRIER, Ingénieur de recherche CNAM, pour ses conseils durant la construction du banc. Un grand merci à Kittirath LOUIS qui n'a pas ménagé ses efforts pour la réussite de la construction du banc d'essais.

J'aimerais également remercier toute l'équipe du FMEG à PSA, ainsi que l'ensemble des personnes du laboratoire LISE qui m'ont aidé à passer des années bien sympathiques.

J'embrasse très fort ma fille, ma femme, mes parents, mes frères et sœur et toute ma famille, qui sont toujours là et prêts à me motiver.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	A
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAP. 1: GELS ET EMULSIONS DE BLOW-BY : ETATS DE L'ART.....	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Le circuit de blow-by.....	7
1.3 Le gaz de blow-by.....	8
1.4 Le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by.....	9
1.5 Etat de l'art à PSA sur la formation de gels et d'émulsions de blow-by.....	11
1.6 Conclusion partielle.....	14
CHAP. 2: ASPECTS THEORIQUES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES	17
2.1 Introduction.....	17
2.2 L'air humide.....	17
2.3 Les émulsions.....	25
2.4 La condensation de l'air humide.....	39
2.5 Conclusion partielle.....	58
CHAP. 3: ANALYSE DES PHENOMENES DE GELS ET D'EMULSIONS DE BLOW-BY ET CHOIX DES PARAMETRES	65
3.1 Introduction.....	65
3.2 Les essais préliminaires	66
3.3 Les phénomènes attendus.....	67
3.4 Analyse théorique des phénomènes en jeu.....	68
3.5 La composition en eau du gaz de blow-by.....	72
3.6 Le débit et la turbulence.....	79
3.7 La température du gaz.....	82
3.8 La température de paroi.....	84
3.9 Les dispositions des circuits de blow-by.....	85
3.10 L'orientation des pièces.....	87
3.11 La géométrie des pièces	89
3.12 Le diamètre des tubes	90
3.13 La longueur des tubes	91
3.14 Les matériaux	93
3.15 La nature de l'huile.....	96
3.16 Granulométrie et concentration en huile	101
3.17 Les autres paramètres.....	110
3.18 Conclusion partielle.....	111
CHAP. 4: ETUDES EXPERIMENTALES EN ABSENCE DE PARTICULES D'HUILE ET CORRELATIONS.....	117

4.1	<i>Introduction</i>	117
4.2	<i>Le banc d'essais</i>	117
4.3	<i>La matrice d'essais</i>	128
4.4	<i>Conduite des expérimentations</i>	131
4.5	<i>Les phénomènes observés</i>	136
4.6	<i>Le profil de pression</i>	161
4.7	<i>Etablissement des corrélations</i>	169
4.8	<i>Elaboration des critères</i>	190
4.9	<i>Conclusion partielle</i>	193
CHAP. 5:	MODELISATION DES PHENOMENES DE TRANSFERT	199
5.1	<i>Introduction</i>	199
5.2	<i>Les hypothèses</i>	199
5.3	<i>Les paramètres d'entrée du modèle</i>	201
5.4	<i>Les paramètres de sortie du modèle</i>	202
5.5	<i>Mise en équations</i>	203
5.6	<i>Présentation dans AMESIM</i>	207
5.7	<i>Analyse des résultats</i>	208
5.8	<i>Validations expérimentales</i>	211
5.9	<i>Application du modèle</i>	214
5.10	<i>Analyse de sensibilité vis-à-vis des phénomènes</i>	222
5.11	<i>Analyse de sensibilité des paramètres d'entrée</i>	224
5.12	<i>Les facteurs affectant Nu</i>	227
5.13	<i>Conclusion partielle</i>	229
CHAP. 6:	RESULTATS DES ESSAIS D'EMULSIONS	235
6.1	<i>Introduction</i>	235
6.2	<i>La matrice d'essais</i>	235
6.3	<i>Le protocole expérimental</i>	236
6.4	<i>Les phénomènes observés</i>	237
6.5	<i>Impact de l'émulsion sur le profil de pression</i>	242
6.6	<i>Impact thermique de l'huile</i>	243
6.7	<i>Conclusion partielle</i>	244
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	249
	DEFINITION DES TERMES	253
	REFERENCES	255

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les gaz de blow-by sont les gaz sortant des carters des moteurs à combustion interne. Ils proviennent essentiellement de la fuite des gaz de la chambre de combustion à travers les segmentations du piston qui ne sont pas totalement étanches. La législation exige que ces gaz pollués ne soient pas rejetés dans l'atmosphère. C'est pourquoi ils sont partiellement purifiés dans des déshuileurs et réintroduits vers la ligne d'admission d'air du moteur à travers des séries de tuyaux et de raccords. L'ensemble de ces conduites constitue le circuit de blow-by.

Les gaz de blow-by contiennent non seulement du gaz mais aussi de la vapeur d'eau provenant de la combustion. Il arrive que dans des conditions climatiques froides, cette vapeur finisse par condenser et se solidifier à l'intérieur des circuits de blow-by conduisant ainsi au bouchon du circuit. Ce phénomène correspond au **gel de blow-by**. En outre, sachant que le gaz de blow-by contient aussi des particules d'huile provenant du bas carter et des segmentations, on peut assister à la formation d'une émulsion. Il s'agit d'un mélange intime d'eau et d'huile capable de s'accumuler à certains endroits des conduites et éventuellement de s'y cristalliser. On appelle communément ce mélange une «mayonnaise» ou une **émulsion de blow-by**.

Les gels et les émulsions de blow-by sont susceptibles de boucher les tuyaux de blow-by et de conduire à la surpression dans le carter. A terme, cela entraîne l'éjection de la jauge d'huile suivie d'une vidange voire même à une casse moteur. Un risque d'incendie est aussi possible lorsque l'huile est éjectée sur des parties chaudes du moteur.

Aussi, les problèmes de formation de gels et d'émulsions dans le circuit de blow-by des véhicules constituent un enjeu important au niveau du groupe PSA. Ces pannes et risques d'incendie peuvent avoir des conséquences catastrophiques vis-à-vis de l'image du groupe. Les approches adoptées actuellement sont très coûteuses puisque basées sur des essais systématiques des véhicules sur banc climatique. De plus, les solutions techniques qui en découlent sont souvent difficiles à mettre en œuvre compte tenu de leur déploiement tardif vis-à-vis du cycle de développement des moteurs.

L'objectif de cette thèse est de **comprendre le déroulement des phénomènes mis en jeu** dans la formation de gels et d'émulsions de blow-by, de **mettre en évidence les paramètres influents** et finalement de **construire des outils prédictifs** appropriés.

Le gel et l'émulsion de blow-by sont des problèmes assez récents qui sont causés par l'évolution des normes environnementales. Ceci explique pourquoi ils n'ont jamais été traités dans la littérature. En outre, les problèmes sont très complexes compte tenu de la multiplicité des phénomènes mis en jeu (qui sont souvent liés entre eux) ainsi que du nombre important des paramètres concernés.

Afin de comprendre le contexte du phénomène étudié, nous avons présenté l'état de l'art sur la formation de gels et d'émulsions de blow-by, dans le **chapitre 1**. Le circuit de blow-by est essentiellement composé de conduites cylindriques à l'intérieur desquelles circule un mélange de gaz humide et de particules d'huile. De plus, les propriétés thermiques, hydrodynamiques et chimiques du gaz ne sont pas constantes mais évoluent avec de nombreux paramètres dont la nature du moteur et du véhicule, l'ambiance extérieure et le fonctionnement du véhicule. A l'heure actuelle, la connaissance sur le gel et l'émulsion de blow-by repose sur des bases purement empiriques dont des observations visuelles effectuées lors des différents essais sur véhicules ainsi que des modèles empiriques spécifiques à chaque véhicule. Chacun de ses résultats d'essais ainsi que les paramètres caractéristiques des circuits de blow-by concernés ont été réunis dans une base de données unique afin de faciliter le choix des paramètres et du phénomène d'intérêt.

Les divers phénomènes mis en jeu dans la formation de gels et d'émulsions de blow-by relèvent de plusieurs domaines scientifiques, qui sont rarement traités simultanément dans la littérature, nous avons donc choisi, dans le **chapitre 2**, de rappeler les différentes approches théoriques concernant

ces divers phénomènes élémentaires. Les phénomènes en question sont la **condensation**, la **formation de givre**, la **formation de l'émulsion** et la **solidification** de l'eau ou de l'émulsion. Pour chaque phénomène, nous avons énuméré les différents paramètres physicochimiques et regardé leur impact sur la morphologie, le déroulement ainsi que la propriété des produits obtenus (stabilité, température de cristallisation, etc.). La condensation de l'air humide est étroitement liée au phénomène de convection du gaz sur une paroi froide, nous avons décidé de précéder l'analyse de ce phénomène par une brève présentation du phénomène de convection et du coefficient de transfert massique et thermique. Dans la mesure où les condensats qui se forment à l'intérieur des tubes peuvent affecter les phénomènes de transferts thermiques et massiques, nous avons considéré les particularités de la condensation en film et de la condensation en gouttes.

Il n'est pas possible d'étudier séparément chacun des paramètres mis en jeu dans le cadre de cette étude, mais il est important d'avoir un minimum d'information concernant les phénomènes attendus et leurs interactions pour mieux orienter l'étude. Nous avons donc choisi, dans le **chapitre 3**, de mener une analyse qualitative de ces divers phénomènes mis en jeu de manière à identifier les paramètres pertinents. En se basant sur les différentes théories du chapitre 2 ainsi que sur des essais préliminaires sur des dispositifs simples de laboratoire, nous avons d'abord rappelé les différents phénomènes théoriquement attendus et expérimentalement constatés. Puis, nous avons expliqué leurs conditions d'existence respectives et rappelé les phénomènes physiques à considérer. Ensuite, nous avons considéré un à un les différents paramètres concernés et estimé leur importance respective vis-à-vis des différents phénomènes envisageables. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu comme pertinents les paramètres suivants : l'humidité du gaz qui est caractérisée par le point de rosée, la température du gaz, le débit du gaz, le diamètre du tuyau, la température de la paroi et le débit en particules d'huile. En s'appuyant sur la base de données que nous avons construite, nous avons établi par la suite la plage de variation de chaque paramètre en vue de construire un banc d'essai.

Les paramètres d'ordre un étant choisis, les études qualitatives ont été ensuite complétées, dans le **chapitre 4**, par des études quantitatives à travers des essais de gel sur le banc prévu à cet effet. Les essais consistent à envoyer de l'air humide à l'intérieur d'une conduite extérieurement refroidie par un bain froid, à observer les phénomènes qui en résultent et à mesurer les différentes propriétés caractéristiques du gaz et de la paroi aux différents endroits (humidité, températures). La pression à l'intérieur de l'échantillon d'essai a aussi été suivie afin de caractériser la formation et l'évolution des bouchons à l'intérieur des tubes. Un banc a donc été spécifiquement conçu pour ces essais. Il comprend une unité de purification du gaz, une unité pour contrôler le débit, l'humidité et la température du gaz et une unité permettant d'introduire une certaine quantité de particules d'huile à l'intérieur du gaz pour les essais émulsions.

L'objectif de ces essais est de comprendre les phénomènes mis en jeu ainsi que d'identifier leurs domaines de prédominance respectifs. Aussi, la matrice expérimentale et la conduite des essais ont été choisies de manière à identifier le plus rapidement possible la frontière entre les **conditions opératoires givrantes** et les **conditions opératoires condensantes**. Notre étude a été menée sur trois échantillons de diamètre différent. A partir des résultats collectés, nous avons constaté qu'il est possible d'identifier les zones de risque de bouchon et les phénomènes prépondérants en fonction de la température moyenne de paroi et du débit total de condensation. Toutefois, les critères de givre ou de condensation ainsi que les critères de risque de bouchon ne sont pas identiques pour les trois diamètres de tube testés. Quand le diamètre du tube augmente, la température moyenne de paroi requise pour la formation de bouchon diminue et le débit de condensation nécessaire augmente.

Des corrélations expérimentales des coefficients de transfert avec les conditions opératoires ont été proposées. Elles ont permis de constater qualitativement l'impact des divers paramètres ainsi que leurs interactions sur le phénomène de transfert. En outre, en se servant d'une corrélation de l'énergie échangée en fonction du gradient d'enthalpie entre les gaz dans la veine et le gaz au voisinage de la

paroi du tube, nous avons pu mettre en évidence les différentes formes d'échange d'énergie entre le gaz et la paroi froide.

Dans le **chapitre 5**, nous avons établi des modèles physiques des transferts de masse et de chaleur en se basant sur la théorie et en tenant compte des phénomènes possibles suggérés par les corrélations expérimentales. Le principe consiste à représenter chaque morceau de tube par un élément de surface sur lequel s'effectue un transfert de chaleur composé par la convection de l'air humide causée par le gradient de température entre le gaz et la paroi ainsi que la condensation de la vapeur induite par le gradient d'humidité entre les deux milieux. Ainsi, dans une condition sursaturée, deux phénomènes de stabilisation par condensation ont été proposés : la stabilisation par condensation adiabatique et la stabilisation par condensation isothermique. Les modèles proposés ont permis de déterminer la distribution spatiale de la température de paroi interne et de retrouver le débit total de condensation. Ceci a permis par la suite de prédire les phénomènes prépondérants et les risques de bouchons à partir des conditions opératoires puis d'effectuer des analyses de sensibilités.

Dans le **chapitre 6**, l'impact de la présence de particules d'huile sur le phénomène de gels et d'émulsions a été traité. L'objectif est de comprendre l'influence de la formation d'émulsions sur le déroulement des phénomènes et de déterminer la modification à apporter aux critères de bouchon ainsi qu'au modèle établi pour tenir compte de la présence d'huile. L'analyse des résultats d'essais sur banc en présence d'huile montre que l'eau liquide se transforme systématiquement en émulsion. Bien que les émulsions puissent avoir une température de cristallisation plus faible (solidification plus difficile) comparée à celle de l'eau, elles n'empêchent pas le bouchon des tubes. Leurs impacts se limitent à de légères réductions de la pression en fin d'essai. Au contraire, pour les conditions condensantes, les émulsions ont tendance à s'accumuler et empêcher le libre parcours de l'eau et d'entraîner le **bouchon partiel** ou le **bouchon total** de la conduite. En analysant la composition des résidus piégés à l'intérieur des tubes, on constate que les givres piègent beaucoup plus de particules d'huile que les glaces et les condensats. Néanmoins, les particules n'ont aucun impact notable sur la formation du givre. Enfin, du point de vue thermique, la présence de particules ne modifie pas les phénomènes d'échange de chaleur. Ainsi, les modèles élaborés sont toujours valides dans la mesure où la quantité de particules mise en jeu ne dépasse pas la quantité qui a été testée (2,5 g/h).

Chapitre 1 :
GELS ET EMULSIONS DE
BLOW-BY : ETAT DE L'ART

CHAP. 1: GELS ET EMULSIONS DE BLOW-BY : ETATS DE L'ART

1.1 Introduction

Le gel et l'émulsion de blow-by font intervenir des phénomènes multiples qui varient à la fois avec le temps, l'endroit du circuit considéré et l'environnement externe et interne des moteurs. Pour pouvoir élaborer une feuille de route pour la recherche à entreprendre, il est important de bien définir le contexte exact dans lequel les phénomènes se déroulent et de prendre en compte l'état de l'art actuel aussi bien chez PSA que chez les autres constructeurs automobiles.

Pour cela, nous allons d'abord rappeler ce qu'est le circuit de blow-by d'un moteur. Ensuite nous allons détailler la composition du gaz de blow-by qui est le principal élément mis en jeu dans la formation de gels et d'émulsions de blow-by. Puis, nous décrivons les phénomènes observés dans divers endroits du circuit et enfin nous exposerons l'état de l'art actuel.

Chacune de ces diverses étapes nous permettra de cadrer les études théoriques et bibliographiques à entreprendre et par la même occasion d'orienter la stratégie et l'approche à adopter pour la suite.

1.2 Le circuit de blow-by

La figure suivante représente le schéma simplifié d'un moteur à combustion. Dans la partie supérieure on distingue la chambre de combustion qui est séparée du carter basse pression (circuit de lubrification) par les pistons. Lors d'un cycle moteur, à cause du défaut d'étanchéité de la segmentation, la pression qui règne dans la chambre de combustion génère une fuite de gaz vers le bas moteur. On l'appelle « gaz de carter » ou « gaz de blow-by ».

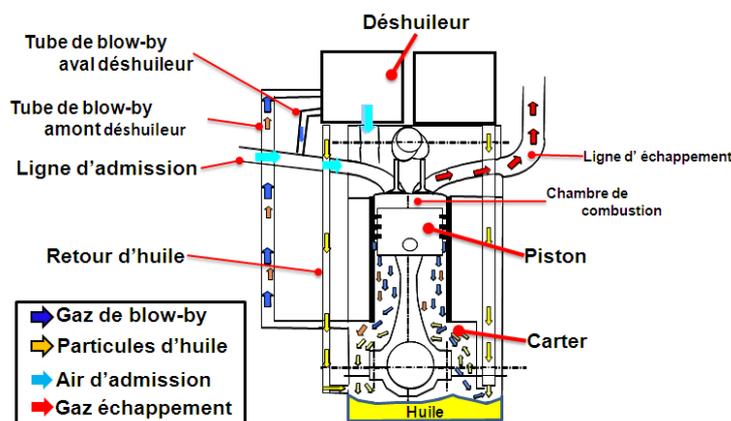


Figure 1 : Le circuit de blow-by

Comme l'exige la législation, le gaz de blow-by ne doit pas être rejeté dans l'atmosphère à cause du risque de pollution. Ainsi le gaz est recyclé vers le circuit d'admission à travers des conduites et un système de décantation appelés **circuit de blow-by**.

Le circuit de blow-by comprend :

- Des tubes (durites) servant à transporter le gaz de blow-by.
- Des déshuileurs, qui sont des volumes équipés majoritairement de chicane, permettant de récupérer la majeure partie des gouttelettes d'huile transportées dans le gaz de blow-by.
- Des piquages sur la ligne d'admission d'air permettant d'injecter le gaz de blow-by dans la ligne.

Selon la position de la durite par rapport au déshuileur, on distingue le tube de blow-by amont et le tube de blow-by aval. Le gaz de blow-by est récupéré soit à travers des piquages situés sur le bas carter, soit par des couvre-culasses avec déshuileurs intégrés qui sont montés sur la culasse. Les couvre-culasses en question sont équipés de cheminées permettant la récupération des gaz et de siphons permettant le retour des huiles piégées vers le carter (voir Figure 4). Pour certains moteurs à essence, afin de maintenir la possibilité d'injecter le gaz de blow-by malgré la fermeture du papillon aux faibles charges, le circuit de blow-by comporte un circuit de réadmission côté amont papillon et un autre circuit côté aval papillon (voir Figure 4).

1.3 Le gaz de blow-by

Afin de comprendre la formation de gels et d'émulsions de blow-by, il est important de rappeler les caractéristiques du gaz de blow-by. On mettra l'accent sur la source, la composition, l'aspect hydrodynamique et l'aspect thermique du gaz.

1.3.1 Source

Comme il a été mentionné précédemment, le gaz de blow-by provient essentiellement de la fuite au niveau de la segmentation. Parmi les autres sources, citons aussi :

- La fuite au niveau du palier du turbocompresseur, depuis les corps de la turbine et du compresseur vers le carter moteur par le retour d'huile.
- La fuite par les joints de queue de soupape depuis la chambre de combustion vers la culasse.
- La fuite de gaz de la pompe à vide, depuis le circuit de freinage vers la culasse.

1.3.2 Composition

Compte tenu de son origine, le gaz de blow-by est essentiellement composé par de l'air et du gaz de combustion. Parmi les composés du gaz de combustion, on distingue le dioxyde de carbone (CO_2), le diazote (N_2) et la vapeur d'eau. On peut trouver en quantité moins importante les polluants résiduels de combustion tels que le monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbures gazeux. Parmi les composés provenant de l'air, on a essentiellement du N_2 et du dioxygène (O_2) mais aussi une certaine quantité d'eau. Le gaz de blow-by est aussi chargé en particules d'huile par effet d'entraînement. Ces particules sont essentiellement produites par des effets aérodynamiques engendrés par les différentes pièces en mouvement (piston, vilebrequin), mais également par la mise en pression du film d'huile, des paliers vilebrequin ainsi que par l'alimentation en huile de la culasse pour la lubrification de la distribution. En outre, compte tenu de son séjour dans la chambre de combustion, le gaz peut contenir une quantité plus ou moins importante de carburant (essence ou gasoil) à l'état vapeur. Ce dernier est constitué par un mélange complexe d'hydrocarbures, d'aromatiques, d'oléfines, ou de composés oxygénés. Comme le régime de fonctionnement et la charge des véhicules ne sont pas toujours uniformes, la composition du gaz de blow-by peut changer avec le point de fonctionnement. De plus, non seulement la composition du gaz n'est pas identique d'un moteur à un autre mais aussi elle est susceptible d'évoluer avec l'âge du moteur. Enfin, la composition du gaz de blow-by évolue le long du circuit de blow-by. En effet, le dépôt progressif le long de la ligne provoque une diminution de la quantité et de la granulométrie des gouttes d'huile avec le déplacement du gaz. D'autre part, la condensation de l'eau à travers les circuits de blow-by peut engendrer une diminution le long de la ligne de la quantité de vapeur d'eau dans le gaz.

1.3.3 Aspect hydrodynamique

En fonctionnement normal, compte tenu de l'aspiration par le circuit d'admission, le circuit de blow-by est en permanence en dépression. Ce qui n'est plus le cas quand les conduites sont bouchées par le gel ou l'émulsion.

A cause du mouvement cyclique du piston, le gaz de blow-by adopte un débit et une pression pulsés. La fréquence de pulsation est liée directement au mouvement des pistons alors que l'amplitude varie

à la fois avec la course du piston, la géométrie du circuit dans son ensemble et la position du point à considérer. De même, le débit moyen du gaz n'est pas constant, il change avec la condition de fonctionnement et varie aussi d'un moteur à l'autre. Enfin, l'écoulement dans un circuit de blow-by est généralement polyphasique. En effet, à part la circulation du gaz, on a aussi le mouvement des gouttelettes d'huile qui sont entraînées ainsi que le mouvement des films d'eau, des films d'huile ou des films d'émulsion qui se sont déposés sur les parois.

1.3.4 Aspect thermique

Issu du bas carter, le gaz de blow-by est naturellement chaud. Comme le débit, sa température varie avec le type de moteur, l'âge du moteur et les conditions de fonctionnement. Etant donné que le transport du gaz se fait à l'intérieur des circuits exposés extérieurement à l'ambiance sous capot, le gaz de blow-by se refroidit avec son déplacement le long de la ligne, à des degrés différents selon l'exposition des circuits concernés. La température varie donc avec l'ambiance sous capot dépendant lui-même de la température externe, du véhicule, de l'architecture et de la vitesse du véhicule.

1.4 Le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by

1.4.1 Contexte

Le gel et l'émulsion de blow-by sont des phénomènes rencontrés essentiellement dans les pays froids où la température ambiante peut rester très faible (en dessous de 0°C) pendant plusieurs semaines. Le phénomène est accentué par le comportement client dans les régions concernées : parking à ciel ouvert dans des conditions climatiques froides, roulage de faibles distances ne permettant pas de chauffer suffisamment les moteurs.

1.4.2 Description des phénomènes

Quand le circuit de blow-by est exposé extérieurement à de basses températures, les parois des tubes se refroidissent et leur température descend en dessous de la température de condensation du gaz de blow-by (voire en dessous de 0°C), ce qui entraîne la condensation et la solidification d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans le gaz. C'est le **Gel de blow-by**.

La condensation ou le gel de l'eau peuvent se présenter sous diverses formes. Dans certains endroits du tube, il peut être sous forme de givre poreux tapissant la paroi ou sous forme de glaçons compacts, mélangés ou non avec de l'huile.



(A) Givre poreux



(B) Glace compact

Figure 2 : Gel de blow-by

La présence simultanée d'eau liquide et de gouttelettes d'huile dans le circuit de blow-by entraîne la formation d'une émulsion qui est un mélange intime d'eau et d'huile appelée communément «**mayonnaise**». C'est l'**émulsion de blow-by**.



Figure 3 : Émulsion de blow-by

Le gel et l'émulsion de blow-by peuvent engendrer des problèmes non négligeables sur le fonctionnement du moteur. En s'accumulant aux divers endroits du circuit de blow-by, le gel ou l'émulsion peuvent conduire à une obturation du circuit de blow-by entraînant la montée en pression du carter suivi de l'éjection de l'huile (vidange). A terme, cela peut conduire à une casse moteur voire un incendie si l'huile est éjectée sur une partie chaude du moteur.

1.4.3 Localisation et fréquence

Le gel et l'émulsion de blow-by concernent à des degrés variables tout le circuit de blow-by. Ils peuvent être retrouvés à l'intérieur d'une durite, au niveau des déshuileurs ou au niveau des piquages sur la ligne d'air.

En se basant sur les résultats des essais sur banc climatique des véhicules à essence, le schéma ci-dessous résume les divers endroits concernés par la formation de gels et d'émulsions de blow-by. Le cas des moteurs Diesel est détaillé dans la référence [1].

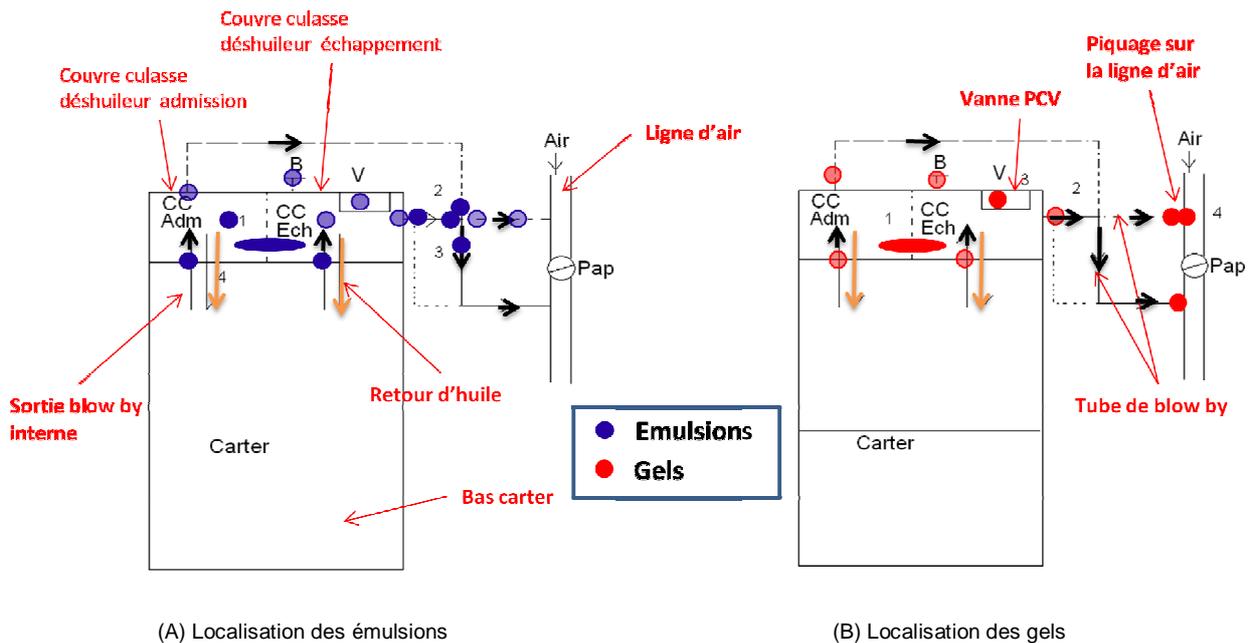


Figure 4 : Localisation des gels et émulsions dans les moteurs à essence

Les fréquences d'apparition du gel et de l'émulsion sur les différentes portions du circuit sont assez comparables entre elles sauf pour les cas des piquages ligne d'air où l'apparition du gel est quasi-systématique (bien qu'en faible quantité pour certains cas).

De même, en se référant au nombre de cas de gel, d'émulsion ou d'émulsion gelée observé sur chaque pièce par rapport au nombre total des pièces inspectées, on a pu constater que la fréquence des phénomènes est assez similaire entre un moteur à essence et un moteur Diesel (23% et 26%

respectivement). Toutefois, pour le cas de gel seulement, la fréquence semble être légèrement supérieure pour les moteurs Diesel.

En ce qui concerne la sévérité (risque de bouchon), les moteurs Diesel semblent être plus épargnés que les moteurs à essence. Notons aussi que pour un même moteur, la sévérité des phénomènes varie d'un véhicule à un autre.

1.5 Etat de l'art à PSA sur la formation de gels et d'émulsions de blow-by

1.5.1 Les moyens de prédiction

Afin de tenir compte de la problématique de gel de blow-by dans la conception et la validation des architectures, PSA a mis en place des essais permettant de prédire les risques de gel pour les véhicules destinés aux pays froids. Bien que ces outils aient certaines limites et désavantages en terme de coût en développement, ils sont largement utilisés à l'heure actuelle. Ils comprennent la modélisation thermique du circuit de blow-by, les gammes d'essais sur banc à rouleaux climatique et les essais sur route.

1.5.1.1 La modélisation thermique

1.5.1.1.1 Principe

La modélisation thermique du circuit de blow-by se fait essentiellement de manière unidimensionnelle (1D). Pour cela on a recours à l'analogie entre électricité et thermique pour caractériser la conduction et la convection à travers les parois et les fluides. Les divers points des circuits sont modélisés par des nœuds qui sont reliés entre eux par des éléments résistifs ou capacitif caractéristiques des matériaux. Les convections internes et externes aux parois sont assimilées à des éléments résistifs dont les caractéristiques font intervenir le coefficient de convection.

Parmi les paramètres d'entrée du modèle, on a le débit des gaz ainsi que les coefficients de transfert.

1.5.1.1.2 Avantage, inconvénient et utilisation

Les modèles thermiques 1D trouvent leur utilisation dans le dimensionnement des réchauffeurs et isolants pour le circuit de blow-by ainsi que l'évaluation des risques de gel pour un circuit donné avec pour critère une température de paroi supérieure à 0°C. Ils permettent d'estimer la température des parois et des gaz en fonctionnement normal (sans bouchon) mais nécessitent la connaissance des coefficients de transfert total. Ce qui nécessite d'importants travaux de recalage par rapport aux vraies températures mesurées sur les pièces lors des essais sur banc à rouleaux. Compte tenu de l'importance du recalage, ces modèles ne peuvent être utilisés qu'en relatif. C'est-à-dire que la modélisation d'un circuit se fait à partir des essais effectués sur un moteur similaire. De même, bien que les résultats de ces modèles soient exacts, le critère de gel 0°C n'est que qualitatif vu qu'une température supérieure à 0°C peut toujours conduire à la condensation et donc à la formation de glaçon quand le moteur se refroidit. Notons que pour des pièces plus complexes tel que le déshuileur, on utilise aussi une modélisation 3D. Cette dernière se fait avec des codes de type FIRE en utilisant des maillages relativement fins.

1.5.1.2 Les gammes de validation

Les essais de validation sur banc à rouleaux constituent un élément majeur des outils de validation des véhicules vis-à-vis du gel et de l'émulsion de blow-by. Les essais s'effectuent sur les véhicules, ils tiennent donc compte à la fois de l'aspect architecture moteur et aérodynamique sous capot.

Actuellement, PSA dispose de deux gammes d'essais : une gamme pour tester la sensibilité à l'émulsion, une autre pour tester la sensibilité au gel. Les deux gammes d'essais sont appliquées successivement au véhicule en intercalant une période de « macération ».

1.5.1.2.1 Gamme émulsion

La condition climatique de la gamme émulsion a été choisie de manière à favoriser l'apparition des émulsions. Elle se fait à température moins basse où l'eau tend à rester à l'état liquide et devient plus favorable à la formation de condensat sans transformation en glace. La gamme émulsion est effectuée sur un cycle de type ville. Il est illustré sur la figure ci-dessous :

L'essai se déroule sur un banc à rouleaux climatique. Comme le montre la figure, la vitesse n'est pas constante mais suit un profil bien particulier qui est assez représentatif de la réalité sur terrain.

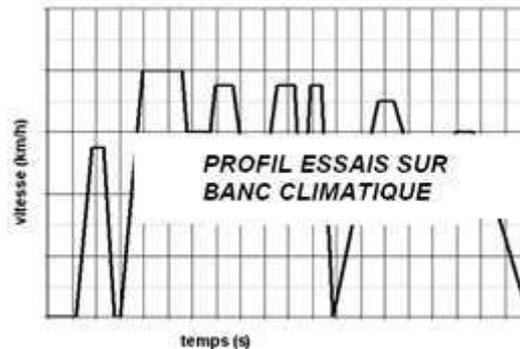


Figure 5 : Gamme émulsion

Ce profil est appliqué à plusieurs reprises sur le véhicule dans une ambiance de -10°C sous soufflerie. Entre deux cycles, l'huile est refroidie par soufflerie à -10°C avant d'entamer le cycle suivant. La température aux différents endroits du circuit de blow-by ainsi que la pression carter sont suivies en temps réel pendant l'essai. A la fin, si cela s'avère techniquement possible, les différents endroits du circuit de blow-by sont examinés.

1.5.1.2.2 Gamme gel

La gamme émulsion est suivie de la gamme gel. L'essai s'effectue sous soufflerie dans une ambiance -18°C, -25°C ou -30°C respectivement pour une validation type climat tempéré, climat froid et climat grand froid.

La gamme comprend une série de points stabilisés pendant quelques minutes, séparés de « lâchés de pied ». Ce qui permet de simuler à la fois le cas d'un papillon fermé et le cas d'un papillon ouvert pour les moteurs à essence.

Comme dans le cas des essais émulsion, les températures et la pression carter sont suivies en permanence pendant l'essai. A la fin de l'essai, on effectue des inspections visuelles des différents endroits du circuit de blow-by.

Les essais gel et émulsion font partie des incontournables et sont testés systématiquement sur tous les véhicules PSA. Les essais sont validés par l'absence de montée en pression du carter ainsi que l'absence de glace dans le circuit.

1.5.1.2.3 Conclusion sur les gammes

Bien que les gammes gel et émulsion soient très intéressantes en termes de fiabilité, ils sont coûteux et doivent être appliqués sur tous les véhicules. De plus ils n'interviennent que tardivement sur le processus de développement et rendent compliquée la prise de mesures relatives au gel et à émulsion de blow-by (prise en compte de l'emplacement des modernisations, choix des dimensions et emplacement du circuit de blow-by).

Enfin, les résultats d'essais sont spécifiques pour chaque véhicule et ne peuvent être exploités comme outils prédictifs.

1.5.2 Les moyens de prévention

1.5.2.1 Les clapets de surpression

Les clapets de surpression sont des dispositifs de sécurité permettant d'éviter la surpression excessive dans le carter (donc d'éviter la vidange d'huile) en cas de bouchon des conduites de blow-by. Ils sont constitués par des membranes d'échappement munies de ressorts de rappel montés sur les déshuileurs ou les couvre-culasses. PSA s'est fixé une pression d'ouverture aux environs de 135 mbar au-dessus de la pression atmosphérique. Ainsi, quand la pression du carter augmente au-delà de cette limite, le clapet s'ouvre et le gaz de blow-by est évacué vers l'atmosphère.

1.5.2.2 Les modernisations

Les modernisations sont les principales mesures techniques pour limiter le problème de bouchon de gels et d'émulsions dans les conduites de blow-by. Elles peuvent être de type actif tels que des réchauffeurs locaux ou de type passif tels que les isolations externes des conduites.

1.5.2.2.1 Les réchauffeurs

Les réchauffeurs sont utilisés pour maintenir la température de paroi au-dessus de 0°C. Ils permettent d'éviter la formation locale de gel et d'émulsion. Ils agissent localement mais ne permettent pas de chauffer le gaz de blow-by. Les réchauffeurs sont dimensionnés en utilisant le modèle thermique décrit précédemment. Leur développement peut être de type préventif en les intégrant sur les véhicules pendant la phase de développement ou curatif (post production) en faisant des rattrapages clientèle si les véhicules sont déjà sur le marché.

1.5.2.2.2 Les isolants

Les isolants servent à empêcher le refroidissement des tubes sous l'impact de l'écoulement d'air froid sous le capot. Ils sont sous forme de mousse d'isolation thermique montée autour des tuyaux à protéger. L'épaisseur est dimensionnée de manière à obtenir un fonctionnement optimal c'est-à-dire le minimum de volume avec un degré d'isolation nécessaire. Les épaisseurs d'isolants sont aussi dimensionnées en se servant du modèle thermique. Comme les réchauffeurs, leurs utilisations sont à valider par les essais sur banc à rouleaux.

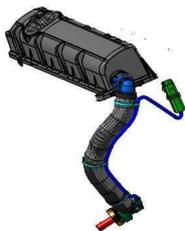


Figure 6 : Mousse d'isolation et réchauffeurs

1.5.2.2.3 Conclusion sur les modernisations

Les modernisations sont déjà appliquées sur certains véhicules à destination des pays froids. Faute d'outils assez prédictifs, les réchauffeurs et les isolants sont difficiles à dimensionner (justification de nécessité, choix du réchauffeur, dimension et puissance de chauffe) pendant la phase initiale du développement des moteurs.

Leur intégration dans la phase finale de développement pose des difficultés s'ils ne sont pas prévus assez tôt. Cela est d'autant plus vrai que les réchauffeurs sont très coûteux en énergie électrique et que l'encombrement des isolations induit parfois des difficultés d'implantation.

La mise en place des isolations est très coûteuses quand il s'agit de rattrapage clientèle. En 2005 par exemple, le coût d'un rattrapage clientèle relatif au gel et émulsion de blow-by atteignait plusieurs millions d'euro.

1.5.2.3 Les autres solutions

La formation de gels et d'émulsions au milieu d'un tuyau de blow-by peut être éradiquée si on arrive à limiter le refroidissement des parois par l'air froid sous capot. Pour cela, dans la mesure du possible, on essaie de placer les tubes de blow-by dans des endroits moins exposés ou plus chauds sous capot. Dans certains cas, on met aussi des caches de protection autour des pièces à protéger.

Récemment, PSA a breveté un moyen de réduire le risque de gel et d'émulsion en équipant le moteur d'un piquage de dilution. Le principe consiste à réduire la pression partielle de l'eau et donc à réduire sa température de condensation en diluant le gaz de blow-by par de l'air sec réchauffé, provenant de l'atmosphère. L'aspiration de ce dernier se fait de manière naturelle sans l'utilisation d'une pompe extérieure puisque le carter est en permanence en dépression.

Un autre brevet a aussi été déposé par PSA dont le principe consiste à maintenir la température de paroi suffisamment chaude en faisant passer les tuyaux de blow-by à l'intérieur des tuyaux acheminant le fluide de refroidissement. Toutefois, ces mesures ont des limites à cause du problème d'implantation et parce qu'il n'est pas toujours possible de l'appliquer sur toute la longueur des tuyaux.

1.5.2.4 Gel et émulsion de blow-by vis-à-vis des autres constructeurs

Le gel et l'émulsion de blow-by ne sont pas spécifiques aux véhicules PSA. Pour certaines marques, la solution se fait directement par les garages locaux qui mettent en place eux-mêmes les dispositifs de réchauffage ou d'isolation thermique dans les circuits de blow-by. Notons aussi que d'autres constructeurs tels que BMW disposent de gammes d'essais similaires à PSA.

1.6 Conclusion partielle

A travers ce chapitre, nous avons vu que le circuit de blow-by est composé par des durites ainsi que des déshuileurs montés bout à bout. Bien que l'interconnexion entre les différents éléments diffère d'un circuit à l'autre, le principe est unique, il consiste à récupérer le gaz de blow-by dans les différents endroits du bloc moteur, éliminer la majorité des particules qu'il contient et le renvoyer sur la ligne d'admission via un piquage.

Nous avons aussi vu que le gaz de blow-by est composé essentiellement par un mélange de vapeur d'eau, de gaz inerte et de particules d'huile. Du point thermique, il a sa propre température et ses propres caractéristiques hydrodynamiques (vitesse, débit) qui peuvent varier avec le temps et l'espace.

Malgré la multiplicité et la complexité apparentes des phénomènes en jeu, nous avons vu que la formation de gels et d'émulsions de blow-by est régie par le changement d'état de l'eau contenue dans un gaz incondensable (de l'état vapeur vers l'état liquide ou solide) dans un environnement froid et en présence de film et de particules d'huile.

Les dépôts observés à l'intérieur des tubes peuvent être uniquement de la glace ou du givre issus d'une simple cristallisation de l'eau. Mais ils peuvent aussi être constitués d'émulsions liquides ou solides provenant d'un mélange intime d'eau et d'huile. Dans tous les cas, les phénomènes concernent à des degrés variables presque la totalité du circuit de blow-by, en particulier ils sont systématiquement présents au niveau du piquage de réadmission du gaz dans la ligne d'air.

Enfin nous avons rappelé qu'au niveau de PSA et les autres constructeurs, l'approche actuelle repose sur des essais véhicules sur banc climatique ainsi que la mise en œuvre de modèles purement empiriques recalés à partir de ces essais. Du point de vue pratique, les solutions actuelles sont la dilution du gaz de blow-by par des chauds ainsi que l'utilisation de réchauffeurs ou d'isolants sur les parois à protéger.

Chapitre 2 :

ASPECTS THEORIQUES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

CHAP. 2: ASPECTS THEORIQUES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

2.1 Introduction

A l'heure actuelle, malgré son ampleur, le phénomène de gels et d'émulsions dans le circuit de blow-by, à proprement dit, n'a jamais été étudié dans la littérature. Toutefois, les différents phénomènes élémentaires conduisant à la formation de ces deux états ont été largement traités dans des contextes, certes, totalement différents. Les phénomènes en question sont la condensation de l'eau, la formation de givre, la formation des émulsions et la cristallisation de l'eau ou des émulsions.

Aussi, comme la formation de gels et d'émulsions dans le circuit de blow-by est un phénomène tout à fait nouveau dans les applications « moteurs », il est important de comprendre d'abord la théorie et la physique qui décrivent ces phénomènes élémentaires avant d'aborder le problème dans sa globalité. Ce qui nous permettra par la suite de mieux définir l'approche à adopter, les paramètres à prendre en compte et intéressants à étudier pour les différents cas de figures.

Dans la première partie du chapitre, nous allons d'abord rappeler la physique liée à l'air humide ainsi que les différents phénomènes associés au changement d'état de l'air humide. Ensuite, nous allons considérer les phénomènes de condensation. Enfin, nous détaillerons la formation des émulsions et leur comportement en fonction de leur environnement.

Pour plus de clarté, les phénomènes physiques liés à la formation de givre ainsi qu'un bref rappel sur la composition des lubrifiants, éléments essentiels dans la formation d'émulsions sont décrits en annexe.

2.2 L'air humide

Nous avons vu que le gel et l'émulsion de blow-by sont essentiellement liés au changement d'état de la vapeur d'eau diluée dans une matrice de gaz incondensable ($\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{CO}$) en présence de gouttelettes d'huile et de carburant. L'air est en proportion majoritaire dans le gaz de blow-by. Les autres gaz présents en faible quantité (14% de CO_2 au maximum) dans le gaz de blow-by seront considérés comme des gaz parfaits et insolubles dans l'eau pour les conditions de pressions et de températures qui nous intéressent. Ainsi, il est possible d'étudier les phénomènes de gels et d'émulsions de blow-by en assimilant le gaz de blow-by à l'air humide contenant des particules d'huile.

Dans ce paragraphe, nous allons d'abord rappeler les différents états de l'eau en nous focalisant sur le cas de la vapeur d'eau pure puis nous considérerons le cas de l'air humide qui est un mélange de vapeur et d'air sec.

2.2.1 Les différents états de l'eau

2.2.1.1 Diagramme d'état de l'eau

Selon les conditions de température et de pression, l'eau peut être sous trois formes différentes:

- A l'état vapeur (gaz) pour les faibles pressions et/ou les températures élevées,
- A l'état liquide pour des pressions plus élevées et/ou des températures plus basses.
- A l'état solide, si la température diminue davantage.

Le diagramme suivant résume l'état de l'eau dans ces diverses conditions de pression et de température.

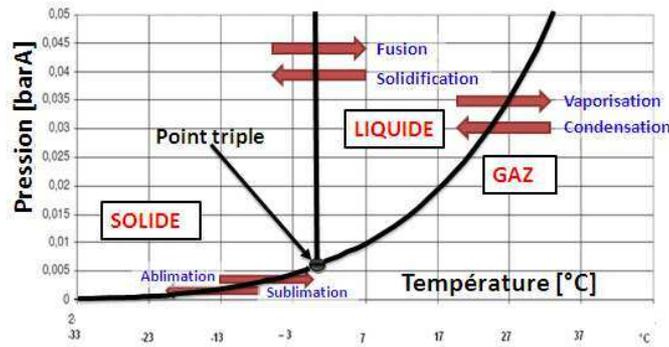


Figure 7 : Diagramme d'état de l'eau

Le diagramme montre que le changement des conditions de température et de pression peut entraîner le changement d'état de l'eau. Selon l'état initial et final de l'eau lors de la transformation, on peut observer :

- Une **condensation** : c'est-à-dire le passage de l'état vapeur vers l'état liquide ou une **vaporisation** si on a l'inverse.
- Une **solidification** : c'est-à-dire le passage de l'état liquide à l'état solide ou une **fusion** si on a l'inverse.
- Une **ablimation** ou le passage direct de l'état vapeur vers l'état solide sans passer par le liquide. Le phénomène inverse est appelé **sublimation**.

Ces divers états monophasiques de l'eau sont séparés par des frontières sur lesquelles les deux phases mises en jeu coexistent (domaines diphasiques). Ainsi, pour les frontières liquide-gaz et solide-gaz, la vapeur d'eau est en équilibre avec la phase liquide ou solide. La pression correspondante est appelée pression de vapeur saturante P_{sat} à la température considérée (Figure 7). On peut aussi distinguer sur le diagramme le point triple de l'eau où les trois phases coexistent simultanément.

Le domaine solide peut être subdivisé en quinze types de glace dont les structures cristallines sont différentes les unes des autres [2]. En ce qui nous concerne, nous nous intéresserons à la glace type I cubique qui est la seule phase solide pouvant exister dans les conditions de température et de pression qui nous intéressent. Les autres types de glace n'apparaissent qu'à des températures extrêmement faibles (-200°C) et/ou à des pressions de l'ordre quelques centaines de MPa.

2.2.1.2 Aspect énergétique

La courbe de refroidissement de la vapeur d'eau à la pression atmosphérique permet de tracer les variations de l'entropie d'une mole d'eau en fonction de son état (figure suivante) :

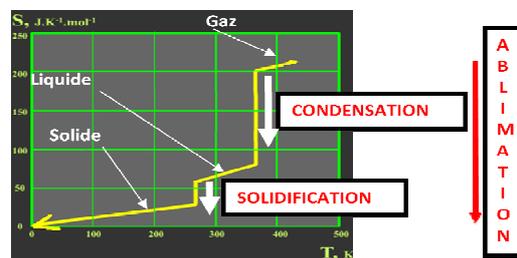


Figure 8 : Diagramme énergétique de l'eau

Les lignes verticales correspondent à la chaleur latente et les lignes obliques représentent la chaleur spécifique.

La figure montre que l'énergie cédée lors du changement d'état de l'eau (chaleur latente) est beaucoup plus importante comparée à la chaleur spécifique contribuant au refroidissement. En outre, on peut aussi constater que l'énergie est cédée, majoritairement, au cours de la phase de

condensation de la vapeur d'eau (~2500 kJ/kg à 0°C) et non pendant la phase de solidification (~335 kJ/kg à 0°C). Cette quantité de chaleur est encore plus importante dans le cas de l'ablation (~2835 kJ/kg à 0°C). Dans tous les cas, les processus sont endothermiques et absorbent de la chaleur du milieu environnant. Rappelons que la condensation et la solidification sont isothermiques. Ils permettent donc de maintenir la température du système, respectivement, à 0°C ou à 100°C, pendant ces deux étapes malgré l'extraction de la chaleur.

2.2.1.3 Diagramme d'état pour un mélange

En présence d'autres éléments condensables, tels que des vapeurs d'hydrocarbure, le diagramme d'état de l'eau est susceptible d'être modifié selon la proportion de l'autre élément condensable. Cette dérive est d'autant plus significative que la fraction d'eau est moins importante dans le mélange.

En particulier, pour un mélange de deux vapeurs données, le point de condensation et de vaporisation ne sont plus identiques pour une même composition du mélange. S'il n'y a pas d'azéotrope, la température de condensation (ou d'évaporation) du mélange se situe entre les températures de condensation des deux éléments purs. Dans certains cas, elle peut aussi être supérieure aux températures de condensation des deux éléments purs (azéotrope négatif), ou inférieure (azéotrope positif) [3].

2.2.2 Diagramme d'état de l'eau : application à l'air humide

2.2.2.1 Présentation du diagramme

Le diagramme d'état de l'eau pure est représenté sur la Figure 7. Pour l'air humide, la phase gaz contient en plus de la vapeur d'eau d'autres gaz tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxygène (O₂) et le diazote (N₂). La pression partielle de l'eau est dans ce cas déduite à partir de sa proportion dans le gaz selon :

$$p_{\text{vap}} = x_{\text{vap}} \cdot P_{\text{Tot}} \quad (2-1)$$

$$\text{avec } P_{\text{T}} \text{ la pression totale soit } P_{\text{T}} = p_{\text{vap}} + \underbrace{p_{\text{N}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{CO}_2}}_{p_{\text{air}}}$$

Ainsi, pour l'air humide on retrouve le même diagramme que celui de la Figure 7 mais la pression totale est remplacée par la pression partielle de l'eau. Cela veut dire que la température de changement de phase à une pression donnée n'est plus unique mais varie avec la quantité de vapeur dans l'air : plus l'air contient de l'eau plus la température de condensation est élevée (mais majorée à 100°C à la pression atmosphérique). Autrement dit plus la température est élevée, plus la quantité maximale d'eau pouvant être contenue dans l'air augmente. Cette quantité maximale est caractérisée par la pression de vapeur saturante à la température considérée.

Reprenons le diagramme d'état de l'eau en plaçant en ordonnée la pression partielle de l'eau (vapeur) (Figure 9) :

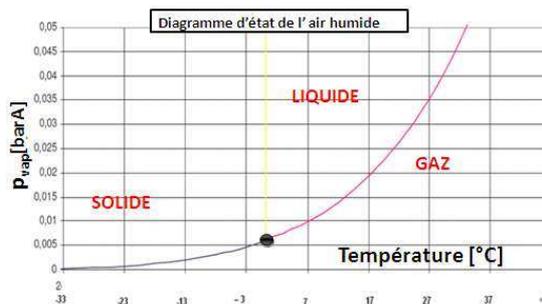


Figure 9 : Diagramme d'état appliqué à l'air humide

Considérons un air humide à la température T contenant de la vapeur d'eau à la pression partielle p_{vap} . Il est possible de déterminer l'état de l'eau en positionnant le couple (p_{vap}, T) sur le diagramme :

- Si le couple (p_{vap}, T) se trouve dans la zone du gaz, la totalité de l'eau est à l'état gazeux, on parle alors d'un air humide surchauffé.
- Si le couple (p_{vap}, T) se trouve dans la zone liquide, il y aura de l'eau à l'état liquide en présence d'air humide saturé.
- Si le couple (p_{vap}, T) se trouve dans la zone solide ($< 0^\circ\text{C}$), il y a ura de la glace en présence et d'air humide saturé.
- Si le point se trouve sur la courbe d'équilibre, on est en présence de vapeur saturée en eau.

Les courbes d'équilibre du diagramme renseignent sur la pression de vapeur saturante de l'eau à une température donnée. Autrement dit, elle correspond à la pression partielle de l'eau dans l'air à la température T si celle-ci est saturée et coexiste avec une phase solide ou une phase liquide d'eau pure.

Le diagramme est beaucoup plus compliqué si en sus de la vapeur d'eau et de l'air, s'ajoute une autre vapeur condensable telles que les vapeurs d'essence ou d'autres hydrocarbures. Dans cette étude, on se limitera au cas de l'air humide pur.

2.2.2.2 Equation des courbes d'équilibre

Pour une température T donnée de gaz, la pression de vapeur saturante P_{sat} [Pa] est donnée par la formule ci-dessous [4]:

$$\ln(P_{sat}) = C/T + C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot \ln(T) \quad (2-2)$$

Les valeurs des constantes varient avec la phase (glace ou eau liquide) en équilibre avec la vapeur saturée dans l'air humide.

2.2.3 Les paramètres caractéristiques de l'air humide

Le diagramme d'état permet de comprendre qualitativement les différentes transformations que peuvent subir l'air humide lors d'un refroidissement. Afin de pouvoir avancer davantage dans l'étude, il est important maintenant de le caractériser de manière quantitative. Pour cela, il existe plusieurs paramètres caractéristiques que l'on doit prendre en compte. Ce sont:

- Le point de rosée (T_d)
- L'humidité relative (HR)
- L'humidité absolue (Y)
- L'enthalpie spécifique (H)

Les différents paramètres caractéristiques de l'air humide sont expliqués dans les références [4],[5] [6].

2.2.3.1 Le point de rosée ou la température de rosée

La température de rosée (T_d) est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation. C'est donc la température à laquelle la pression partielle de vapeur est identique à la pression de vapeur saturante.

A la saturation, on a:

$$p_{vap}(P, T_d) = P_{sat} \quad (2-3)$$

2.2.3.2 L'hygrométrie relative

C'est le rapport entre la pression partielle p_{vap} de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de vapeur saturante à la même température :

$$HR = \left(\frac{P_{vap}}{P_{sat}} \right)_P \quad (2-4)$$

2.2.3.3 L'humidité absolue

C'est la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume V d'air humide rapporté à la masse d'air sec contenu dans le même volume.

$$Y = \frac{m_{vap}}{m_{air \text{ .sec}}} \quad (2-5)$$

2.2.3.4 L'enthalpie

L'enthalpie H de l'air humide se définit comme la quantité totale de chaleur à fournir à 1kg d'air sec et d'eau liquide initialement à la température de 0°C pour le porter à une température T et à une humidité absolue Y. Mathématiquement, c'est la somme de l'enthalpie de l'air sec et l'enthalpie de la vapeur qu'il contient.

$$H = m_{a,s} \cdot \int_0^T Cp_{a,s} \cdot dT + m_{vap} H_{vap} \quad (2-6)$$

On suppose que les enthalpies massiques de l'air sec et de l'eau liquide à 0°C sont nulles (points de référence). La capacité calorifique massique de l'air sec $Cp_{a,s}$ peut être supposée constante dans le domaine de température qui nous intéresse.

$m_{a,s}$ et m_{vap} représente la masse d'air sec et la masse de vapeur.

L'enthalpie massique H_{vap} correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser de l'eau liquide à 0°C afin d'obtenir de la vapeur d'eau à la même température et pour chauffer cette vapeur de 0°C à la température T. On peut écrire:

$$H_{vap} = L_v + Cp_{vap} \cdot T \quad (2-7)$$

Pour faciliter son utilisation, l'enthalpie de l'air humide est ramenée à la quantité d'air sec. On parle alors d'enthalpie spécifique.

L'enthalpie massique spécifique $H_{a,h}$ est donc :

$$H_{a,h} = Cp_{a,s} \cdot T + Y(L_v + Cp_{vap} \cdot T) \quad (2-8)$$

Les constantes Cp et Lv sont calculées à 0°C, on a :

$Cp_{a,s}$ [kJ/kg °C]	Cp_{vap} [kJ/kg °C]	L_v [kJ/kg]
1.006	1.84	2501

2.2.4 Relation entre les paramètres

Ces relations permettent de passer d'un paramètre à un autre plus significatif selon le domaine d'application. Le passage de la pression partielle de l'eau au point de rosée par exemple permet de passer d'une grandeur caractérisant la quantité relative en vapeur d'eau à une grandeur exprimant la tendance à la condensation.

2.2.4.1 Humidité absolue Y et pression partielle de l'eau p_{vap}

L'humidité absolue est liée à la pression partielle selon :

$$Y = \delta \cdot \frac{P_{vap}}{P - p_{vap}} \quad (2-9)$$

δ est égale au rapport des masses molaires M_a/M_{vap}

À la saturation on a :

$$Y = \delta \cdot \frac{P_{sat}}{P - P_{sat}} \quad (2-10)$$

2.2.4.2 Humidité relative HR et point de rosée Td

Pour un air humide à la température T, le rapport entre l'humidité relative et le point de rosée Td est :

$$HR = \frac{P_{sat}(Td)}{P_{sat}(T)} \quad (2-11)$$

2.2.4.3 Point de rosée Td et pression de vapeur saturante P_{sat}

La température de rosée peut être calculée à partir de la pression de vapeur saturante selon :

$$Td = C0 + C1 \cdot \ln(P_{sat}) + C2 \times [\ln(P_{sat})]^2 + C3 \times (P_{sat})^3 + C4 \cdot P_{sat}^{0.1984} \quad (2-12)$$

C0 à C4 sont des constantes empiriques, leurs valeurs sont disponibles dans la référence [5].

2.2.5 La table psychrométrique

2.2.5.1 Objectif

Pour des raisons pratiques, pour une pression constante P (P_{atm} généralement) toutes ces équations peuvent être réunies sur un seul diagramme. Ce qui permet d'obtenir la table psychrométrique. Cette table servira par la suite pour :

- Avoir un aperçu simultané de tous les paramètres sur un même diagramme,
- Définir facilement l'état de l'air humide dans une condition donnée ou pendant sa transformation,
- Mieux définir les phénomènes de transformation de l'air humide,
- Mieux représenter les domaines iso-paramétriques (isenthalpe, iso-point de rosée, etc.).

2.2.5.2 Description du diagramme

La figure ci-dessous représente le diagramme psychrométrique de l'air sous la pression atmosphérique :

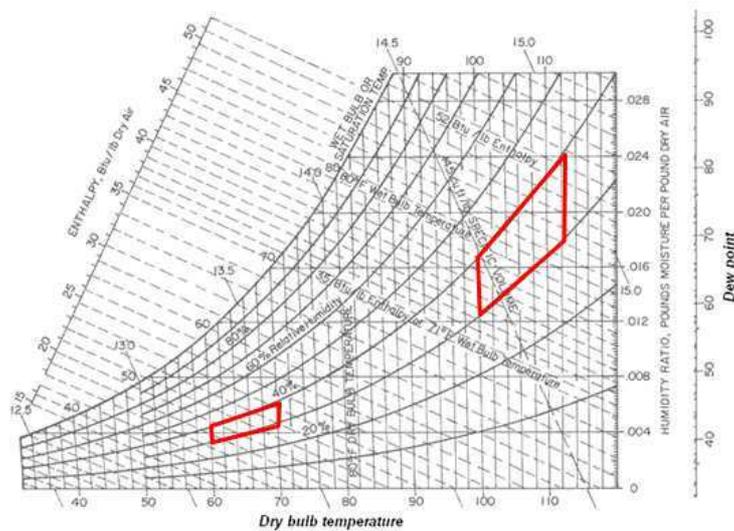


Figure 10 : Diagramme psychrométrique

Sur ce diagramme, on reporte en abscisse la température du gaz et en ordonnée soit l'hygrométrie absolue, soit le point de rosée ou encore la pression partielle.

Chaque courbe à iso-humidité relative est tracée suivant les deux axes. La courbe iso-humidité relative $HR=100\%$ représente la saturation. L'ordonnée correspondant renseigne directement sur la pression de vapeur saturante ou l'hygrométrie absolue Y à la saturation pour une température T .

La partie traversée par les courbes iso-humidité $HR < 100\%$ correspond à un gaz non saturé (partie hachurée) alors que la partie se trouvant au-delà de l'iso-humidité 100% correspond à une zone de condensation ou à une zone de sursaturation.

On peut aussi déterminer l'enthalpie d'un air humide à une température donnée T ayant une humidité absolue donnée Y (ou point de rosée donné) à partir de l'axe d'enthalpie placé en ordonnée. Les isenthalpes sont dans ce cas représentées par les droites obliques tracées dans les deux axes de température et d'hygrométrie absolue.

2.2.5.3 Interprétation des courbes

En comparant la surface des losanges, on peut constater que pour une même quantité de vapeur d'eau (droite horizontale d'iso-humidité absolue ou d'iso-rosée), l'humidité relative change beaucoup plus vite avec la température pour un gaz froid que pour un gaz chaud. Inversement, pour une humidité relative donnée (courbe iso- HR), la quantité totale d'eau (humidité absolue) varie beaucoup plus vite avec la température pour un gaz chaud que pour un gaz froid. En particulier, en considérant un changement de température donné et en prenant $HR=100\%$, on voit que le changement d'hygrométrie absolue d'un gaz saturé chaud est plus important que le changement d'hygrométrie d'un gaz froid saturé.

Glossaire

Notations	Noms	Unités
p	Pression partielle	Pa
P	Pression total	Pa
T	Température absolue	K
T_d	Température de rosée	°C
Y	Humidité absolue	kg/kg
m	Masse	kg
i	enthalpie spécifique	J/kg air
C_p	Chaleur spécifique isobare	J/kg °C
L_v	Chaleur latente du changement d'état vapeur/liquide	J/kg eau
w	Fraction massique	-
$\bar{\delta}$	Rapport M_a/M_{vap}	-
HR	Humidité relative	%
x	Fraction molaire	-

Script

vap	Vapeur
Sat	Saturation
a	air
s	sec
h	humide

2.3 Les émulsions

2.3.1 Définition

2.3.1.1 Émulsion

Par définition, une émulsion est une dispersion de gouttelettes d'un liquide dans une phase continue d'un autre liquide dans lequel il est non miscible.

On parle d'une émulsion d'eau dans l'huile (notée E/H) si la phase continue est la phase organique, et émulsion huile dans l'eau (H/E) si la phase continue est le liquide polaire (eau). Généralement, la taille des gouttelettes formant la phase dispersée est de l'ordre du micron, ce qui leur donne un aspect blanc opaque, typique de la plupart des émulsions.

2.3.1.2 Tensioactif

Les tensioactifs sont des molécules que l'on qualifie d'amphiphiles car elles comportent deux parties de polarité différente, l'une polaire et hydrophile et l'autre apolaire et lipophile. Une des propriétés de ces molécules est de pouvoir se placer facilement aux interfaces (liquide/liquide, liquide/solide, liquide gaz) diminuant ainsi la tension interfaciale entre les deux phases.

2.3.2 Formation des émulsions

La formation d'une émulsion nécessite la présence de deux phases liquides non miscibles. Généralement, c'est le cas si les deux liquides sont de polarité différente. Pour un mélange de phases polaire et apolaire, cette non miscibilité est obtenue compte tenu de la différence des forces de cohésion respectives mises en jeu à l'intérieur de chaque phase : forces de dispersion pour la phase apolaire et cohésions de type liaisons hydrogènes pour la phase aqueuse (polaire). En outre, la formation d'une émulsion requiert l'apport d'une énergie mécanique afin d'obtenir la dispersion de l'une ou des deux phases à partir du liquide initial. Cela peut être apporté sous forme d'agitation mécanique du mélange pendant la préparation de l'émulsion, mais aussi, elle peut être mise en œuvre par la pulvérisation de l'une ou des deux phases liquides initiales avant leur mélange.

Enfin, l'émulsion ainsi formée doit être stabilisée par des agents tensioactifs permettant de ralentir sa destruction (stabilité cinétique).

2.3.3 Classification des émulsions

Selon les paramètres et leur mode de formation, une émulsion peut avoir plusieurs types de morphologie.

2.3.3.1 Émulsion simple H/E et E/H

Les émulsions simples sont caractérisées par une seule phase continue à l'intérieur de laquelle est répartie la phase dispersée. Ce sont des émulsions eau dans l'huile E/H ou huile dans l'eau H/E.

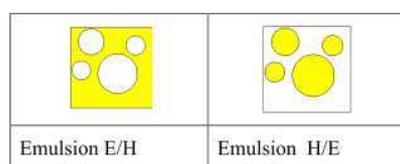


Figure 11 : Émulsion simple (E/H et H/E)

En général, la fraction volumique de la phase continue est plus importante. Dans tous les cas, selon la **règle d'Oswald**, la fraction volumique de la phase dispersée ne peut dépasser 74% [7]. Théoriquement, cela peut être obtenu en supposant qu'une émulsion est un empilement aléatoire de sphères identiques de la phase dispersée dans la phase continue selon un motif hexagonal compact ou cubique compact. D'autre part, selon la **règle de Bancroft**, la phase dans laquelle l'amphiphile est

plus soluble constitue la phase continue de l'émulsion [7]. Ce qui n'est pas toujours applicable pour les émulsions concentrées.

2.3.3.2 Émulsions concentrées

Une émulsion est dite concentrée si la fraction de la phase continue est supérieure à 74%. Cela peut être obtenu si les gouttes ne sont pas sphériques mais ont une structure polyédrique. La fraction en question peut aussi être dépassée dans le cas où les gouttes ne sont pas de même taille mais sont polydispersées de manière à ce que les plus petites gouttes remplissent l'espace entre les grosses gouttes [7] [8].

2.3.3.3 Émulsions multiples

Une émulsion multiple est une émulsion d'émulsions. Une émulsion multiple H/E/H est constituée de gouttelettes d'huile dispersées dans des gouttelettes d'eau plus grosses, elles-mêmes dispersées dans une phase continue huileuse. Inversement, une émulsion multiple E/H/E est constituée par des gouttelettes d'eau dans des gouttelettes d'huile dispersées dans une phase continue aqueuse [8].

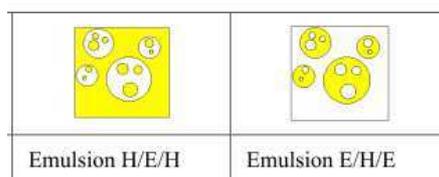


Figure 12 : Émulsions multiples

Les émulsions multiples s'obtiennent généralement par émulsification de l'huile H dans l'eau E avec une phase huile limitée à 30%. Puis cette émulsion {H/E} est émulsifiée dans l'huile. La quantité totale de l'huile peut alors dépasser les 30% alors qu'elle est à l'état dispersé. Un tel scénario semble possible pour les émulsions de blow-by puisque la présence des gouttelettes d'huile favorise une émulsion H/E alors que la quantité totale de cette huile peut dépasser la limite de 30% définie par la règle d'Oswald.

Les émulsions multiples peuvent aussi être obtenues spontanément dans le cas d'une inversion de phase d'une émulsion simple E/H ou H/E.

2.3.4 Les paramètres influant sur les émulsions

Non seulement les émulsions peuvent avoir des propriétés microscopiques différentes selon leur mode de formation mais aussi elles peuvent changer de morphologie selon leur environnement. En ce qui concerne le mode de formation, les variables influençant sont : la formulation, la composition et le procédé de formation.

2.3.4.1 Influence de la formulation (ou HLD)

2.3.4.1.1 Rappel

La formulation représente les conditions dans lesquelles l'émulsion a été formée. Elle comprend divers paramètres dont la température, la pression, la nature du tensioactif et celle de l'huile.

La formulation peut être caractérisée par un nombre sans dimension noté HLD (hydrophilic lipophilic deviation) intégrant simultanément la contribution relative des différents paramètres en jeu. La valeur numérique de la HLD peut être calculée empiriquement en fonction de la température, la composition du tensioactif, la nature de l'huile, la salinité, etc. [9] [10]:

2.3.4.1.2 Influence de la HLD sur la morphologie : La carte HLD

A une concentration de tensioactif constante et un mode de formation donné, il est généralement possible de prévoir la nature d'une émulsion à partir des paramètres de formulation HLD et la fraction en eau. On obtient alors la carte HLD suivante [11] [12]

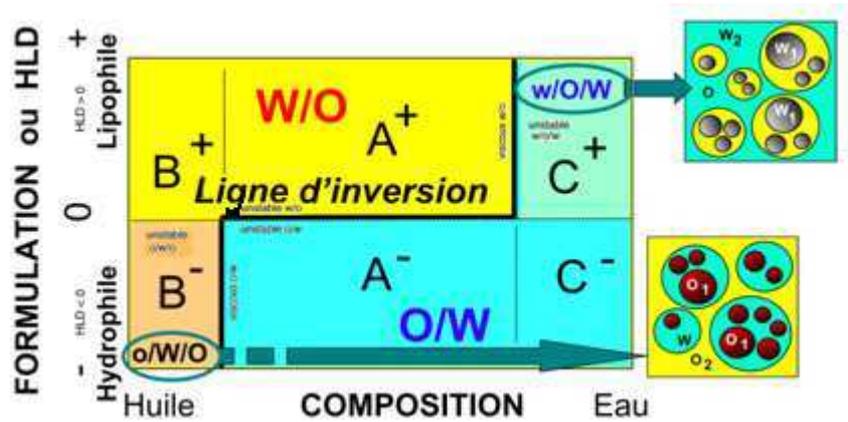


Figure 13 : Carte de formulation des émulsions (HLD)

Selon la proportion en eau, on distingue trois zones différentes :

- Une zone A pour une proportion en eau et en huile relativement comparable. Ce qui donne une émulsion E/H ou H/E selon les paramètres de formulation HLD (en particulier selon la nature du tensioactif). On note A+ ou A- ces deux types d'émulsion selon le signe de la HLD correspondant.
- Une zone B pour une proportion en huile très élevée : comme le prévoit la règle d'Oswald, la phase externe est dans ce cas constituée par l'huile quelque soit le paramètre de formulation. Deux cas peuvent alors être envisagés.
 - Si la règle de Bancroft est vérifiée (tensioactif plus soluble dans la phase continue huileuse) on aura comme prévu une émulsion H/E simple. On est donc dans la zone B+ correspond à une HLD positive.
 - Par contre, si la règle de Bancroft ne peut être satisfaite (c'est-à-dire que l'eau ne peut pas être la phase continue même si le tensioactif y est plus soluble), on obtient une émulsion multiple H/E/H. La phase externe obéit ainsi à la règle d'Oswald tandis que la phase la plus interne obéit à la règle de Bancroft. On est dans la zone B - .
- Une zone C pour une proportion en eau élevée : comme précédemment, la phase externe sera l'eau quelle que soit la formulation. On obtient une émulsion E/H si la règle de Bancroft est vérifiée (zone C -) et une émulsion E/H/E si les deux règles sont contradictoires (zone C+).

La zone où la phase externe est l'eau et celle où la phase externe est l'huile sont séparées par une frontière en forme de marche d'escalier appelée ligne d'inversion de phase standard. La ligne comprend une partie horizontale correspondant à une HLD nulle et deux traits verticaux dont les positions dépendent de plusieurs facteurs dont la concentration en tensioactif, la viscosité, etc.

La ligne d'inversion est extrêmement importante puisqu'elle délimite les régions où l'émulsion obtenue possède une propriété ou une autre.

2.3.4.2 Influence de la température

Pour une concentration donnée de tensioactif, il est possible de représenter les divers états de l'émulsion à différentes températures par les représentations suivantes [12].

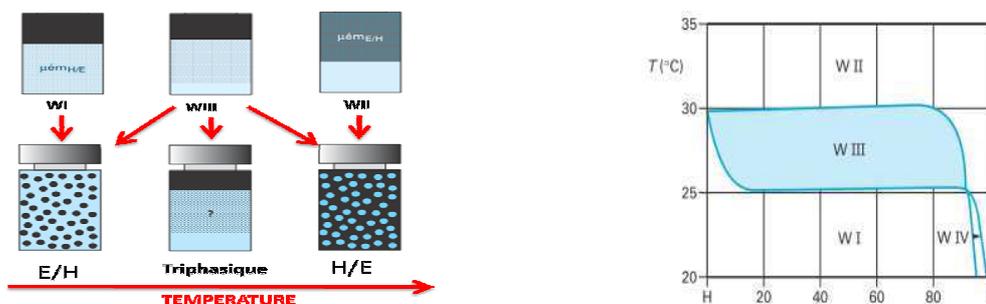


Figure 14 : Influence de la température sur les émulsions (Cas d'un mélange 50% Eau/ Tétradécane en présence d'un tensioactif neutre, le C12E5)

A faible température, les tensioactifs sont plus solubles dans l'eau que dans l'huile. Du point de vue microscopique, cela correspond à des gouttes d'huile dispersées dans une phase aqueuse riche en tensioactifs (WI sur la Figure 14). Du point de vue macroscopique, elle correspond à une émulsion E/H.

A température moyenne, le tensioactif est soluble aussi bien dans la l'eau que dans l'huile. Trois cas sont possibles :

- Dans le premier cas, on obtient une phase supérieure riche en eau, une phase inférieure riche en huile et une phase intermédiaire riche en tensioactif et contenant une quantité similaire d'eau et d'huile.
- Dans le deuxième cas, on obtient une phase unique d'émulsion H/E.
- Enfin on peut obtenir une émulsion unique E/H.

Dans les trois cas, du point de vue microscopique, chaque phase peut être considérée comme un mélange composé de gouttes riches en huile (resp. riche en eau), d'une phase continue riche en eau (resp. riche en huile), et d'une interface riche en tensioactif (WIII sur la Figure 14).

A température élevée, le tensioactif est plus soluble dans l'huile. Du point de vue microscopique, on a des gouttes d'eau en suspension dans une phase continue d'huile riche en tensioactif (WII sur la Figure 14). Du point de vue macroscopique, cela correspond à une émulsion H/E.

2.3.4.3 Influence du tensioactif

Les figures précédentes ont été établies pour une faible concentration en tensioactif. Avec une concentration plus élevée, on observe successivement l'apparition d'une phase unique de microémulsion (notée WIV sur la Figure 15) correspondant à la dissolution des phases en excès dans une microémulsion H/E ou E/H.

Pour des concentrations en tensioactif encore plus élevées, on observe l'apparition de cristaux liquides suite à l'association des tensioactifs entre eux [12].

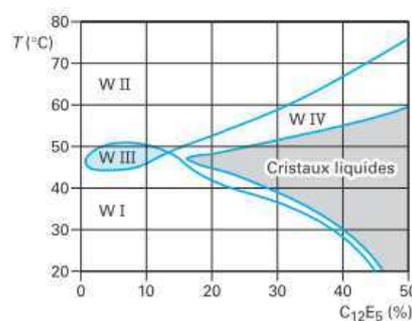


Figure 15 : Influence de la concentration en tensioactif sur les émulsions

Ainsi par exemple, pour une concentration en tensioactif de 16,6%, le diagramme de phase de la Figure 14 est modifié. La phase intermédiaire WIII de cette figure est remplacée par une phase diphasique de cristaux liquides ou d'une émulsion homogène WIV.

2.3.5 Stabilité des émulsions

2.3.5.1 Aspect énergétique

2.3.5.1.1 Interface Eau/Huile

Les phases huiles et aqueuse sont les sièges de force de liaison permettant de maintenir la cohésion des molécules respectives à l'intérieur de chaque phase. Ainsi, comme les deux phases ne peuvent pas établir de liaisons entre elles, étendre l'aire de l'interface E/H correspondrait à la perte de ces cohésions et nécessiterait un apport d'énergie externe. L'accroissement de la surface s'accompagne dans ce cas de l'accroissement de l'énergie libre totale.

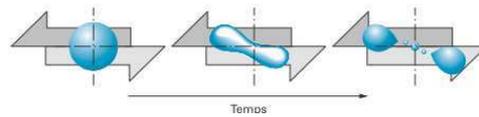


Figure 16 : Accroissement d'une interface

Ainsi, on peut caractériser l'interface H/E par son enthalpie libre F_s , qui est l'énergie nécessaire lors de la variation de l'aire A de l'interface entre les deux phases d'une quantité ΔA [7] [13]:

$$\Delta G^{\text{form}} = \gamma_{\text{int}} \cdot \Delta A \quad (2-13)$$

γ_{int} représente la tension interfaciale. Elle exprime la force tangentielle qui tend à minimiser l'aire interfaciale A .

En considérant ces aspects énergétiques, on peut dire qu'une dispersion d'eau dans l'huile ou d'huile dans l'eau est thermodynamiquement instable. Les gouttelettes d'une émulsion ont donc tendance à coalescer rapidement pour conduire à un état thermodynamique plus stable dans lequel les deux phases sont séparées par une surface minimale : formation de deux couches bien distinctes.

2.3.5.1.2 Interface Eau/Huile en présence de tensioactif

Bien qu'elle soit thermodynamiquement instable, une émulsion peut présenter une pseudo-stabilité en présence de composés tensioactifs. En effet, le tensioactif par nature va se placer entre les deux phases. Ainsi, les gouttes formées sont protégées de la coalescence par un film interfacial de tensioactif. Ce dernier comporte une partie hydrophile et une partie lipophile et s'adsorbe à l'interface de manière à diminuer la tension interfaciale entre les deux phases et à augmenter la stabilité de l'interface [12].

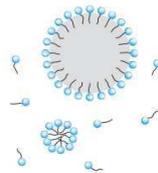


Figure 17 : Stabilisation d'une goutte d'huile dans une phase continue d'eau en présence de tensioactif

En solution diluée, on montre que de la tension interfaciale γ_{int} entre la phase huile et la phase eau diminue en fonction de la concentration en tensioactif dans la phase dans laquelle il est solubilisé [13][14] (figure suivante) :

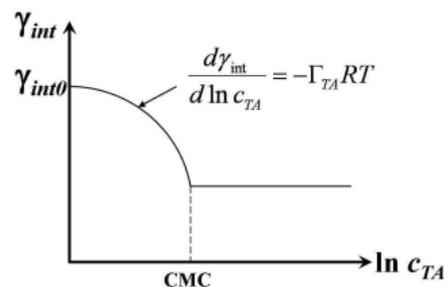


Figure 18 : Variation de la tension interfaciale en présence de tensioactif

Γ_{TA} est l'excès de la quantité de tensioactif par unité d'aire de l'élément (Caractéristiques des tensioactifs)

C_{TA} est la concentration en tensioactifs dans la phase dans laquelle il est solubilisé

R est la constante des gaz parfaits.

2.3.5.2 Processus de déstabilisation des émulsions

Comme il a été dit précédemment, une émulsion est un système métastable. Elle évolue avec le temps et subit des processus de déstabilisation plus ou moins importants. On distingue la coalescence, le murissement d'Ostwald, la floculation et la sédimentation.

2.3.5.2.1 La coalescence

La coalescence est la formation d'une grosse goutte par rapprochement et fusion de gouttelettes due à l'instabilité des interfaces [7]. Elle est irréversible et implique la rupture des films séparant les gouttes [13]. A termes, la coalescence aboutit à la formation de deux phases.



Figure 19 : Coalescence

La coalescence se fait en trois étapes [13]:

- L'entrée en contact des surfaces couvertes de tensioactifs des deux gouttes, accompagnée du drainage du liquide qui les sépare,
- La formation d'un canal entre les deux gouttes,
- L'accroissement du diamètre du canal aboutissant à la fusion des deux gouttes en une nouvelle goutte plus grande.

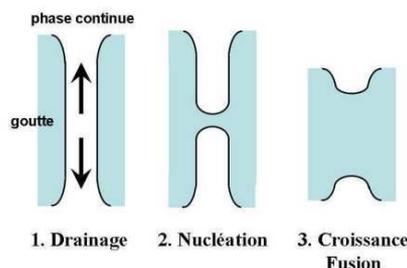


Figure 20 : Mécanisme de coalescence

La cinétique de la coalescence est liée à ces trois étapes et dépend essentiellement de l'interaction entre les gouttes.

La stabilité cinétique peut être interprétée du point de vue énergétique par l'existence d'une barrière énergétique d'ordre électrique ou stérique s'opposant à la coalescence des gouttelettes. Ainsi sa cinétique dépend en grande partie de la protection colloïdale des gouttelettes c'est-à-dire les propriétés de la surface mise en jeu [7]. Pour la dispersion d'huile dans l'eau en présence de tensioactif ionique, les gouttes sont chargées électriquement grâce au tensioactif qui s'adsorbe à la surface. Elles se repoussent donc mutuellement d'où la stabilité.

Notons que la dilution d'une émulsion favorise la coalescence. Les tensioactifs adsorbés à la surface étant en équilibre avec la phase continue, la dilution de l'émulsion déplace l'équilibre d'adsorption vers la diminution de la quantité de tensioactifs adsorbés ce qui affaiblit les films protecteurs. Ce phénomène mérite notre attention sachant que l'émulsion de blow-by est en permanence diluée par l'eau de condensation fraîchement formée dans les conduites.

2.3.5.2.2 Le murissement d'Ostwald

Afin d'expliquer le murissement d'Ostwald, il est important de rappeler l'existence de la surpression de Laplace à l'intérieur des gouttes dispersées.

La pression de Laplace

L'existence d'une tension interfaciale γ_{int} entre les deux phases non miscibles implique que la pression à l'intérieur des gouttes soit supérieure à la pression extérieure. Cette surpression est déduite de la tension superficielle et du rayon de la goutte selon la loi de Laplace:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (2-14)$$

Plus le rayon est faible, plus la pression à l'intérieur de la goutte est élevée.

Le murissement d'Ostwald

Le murissement d'Ostwald est la conséquence de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur des gouttes. La pression dans les grosses gouttes est plus faible que celle dans une petite goutte, la matière dans les petites gouttes se diffuse donc à travers la phase continue vers les grosses gouttes [8] [7]. On observe une diminution de la taille des petites gouttes jusqu'à leur disparition complète et par la même occasion l'augmentation de la taille des grosses gouttes.

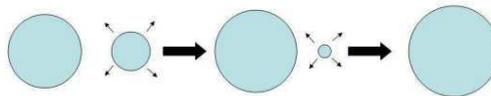


Figure 21 : Murissement d'Ostwald

Grâce au murissement d'Ostwald, la granulométrie de l'émulsion évolue avec le temps et le diamètre moyen des gouttes croît [13]. Le phénomène s'auto-ralentit et devient très lent au-delà d'un diamètre moyen de goutte supérieur à 1 μm .

2.3.5.2.3 La floculation

La floculation [7][8][13] correspond au regroupement des gouttelettes indépendantes pour former des grappes. Un rapprochement des gouttes est favorisé par l'agitation thermique et si une interaction attractive suffisante existe entre les gouttes ainsi mises en contact, les gouttes restent associées sous forme d'agrégats.

Du point de vue énergétique, pour deux gouttelettes identiques de rayon R, séparées entre elles d'une distance d, le potentiel du système est donné par la figure suivante:

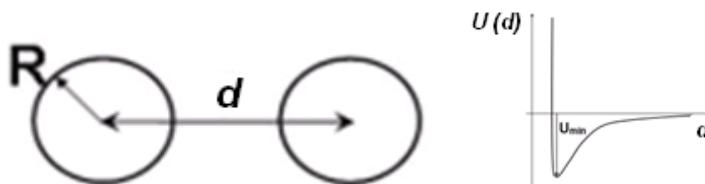


Figure 22 : Aspect énergétique de la floculation

Ceci montre que le système présente un puits de potentiel U_{min} pour lequel la distance d entraîne une énergie minimale. Elle correspond à la configuration optimale du système. Trois cas peuvent alors se présenter :

- Si le mouvement brownien est assez énergétique pour sortir le système du puits de potentiel, c'est-à-dire si $U_{min} \ll kT$, la distance d augmente et il n'y aura pas d'agrégation.
- Si le mouvement brownien est juste suffisant pour écarter la position des gouttes de l'état d'équilibre, c'est-à-dire si $U_{min} \sim kT$, il y a un équilibre permanent entre les gouttes libres et les gouttes restant à l'état agrégé.

- Si le mouvement brownien est trop faible par rapport à U_{\min} , c'est-à-dire si $U_{\min} \gg kT$, les gouttes s'agrègent dans tout le volume et ne peuvent être re-dispersées par l'énergie thermique seule.

En outre, du point de vue cinétique, le rapprochement entre les deux gouttes peut être ralenti par une barrière de potentiel E_b (due aux répulsions électrostatiques, par exemple) empêchant les deux gouttes de se rapprocher à la distance d'équilibre correspondant à U_{\min} . Selon la valeur de cette barrière énergétique on observe trois cas:

- Si $E_b \gg kT$, le mouvement brownien n'est pas suffisant pour rapprocher les deux gouttes au-delà de la barrière énergétique. Il n'y aura donc pas d'agrégation.
- Si $E_b \sim kT$, l'agrégation est lente.
- Si $E_b \ll kT$, la barrière énergétique est franchie par le mouvement brownien et l'agrégation est rapide.

En présence de tensioactifs ou d'autres solutés dans le milieu, la valeur de E_b peut être modifiée. Ainsi, à faible concentration en tensioactif, les gouttes restent à l'état libre (E_b élevé) alors qu'elles auront tendance à former rapidement des agrégats pour une concentration élevée en tensioactif.

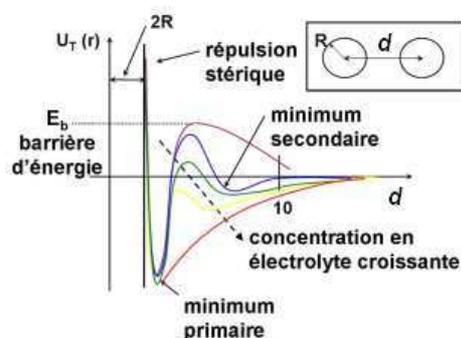


Figure 23 : Aspect énergétique de la floculation en présence de tensioactif

2.3.5.2.4 Le crémage et la sédimentation

Le crémage et la sédimentation sont les résultats de la différence de densité entre la phase huileuse et la phase aqueuse. Sous l'effet de la pesanteur, si les gouttes sont moins denses que la phase continue, elles ont tendance à migrer vers le haut et s'accumuler dans la partie supérieure. On parle alors de crémage. Dans le cas contraire, si les gouttes sont plus denses que la phase continue, les gouttes descendront vers le bas pour former des culots de sédimentation. C'est le phénomène de sédimentation.

La sédimentation et le crémage entraînent une répartition inégale des gouttes suivant la hauteur et se traduisent par un éclaircissement respectivement de la partie inférieure ou de la partie supérieure. Le crémage (resp. la sédimentation) aboutit à l'apparition d'une couche d'émulsion supérieure (resp. inférieure) riche en gouttelettes et d'une couche d'émulsion inférieure (resp. supérieure) pauvre en gouttelettes.

Analytiquement, la vitesse de migration des gouttes est régie par la loi de Stokes [7] :

$$v = \frac{2 \Delta\rho \cdot g \cdot r^2}{9 \mu_c} \quad (2-15)$$

$\Delta\rho$ représente la différence de densité des deux phases

g est l'accélération de la pesanteur

μ_c est la viscosité de la phase continue

r est le rayon de la goutte

Ce qui montre que la vitesse de sédimentation ou de crémage est d'autant plus élevée que la différence de densité est élevée et la taille des gouttes est forte.

2.3.5.3 L'inversion de phase

Par définition, l'inversion de phase correspond au passage d'une émulsion E/H vers une émulsion H/E ou le contraire. Comme le montre le diagramme de formulation de la Figure 13, une inversion de phase peut se produire lorsque les paramètres de formulation d'une émulsion sont modifiés (changement de la température ou modification de la composition).

La compréhension du phénomène d'inversion de phase est importante pour nous vu que, non seulement l'émulsion de blow-by peut subir un refroidissement ou un réchauffement en fonction des conditions de fonctionnement du moteur, mais aussi, la composition en eau ou en huile d'une émulsion de blow-by peut évoluer dans le temps.

2.3.5.3.1 Inversion de phase due à la température

Pour une composition donnée, une émulsion E/H peut se transformer en émulsion H/E au-dessous d'une certaine température appelée **Température d'inversion de phase (PIT)**. De même une émulsion H/E peut devenir une émulsion E/H en augmentant la température au-delà de PIT [10][12].

Sur la carte HLD, la PIT correspond à une HLD=0. La PIT est indépendante de la concentration en tensioactif, mais varie avec la nature de celle-ci. Rappelons toutefois qu'à partir d'une certaine concentration en tensioactif, tout le domaine devient monophasique quelle que soit la température.

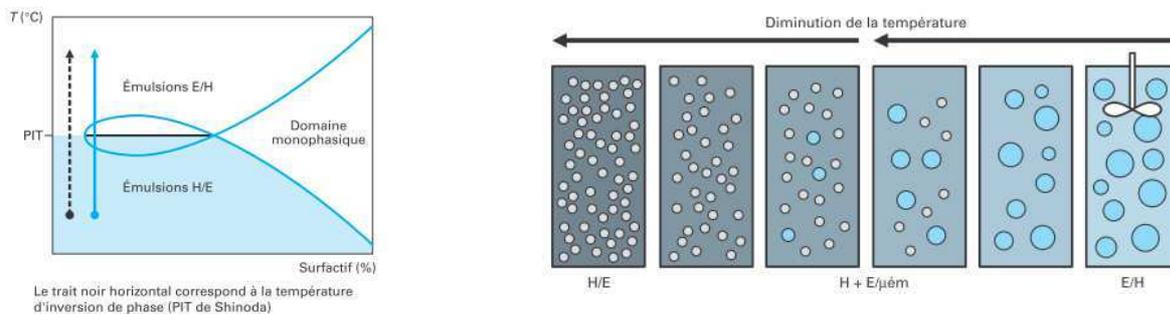


Figure 24 : Inversion de phase avec la température

L'inversion de phase avec la température, est un phénomène réversible. Comme il a été montré dans le paragraphe précédent, c'est une conséquence directe du changement de la solubilité relative des tensioactifs dans chacun des milieux en fonction de la température.

2.3.5.3.2 Inversion de phase due au changement de composition

Comme prévu par le diagramme de formulation, une variation de la teneur en eau peut aussi entraîner une inversion de phase. Toutefois, la ligne d'inversion ne coïncide généralement pas avec la ligne d'inversion standard du diagramme de formulation. Elle présente des retards ou hystérèses selon le sens de déplacement du paramètre. On parle alors d'une inversion dynamique.

On distingue deux processus d'inversion de phase. Le premier provient de l'ajout de phase interne à une émulsion normale (H/E ou E/H de la zone A) conduisant d'abord à la formation d'une émulsion de plus en plus concentrée (les gouttes deviennent polyédriques) jusqu'à une limite où les phases s'inversent. Le deuxième processus correspond à l'ajout de phase interne à une émulsion de type anormale (zone B- ou C+ du diagramme de la Figure 13) et qui conduit à un changement de phase dès que le contact entre les gouttes est possible.

En outre, selon la vitesse d'ajout de la phase interne, on peut s'attendre à une inversion de phase directe ou une inversion de phase passant par une émulsion multiple. Pour une addition lente, l'inversion de phase passe par une émulsion multiple résultant de l'inclusion sous forme de gouttelettes de la phase continue dans la phase ajoutée. [11]

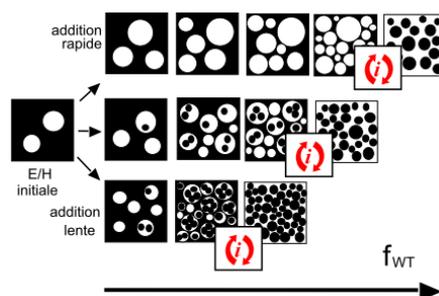


Figure 25 : Inversion de phase par changement de la proportion en eau (ou en huile)

Enfin, notons que si la phase ajoutée est la phase continue, on n'observe aucun changement de phase mais seulement une dilution de l'émulsion.

2.3.5.4 Stabilité d'une émulsion en fonction de la formulation : Carte de propriété.

La morphologie constitue un paramètre caractéristique important d'une émulsion. En effet, selon la nature de la phase continue ou de la phase dispersée, la propriété d'une émulsion peut changer de manière significative.

On peut donc établir une carte de propriété en associant les divers domaines de la carte HLD de la Figure 13 avec les propriétés communes des émulsions qui leur correspondent [12]

- En ce qui concerne la stabilité, la zone A- et A+ de la Figure 13 donne des émulsions H/E ou E/H relativement stable. Au voisinage de $HLD=0$, c'est-à-dire sur la ligne horizontale d'inversion de phase, on a une diminution assez importante de la stabilité et l'émulsion se sépare assez vite.
- Pour la viscosité, les domaines A- et A+ (Figure 13) correspondent à une émulsion assez visqueuse alors qu'au niveau de la ligne d'inversion de phase, la viscosité est très faible et passe par un minimum.

2.3.6 Solidification des émulsions

La solidification d'une émulsion correspond au passage de l'état liquide à l'état solide d'un ou de tous ses constituants. En ce qui nous concerne cela correspond surtout à la solidification de l'eau sachant que la température de cristallisation des lubrifiants est bien en-dessous de la température minimale que nous allons considérer au cours de cette étude.

2.3.6.1 Rappel : température de cristallisation pour un milieu infini

Pour faciliter la compréhension des phénomènes de solidification des émulsions, considérons en premier lieu la solidification de l'eau à l'état pur.

2.3.6.1.1 Cas d'un milieu homogène

Considérons un volume d'eau de taille infinie. La solidification de ce volume débute par l'apparition de germes de cristallisation dans le volume suivi par la croissance de ces germes jusqu'à la solidification totale du reste du liquide. Bien que la solidification à proprement dite soit exothermique, la formation des premiers germes nanométriques ne se fait que par un apport d'énergie au système. Théoriquement, l'énergie ΔG nécessaire pour former un germe de taille r est donnée par la somme de l'énergie pour la formation de la surface du germe (I) et l'énergie nécessaire pour le regroupement des molécules d'eau (II) [15].

$$\Delta G = I + II = 4.\Pi.r^2.\gamma + \Pi.r^3.E_v$$

r : Taille du germe
 Ev : Energie libérée pour regrouper les molécules
 γ : Tension interfaciale

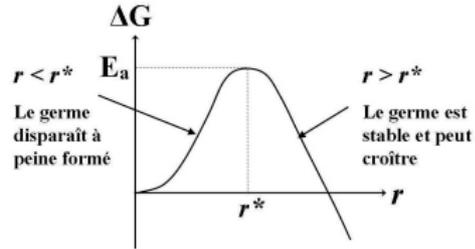


Figure 26 : Energie de formation d'un cristal de taille r

Comme le montre la figure, l'énergie ΔG présente un maximum local correspondant à une valeur de $r = r^*$. r^* est le rayon critique pour une condition de température donnée. Si la taille r du germe qui se forme est inférieure à r^* , le germe a tendance à se détruire pour atteindre un niveau d'énergie inférieur. Si $r > r^*$, le germe évolue pour atteindre une taille infinie correspondant à la solidification totale de tout le liquide.

On montre que l'énergie ΔG correspondant à la formation d'un germe de taille r^* peut être liée à la température selon [15]:

$$\Delta G_{crit} = \frac{16.\Pi.\gamma^3.V_s^2}{3L_f^2 \ln^2 \frac{T_f}{T}} \quad (2-16)$$

Lf est la chaleur latente de fusion
 Vs représente le volume molaire d'un germe solide

C'est-à-dire que, plus la température T du milieu est faible par rapport à la température de fusion Tf, plus l'énergie ΔG_{crit} nécessaire pour obtenir un germe ayant la taille critique est faible. La cristallisation est donc facilitée.

Inversement, en présence d'une source d'énergie importante (vibration dans le moteur par exemple), le début de cristallisation de l'eau pure dans un milieu infini, peut être très proche de la température de fusion 0°C. Par contre, en absence de source d'énergie cette valeur peut être beaucoup plus basse. On parle dans ce cas de phénomène de surfusion.

2.3.6.1.2 Cas d'un milieu hétérogène

Dans la pratique, la nucléation se fait essentiellement à partir des impuretés présentes dans les liquides ou à partir de surfaces solides. En fonction de la taille des particules d'impureté ou de l'aspect des surfaces, l'énergie réelle nécessaire à la germination peut diminuer [12].

$$\Delta G'_{crit} = \Phi \Delta G_{crit} \quad (2-17)$$

Le facteur Φ est inférieur ou égal à 1. On démontre que Φ peut s'exprimer en fonction de l'angle de mouillage θ du solide cristallin dans le système solide (surface du solide étranger) / liquide selon l'équation suivante [12]

$$\phi = \frac{(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2}{4} \quad (2-18)$$

L'angle de mouillage θ varie en fonction des tensions interfaciales $\gamma_{int}(Cl)$, $\gamma_{int}(Cs)$ et $\gamma_{int}(Sl)$ selon le diagramme énergétique suivant :

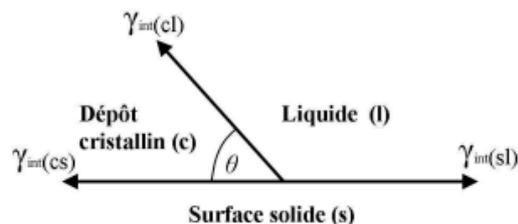


Figure 27 : Détermination de l'angle de mouillage du cristal en fonction des tensions interfaciales

Si le matériau étranger (solide S) présente une affinité partielle avec les cristaux de glace (dépôt cristallin c), Φ est inférieur à 1, on observe donc l'accélération de la nucléation et l'abaissement de la température de début de cristallisation. Dans ce cas la cristallisation se fait de manière hétérogène et elle se développe à partir de l'élément étranger.

2.3.6.2 Température de cristallisation : application aux émulsions

Concernant les émulsions, il existe deux types de cristallisation selon que l'émulsion est de type H/E ou E/H.

2.3.6.2.1 Température de cristallisation d'une émulsion H/E

Si l'eau est la phase continue, la cristallisation est comparable à la cristallisation d'une phase liquide infinie. On peut donc appliquer les théories précédentes et la solidification totale du mélange est initiée par l'apparition d'un seul germe stable dans le volume entier.

La température de solidification est dans ce cas donnée par la température de germination qui peut être plus ou moins proche de 0°C selon le volume de l'échantillon :

- Pour une température donnée, plus le volume d'échantillon est faible, plus la probabilité d'obtenir un germe de taille supérieure à la taille critique est faible, d'où la diminution de la température de cristallisation.
- Par contre, si le volume est élevé, la probabilité d'obtenir un germe dépassant la taille critique est élevée.

Ainsi, pour une gouttelette d'eau isolée par exemple, la température de cristallisation peut descendre jusqu'à -45°C alors qu'elle peut être très proche de la température de fusion pour un volume d'échantillon plus important.

2.3.6.2.2 Température de cristallisation émulsion E/H

Si l'eau est la phase dispersée, on peut considérer la solidification comme la cristallisation simultanée des différentes gouttes dispersées. Chaque goutte étant considérée comme plusieurs milieux homogènes isolés, caractérisés par leurs volumes respectifs. La taille d'une goutte d'eau étant nettement inférieure par rapport à une phase continue d'eau, la température de cristallisation d'une émulsion E/H est beaucoup plus faible que celle de l'eau pure.

On montre que [15], pour un échantillon refroidi de manière continue, la fréquence de solidification (dN/N_0) atteint une valeur maximale à partir d'une certaine température avant de redescendre jusqu'à zéro (à cause de la diminution du nombre de gouttes liquides restant disponibles à la cristallisation).

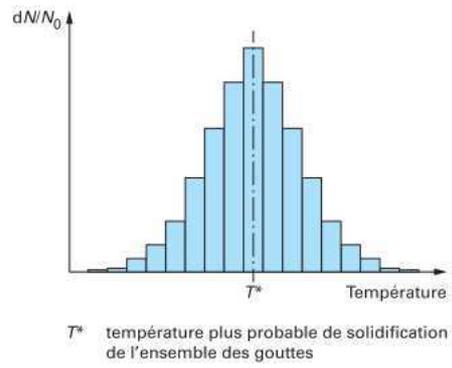


Figure 28 : Température probable de solidification pour les émulsions

On parle alors de la température probable de solidification de l'ensemble des gouttes. Elle est à la fois fonction de la taille des gouttes et de la vitesse de refroidissement de l'échantillon.

Glossaire

Notation	Noms	Unités
A	Surface créée	m ²
d	Distance entre deux gouttes	m
D	Diamètre d'une goutte dispersée	m
E/H	Émulsion Huile/Eau (noté aussi W/O)	-
E _b	Barrière de potentiel ou Energie d'activation	J/mol
E _v	Energie libérée pour regrouper les molécules dans la formation d'un germe cristallin	N/m ²
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
H/E	Émulsion Eau dans l'huile (noté aussi O/W)	-
HLD	Hydrophilic Lipophilic Deviation	-
J	Vitesse de nucléation (nombre de germes par unité de volume et par unité de temps)	s ⁻¹ m ⁻³
k	Constante caractéristique de l'agitation thermique	-
L _f	Chaleur latente de fusion	J/mol
n	Nombre d'éléments	-
N _t	Nombre de gouttes (cristallisées à l'instant t)	-
PIT	Température d'inversion de phase	°C
R	Rayon d'une goutte dispersée	m
r	Rayon d'un germe	m
R	Constante des gaz parfait	J/(mol*K):
t	Temps	s
T	Température	°C
T _f	Température de fusion	°C
U	Energie du système défini dans la Figure 22	J/mol
v	Vitesse de migration des gouttes	m ²
V	Volume	m ³
V _s	Volume molaire d'un germe solide	m ³ /mol
WI , WII, WIII, WIV	Émulsion Winsor I, II, III, IV	
α	Constante	-
γ	Tension interfaciale Huile/Eau	N/m
γ _{int} (cl)	Tension interfaciale germe cristallin/liquide	N/m
γ _{int} (cs)	Tension interfaciale germe cristallin /solide étranger	N/m
γ _{int} (sl)	Tension interfaciale solide étranger /liquide	N/m
Γ _i	l'excès de la quantité de tensioactif par unité d'air de l'élément i	mol/m ²
ΔG	Enthalpie de formation d'un germe cristallin	N.m
ΔG ^{form}	Energie libre de formation d'une interface	J/m ³
ΔP	Suppression de Laplace	Pa
Δρ	Différence de masses volumiques des phases	kg/m ³
θ	Angle de contact	rad
μ	Viscosité dynamique	Pa-s
μ _i	Potentiel chimique	J/mol
ρ	Densité	kg/m ³
Φ	Facteur de réduction pour le calcul de l'énergie d'activation	-
T*	Température probable de solidification	[°C]

Script

c	Continu
crit	Critique
i	Elément i
TA	Tensioactif
α	Phase eau
β	Phase huile

2.4 La condensation de l'air humide

2.4.1 Définitions

2.4.1.1 La condensation de la vapeur pure

Par définition, la condensation est l'extraction de la chaleur dans un système de manière à ce qu'une vapeur se transforme en liquide. Pour la vapeur d'eau, elle se produit lorsque la vapeur est exposée à une température inférieure à la température de vaporisation de l'eau qui est de 100°C à la pression atmosphérique.

2.4.1.2 La condensation de l'air humide [16] [17]

La condensation de l'air humide se produit si le gaz est exposé à une température inférieure à sa température de rosée. On observe alors le passage d'une partie de l'eau contenue dans l'air humide de l'état vapeur vers l'état liquide tout en laissant derrière lui un air de plus en plus sec.

Rappelons que, pour une pression quelconque, la température de rosée varie avec l'humidité ou la pression partielle de l'eau. Pour l'air humide, la température de rosée est beaucoup plus faible que la température de condensation de la vapeur d'eau pure. (Voir Figure 9).

2.4.2 Aspect thermodynamique

La condensation commence par la formation de particules liquides microscopiques appelées nucléus à partir de la vapeur. Du point de vue thermodynamique, la formation d'un nucléus de taille R nécessite une énergie ΔG tel que [18] [19] :

$$\Delta G = \left[-\frac{4\pi R^3 k T_w}{3\Omega_s} \ln\left(\frac{p_w}{p_\infty}\right) + 4\pi R^2 \sigma_{vap,w} \right] \quad (2-19)$$

- R : Rayon d'une goutte de nucléus
- k : Constante de Boltzmann
- T_w : Température du support
- p_w : Pression partielle de vapeur
- p_∞ : Pression partielle de vapeur évalué à la température du support
- Ω_s : Volume d'une molécule
- σ : Tension interfaciale liquide/paroi

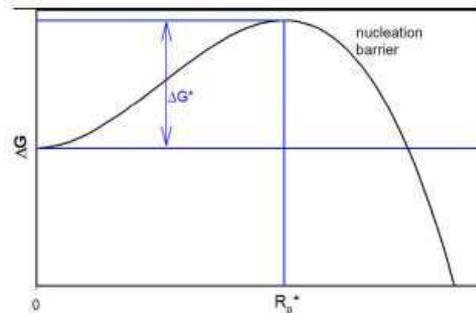


Figure 29 : $\Delta G = f(R)$

Le premier terme de l'équation (2-22) représente l'énergie nécessaire pour passer un amas de particules de taille R de l'état vapeur à l'état liquide tandis que le deuxième terme représente la barrière énergétique à franchir pour former l'interface liquide/vapeur. Comme le montre la Figure 29, le diagramme énergétique du système passe par une valeur maximale ΔG^* qui est une barrière énergétique à franchir pour qu'un nucléus puisse croître au-delà du rayon critique R^* . Comme dans le cas de la cristallisation de l'eau, le rayon critique R^* est le rayon minimum nécessaire pour que le germe de condensation soit stable.

Cinétiquement, le taux de nucléation peut être lié à l'énergie d'activation ΔG^* selon la relation suivante :

$$\frac{dn}{dt} \approx e^{-\frac{\Delta G^*}{k.T}} \quad (2-20)$$

En calculant l'énergie d'activation ΔG^* , on démontre que le taux de nucléation peut être lié à la pression partielle de vapeur selon [20]:

$$\frac{dn}{dt} \approx \exp \left(- \frac{16 \Pi}{3 (kT)^3} \frac{\sigma^3 \Omega_s^2}{\log^2 \frac{p_\infty}{p_w}} \cdot F(\theta) \right) \quad (2-21)$$

Ce qui montre que, pour l'air humide, le taux de nucléation varie avec le rapport p_∞ / p_w , plus précisément le degré de sursaturation. Notons qu'il en est de même pour la vapeur pure telle qu'il a été détaillé dans la référence [21]. Le facteur $F(\theta)$ varie avec la mouillabilité de la surface de condensation. Plus l'angle de contact est faible (mouillabilité élevée), plus $F(\theta)$ est élevé, et le taux de nucléation est important. Si l'angle de contact est élevé (paroi hydrophobe), le taux de nucléation est à sa valeur minimale. Notons qu'à partir du moment où l'eau à l'état liquide est présente sur la surface de condensation, la sursaturation requise diminue de manière importante. En effet, la condensation au-dessus d'un film d'eau est facilitée et devient possible dès que la saturation est atteinte ($p_w = p_{sat}$). Rappelons aussi que la présence de givre solide sur les surfaces peut changer complètement le rôle de l'angle de contact sur la nucléation, comme expérimentalement observé par Kripa et al [22] qui ont travaillé sur des parois superhydrophobes.

2.4.3 Les différents type de condensation

Selon leur mécanisme de formation, on peut différencier la condensation hétérogène de la condensation homogène.

2.4.3.1 La condensation hétérogène

La condensation hétérogène est observée si le gaz humide entre en contact avec une surface froide (liquide ou solide) dont la température est inférieure à la température de rosée. Ce type de condensation mérite notre attention vu que le phénomène de glace et de d'émulsion de blow-by concerne essentiellement le changement d'état de l'eau à cause des parois froides des tuyaux de blow-by.

La condensation hétérogène peut être classée en deux groupes : la condensation en film et la condensation en gouttes.

La condensation en film est observée si l'eau liquide mouille complètement la surface de condensation (angle de contact faible ou surface hydrophile). Elle est favorisée en présence de contrainte ou force extérieure qui tend à étaler les condensats : force de gravité, cisaillement apportée par un gaz en mouvement. La condensation en film conduit à l'obtention d'une couche de condensat répartie de manière continue sur la paroi de condensation.

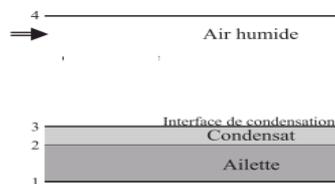


Figure 30 : Condensation en film

La condensation en gouttes est observée pour les surfaces de condensation hydrophobes (angle de contact élevé). Les condensats sont dans ce cas sous forme de gouttelettes allant de quelques microns à des gouttes visibles à l'œil nu. Typiquement ils peuvent couvrir plus de 90% de la surface de condensation et sont repartis de manière discrète sur toute la paroi [17].

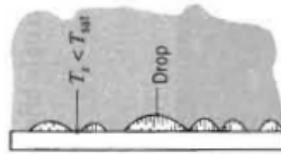


Figure 31 : Condensation en gouttes

2.4.3.2 La condensation homogène

La condensation homogène se produit si le gaz est refroidi au-delà de sa température de saturation ou si sa pression partielle de vapeur est amenée au-delà de sa pression vapeur saturante. Elle se manifeste par la formation d'un brouillard de particules d'eau en suspension dans l'air humide saturé.

La formation de brouillard est possible pour les trois cas suivants :

- Mélange de gaz humide chaud et de gaz froid pour lequel la température finale est inférieure au point rosée.
- Augmentation de la pression.
- Refroidissement d'un gaz humide sur une paroi froide (brouillard d'advection)

2.4.4 Rappel sur le phénomène de convection

En convection forcée, les phénomènes de condensation et de convection sont étroitement liés. Ce qui justifie l'existence de nombreuses équations empiriques basées sur l'analogie entre les deux phénomènes. Aussi, pour mieux cerner le problème, nous allons d'abord rappeler les différents concepts liés à la convection forcée avant de nous concentrer sur le phénomène de condensation proprement dit.

2.4.4.1 Notion de couche limite thermique en convection forcée

Considérons une conduite quelconque à la température T_w dans laquelle circule un gaz à la température donnée $T = T_\infty$. Si les deux températures sont différentes, en particulier si $T_\infty > T_w$, il s'établit entre la paroi et le gaz une couche limite appelée couche limite thermique dans laquelle la température évolue progressivement de sa valeur minimale T_w vers sa valeur maximale T_∞ dans la veine. Physiquement, les particules de gaz au voisinage de la paroi sont en équilibre thermique avec celle-ci et sont maintenues à la température T_w . A leur tour, ces particules extraient de l'énergie aux particules voisines et ainsi de suite jusque dans la veine, d'où le profil de température schématisé sur la Figure 32. On montre que le gradient de température correspondant dictera par la suite, le coefficient de transfert thermique par convection :

$$h = \frac{-k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}}{T_w - T_\infty} \quad (2-22)$$

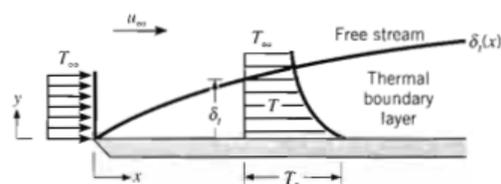


Figure 32 : Couche limite thermique

L'épaisseur de la couche limite varie avec la nature de la convection mise en jeu et elle évolue le long de la conduite. Elle est très faible à l'entrée du gaz, puis, au fur et à mesure que le gaz avance, la

couche limite se développe et entre dans le flux gazeux jusqu'à atteindre une hauteur maximale δ_{\max} [23].

2.4.4.2 Nombre de Nusselt (Nu) et similitude en convection

Pour des raisons de similitude, il est plus commode d'exprimer la relation du coefficient de transfert (2-25) à partir des paramètres adimensionnés suivants:

$$x^* = \frac{x}{L}, z^* = \frac{z}{L}, T^* = \frac{T - T_w}{T_\infty - T_w} \quad (2-23)$$

x : Coordonnée sur l'axe parallèle à l'écoulement

Z : Coordonnée vis-à-vis d'un axe perpendiculaire à la paroi

L : Longueur caractéristique (= diamètre pour un tube)

T_∞ : Température du gaz dans la veine

T_w : Température de la paroi

On obtient :

$$h_x = \frac{k (T_\infty - T_w)}{L (T_\infty - T_w)} \left. \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=0} = \frac{k}{L} \left. \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=0} \quad (2-24)$$

k est la conductivité thermique du fluide (gaz)

h représente le coefficient de transfert thermique par convection (global)

Ce qui permet d'exprimer le gradient de température au niveau des parois sous la forme adimensionnelle :

$$\left. \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=0} = \frac{h.L}{k} = Nu \quad (2-25)$$

Selon cette relation, on peut conclure que, le gradient de température $\left. \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=0}$ peut être caractérisé par le nombre de Nusselt (Nu) seul sans tenir compte des températures aux conditions limites ni de la dimension du tube. Le gradient $\left. \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=0}$ lui-même étant caractéristique de la convection, il s'ensuit qu'en se servant de Nu, on peut établir une similarité entre plusieurs phénomènes de convection qui se déroulent dans des conditions bien différentes.

Dans le domaine de la convection forcée, pour une géométrie donnée, l'expérience montre que le nombre de Nusselt est fonction de trois paramètres adimensionnels : le nombre de Reynolds, le nombre de Prandtl et la coordonnée adimensionnée x^* du point considéré. Re comprend les termes d'ordre dynamique et Pr regroupe les termes relatifs aux propriétés du gaz.

2.4.4.3 Coefficients de transfert thermique local

Le coefficient de transfert en zone d'établissement évolue avec l'espace, il en découle que le nombre de Nusselt est aussi fonction de la coordonnée x :

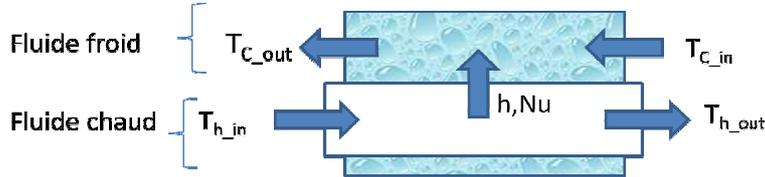
$$Nu_x = \frac{h_x.D}{k} = \frac{\dot{q}_x.D}{k(T_\infty - T_w)} \quad (2-26)$$

Plusieurs corrélations ont été proposées pour calculer le nombre de Nusselt local en convection forcée. Généralement, elles ont été construites pour des géométries et des contextes bien définis et ne sont valables que dans des conditions pour lesquelles elles ont été établies. En particulier, pour les tubes cylindriques lisses, des corrélations ont été proposées pour des températures constantes et pour des flux thermiques constants [23] :

Dans la zone établie, en aval des tuyaux, le nombre de Nusselt est indépendant de l'espace. Selon le régime, sa valeur est égale au nombre de Nusselt moyen défini par les équations (2-32), (2-33), (2-36), (2-37),(2-38) des paragraphes suivants.

2.4.4.4 Corrélation coefficient de transfert thermique moyen

Considérons le cas d'un échange de chaleur entre un fluide froid et un liquide chaud à travers une paroi conductrice de surface donnée (figure suivante) :



- T_{h_in} : Température du fluide chaud entrant dans le volume d'étude
- T_{h_out} : Température du fluide chaud sortant du volume d'étude
- T_{c_in} : Température du fluide froid entrant dans le volume d'étude
- T_{c_out} : Température du fluide froid sortant du volume d'étude

Parfois, il est préférable d'avoir directement le nombre de Nusselt moyen sur le tube en entier. On a :

$$Nu = \frac{1}{L} \int_L \frac{h_x \cdot D}{k} dx = \frac{\dot{q}_{tot} \cdot D}{k \cdot DTML} \tag{2-27}$$

\dot{q}_{tot} est le flux thermique total traversant la paroi
 D est le diamètre du tube

DTML représente la différence logarithmique moyenne de la température entre les deux fluides. Elle est calculée selon :

$$DTML = \frac{(T_{h_in} - T_{c_out}) - (T_{h_out} - T_{c_in})}{\ln \left[\frac{(T_{h_out} - T_{c_out})}{(T_{h_in} - T_{c_in})} \right]} \tag{2-28}$$

En remplaçant les températures du fluide froid par les températures de paroi, nous pouvons nous concentrer sur l'échange thermique entre le fluide chaud et la paroi. Le nombre de Nu moyen correspondant peut être obtenu en se servant des corrélations. En régime laminaire établi, le nombre de Nusselt est constant. On a :

Température de paroi uniforme : $Nu = 4,364$ (2-29)

Flux uniforme au niveau de la paroi: $Nu = 3,66$ (2-30)

Néanmoins, ce cas de figure n'est atteint que pour les tubes très longs. Pour les autres cas, les corrélations disponibles sont les suivantes [23]:

Hausen	Sieder-Tate
$Nu_{lam} = 3.66 + \frac{0.19Gz^{0.8}}{1 + 0.117Gz^{0.467}} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_w} \right)^{0.14} \tag{2-31}$	$Nu_{lam} = 1.86Gz^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_w} \right)^{0.14} \tag{2-32}$
0.1 < Gz < 10⁴ – Tube horizontal	Gz > 100 - Tube horizontal

En régime turbulent, le nombre de Nusselt s'exprime en fonction de Re et de Pr selon la relation de Dittus et Boelter [24] ou de Colburn [25] :

Dittus et Boelter	Colburn
$Nu = 0.023.Re^{4/5} .Pr^{\beta}$ <p>(2-33)</p>	$Nu = 0.023.Re^{4/5} .Pr^{1/3}$ <p>(2-34)</p>
$0.7 \leq Pr \leq 120, 2500 \leq Re D \leq 1.24 \times 10^5$ $\beta = 0,4 \text{ si } T_{gaz} > T_w \text{ et}$ $\beta = 0,3 \text{ si } T_{gaz} < T_w$	$0.7 \leq Pr \leq 120, 2500 \leq Re D \leq 1.24 \times 10^5$

Re est nombre de Reynolds, Pr est nombre de Prandtl et Gz est le nombre de Graetz, leurs définitions respectives sont disponibles à la fin du chapitre.

Pour tenir compte davantage des variations des propriétés du fluide avec la température, Sieder et Tate ont proposé de prendre en compte les viscosités du fluide évaluées à la température moyenne du fluide et la viscosité à la température de paroi [23].

$$Nu = 0.027.Re^{4/5} .Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_w} \right) \quad (2-35)$$

Avec $0,7 \leq Pr \leq 16700$

Pour les tubes courts, l'impact d'un régime non établi en amont peut être pris en compte en apportant une correction aux relations de Dittus et Boelter :

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3} .(L / D)^{-0.054} \quad (2-36)$$

Ou plus généralement :

$$Nu = [1 + G(D / L)].Nu_{Colburn} \quad (2-37)$$

G est un facteur de correction lié à la géométrie du tube, sa valeur est disponible dans la référence [26].

Pour lisser le passage entre le régime laminaire et turbulent, le régime transitoire peut être corrélé par la relation de Gnielinski disponible dans les références [26] et [23]:

$$Nu = \frac{(f / 2)(Re - 1000).Pr}{1 + 12.7(f / 2)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \left(1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{2/3} \right) \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right) \quad (2-38)$$

Dans laquelle, le « fanning friction » f est donnée par

$$f = 0.25(1.82 \log_{10}(Re) - 1.64)^{-2} \quad (2-39)$$

Des corrélations uniques pour les différents régimes d'écoulement sont aussi proposées par Hausen [23].

2.4.4.5 Coefficient de transfert en régime pulsatoire

De nombreuses études s'accordent sur le fait qu'une pulsation à basse fréquence de la vitesse du gaz entraîne une nette amélioration du coefficient de transfert [27] [28] [29]. Cela s'explique par le développement de la turbulence locale conduisant ainsi à la rupture des couches limites [30]. Toutefois, les auteurs soulignent qu'il existe une fréquence critique au-delà de laquelle l'impact de la pulsation sur le transfert de chaleur ne sera plus ressenti voire sera inversé. Pour une convection forcée à l'intérieur d'un tube cylindrique, Hommema et al.[30] proposent de corrélérer Nu moyen avec l'oscillation en faisant intervenir l'amplitude Va de la vitesse pulsé et la vitesse moyenne Vm selon:

$$Nu = 0.028.Re^{0.75} \left(1 + 0.21 \frac{V_a}{V_m} \right)^{0.75} \quad (2-40)$$

Dans d'autre corrélation, l'oscillation intervient via la fréquence de pulsation en apportant une correction ω^* au nombre de Reynolds [31]

$$Nu = \left[23 + \frac{5.6(Re \omega^* \cdot 10^{-5} - 2)}{1 + 0.17(Re \omega^* \cdot 10^{-5} - 2)} \right] Pr^{0.3} \quad (2-41)$$

$$\text{Avec } \omega^* = \frac{\omega r^2}{\nu} \quad (2-42)$$

La corrélation a pour avantage de ne pas faire intervenir l'amplitude de la pulsation. Selon l'auteur, l'impact de ce dernier est négligeable pour les conditions de pression faible (pression atmosphérique). La corrélation a été validée à température élevée pour une fréquence de pulsation allant de 5 à 60 Hz.

Toujours pour les tubes cylindriques, en travaillant avec les circuits d'échappement des brûleurs, Arpaci [32] a proposé de corréler le nombre Nu à la fois en fonction de la fréquence et de l'amplitude de pulsation selon :

$$Nu = 0.028.Re^{3/4} \left(1 + 0.21 \frac{V_a}{V_m} \left(1 + 7.36 \frac{(\omega - \omega_0)}{V_m} \right) \right)^{3/4} \quad (2-43)$$

2.4.5 Condensation sur une paroi sèche

2.4.5.1 Définition d'une couche limite de concentration

Considérons un flux de mélange de vapeur et d'air s'écoulant sur une paroi froide. Si la température de la paroi est inférieure à la température du gaz, le gaz au voisinage de la paroi sera à la température T_w . Si en plus, la température de paroi est plus faible que la température de rosée du mélange, la concentration en vapeur $C_{vap,w}$ au voisinage de la paroi doit satisfaire la valeur maximale autorisée par T_w . Ainsi, $C_{vap,w}$ sera plus faible que la concentration en vapeur dans la veine.

La différence de concentration en vapeur entre le gaz dans la veine et la paroi génère un transfert de matière par convection entre les deux milieux. Ce qui conduit à l'apparition d'une couche limite de concentration à l'intérieur de laquelle la concentration évoluera à partir de sa valeur minimale $C_{vap,w}$ vers sa valeur maximale $C_{vap,\infty}$.

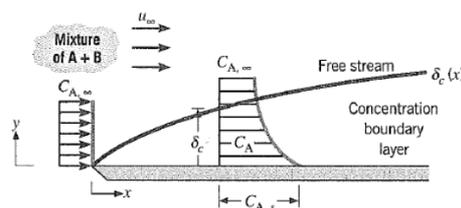
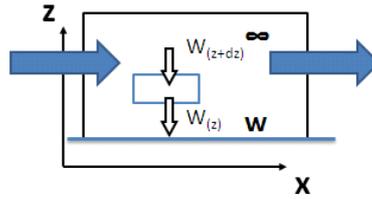


Figure 33 : Couche limite de concentration

2.4.5.2 Distribution de la concentration à l'intérieur de la couche limite

Considérons un élément de volume quelconque à l'intérieur de la couche limite.



Dans la direction de z , le flux massique total du mélange est la somme des flux d'air n_{air} et de vapeur n_{vap} :

$$n_{vap} + n_{air} = \rho \cdot v \quad (2-44)$$

v est la vitesse totale massique (mélange air + vapeur) – ou vitesse induite
 ρ est la densité du mélange

La fraction massique de vapeur peut être écrite selon :

$$\frac{\rho_{vap}}{\rho} = W_{vap} \quad (2-45)$$

ρ_{vap} est la densité de la vapeur

Le flux de vapeur vers la paroi est composé de deux flux différents : le flux de diffusion j_{vap} causé par le gradient de concentration et le flux de vapeur causé par le mouvement du gaz (advection) [33] :

$$n_{vap} = j_{vap} + \rho_{vap} \cdot v \quad (2-46)$$

En portant (2-47) et (2-48) dans (2-49), on peut exprimer le flux de diffusion j_{vap} selon :

$$j_{vap} = n_{vap} - w_{vap} \cdot (n_{vap} + n_{air}) \quad (2-47)$$

En outre, la loi de Fick appliquée à la diffusion de la vapeur s'écrit [34] [35]:

$$j_{vap} = \rho_{vap} (v_{vap} - v) = -\rho D_{AB} \frac{dW_{vap}}{dz} \quad (2-48)$$

D_{AB} est le coefficient de diffusion du système binaire Eau/Air

Ainsi en combinant (2-50) et (2-51), on déduit une nouvelle forme de la loi de Fick :

$$n_{vap} = W_{vap} (n_{vap} + n_{air}) - \rho \cdot D_{AB} \frac{dW_{vap}}{dz} \quad (2-49)$$

Dans la mesure où la paroi est imperméable à l'air sec (l'air ne condense pas), la relation (2-52) permet d'écrire :

$$n_{vap} = -\frac{\rho \cdot D_{AB}}{1 - W_{vap}} \frac{dW_{vap}}{dz} \quad (2-50)$$

On peut alors déterminer la vitesse totale (convection et diffusion) selon la relation ci-dessous [36] [35]:

$$v = \frac{n}{\rho} = -\frac{D_{AB}}{1 - W_{vap}} \frac{dW_{vap}}{dz} \quad (2-51)$$

Cette équation montre que la vitesse convective v est induite par la condensation de la vapeur vers la paroi. Elle joue un rôle important dans le phénomène de transfert si la concentration en vapeur est élevée [36] [37] [38].

En portant la valeur de v de l'équation (2-54) dans l'équation de la diffusion (2-55) ci-dessous et en appliquant les conditions limites définies par l'équation (2-56)):

$$\rho \left(v \frac{\partial W_{vap}}{\partial z} \right) = \rho \cdot D \cdot \left(\frac{\partial^2 W_{vap}}{\partial z^2} \right) \quad (2-52)$$

$$\left. \begin{aligned} W_{vap,y=0} &= W_{vap,w} \\ W_{vap,y=\infty} &= W_{vap,\infty} \end{aligned} \right\} \quad (2-53)$$

On aboutit à la relation suivante qui donne la distribution de la concentration de vapeur dans la couche limite d'épaisseurs δ_c :

$$W(z) = 1 - (1 - W_{vap,w}) \cdot \exp \left[\frac{y}{\delta_c} \ln \left(\frac{1 - W_{vap,\infty}}{1 - W_{vap,w}} \right) \right] \quad (2-54)$$

2.4.5.3 Couche limite et transfert de masse

Pour le cas de l'air humide, la condensation au niveau des parois laisse derrière elle un film de gaz plus riche en incondensable (air) et pauvre en vapeur. Colburn et al [3] [37] [39] ont montré que ce type de condensation est essentiellement contrôlée par la diffusion de la vapeur à travers la couche d'incondensable qui s'accumule au niveau de la paroi.

Le flux de condensation \dot{m} au niveau de la paroi peut être déduit en appliquant la relation (2-53) au voisinage de la paroi. On a :

$$\dot{m} = \frac{-\rho \cdot D_{AB} \left(\frac{\partial W_{vap}}{\partial z} \right)_w}{(1 - W_{vap,w})} \quad (2-55)$$

Rappelons qu'en absence de vélocité induite (faible valeur de w), l'équation (2-57) est une droite. L'équation (2-58) devient alors :

$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot D_{AB}}{\delta_c} \cdot \frac{(W_{vap,\infty} - W_{vap,w})}{(1 - W_{vap,w})} \quad (2-56)$$

En outre, par définition, le coefficient de transfert massique h_{m0} peut être écrit par rapport aux conditions limites selon :

$$\dot{m} = h_{m0} \frac{W_{vap,\infty} - W_{vap,w}}{1 - W_{vap,w}} \quad (2-57)$$

Ainsi, en combinant (2-59) et (2-60), il est possible de déterminer la valeur de $\rho \cdot (D_{AB} / \delta_c)$ selon la relation suivante:

$$h_{m0} = \rho \cdot (D_{AB} / \delta_c) \quad (2-58)$$

Puis en se servant de (2-61) et (2-57), on peut réécrire le flux de condensation de (2-60) en fonction des concentrations et du coefficient de transfert massique sans vélocité induite. On obtient :

$$\dot{m} = -h_{m0} \cdot \ln \left(\frac{1 - W_{vap,\infty}}{1 - W_{vap,w}} \right) \quad (2-59)$$

Ce qui montre que le coefficient de transfert en présence de vitesse induite est différent du coefficient de transfert si la vitesse induite n'existe pas. Autrement dit, les coefficients de transfert par convection sont intensifiés par la présence de condensation. C'est **l'effet d'aspiration**.

En pratique, le décalage apporté par la vitesse induite peut être pris en compte en ajoutant aux coefficients de transfert classique un terme rectificatif θ_m [35] [36] [40] [41]

$$\dot{m} = \theta_m \cdot h_{m0} \cdot \frac{W_{vap,\infty} - W_{vap,w}}{1 - W_{vap,w}} \quad (2-60)$$

En comparant l'équation de diffusion en absence (Eq(2-60)) et en présence (Eq (2-63)) de vitesse induite, Ackermann [42] et Bird [33] ont établi l'expression du facteur de correction θ_m selon les relations suivantes.

Ackermann	Bird
$\theta_m = -\frac{\phi_m}{e^{-\phi_m} - 1}$ <p>(2-61)</p>	$\theta_m = \frac{\ln(1 + B_m)}{1 + B_m}$ <p>(2-62)</p>
avec	avec
$\phi_m = -\frac{\dot{m}}{h_{m0}}$ <p>(2-63)</p>	$B_m = \frac{(W_{vap,w} - W_{vap,\infty})}{(1 - W_{vap,w})}$ <p>(2-64)</p>

Ces deux expressions ont été par la suite reprises par de nombreux auteurs pour résoudre le problème de la condensation des mélanges de vapeur avec l'air : [35][36] [43] pour l'équation (2-64) et [41] [44] [45] pour l'équation (2-65).

En outre, en procédant de la même manière, on montre que le coefficient de transfert thermique h est aussi intensifié par la condensation. Le coefficient de transfert par convection s'écrit alors comme suit [35] [43]:

$$h = \theta_h \cdot h_0 \quad (2-65)$$

θ_h est le facteur de correction du coefficient de transfert

Ou encore :

$$Nu = \theta_h \cdot Nu_0 \quad (2-66)$$

Avec :

Brouwers [36]	Kays et al [45]
$\theta_h = -\frac{\phi_h}{e^{-\phi_h} - 1}$ <p>(2-67)</p>	$\theta_h = \frac{\ln(1 + B_h)}{1 + B_h}$ <p>(2-68)</p>
avec	avec
$\phi_h = -\frac{\dot{m} \cdot Cp_{vap}}{h_0}$ <p>(2-69)</p>	$B_h = \frac{\dot{m}/G}{St}$ <p>(2-70)</p>

2.4.5.4 Equation de transfert de masse

Pour l'air humide, la concentration en vapeur est beaucoup plus faible par rapport à la quantité d'air sec (humidité maximale : 50 g/kg d'air sec dans notre cas). On peut écrire :

$$1 - W_{vap,w} \approx 1$$

Ainsi, en reprenant l'équation (2-63), on peut écrire le débit de condensation sur un élément de surface dA selon [46] :

$$\dot{m}_w = h_m \cdot (W_{vap,\infty} - W_{vap,w}) \quad (2-71)$$

avec :

$$h_m = \theta_m \cdot h_{m0} \quad (2-72)$$

D'autre part, d'après l'analogie de Chilton et Colburn, les j-facteur massique j_m et thermique j_h définis par les équations (2-77) et (2-78) sont identiques [26],[47]

$$j_h = j_m \quad (2-73)$$

Avec [46] :

$$j_h = \frac{h}{\rho \cdot Cp \cdot V} \cdot Pr^{2/3} \quad (2-74)$$

avec (0,6 < Pr < 60)

$$j_m = \frac{h_m}{V} \cdot Sc^{2/3} \quad (2-75)$$

avec (0,6 < Sc < 3000)

En remplaçant Pr et Sc dans les deux équations par leurs expressions, les coefficients de transfert de masse et de chaleur peuvent être liés par la relation suivante :

$$\frac{h}{h_m} = \rho \cdot Cp \cdot \left(\frac{\alpha_{vap}}{D_{vap}} \right)^{2/3} = \rho \cdot Cp \cdot Le^{2/3} = F(Le) \quad (2-76)$$

α_{vap} est la diffusivité thermique de la vapeur

D_{vap} est la diffusivité massique de la vapeur

Dans laquelle le nombre de Lewis le est donnée par :

$$Le = \frac{\alpha_{vap}}{D_{vap}} = \frac{Pr}{Sc} \quad (2-77)$$

Sc est le nombre de Schmidt

Selon Lewis, la valeur Le est proche de l'unité pour une faible concentration en vapeur.

2.4.5.5 Equation de transfert total

En présence de condensation, le flux thermique \dot{Q} est composé par le transfert par convection vers les parois (sensible) et le transfert dû au changement d'état de la vapeur (latente). On a :

$$\dot{Q} = h \cdot (T_\infty - T_w) + Lv \cdot \dot{m}_w \quad (2-78)$$

Lv est la chaleur latente de vaporisation

\dot{m}_w est donné par l'équation (2-74) et h par l'équation (2-68). On obtient :

$$\dot{Q} = h.(T_{\infty} - T_w) + Lv.h_m \cdot (W_{vap,\infty} - W_{vap,w}) \quad (2-79)$$

S'il est possible de déterminer analytiquement les facteurs de correction causé par l'aspiration, cette équation devient.

$$\dot{Q} = \theta_h.h_0.(T_{\infty} - T_w) + Lv \cdot \theta_m.h_{m0} \cdot (W_{vap,\infty} - W_{vap,w}) \quad (2-80)$$

Les facteurs θ_h et θ_m sont les facteurs d'aspiration définis dans les équations (2-64), (2-65), (2-70) et (2-71).

2.4.5.6 Corrélations du coefficient de transfert convectif h

Dans la plupart des études effectuées, les coefficients de transfert en régime humide ont été établis directement à partir de corrélations. Ils sont de la forme [48] [49] [50]:

$$Nu = \frac{h.D}{k} = f(Re, Pr) \quad (2-81)$$

Ou aussi [35] [51] :

$$Nu = \frac{h.D}{k} = f(Re, Pr, T_{\infty}, T_w) \quad (2-82)$$

Ou par rapport à j-facteur :

$$j_h = St \cdot Pr^{2/3} = \frac{h}{\rho \cdot Cp \cdot V} \cdot Pr^{2/3} = f(Re) \quad (2-83)$$

St est le nombre de Stanton

V représente la vitesse du gaz

La fonction f varie avec la géométrie du tube, les détails pour les différentes géométries sont disponibles dans les références [52] [53] [54] [55] [56] [57]. Pour les tubes lisses cylindriques, les corrélations sont tout à fait comparables aux corrélations du j-facteur ou de Nu pour l'air sec. Par contre, pour les géométries complexes, le nombre de Reynolds intervient sous forme logarithmique dans les exposants. Les complications en question peuvent provenir de la complexité de la géométrie elle-même mais elles peuvent aussi être liées aux comportements des condensats retenus localement à cause de ces géométries.

2.4.5.7 Corrélations du coefficient de transfert de masse

Le coefficient de transfert de masse peut être déduit des corrélations de coefficient de transfert par convection en utilisant l'équation (2-79). Ce qui permet d'écrire :

$$h_m = \frac{h}{\rho \cdot Cp \cdot Le^{2/3}} \quad (2-84)$$

En particulier, si le nombre de Nusselt est de la forme :

$$Nu = \alpha \cdot Re^{\beta} \cdot Pr^{\gamma} \quad (2-85)$$

il est alors possible d'écrire directement le nombre de Sherwood Sh à partir des coefficients α , β et γ de l'équation (2-88) selon la relation ci dessous [37][58]:

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D} = \alpha \cdot Re^{\beta} \cdot Sc^{\gamma} \quad (2-86)$$

Cette approche montre toutefois ses limites. Jacobi et al. ont montré expérimentalement qu'à Re élevé, le coefficient de transfert par convection (h) ou plus précisément le j-facteur est plus élevé en

régime condensant qu'en régime sec et inversement en Re faible [59]. De même Mihr a pu constater que les j-facteurs en régime humide sont plutôt repartis autour des j-facteurs sec et qu'il est impossible d'affirmer si la présence de condensat améliore ou non le coefficient de transfert sensible [60]. Pour surmonter ces obstacles, T.D Chen et al. [61] ont proposé de corrélérer directement le j-facteur massique en régime humide en évitant l'utilisation de l'analogie de Lewis et en passant par le concept de DYLM. De son côté, en se servant des analogies transfert de chaleur et transfert de masse, Terekhov [62] a pu résoudre les problèmes des couches limites associées à la condensation de l'air humide et aboutir à des corrélations directes de la vitesse de condensation selon :

$$\dot{m}_w = \alpha \cdot V \cdot Re^\beta \cdot Sc^{C_1} \cdot B_m (1 - B_m)^{C_2} \quad (2-87)$$

C1 et C2 sont des constantes

2.4.5.8 Corrélation des coefficients de transfert thermiques totaux

D'après la relation (2-83), la connaissance du coefficient de transfert convectif et du coefficient de transfert massique conduisent à la détermination du coefficient de transfert total. Néanmoins, du point de vue pratique, il est parfois plus commode d'avoir une corrélation permettant de lier directement les échanges d'énergie avec les conditions opératoires. Pour cela le Nu_{tot} est calculé par rapport à l'énergie totale échangée :

$$Nu_{tot} = \frac{h_{tot} \cdot D}{k} = \frac{\dot{Q}}{T_\infty - T_w} \quad (2-88)$$

L'énergie échangée \dot{Q} prend en compte à la fois la condensation de la vapeur et la convection. Dans ce sens, plusieurs corrélations ont été proposées pour le cas de l'air humide, ou plus généralement pour le cas des mélanges de vapeur d'eau et d'air.

Pour un mélange riche en vapeur, Groff [63] a proposé de corrélérer Nu_{tot} à partir des corrélations de la condensation de vapeur pure en y ajoutant un facteur de correction relatif à la présence d'incondensable.

Pour l'air humide à humidité élevée, Che et al ont [58] ont déduit que l'impact de la condensation de la vapeur peut être considéré en ajoutant un terme correctif Ch dans l'équation du nombre de Nusselt selon :

$$Nu_{tot} = a \cdot Re^b \cdot Pr^{1/3} \cdot Ch^c \quad (2-89)$$

Le facteur de condensation Ch est lié à l'humidité du gaz selon

$$Ch = \frac{T_{sat} - T_w}{T_\infty - T_w} \quad (2-90)$$

Pour le rendre compatible avec les gaz moins humides, cette équation a été améliorée par Liang [37] et vérifié expérimentalement par Shi [64]. Les équations résultantes sont de la forme :

$$Nu_{tot} = C \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(1 + Le^{2/3} \cdot B_m \cdot Ja \right) \quad (2-91)$$

Dans laquelle le premier terme $(C \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3}) \cdot 1$ représente le transfert de chaleur dû à la convection et le deuxième terme $(C \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3}) \cdot (Le^{2/3} \cdot B_m \cdot Ja)$ représente le transfert de chaleur dû à la condensation de la vapeur. B représente la force motrice de la condensation, il correspond au gradient d'humidité entre la paroi et le gaz (Equation (2-67)). Ja est le nombre de Jacob. Il représente le rapport entre l'énergie sensible et l'énergie latente selon :

$$Ja = \frac{H_{fg}}{Cp.(Tg - Tw)} \quad (2-92)$$

2.4.6 Particularité de la condensation en film

Dans la réalité, la condensation ne fait intervenir la paroi solide que pendant les premières phases du phénomène. La surface se couvre ensuite d'une certaine épaisseur de condensat et la condensation se poursuit au dessus de ce film. Enfin, à cause de la force de cisaillement apportée par le gaz en mouvement ainsi que la force de gravité, les films pourront se déplacer le long de la surface de contact. La figure suivante représente un aspect typique des films de condensat rencontrés dans le cas de la vapeur d'eau.

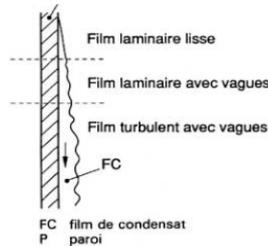


Figure 34 : Aspect des films de condensat en configuration verticale

Comme le montre la Figure 34, au début de la condensation (en entrée de la vapeur), le film est lisse et laminaire. Puis au fur et à mesure que le film descend de la paroi, des vagues commencent à apparaître et le film devient turbulent [65].

2.4.6.1 Impact du film vis-à-vis de la température aux interfaces.

La présence du film de condensat entraîne une résistance thermique supplémentaire entre le gaz et la paroi. L'interface entre le gaz et le liquide est, dans ce cas, portée à une température $T_i > T_w$.

L'influence du film de conduction peut être constatée par exemple si le sens de l'écoulement est modifié. Si l'écoulement du condensat et du gaz se font de manière concourante (tube vertical-gaz descendant, tube horizontal), le film est plus fin et le coefficient de transfert global est plus élevé. Par contre si les écoulements se font à contrecourant (flux gaz vertical ascendant), le coefficient de transfert est beaucoup plus faible à cause de l'épaississement du film [66].

Considérons le cas d'une paroi verticale. Le transport d'énergie à l'intérieur du film de condensat se fait essentiellement par conduction, ce qui implique une distribution linéaire de la température à l'intérieur du film. La température de la paroi du film peut être déduite en appliquant la loi de Fourier à travers le film en question :

$$\dot{q} = \frac{k_f}{\delta_{f,Nu}} (T_i - T_w) = h_f (T_i - T_w) \quad (2-93)$$

- $\delta_{f,Nu}$: Epaisseur du film de condensat
- h_f : coefficient de transfert côté film
- k_f : Conductivité thermique du film de condensat

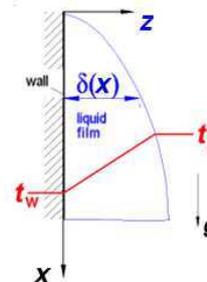


Figure 35 : Théorie de Nusselt

Pour un film laminaire, l'épaisseur de film $\delta_{f,Nu}$ requise pour le calcul du coefficient de transfert côté film $h_f = k_f / \delta_{f,Nu}$ peut être déduite à partir des contraintes de cisaillement des deux côtés du film

(voir [67]) ainsi que du débit de condensation en se servant de la théorie de Nusselt [17] [68]. Dans la littérature (Muroz-cobo et al [69], Collier et al [3]), il a été proposé d'apporter une correction aux contraintes de cisaillement elles-mêmes pour prendre en compte l'effet **d'aspiration causé** par la condensation.

Après un certains parcours, le film de condensat devient turbulent même en absence de cisaillement. En outre, en présence de cisaillement, quand la vitesse des gaz augmente, Re_f augmente aussi et le film devient turbulent. Des vagues commencent à apparaître sur leur surface et le coefficient de transfert du film se trouve modifié. La figure suivante résume les différents types de films rencontrés dans le cas de conduites cylindriques horizontales :

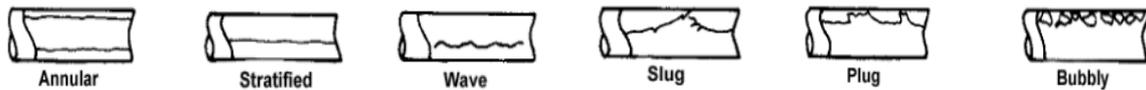


Figure 36 : Différents types de « film » de condensat en configuration horizontale (Vapeur pure) [70]

Pour le cas de la vapeur pure, de nombreuses corrélations des coefficients de transfert caractéristiques de ces différents types de films ont été proposées [71], [72], [41], [73], [3], [74], [3], [74] [75], [23], [74], [76].

2.4.6.2 Impact du film vis-à-vis de la composition du gaz en particules liquides.

L'arrachement des films de condensat par le gaz peut conduire à l'apparition de gouttelettes dans la phase gazeuse. Les différents scénarii d'apparition de ces gouttelettes sont détaillés dans la référence [77]. L'auteur a proposé 4 types de source de gouttelettes :

La première source de gouttelettes provient du cisaillement du sommet des vagues de condensat par le gaz en mouvement. On observe alors l'arrachement de l'eau ainsi que la formation d'une vague asymétrique résultant de l'action opposée de l'entraînement par le gaz et de la force de la tension superficielle aux parois (Figure 37-A).

La deuxième source de particules est le transperçement du film par un flux gazeux tel qu'il est présenté sur la Figure 37-B.

Comme illustré sur la Figure 37-C, certaines particules peuvent aussi provenir d'éclaboussures créées par l'impact d'une goutte ou d'un film de liquide sur un autre film.

La dernière source de particules est l'arrachement par le gaz d'un important volume d'eau (dans les conditions contre-courant) issu d'un bouchon de liquide. Le volume arraché peut par la suite se désintégrer en plus petites particules qui sont entraînées avec le gaz. (Figure 37-D)

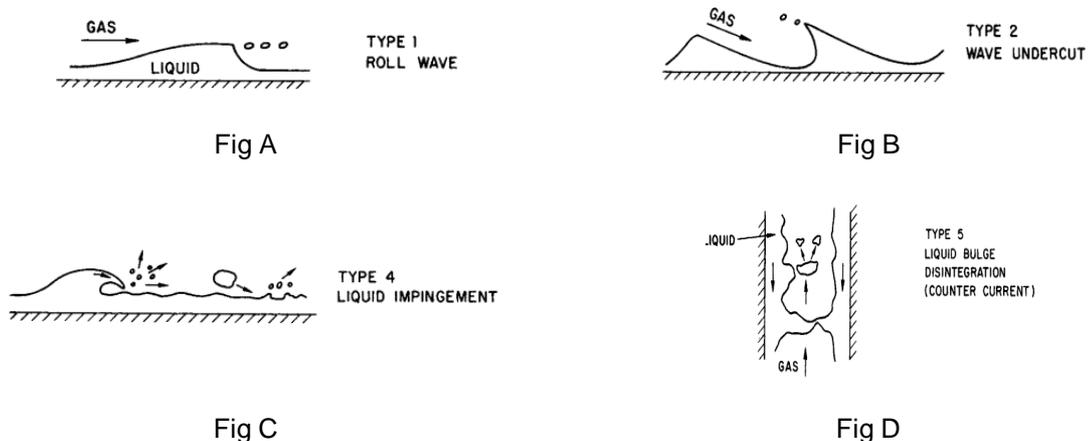


Figure 37 : Formation de gouttelettes d'eau en présence de cisaillement

Il a été montré que la possibilité d'apparition de particules peut être déterminée en fonction de Re_f :

- Pour de valeurs faibles de Re_f ($Re_f < 1500$), le film reste plan et l'arrachement des particules est impossible.
- Pour des valeurs de Re_f supérieure ($Re_f > 2000$), le film de liquide est rugueux, il est entièrement en régime turbulent et la formation de particules est possible au-delà d'une certaine vitesse de gaz.
- Pour des valeurs intermédiaires de Re_f , la possibilité d'entraînement des particules varie simultanément avec la vitesse du gaz et la vitesse du film.

2.4.7 Condensation en gouttes

2.4.7.1 Dérroulement

La condensation en gouttes peut être décrite comme suit [78] [79] :

- Les premières gouttelettes se forment sur les sites de nucléation. Ces derniers sont caractérisés par de faibles énergies de nucléation et se situent généralement au niveau des irrégularités de surface ou au niveau des impuretés sur la surface.
- La condensation continue sur la surface des gouttelettes déjà en place conduisant ainsi à leur grossissement avec le temps.
- Quand les gouttes sont suffisamment grosses, elles entrent en contact par coalescence. A cause de la force de capillarité qui s'établissent entre les gouttes coalescées, les gouttes se déforment et les surface qu'elles occupent s'étendent au delà des sites de nucléation initiaux. A ce stade, les gouttes sont plus grosses mais elles sont moins nombreuses par rapport aux gouttes initiales.
- Les gouttes continuent de croître par coalescence et par condensation. Quand elles atteignent une certaine taille appelée taille critique, les gouttes se déplacent par gravité ou sont entraînées par le gaz.
- En se déplaçant, les gouttes de taille critique amènent avec elles les gouttelettes qui se trouvent sur leur passage, laissant de nouveau les parois lessivées propres.
- Les sites lessivés ou abandonnés par les gouttes mobiles sont à nouveau actifs, la condensation reprend alors sur ces sites et les gouttes continuent de croître à nouveau jusqu'à ce qu'elles atteignent une taille similaire aux gouttes non lessivées.
- Et ainsi de suite ...

2.4.7.2 Phénomène et résistances associées aux condensations en goutte

Les différents phénomènes de transfert de masse mis en jeu lors des développements des gouttes de condensat peuvent être résumés par la Figure 38. Ils comprennent [20]

- La diffusion et la condensation de la vapeur d'eau du gaz sur la surface des gouttes déjà en place conduisant ainsi à l'accroissement de celle-ci et à l'appauvrissement du milieu environnant en vapeur d'eau (1).
- La nucléation et l'évaporation des gouttelettes proches de la taille critique conduisant à la diffusion progressive de la vapeur vers les grosses gouttes déjà en place (2).
- La nucléation et la coalescence des petites gouttes (3).

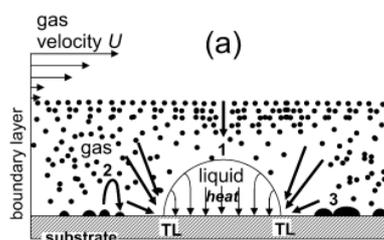


Figure 38 : Transfert de masse en condensation en gouttes (cas air humide)

Le transfert de chaleur à travers une goutte de condensat fait intervenir quatre résistances thermiques qui s'établissent entre la paroi et le gaz. En termes de différences de température, les résistances en question peuvent être écrites comme suit [16] [21] [80] [81]:

$$\Delta T = \Delta T_{courbure} + \Delta T_{interface} + \Delta T_{conduction} + \Delta T_{constriction} \quad (2-94)$$

$\Delta T_{courbure}$ est la résistance due à la surpression de Laplace qui règne à l'intérieur des gouttes. Elle correspond au surplus de température requis par la vapeur pour pouvoir maintenir la courbure des gouttes. La contribution de $\Delta T_{courbure}$ sur le transfert augmente quand la taille des gouttes diminue. Pour le cas de la vapeur pure, elle s'exprime selon la relation:

$$\Delta T_{courbure} = \frac{2T_{sat}\sigma}{Lv.\rho.r} \quad (2-95)$$

- T_{sat} : température de saturation de la vapeur
- σ_{liq} : tension interfaciale liquide/vapeur
- r : rayon de courbure

$\Delta T_{interface}$ est la résistance à l'interface gaz liquide. Elle est fonction du flux thermique q et du coefficient de transfert aux interfaces h_i selon (cas de la vapeur pure) :

$$\Delta T_{interface} = \frac{q}{2\Pi r^2 h_i} \quad (2-96)$$

Le coefficient de transfert aux interfaces h_i est fonction de la température de saturation du gaz ainsi que de la quantité de gaz incondensable présent dans la vapeur.

$\Delta T_{conduction}$ correspond à la résistance thermique due à la conduction thermique à travers les gouttes. Elle est donnée par :

$$\Delta T_{conduction} = \frac{q.r}{2\Pi.r^2.k} \quad (2-97)$$

k représente la conductivité thermique de la goutte

$\Delta T_{constriction}$ est la résistance à la constriction. Elle est causée par l'hétérogénéité des flux thermiques sur la surface de condensation compte tenu de la distribution non uniforme des gouttes. En général, quand la conductivité du matériau diminue, la résistance de constriction fait diminuer considérablement le coefficient de transfert thermique [82] [83].

L'impact de la constriction peut être déterminé analytiquement ou en se servant des corrélations telles que celles proposées dans la référence [84]. Notons toutefois que certains travaux [85] ont démontré que cette influence est négligeable et la température de paroi peut être considérée comme uniforme à cause des phénomènes de coalescence, qui participent à l'uniformisation des températures des gouttes voisines.

Rappelons aussi que, pour le cas de la condensation de vapeur pure par exemple, les études [21] ont montré que la conduction à travers les gouttes constitue la plus importante résistance au transfert thermique. En particulier, elle l'emporte sur le reste si les diamètres des gouttes sont élevés [81].

2.4.7.3 Tailles et répartition des gouttes

La distribution de la taille des gouttes a fait l'objet de nombreuses études. Mei [86] s'est appuyé sur une analyse fractale pour y parvenir. Rose et al [87] ont établi une loi de distribution des gouttes en considérant le développement des gouttes comme la succession de plusieurs phénomènes dont le grossissement et la capture par coalescence des gouttes par des gouttes plus grosses. Les examens microscopiques montrent que les gouttelettes ne sont pas uniformes mais sont réparties dans une large gamme de granulométrie [78]. Pour une température donnée, la taille minimale r_{min} possible des gouttes peut être déduite par l'équation (2-98). On obtient :

$$r_{\min} = \left(\frac{2T_{\text{Sat}}\sigma}{Lv.\rho} \right) \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (2-98)$$

En supposant que les gouttes ne coalescent pas, certaines études [16] ont proposé d'exprimer la fraction α de surface occupé par de gouttes de taille supérieure à r_{\max} selon :

$$\alpha = 1 - \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^m \quad (2-99)$$

m est une constante

Du point de vue pratique, cette loi correspond à la distribution de gouttes telle que les gouttes de taille supérieure à r_{\max} sont inexistantes et que la couverture est maximale quand la taille des gouttes diminue. Cette loi a servi de base dans de nombreux travaux liés à la condensation en gouttes [79] [87] [88]. En particulier elle est tout à fait comparable avec le résultat observé par Graham et al. [21] qui a montré que la majorité de la surface de condensation est occupée par des gouttes de petite taille.

2.4.7.4 Coefficient de transfert de chaleur

L'étude des coefficients de transfert de condensation en gouttes est très rare voire inexistante dans le cas de l'air humide. Afin de pouvoir estimer les paramètres importants à considérer dans notre étude, nous allons donc détailler le cas de la condensation de la vapeur pure puis nous allons en déduire ce qui se passerait dans le cas de l'air humide.

Cas de la vapeur pure

La relation entre le coefficient de transfert et la nature des parois a été décrite par Rose [79]. Pour un niveau de sursaturation donné, l'auteur a rappelé que le coefficient de transfert est proportionnel à la taille maximale des gouttes aptes à se maintenir sur les parois avant d'être transportées. Glicksman [81] a souligné que le coefficient de transfert total est fortement influencé par la densité des sites de nucléation. Rappelons que ce dernier est influencé à la fois par la nature de la paroi et le degré de sursaturation. A travers ses expérimentations, Neumann [89] a montré que le coefficient de transfert total augmente avec l'angle de contact.

Théoriquement, le coefficient de transfert en condensation en gouttes peut être obtenu en intégrant les coefficients de transfert local propres à chaque goutte sur la totalité de la distribution. Dans le cas de la vapeur pure, les résultats montrent que le coefficient de transfert est constant pour une vitesse de gaz donnée et le flux échangé est directement proportionnel aux degrés de sursaturation ($T_{\infty} - T_w$). Cette approche est suffisante pour les configurations moins favorables à l'inondation (exemple : plafond d'une paroi horizontale). Par contre, pour les autres configurations, il faudra aussi prendre en compte le déplacement des gouttes à cause de la gravité et/ou du cisaillement par le gaz. Ces phénomènes participent à la redistribution de l'énergie en aval du flux et à la libération plus fréquente des surfaces de condensation. A travers des modèles, Yamali [78] a montré qu'en présence d'inondation, le flux de transfert n'est plus proportionnel au degré de sursaturation. Ainsi, pour les valeurs élevées de sursaturation, le coefficient de transfert diminue et les flux correspondant présentent une asymptote voire diminuent avec le degré de sursaturation. La dérive est d'autant plus importante que la longueur d'échange est plus longue et que la vitesse d'accélération subie par les gouttes est importante. Notons que cette tendance a été démontrée expérimentalement plus tard par Gerd Koch [90]. En outre, l'auteur a pu démontrer expérimentalement que l'impact de l'inondation peut aussi être senti par la modification de l'inclinaison des surfaces de condensation. Ainsi, pour le cas d'une plaque plane horizontale, dans laquelle les gouttes se déplacent plus difficilement, le coefficient de transfert peut être jusqu'à 87% plus faible par rapport à une configuration verticale.

Selon Graham et al. [21] et Glicksman et al. [81], la majorité des transferts de chaleur par condensation sont assurés par les gouttes de petite taille (150 μm si point de rosée de la vapeur =100°C) car elles sont très nombreuses et ont une faible résistance thermique. La taille de ces gouttes est d'autant plus petite que le degré de sursaturation correspondant est élevé.

Il est bien connu que la condensation en gouttes améliore largement le coefficient de transfert thermique pour les vapeurs pures [3][17][65][91]. Toutefois, même avec de faibles quantités d'incondensables (max : 5% du gaz), il a été mis en évidence que cette influence est devancée par l'influence de la concentration en vapeur dans le flux [92].

Cas de l'air humide

Les différentes théories détaillées précédemment peuvent aussi s'appliquer à la condensation de l'eau dans l'air humide. Toutefois, l'importance des différents paramètres est beaucoup plus faible dans la mesure où l'étape limitante dans les transferts de chaleur par condensation de l'air humide se trouve dans le film d'incondensables côté gaz et non dans la goutte de condensat liquide. Cela est d'autant plus vrai que la quantité de condensat mise en jeu est beaucoup moins importante pour l'air humide que pour la vapeur pure. Aussi, pour le cas de l'air humide, une attention devrait être portée sur l'impact de l'irrégularité apportée par les gouttes vis-à-vis de la couche limite de diffusion (Figure 39-A). En comparant les j-facteurs sensibles obtenus avec les gaz secs et les j-facteurs sensibles des gaz humides sur un échangeur, Jason [16] a conclu que les gouttelettes font augmenter le coefficient de transfert par convection en perturbant le flux gazeux. Une constatation similaire a été soulignée par Huhtiniemi [93].

Pour les conduites fermées telles que les tubes, l'impact des gouttes de condensat sur le flux gazeux est d'autant plus important que l'espacement entre les parois est important [56]. Comme le montre la Figure 39-B, si le passage du gaz est faible, des phénomènes de vortex sont favorisés en aval des gouttes de condensat.

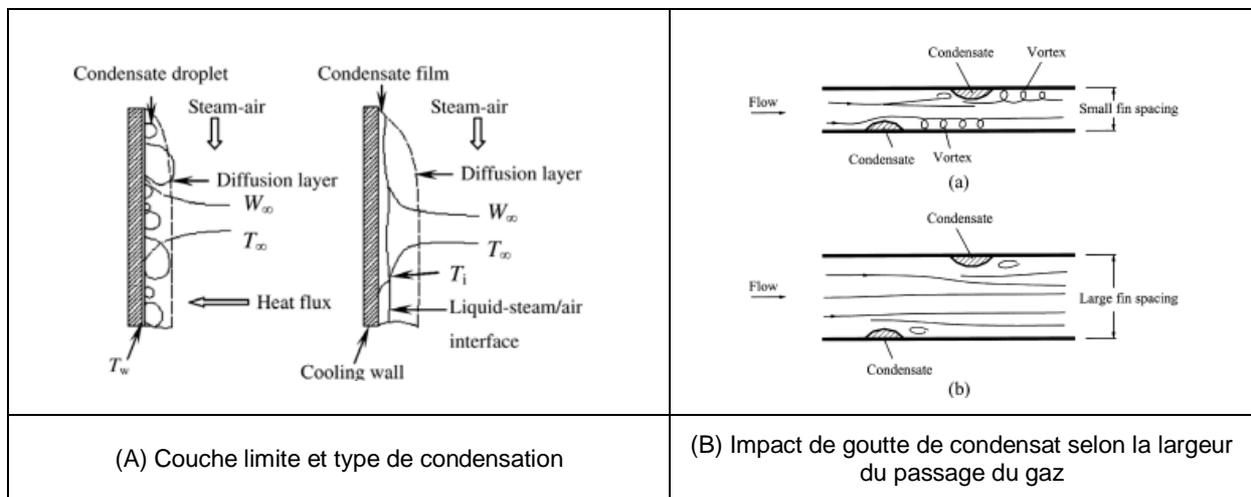


Figure 39 : Impact des condensats sur la couche limite et type de condensation

2.5 Conclusion partielle

Les travaux qui traitent des différents phénomènes élémentaires composant le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by relèvent de plusieurs domaines scientifiques totalement différents. Les phénomènes liés à la formation d'émulsions relèvent de la physico-chimie des mélanges diphasiques ainsi que la thermodynamique des changements de phase alors que les phénomènes de condensation et ceux liés à la formation du givre sont plutôt associés aux phénomènes de transfert thermique et de transfert de matière. En outre, bien qu'il y ait une certaine similitude entre la condensation et la formation de givre, le premier concerne essentiellement le phénomène de transfert de masse par convection alors que le deuxième comprend à la fois le transfert de masse par convection ainsi que les phénomènes de transfert en milieux poreux.

2.5.1 L'air humide

L'air humide, plus généralement le gaz de blow-by, peut être caractérisé par le couple température/humidité relative, ou le couple température/humidité absolue ou aussi par la combinaison température/point de rosée. En ce qui concerne le gel et l'émulsion de blow-by, la combinaison température/point de rosée constitue le meilleur couple de paramètres de caractérisation. Il donne directement la température de condensation (ou d'abliment) de l'air humide tout en renseignant la quantité de vapeur qu'il contient. Par ailleurs, pour les gaz saturés, les deux paramètres ont des valeurs identiques, ainsi, le fait de spécifier le point de rosée revient à donner des informations sur tous les paramètres hygrométriques restants.

Du point de vue énergétique, l'air humide est caractérisé par son enthalpie spécifique. Cette enthalpie prend compte à la fois l'énergie sous forme sensible liée à la température de l'air humide ainsi que la l'énergie stockée sous forme de chaleur latente par la vapeur d'eau. Les différents paramètres caractéristiques de l'air humide peuvent être réunis dans la table psychrométrique.

Le changement d'état de l'air humide ayant une humidité donnée causé par une quelconque diminution de la température peut être décrit par le diagramme d'état de l'eau. Les divers changements d'état en question sont la condensation, l'abliment et la solidification. Leurs domaines d'existence respectifs sont dictés par la température et la pression partielle de vapeur de l'air humide mises en jeu.

2.5.2 Les émulsions

Une émulsion est obtenue si l'eau et l'huile sont portées à l'état dispersé de manière à obtenir un mélange intime qui sera stabilisé par des tensioactifs.

En fonction des conditions de formation, les émulsions ont des morphologies et des compositions très variées. Ces deux derniers paramètres sont étroitement liés à la stabilité et la température de cristallisation des émulsions. En particulier, plus l'émulsion est riche en eau, plus sa température de cristallisation est élevée. De même, plus la taille des particules d'eau est grande, plus la température de cristallisation est élevée.

La déstabilisation de l'émulsion regroupe l'inversion de phase ainsi que tout autre phénomène tendant à ramener le mélange intime d'eau et d'huile vers deux couches séparées d'eau et d'huile. Ce sont la coalescence, le murissement d'Ostwald, la floculation, le crémage et la sédimentation. En agissant sur la distribution des gouttes d'eau et d'huile à l'intérieur de l'émulsion, ces différents phénomènes peuvent modifier la viscosité d'une émulsion ainsi que sa température de cristallisation.

2.5.3 La condensation

Les phénomènes de convection et de condensation de l'air humide sont étroitement liés. Le coefficient de transfert massique peut être calculé à partir du coefficient de transfert thermique par convection en se servant de l'analogie de Lewis. Le flux massique de condensation peut être calculé directement à

partir du coefficient de transfert massique par convection en y ajoutant un facteur correctif qui prend en compte les phénomènes **d'aspiration induite**.

Du point de vue énergétique, la condensation de l'air humide comprend deux types de transfert d'énergie, dont une partie purement sensible et qui est associée à la convection de l'air humide due au gradient de température gaz/paroi et une autre partie purement latente due au changement d'état de l'eau.

En ce qui concerne le coefficient de transfert, plusieurs corrélations de sa valeur moyenne avec Re et Pr ont été proposées. Rappelons aussi que Nu varie avec le régime d'écoulement, la géométrie des pièces ainsi que tout autre phénomène capable de déstabiliser la couche limite de convection qui règne à l'intérieur des tubes : pulsation, irrégularité due aux gouttes et aux films de condensat, etc.

L'accumulation des condensats sous forme de film sont susceptibles d'introduire une résistance thermique supplémentaire sur le transfert de chaleur entre la paroi et le gaz. L'épaisseur du film en question ainsi que le coefficient de transfert à l'intérieur du film peuvent être déterminés analytiquement en s'appuyant sur la théorie de Nusselt ou en se basant sur les différentes corrélations disponibles dans la littérature. En outre, la présence d'un film de condensat peut aussi faire intervenir un phénomène supplémentaire qui est la pulvérisation de l'eau par cisaillement.

Les phénomènes de transfert associés à la condensation en gouttes peuvent être différents de la condensation en film. En sus de la conduction à l'intérieur du condensat, on distingue aussi d'autres résistances qui sont liées à la courbure des gouttes et la constriction de la chaleur sur les parois au voisinage de ces gouttes. En outre, les déplacements des gouttes par phénomène d'inondation peuvent entraîner une dérive des phénomènes de transfert par rapport à la condensation sur une paroi sèche.

2.5.4 La formation de givre ¹

Le givre est une couche de glace poreuse provenant de l'ablimation de la vapeur d'eau en cristaux de glace. Elle est largement étudiée pour les installations cryogéniques. Le phénomène se déroule en trois phases : la nucléation, le développement cristallin et la formation d'une couche poreuse uniforme. La dernière phase constitue la phase la plus importante.

Le phénomène de givre est régi par trois phénomènes élémentaires : la convection dans l'air humide accompagnée de l'ablimation de la vapeur, la diffusion de la vapeur d'eau à travers la structure poreuse de givre et l'ablimation progressive de la vapeur le long de son parcours à travers cette matrice poreuse. Le phénomène est insensible aux paramètres de la convection dont la turbulence locale [94] mais il est surtout régi par un gradient d'humidité entre le gaz et la paroi qui est le vecteur du transfert de masse entre les deux milieux. A long et à moyen termes, le phénomène est faiblement impacté par la nature de la surface froide.

La morphologie du givre varie avec l'environnement dans lequel il s'est développé. Les facteurs les plus importants sont la température de la paroi, la température du gaz, la vitesse des gaz et l'humidité. Plus ces quatre paramètres sont élevés, plus le givre est dense.

L'épaisseur du givre évolue avec le temps. L'épaisseur du givre diminue avec la température de la paroi et la température du gaz. Elle augmente avec l'humidité, mais elle est par contre insensible au débit et à la vitesse.

Physiquement, la quantité totale de vapeur et d'énergie mise en jeu est régie par l'équation de transfert massique par convection et l'analogie de Lewis. La résolution du système peut être complétée en déterminant les conditions de température à la surface du givre à l'instant t et à la position considérée ainsi qu'en déterminant la distribution de la vapeur d'eau (\dot{m}_f) entre la fraction qui

¹ Physique des phénomènes de givrage disponible en annexe

participe à la densification du givre et la fraction qui participe à son épaissement : problème de diffusion en milieu poreux avec changement d'état.

2.5.5 Les lubrifiants ²

Les lubrifiants sont composés par une huile de base ainsi que plusieurs additifs. La nature de l'huile de base ainsi que les additifs utilisés varient d'une huile à l'autre. Parmi les huiles de base, on distingue des paraffines aliphatiques ou cycliques mais aussi des oxygénées et des aromatiques. Pour les additifs, on a surtout des additifs de viscosité qui sont essentiellement des polymères ainsi qu'une quantité importante d'éléments tensioactifs servant comme détergent, d'anti-mousse ou de dispersant.

On distingue plusieurs types de lubrifiants, néanmoins, dans le cadre de notre étude, nous nous efforcerons de nous concentrer sur les lubrifiants de basse viscosité qui sont utilisés dans les pays froids.

² La chimie des lubrifiants est disponible en annexe

Glossaire

Notation	Noms	Unités
$\frac{dn}{dt}$	Taux de nucléation	s ⁻¹
a _r	Composant de l'accélération parallèle à la paroi	m ² /s
B	Paramètre d'aspiration	-
Ch	Facteur de condensation	-
Cp	Capacité calorifique massique	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
D	Diamètre du tube	m
D _{vap}	Diffusivité massique de la vapeur	m ² /s
D _{AB}	Coefficient de diffusion du système binaire Eau/Air	m ² /s
DTLM	Différence moyenne logarithmique de température	°C
F	Facteur de réduction	-
f	Facteur de Fanning friction	-
f	Coefficient de friction	-
G	Facteur de correction dans l'équation	-
g	Accélération de la gravité	m/s ²
Gz	Nombre de Graetz : $Gz = \frac{\rho \cdot Cp \cdot V \cdot D^2}{k \cdot L} = \frac{D}{L} \cdot Re \cdot Pr$	-
h	Coefficient de transfert par convection	W/(m ² K)
hm	Coefficient de transfert de masse	m/s
j	Flux causé par la diffusion	kg.m ⁻² .s ⁻¹
j _{H, j_m}	Chilton et Colburn jfacteur	-
Ja	Nombre de Jacob	-
k	Constante de Boltzmann	J/K
k	Conductivité thermique	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Le	Nombre de Lewis	-
Lv	Chaleur latente de vaporisation (ou condensation)	J/kg
m ^o	Flux massique de la vapeur	kg.m ⁻² .s ⁻¹
m ^o _w	Flux de condensation	kg.m ⁻² .s ⁻¹
n	Nombre de particules ayant dépassé la taille R*	-
N(r)	Nombre de gouttes de taille supérieure à r	-
n _i	Flux massique combiné de l'espèce i (convection et diffusion)	kg.m ⁻² .s ⁻¹
Nu	Nombre de Nusselt côté gaz	-
p	Pression partielle	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	-
q	Flux thermique	W
R	Rayon d'une goutte de nucléus	m
r	Rayon d'une goutte (émulsion)	m
R*	Rayon critique d'une goutte nucléus	m
Re	Nombre de Reynolds	-
Sc	Nombre de Schimdt	-
St	Nombre de Stanon	-
T	Température	°C
u	Vitesse	m/s
U	Vitesse axiale	m/s
u	Vitesse à l'interface film/gaz	m/s
v	Vélocité totale massique (mélange air+ vapeur) – ou vélocité induite	m/s
V	Vitesse du gaz	m/s
W	Fraction massique	-
x	Coordonnée sur l'axe parallèle à l'écoulement	m
X	Position zone transition vers turbulent ou laminaire	m
z	Coordonnée vis-à-vis d'un axe perpendiculaire à la paroi	m
α	Facteur multiplicatif dans les corrélations type Colburn	-
α _{vap}	Diffusivité thermique de la vapeur	m ² /s

β	Constate, exposant du nombre de Pr	-
δ	Epaisseur de la couche limite	m
δ_c	Epaisseur de la couche limite de concentration	L
δ_f	Epaisseur du film de condensat	m
ΔG	Energie de formation d'un nucléus	J/mol
ΔG^*	Energie critique de formation d'un nucléus	J/mol
ΔT	Résistance en termes de différence de températures	°C
θ	Angle de contact	rad
θ	Facteur de correction du coefficient de transfert	-
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
ρ	Densité	kg/m ³
σ	Tension interfaciale liquide/paroi	N/m
τ_g, τ_w	Contrainte de cisaillement côté gaz, Contrainte de cisaillement côté paroi	N/m ²
ω	Fréquence de pulsation	s ⁻¹
Ω_s	Volume d'une molécule	m ³
Γ	Taux de condensation Γ par unité de périmètre	kg/m ³ /s
Φ_c	Flux massique adimensionné	-

Script

*	Sans dimension
0	Monophasique
∞	Gaz dans la veine
a	Amplitude de pulsation
air	Air sec
c	Côté couche limite gaz
D	Diamètre
f	Côté film de condensat
g	Gaz
h	Hydrodynamique dans X_h
h	Transfert de chaleur
i	interface film/gaz
lam	Laminaire
m	Transfert de masse
m	Moyen (d'une vitesse pulsée)
nc	Non condensable (air)
sat	Saturé
T	Thermique
tot	Total (condensat et convection)
turb	Turbulent
vap	Vapeur
w	Gaz au voisinage de la paroi

Chapitre 3 :

ANALYSE DES PHENOMENES DE GELS ET D'EMULSIONS DE BLOW-BY : CHOIX DES PARAMETRES

CHAP. 3: ANALYSE DES PHENOMENES DE GELS ET D'EMULSIONS DE BLOW-BY ET CHOIX DES PARAMETRES

3.1 Introduction

Bien que la conséquence et l'apparence des gels et des émulsions de blow-by soient bien connus au travers des nombreux essais de véhicules sur banc climatique, il n'en est pas de même du déroulement des phénomènes ainsi que des paramètres mis en jeu.

Aussi, il est primordial, avant de s'engager dans une étude analytique et expérimentale de connaître les paramètres pertinents à prendre en compte et de déterminer les phénomènes d'intérêt parmi la multitude de phénomènes possibles.

Pour atteindre ces objectifs, nous allons décrire les différents phénomènes possibles dans la formation de gels et d'émulsions de blow-by et analyser un à un les différents paramètres mis en jeu. Nous considérerons en particulier les compositions en eau et en huile du gaz, les températures du gaz et de la paroi, les caractéristiques hydrodynamiques du gaz ainsi que les caractéristiques géométriques des circuits de blow-by.

Pour chaque paramètre à considérer, nous allons dans un premier temps définir la plage de variation en se servant des différentes mesures sur banc à rouleaux et sur banc moteur. Dans un deuxième temps nous allons estimer qualitativement le rôle joué par chaque paramètre en se basant sur les analyses bibliographiques détaillées dans les chapitres précédents ainsi que les résultats des essais préliminaires effectués sur des dispositifs simples de laboratoire. Enfin, nous allons définir les paramètres retenus pour la suite de l'étude et établir leurs plages de variation définitives en vue de construire un banc d'essais.

Le principe de l'approche peut être résumé par la figure suivante :

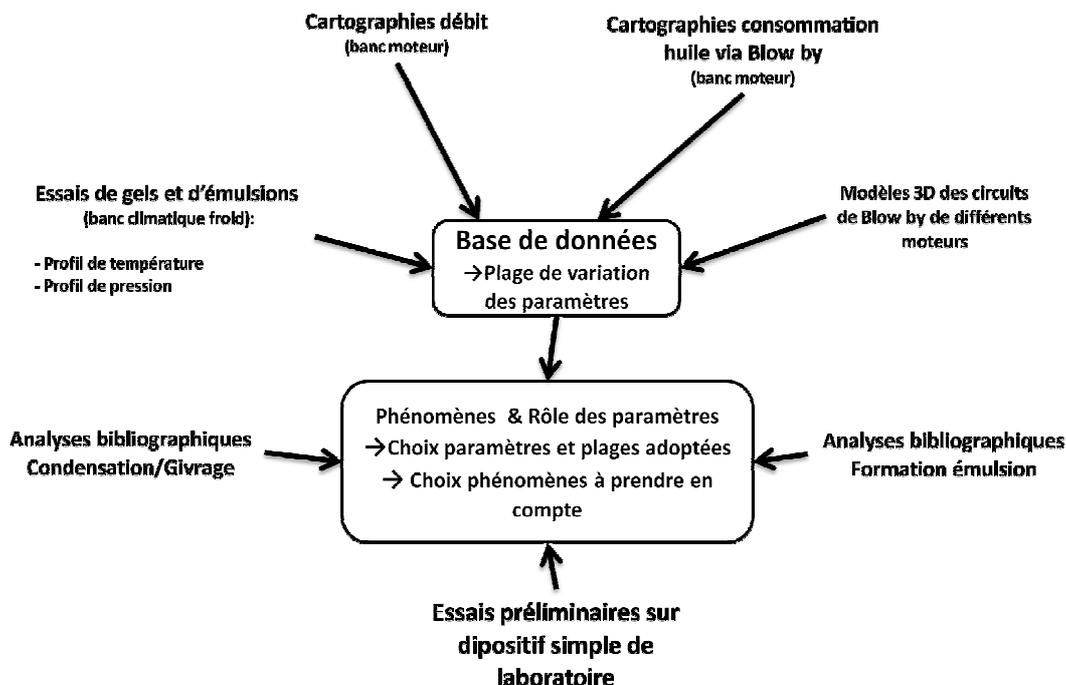


Figure 40 : Approche de l'analyse des phénomènes et choix des paramètres

3.2 Les essais préliminaires

3.2.1 Objectifs des essais préliminaires

Il existe une grande quantité de paramètres mis en jeu dans les phénomènes de gels et d'émulsions de blow-by. On peut distinguer le débit de gaz, la température du gaz, l'humidité du gaz, le profil de température sur les parois des circuits, la géométrie et l'orientation des circuits, l'amplitude et la fréquence de pulsation du gaz, l'évolution temporelle des différents paramètres (cycle de roulage), la température et la quantité de particules d'huile, la composition de l'huile, la composition du carburant, etc. De plus, ces divers paramètres dépendent également d'autres tels que le type du moteur et son âge, ses conditions de fonctionnement (régime et charge) et l'ambiance extérieure. Cette multiplicité s'accompagne également de complexité. En effet, on peut rencontrer la formation de givre, la condensation, la solidification de l'eau, la formation d'émulsion, la solidification de l'émulsion, la fusion de la glace ou la fusion des émulsions cristallisés, l'accumulation de l'eau ou l'accumulation des émulsions, la démixtion des émulsions, etc.

Aussi, afin de réduire au minimum le nombre de paramètres et des phénomènes élémentaires à prendre en compte, nous avons décidé d'effectuer des essais préliminaires avant la conception et le déploiement du banc d'essai ainsi que du choix des essais à effectuer sur ce banc. Notre objectif est donc, avant tout, de pouvoir effectuer un nombre maximum d'essais permettant d'observer le plus de phénomènes possibles et d'estimer les variables intéressantes. Pour cela, des essais préliminaires ont été effectués sur des dispositifs très simples que nous avons montés en laboratoires dont les paramètres ont été contrôlés et mesurés de manière grossière.

3.2.2 Principe du dispositif utilisé lors des essais préliminaires

Le principe du dispositif consiste à faire barboter de l'air comprimé dans de l'eau chaude maintenue à une température donnée, puis d'envoyer cet air humide dans un tube en PVC transparent refroidi extérieurement par un bain cryothermostaté.

Le contrôle du débit se fait à l'aide d'un détendeur monté sur la source d'air comprimé. Le maximum de débit testé a été choisi dans la limite maximale supportée par le barboteur de 250 mL (c'est-à-dire aucune trace d'eau liquide amenée par le gaz en mouvement) tandis que le débit minimum a été choisi de manière à ce que les bulles qui apparaissent dans le barboteur se forment de manière régulière. Les valeurs réelles du débit n'ont pas été mesurées.

La température à l'intérieur du barboteur a été contrôlée en modifiant la température du bain dans lequel il plongeait. Les températures du gaz à l'entrée et à la sortie de l'échantillon test ont été mesurées (mais pas l'humidité).

En ce qui concerne l'huile, elle a été déposée sous forme de film à l'intérieur du tuyau ou introduite via une nourrice d'huile. Dans ce dernier cas, l'aspiration de l'huile se fait par un siphon à l'aide d'une petite restriction placée à côté de la nourrice ; elle s'arrête dès que la pression à l'intérieur du circuit augmente. Le schéma du dispositif est disponible ci-dessous.

La montée en pression a été identifiée par l'éjection du couvercle du barboteur.

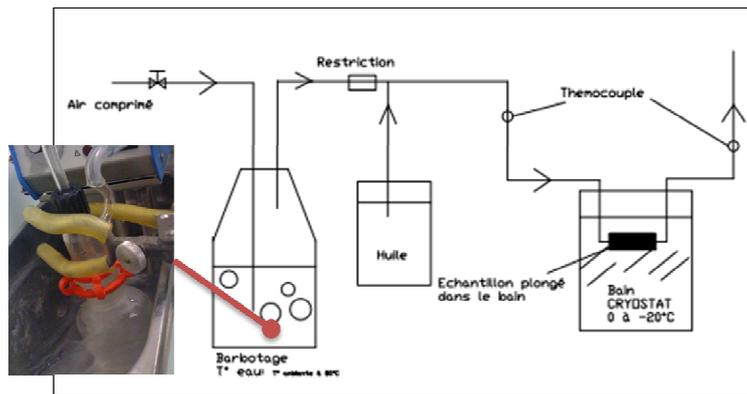


Figure 41 : Dispositif utilisé lors des essais préliminaires

3.3 Les phénomènes attendus

Considérons les schémas typiques du circuit de blow-by (Figure 42). Les deux schémas représentent le flux des gaz avec le papillon sur la ligne d'air qui est soit complètement fermé soit complètement ouvert. En régime statique, en tenant compte des conditions locales en termes de températures et de compositions de gaz, les phénomènes principaux attendus sont détaillés sur les deux figures. Ils comprennent la condensation, l'accrétion de glace (ou de particules liquides), la formation d'émulsion, la formation de glace par solidification de condensat et la formation de givre.

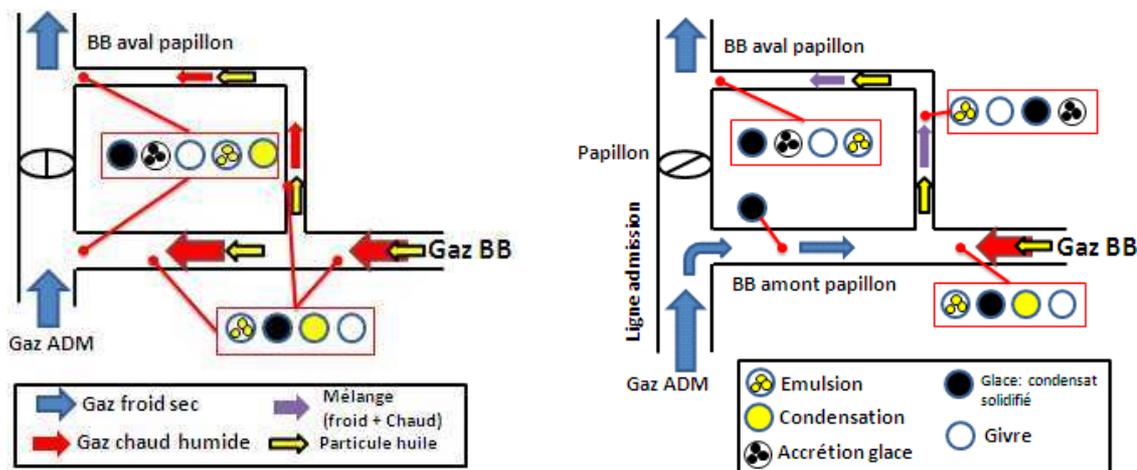


Figure 42 : Phénomènes élémentaires attendus sur le circuit de blow-by type essence en condition statique

Interprétation de la figure :

- Dans les endroits où le gaz humide est en contact avec le gaz froid, le phénomène d'accrétion peut apparaître. Ce phénomène consiste en la condensation ou la solidification en masse de la vapeur d'eau ainsi que le dépôt aérodynamique des particules sur les parois. Ce phénomène concerne essentiellement la portion du tube au voisinage immédiat des piquages sur la ligne d'admission. Avec la cristallisation de condensat, ce phénomène participe à l'accumulation de glace à cet endroit, sans forcément être l'acteur majoritaire. L'accrétion ne sera pas pris en compte dans le cadre de cette thèse (car cela nécessite une chambre climatique, compte tenu du débit d'air d'admission nécessaire : 5,4 kg d'air froid /min).
- Si le papillon est ouvert, la formation de condensat est envisageable dans toute la zone chaude parcourue par le gaz de blow-by. Par contre, si le papillon est fermé, toute la portion du circuit amont et aval papillon est traversée par le gaz froid, on observe donc la formation de givre, d'accrétion de particules ou de solidification de condensats (liquide provenant de la portion de tube avant la ramification).

- La formation de glace par solidification de condensat est possible chaque fois que le phénomène de condensation est présent (formation sur l'endroit à étudier ou à l'amont du point en question). Il concerne donc toute la portion du tube traversé par le gaz de blow-by chaud.
- La formation de givre est envisageable tout au long du tube de blow-by. Il est similaire au phénomène de condensation sauf qu'il nécessite une température, un débit et une humidité de gaz plus faible.
- Le phénomène d'émulsion est attendu dès que l'eau liquide et l'huile sont simultanément présentes. Il concerne toute la portion du tube traversée par le blow-by si le papillon est ouvert. Il devrait être de plus en plus important au fur et à mesure qu'on s'approche du carter (ou du déshuileur)

L'étude de la physique des phénomènes de gel et émulsion de blow-by tourne donc autour de ces divers phénomènes élémentaires ainsi que leur combinaison en un point donné du circuit. Notons toutefois que du point de vue pratique, il est difficile de distinguer séparément les différents phénomènes compte tenu de leurs interactions, de la ressemblance des résultats obtenus et l'aspect non stationnaire des conditions locales. Ainsi le givre peut être lessivé par des condensats quand la température augmente, une émulsion peut être mélangée avec du condensat pur ou de l'huile pure. La glace peut être présente en même temps avec de l'eau liquide. L'accrétion de glace et les condensats solidifiés peuvent conduire à un seul bloc de glace, etc.

3.4 Analyse théorique des phénomènes en jeu

Du point de vue thermodynamique, si on refroidit un air humide, de température et d'humidité données, sur une paroi, on s'attend à observer la condensation ou l'ablimation partielle de la vapeur comme il est prédit par le diagramme d'état simplifié suivant :

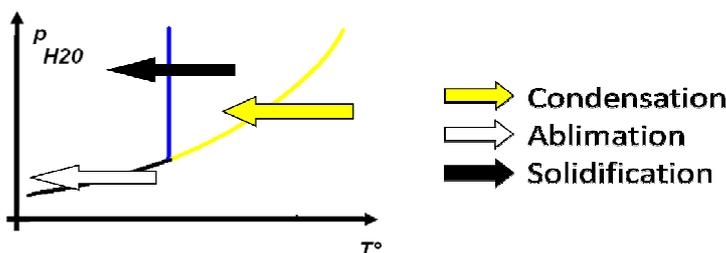


Figure 43 : Phénomènes mis en jeu

En outre, malgré une température positive de gaz, le condensat lui-même est susceptible d'évoluer en glace par solidification compte tenu de la distribution non uniforme de la température de paroi ou de l'apparition d'une température négative au sein du liquide lui-même à cause de sa propre résistance thermique.

3.4.1 La formation du givre

Physiquement, le phénomène de formation du givre peut être décrit par la figure suivante. De plus amples détails sont disponibles en annexe.

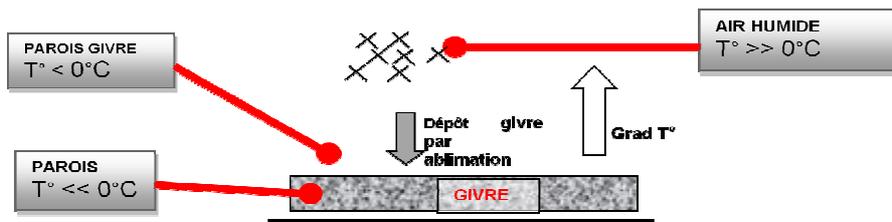


Figure 44 : Condition d'existence du phénomène de formation de givre

Ce phénomène est envisageable puisque la gamme de température de paroi qui nous concerne est suffisamment faible par rapport à 0°C. En outre, comme il est montré sur la Figure 45, certaines conditions de débit et de dimension de l'échantillon se trouvent dans la zone de convection laminaire. Ce qui devrait favoriser l'établissement d'une certaine couche limite de convection, siège d'un important gradient de température, contribuant ainsi au maintien de la température, au voisinage de la paroi, inférieure à 0°C bien que le gaz dans la veine d'essai soit beaucoup plus chaud.

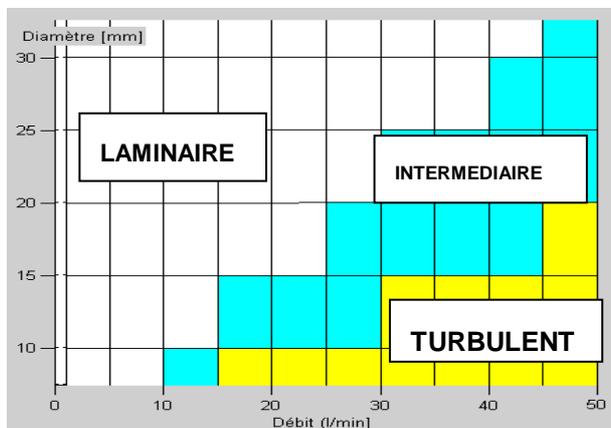


Figure 45 : Distribution des régimes de convection pour une conduite cylindrique lisse (en régime établi)

Notons que la condition requise pour pouvoir entretenir un phénomène de givre dans des conditions de type blow-by reste à définir. En effet, dans la littérature, le phénomène de givre a été généralement identifié dans des contextes de convection naturelle (domaine des dispositifs cryogéniques) ou dans le domaine des échangeurs de chaleur travaillant en convection forcée mais qui, contrairement au gaz du circuit de blow-by, sont soumis à des gaz relativement froids et secs (températures de rosée et de gaz inférieures à 20°C).

Lors des essais préliminaires, la formation de givre a été observée pour toutes les conditions de débit faible et toutes les conditions d'humidité faible (température de barbotage 20°C). Ces essais ont montré que la quantité de givre qui se forme diminue très rapidement vers l'aval du tube et presque la totalité du givre a été localisée sur le premier contact entre le gaz chaud et le bain froid (-18°C).

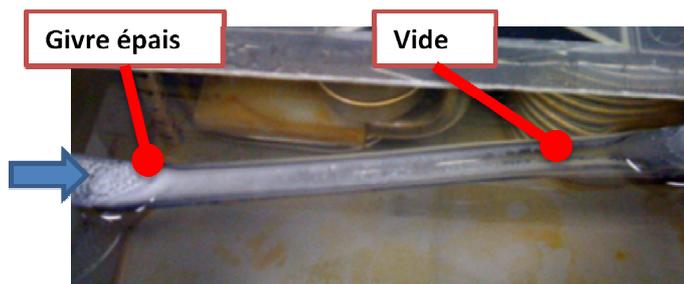


Figure 46 : Exemple de givre à basse température de bain lors des essais préliminaires.

Remarquons aussi que dans les circuits fermés comme les circuits de blow-by, l'air humide subit un refroidissement et un séchage progressif lors de son déplacement. Ce qui veut dire que même si la formation de givre n'est pas envisageable par rapport au gaz frais issu du carter, une **condition givrante** est toujours possible dans les circuits plus en aval. Cela est d'autant plus vrai que les déshuileurs, qui se situent en amont des tubes de blow-by, ont une importante surface exposée au froid.

La frontière entre la formation de givre et la **condensation suivie de solidification** n'a jamais été clairement établie. Néanmoins, de nombreux auteurs soulignent que dans certaines conditions (notamment de températures, turbulence et humidité élevées) l'eau liquide apparaît à la surface du

givre dès que celui-ci devient suffisamment épais [95][96]. Cela s'explique par le fait que la conduction thermique à travers le givre n'est plus assurée à cause de l'épaisseur et la température à la surface devient positive. Le phénomène d'ablimation est donc remplacé par la condensation et une partie de la structure poreuse de la glace fond (figure suivante).

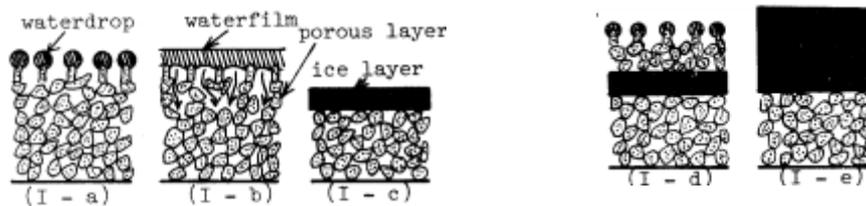


Figure 47 : Phénomène de givrage et perméation

L'eau ainsi présente se déplace ensuite par perméation dans la matrice de givre poreux la rendant plus compacte et plus conductrice. Ce qui permet la diminution de la température à la surface et donc la reprise des phénomènes de givrage jusqu'à ce que l'épaisseur des nouveaux dépôts devienne de nouveau trop épaisse pour assurer la conduction (Figure 47). A terme, le givre devient très compact et est difficile à distinguer par rapport à la glace issue de la solidification de condensat.

Rappelons que le développement des couches de givre se ralentit quand l'épaisseur augmente. Ainsi contrairement à la condensation, il est impossible de mettre en équation la formation du givre sans se soucier du facteur temps et des divers phénomènes qui se déroulent en parallèle avec la formation de givre. Autrement, cela conduirait à des calculs fastidieux et inutiles puisque pour le blow-by, les phénomènes sont soumis à des conditions opératoires non stationnaires (débit et température variables) et que la formation de givre est couplée avec d'autres phénomènes qui sont susceptibles de modifier le déroulement de son développement (condensation, lessivage du givre par l'eau liquide, lessivage par des films d'huile provenant du déshuileur).

3.4.2 La condensation

Les phénomènes de gels et d'émulsions de blow-by se passent dans des conditions de température ambiante très faible ($< -10^{\circ}\text{C}$). Toutefois, la température de paroi interne des tubes peut être proche de 0°C voire positive compte tenu de la chaleur apportée par le gaz de blow-by lui-même ainsi que la résistance supplémentaire apportée par les parois des tubes et le faible coefficient de transfert sous le capot. La vapeur d'eau se dépose dans ce cas sous forme de liquide ou de condensat. Elle se déplace facilement à travers les tuyaux sous l'action des forces de cisaillement apportées par le gaz en mouvement ainsi que toutes autres forces extérieures (vibration des parois, pesanteur). Le phénomène de condensation est donc sensible à l'orientation des pièces ainsi qu'à la présence ou non d'éléments capables de retenir ou d'évacuer les condensats ainsi formés.

Nous avons vu que, selon l'angle de contact de la paroi, le phénomène de condensation peut se faire sous forme de goutte ou sous forme de film. Les phénomènes physiques de ces deux types de condensation sont détaillés dans le paragraphe §2.4. En ce qui nous concerne, nous ne nous attendons pas à une différence significative entre les deux cas compte tenu de la faible quantité de vapeur d'eau mise en jeu. En outre, la présence de film d'huile à l'intérieur des circuits de blow-by rend obsolète toute tentative d'étudier séparément les deux cas de figure par les méthodes usuelles qui sont basées sur la mouillabilité des surfaces.



Figure 48 : Phénomènes de condensation

Compte tenu de cela, nous allons recentrer l'étude sur le cas de la condensation sur une surface sèche et constater par la suite l'impact des films d'eau, des gouttes d'eau ainsi que de la présence d'huile sur le phénomène à travers des expériences complémentaires.

3.4.3 La solidification

La solidification est le passage de l'état liquide vers l'état solide de l'eau issue des phénomènes de condensation. Elle est attendue dans la mesure où la température de paroi interne peut descendre en dessous de 0°C qui correspond à la température de l'ambiance sous capot. Connu aussi sous le nom de gel de blow-by, la solidification correspond à la formation de la glace dans le circuit.

Quatre cas sont envisageables :

Le premier cas consiste à la cristallisation immédiate de l'eau liquide juste après sa formation. Dans ce cas, la glace se forme et s'accumule localement jusqu'à boucher totalement le circuit. Un tel scénario est possible si la température de paroi interne est maintenue suffisamment basse et le débit de condensation suffisamment faible pour assurer le refroidissement spontané de la totalité des condensats qui se forment.

Le deuxième cas correspond à la cristallisation progressive du condensat le long de son déplacement. Ce scénario envisageable si le débit de condensation est relativement élevé de sorte que la température de cristallisation n'est atteinte qu'après un certain parcours du liquide le long de la paroi froide. Ce sera aussi le cas si la température de paroi n'est pas uniforme (exemple : transfert de chaleur limité par la convection externe, paroi épaisse, exposition au froid des divers pièces).

Dans le troisième cas, le phénomène est régi par des transferts de chaleur transitoires, la solidification se passe sur le lieu de condensation mais ne commence qu'au delà d'un certain temps de contact, c'est-à-dire quand l'eau qui s'accumule atteint le degré de sur-refroidissement requis.

Dans le dernier cas, le phénomène concerne la cristallisation des condensats liquides qui s'accumulent avant l'arrêt des véhicules. Elle est aussi envisageable si la condition de fonctionnement du moteur fait alterner dans le circuit blow-by des **conditions condensantes** avec des conditions plus favorables à des températures de paroi froides. Dans la mesure où les phénomènes stationnaires ne sont pas encore éclaircis, ce dernier scénario ne sera pas traité expérimentalement dans notre étude. Il peut toutefois être estimé en se servant des calculs relatifs aux condensations pures qui ont généré l'eau avant sa transformation en glace.

3.4.4 La formation d'émulsions

La formation d'émulsion peut être expliquée par la combinaison des phénomènes suivants :

On a d'abord le dépôt de particules d'huile sur l'eau stagnante en présence de tensioactifs (présents dans l'huile) et en présence d'éventuelles agitations (vibration du moteur, fluctuation du débit, cisaillements par le gaz en déplacement). Dans ce cas au moins une partie de l'huile se met sous forme dispersée.

Puis, la condensation de la vapeur d'eau sur un film d'huile en présence de tensioactifs et d'éventuelles agitations peut prendre place. Dans ce cas, il est probable qu'au moins une partie de l'eau est sous forme dispersée. Ce scénario est confirmé, lors des essais préliminaires, par l'obtention des émulsions par simple refroidissement de l'air humide sur un film d'huile déposé à l'intérieur de l'échantillon de test. Les résultats observés sont les suivants :

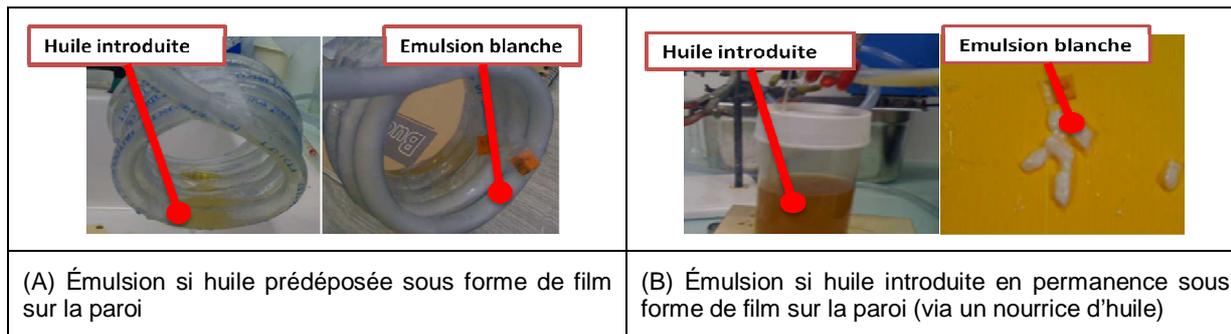


Figure 49 : Formation d'émulsion en présence de film d'huile (Essai préliminaire)

Enfin on peut avoir la déposition simultanée de la vapeur et des particules puis la stabilisation de l'émulsion obtenue par les tensioactifs présents dans l'huile. L'eau et l'huile peuvent donc être à la fois présentes dans la phase dispersée. Ce cas de figure est le plus probable dans le circuit aval du déshuileur. Il a été reproduit à travers des essais effectués par l'ENSCP et le CERTAM [97]. Les émulsions qui ont été obtenues sont illustrées sur la figure ci-dessous.



Figure 50 : Émulsion obtenue par huile atomisée et condensation de l'air humide (CERTAM/ENSCP)

3.4.5 Conclusion sur les phénomènes

En régime stationnaire, dans les conditions de fonctionnement du véhicule (régime et charge constants), les phénomènes attendus pour l'émulsion et le gel de blow-by comprennent : la condensation, la formation de givre, la solidification de condensat, la formation d'émulsions et l'accrétion de particules de glace ou de liquide.

Pour cette étude on se concentrera sur tout ce qui se passe à l'intérieur du tube traversé exclusivement par le gaz de blow-by. Ce qui limitera notre étude à la formation de givre, à la condensation, à la formation de glace par solidification et à la formation d'émulsion. Les phénomènes d'accrétion étant possible seulement si le gaz de blow-by et l'air froid entre en contact à l'intérieur du tube de blow-by (cas d'un papillon fermé).

Les divers phénomènes ont leur propre physique qui les gouverne et sont différents les uns des autres. Il est donc nécessaire de bien définir l'importance respective de chaque phénomène pour chaque condition à étudier et, par la même occasion, de bien définir les frontières physiques qui les séparent à l'intérieur d'un tuyau.

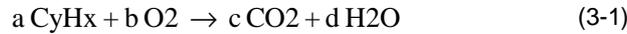
3.5 La composition en eau du gaz de blow-by

Dans cette partie de l'étude, nous allons évaluer la composition en eau du gaz de blow-by. Pour cela nous allons d'abord considérer l'origine de l'eau dans le gaz de blow-by puis nous évaluerons sa quantité maximale et sa quantité minimale en tenant compte des changements qu'elle peut subir le long de son parcours. Enfin nous montrerons un exemple de quantité réelle mesurée.

Après établissement des plages d'humidité du gaz blow-by, nous allons expliquer le rôle de l'humidité dans les processus de formation de gels et d'émulsions et conclure sur la plage choisie pour la suite de l'étude.

3.5.1 Origine de l'eau dans le gaz de blow-by.

Comme il a été expliqué auparavant, le gaz de blow-by provient essentiellement des fuites de gaz de la chambre de combustion à travers les segmentations. Il est donc évident que l'eau contenue dans le gaz de blow-by provient majoritairement du gaz de combustion. Ce dernier étant très humide compte tenu de la quantité importante d'eau produite lors de la combustion des hydrocarbures :



Toutefois, sachant que le gaz de l'air d'admission peut être aussi lui-même déjà humide (humidité ambiante et/ou humidité provenant de l'EGR). On peut aussi envisager qu'une partie de l'eau pourrait provenir du gaz d'admission.

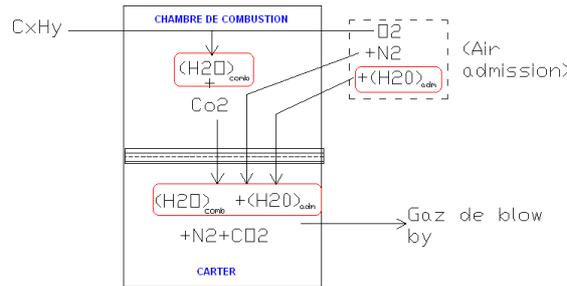


Figure 51 : Origine de l'eau dans le gaz de blow-by

Enfin, comme le gaz de blow-by peut contenir une quantité non négligeable d'air ambiant injecté dans le circuit par la pompe à vide. On peut donc considérer que l'air de la pompe à vide peut aussi amener de l'eau dans le circuit.

3.5.2 Quantité maximale d'eau dans le gaz de blow-by

Le gaz de combustion est beaucoup plus humide que tous les autres gaz (gaz d'admission et gaz de la pompe à vide) constitutifs du gaz de blow-by. L'humidité du gaz de blow-by est donc majorée par l'humidité du gaz de combustion.

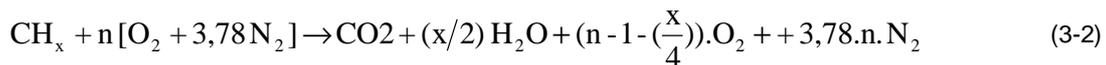
L'humidité du gaz de combustion varie avec le carburant et le déroulement de la combustion elle-même. Elle est donc différente d'un moteur à l'autre et elle change avec la **richesse**³ de la combustion.

Pour déterminer la quantité d'eau pouvant être présente dans le gaz de combustion, considérons les hypothèses suivantes :

- L'air est composé de 23,2 % d'O₂ et 76,7% N₂ en termes de masse.
- L'air est admis sec dans la chambre de combustion
- Les carburants peuvent être représentés par l'hydrocarbure CH_x.

3.5.2.1 Cas de la combustion pauvre ou stœchiométrique

Pour un mélange stœchiométrique, la réaction de combustion s'écrit comme suit :



Avec

$$n = \left(1 + \frac{x}{4}\right) \cdot \frac{1}{\Phi} \quad (3-3)$$

Φ représente la richesse

³ Définition disponible à la fin du manuscrit

La valeur de x varie d'un carburant à un autre, sa plage de variation est définie par le tableau suivant [98] :

x dans CH _x	Min	Max
Essence	1,7	1,9
Gazole	1,9	2,1

Tableau 1 : Rapport atomique $x = n_H / n_C$ pour différent carburant

A partir de la réaction de combustion et en se servant des équations (2-11) et (2-12), il est possible de calculer l'humidité absolue et le point de rosée du gaz de combustion pour différentes valeurs de x. Les résultats que nous avons obtenus peuvent être résumés par la figure suivante :

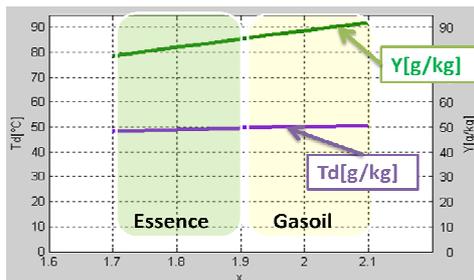
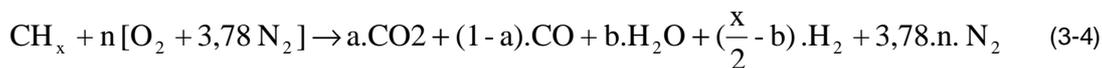


Figure 52 : Température de rosée et humidité absolue du gaz de combustion en fonction du carburant si $\Phi=1$

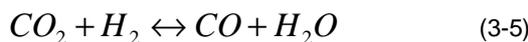
Comme le montre la Figure 52, dans les conditions stœchiométriques, l'humidité du gaz varie légèrement avec la composition du carburant. Par contre, la température de rosée est relativement insensible à ce paramètre. Elle reste aux alentours de 50°C.

3.5.2.2 Comparaison entre une combustion pauvre et une combustion riche

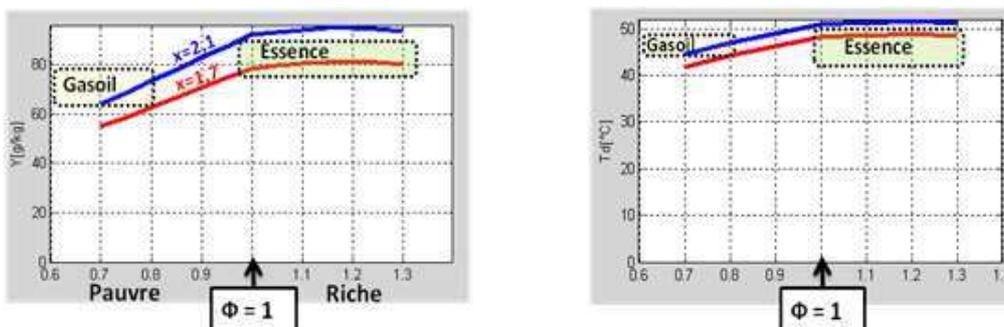
Si la richesse de la combustion est supérieure 1, la combustion sera incomplète. Par conséquent, en plus du CO₂ et de H₂O, le gaz de combustion contiendra aussi des imbrulés tels que CO et H₂. Dans ce cas, l'équation de la combustion est donnée par :



Et :



Sachant que la constante d'équilibre K régissant la réaction (3-5) est égale à 3,8 [98], on peut déterminer les constantes a et b et calculer par la suite l'humidité du gaz de combustion en fonction de la richesse et de x. Les calculs ont permis d'obtenir les figures de comparaison suivantes :



(A) Humidité absolue en fonction de la richesse de la combustion

(B) Température de rosée en fonction de la richesse de la combustion

Figure 53 : Influence de la richesse sur l'humidité du gaz de combustion

Comme le montrent ces figures, l'humidité absolue du gaz de combustion décroît quand la richesse de la combustion décroît au delà de la stœchiométrie. Cela s'explique par la diminution du taux de transformation de l'hydrocarbure qui conduit à la réduction de la quantité d'eau formée.

Du point de vue de température de rosée, la valeur varie de 41°C à 50°C. Elle est maximale quand la richesse est supérieure ou égale à 1. L'impact du carburant est toujours négligeable.

Si on prend en compte à la fois la nature du carburant (valeur de x) et la richesse utilisée dans les moteurs à combustion interne, on voit que l'humidité du gaz est plus élevée pour les moteurs à essence ($Y \sim 80$ g/kg, $T_d \sim 50^\circ\text{C}$) que pour les moteurs Diesel ($Y \sim 70$ g/kg, $T_d \sim 44^\circ\text{C}$).

3.5.3 La quantité réelle de l'eau dans le gaz de blow-by

3.5.3.1 Origine de la dilution du gaz de blow-by

Les mesures ont montré que la quantité réelle de l'eau dans le gaz de blow-by est dans la plupart des cas, inférieure à la quantité d'eau théoriquement présente dans le gaz de combustion pur. Pour expliquer cette différence, prenons les courbes de pression et d'avancement de combustion à l'intérieur de la chambre de combustion (détail disponible dans la référence [99]) et superposons les avec le profil de débit de blow-by tel qu'il a été proposé par Lecompte [100]. On obtient la figure suivante :

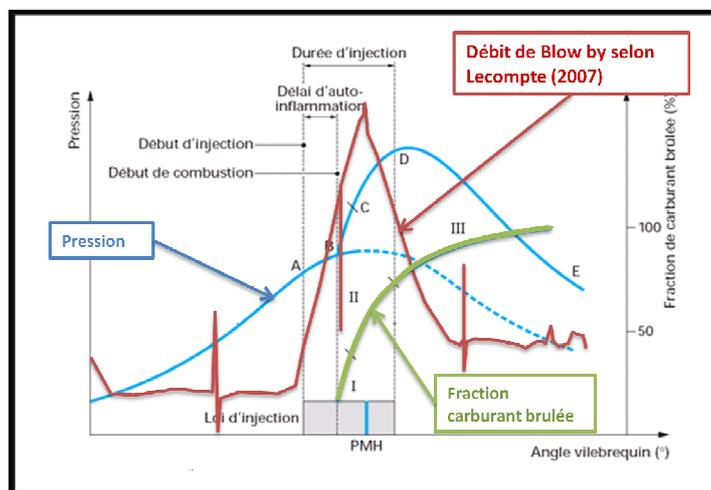


Figure 54 : Explication de l'humidité élevée du gaz de blow-by

La Figure 54 montre que :

- Une partie des gaz dans le blow-by est dégagée avant même que la combustion commence. Ce gaz ne peut contenir que du carburant et de l'air d'admission. Il serait donc aussi sec que l'air ambiant introduit.
- Une autre partie du gaz s'échappe pendant la phase de combustion. Par nature, le gaz en question contiendrait à la fois de l'air (O_2 , N_2) et des gaz brûlés (H_2O , CO_2 , N_2).
- La dernière partie du blow-by s'échappe après la combustion. Ce gaz contiendrait essentiellement des résidus de combustion et aurait une humidité équivalente à celle du gaz de combustion seul ($T_d > 40^\circ\text{C}$, $Y > 58$ g/kg).

Ainsi, l'humidité finale du gaz de blow-by est conditionnée par l'enchaînement de ces différentes fuites. Théoriquement, la proportion de chaque fuite est donnée par l'aire se trouvant en dessous de la courbe de débit pour chaque pas de degré vilebrequin. Deux cas peuvent se présenter. Si la majorité du gaz n'est dégagé qu'après la montée en pression, c'est-à-dire après le début de la combustion, le gaz final aura une humidité proche du gaz de combustion. Par contre, si la majorité du gaz est dégagé pendant la phase basse pression (effet de plaquage des segmentations par la pression), le gaz sera plus sec et l'hygrométrie beaucoup plus faible par rapport au gaz de combustion.

Enfin, rappelons aussi que le gaz de blow-by peut être dilué par l'air sec provenant de la pompe à vide. Ce qui diminuera davantage son hygrométrie.

3.5.3.2 Application : cas du moteur EXXX

A l'heure actuelle, peu de données expérimentales sont disponibles en ce qui concerne la composition en eau du gaz de blow-by. Habituellement ces mesures sont déduites des mesures de CO₂ présent dans le gaz.

Les mesures sur les moteurs EXXX montrent que la concentration en CO₂ détectée dans le gaz de blow-by est beaucoup plus faible par rapport à la quantité de CO₂ d'un gaz de combustion. Cela confirme que le gaz de blow-by contient non seulement du gaz d'échappement mais aussi de l'air pur. La détermination de l'humidité du gaz à partir de ces mesures nous a conduits aux résultats suivants :

Pression partielle	Humidité absolue	Température de rosée
$p_{vap} = 29,7 \text{ mbar}$	$Y = 19,1 \text{ g / kg}$	$Td = 24,1 \text{ °C}$

Ce qui confirme que l'humidité réelle du gaz de blow-by est bien inférieure (quatre fois plus faible en Y) à celle du gaz de combustion pur (Y=80 g/kg et Td= 50 °C).

3.5.3.3 Impact de l'air de dilution sur l'humidité du gaz de blow-by

Nous avons vu que l'humidité réelle du gaz de blow-by est beaucoup plus faible que celle des gaz de combustion parce qu'il est dilué par de l'air sec provenant du gaz d'admission ainsi que d'autres sources. Afin de généraliser, déterminons l'impact de la quantité d'air de dilution sur le gaz de combustion. Pour cela partons des hypothèses suivantes :

- La combustion se fait pour une stœchiométrie de 1 (Température de rosée gaz de combustion = 50°C, Humidité absolue gaz de combustion 89 g/kg)
- Le gaz d'admission est complètement sec ($Y_{adm} = 0 \text{ g/kg}$)
- Le taux de dilution est donné par :

$$\text{Taux.dilution} = \frac{(m_{air})_{adm}}{(m_{air})_{echap}}$$

En partant de ces hypothèses et en se servant de la définition de l'humidité absolue, nous avons pu tracer l'évolution de l'humidité et du point de rosée du gaz de blow-by pour différents taux de dilution. Le résultat obtenu est le suivant :

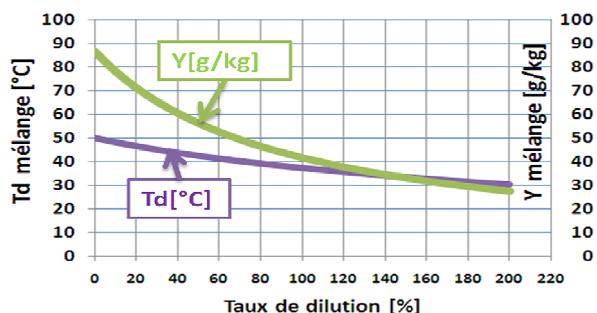


Figure 55 : Impact du taux de dilution sur l'humidité du gaz de blow-by

Les courbes montrent que l'impact de la dilution sur l'humidité diminue avec le taux de dilution. Les humidités absolues faibles telles que celles de EXXX ne peuvent être obtenues que si la part de l'air d'admission dépasse 200% du gaz d'échappement. Ce qui signifie que la part du gaz d'admission devrait être au moins deux fois celle du gaz de combustion dans ce cas de figure.

3.5.4 Composition en eau après déshuileur

Avant d'atteindre le circuit de réadmission, le gaz de blow-by passe à travers des conduites et des parois froides telles que le circuit amont déshuileur et le déshuileur. Il peut donc subir des phénomènes de condensation et de givre conduisant la diminution progressive de l'humidité le long du parcours. L'ampleur de la déshydratation partielle du gaz de blow-by varie avec de nombreux paramètres dont les températures (gaz et paroi), les débits, les géométries, les longueurs de parcours, les surfaces exposées au froid, etc. Compte tenu de la grandeur de la surface du déshuileur pour certaines configurations, cette diminution de l'hygrométrie peut être assez importante. Notons toutefois que, même si le gaz devient plus sec en aval en termes d'humidité, l'eau peut toujours être présente avec le gaz sous forme de particules (gouttelettes ou particules de glace) ou de film provenant de la partie amont du circuit. Théoriquement, la valeur du point de rosée du gaz en sortie déshuileur est minorée par la température du gaz elle-même. La synthèse des essais sur banc rouleau indique que la température de gaz minimale rencontrée est de -10°C , soit une humidité de 1,6 g/kg si le gaz est saturé.

3.5.5 Analyse de l'influence de l'hygrométrie

3.5.5.1 Influence sur la condensation

Dans le paragraphe §2.4, nous avons vu que l'humidité joue un rôle important dans le phénomène de condensation :

En agissant sur le nombre de sites actifs, l'humidité ou plus précisément le rapport $p_{vap}/(p_{sat})_{T=tw}$, agit sur la température de nucléation (Equation (2-24)). Il a donc une influence directe sur la température de condensation du gaz de blow-by.

Du point de vue du transfert de masse, l'augmentation de l'humidité fait augmenter le gradient de concentration de vapeur entre le gaz et la paroi. Ce qui conduit à l'augmentation de la force motrice de la condensation et par conséquent l'augmentation du débit de condensation lui-même (Equation (2-74)). Pour des valeurs élevées d'humidité, une nette augmentation du coefficient de transfert de masse lui-même est attendu à cause des phénomènes d'aspiration (Equation (2-63)).

Du point de vue transfert d'énergie, l'augmentation de l'humidité fait augmenter l'énergie échangée au niveau des parois des tubes, ce qui a pour conséquence de modifier les températures locales des parois, aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des conduites (Equations (2-82), (2-92), (2-94)).

Indirectement, en modifiant les quantités de vapeur qui condensent, la variation de l'humidité entraîne une modification de la quantité des films de condensat et de la quantité des gouttes de condensat à l'intérieur des tubes. Ce qui pourrait entraîner un important changement des phénomènes mis en jeu (résistance des gouttes et des films, formation de particules, aspect des films, phénomènes d'inondation) ainsi que des coefficients de transfert correspondant. Les détails sur ces divers phénomènes sont expliqués dans les paragraphes §2.4.6 et §2.4.7

Enfin, en agissant sur la quantité d'eau qui condense, l'augmentation de l'hygrométrie pourrait aussi entraîner l'augmentation de la vitesse de formation de la glace provenant de la solidification des condensats. Cette tendance n'est pas toutefois généralisable dans la mesure où l'humidité agit aussi sur les autres facteurs tels que la température de paroi.

3.5.5.2 Influence sur le givre

Le phénomène de convection côté air étant similaire à celui de la condensation, l'influence de l'humidité sur le phénomène de nucléation et sur les transferts de masse et de chaleur n'est plus à démontrer. Des détails sur ces phénomènes sont expliqués en annexe (§A1.2 ; §A1.4.2.1 ; §A1.4.3.1 ; §A1.4.3.2 et §A1.5). De plus, comme il a été stipulé dans ces études bibliographiques, pour les givres, non seulement l'humidité agit sur la quantité totale de givre poreux qui se forme, mais aussi ils influent sur la structure même de givre dont sa densité et son épaisseur.

3.5.5.3 Influence sur l'émulsion

En agissant sur la quantité de condensat qui se forme à l'intérieur des tubes, l'humidité influence indirectement la formation et la stabilité des émulsions. Comme il a été expliqué dans le paragraphe §2.3.4.1, la quantité d'eau mise en jeu modifie le type d'émulsion qui se forme :

- Si le condensat est en quantité importante par rapport à l'huile, il devient la phase continue de l'émulsion (émulsion type H/E ou H/E/H) et la cristallisation est plus facile : température de solidification élevée voire 0°C.
- Sinon, si le condensat est en faible quantité, la phase continue est dominée par l'huile (Type E/H ou E/H/E) et la cristallisation de l'émulsion sera beaucoup plus difficile : température de solidification faible voire formation d'une émulsion non cristallisable.

En outre, en diluant la concentration des tensioactifs présents initialement dans l'huile, l'augmentation de la quantité d'eau qui condense peut modifier la stabilité des émulsions vis-à-vis de la température. Ainsi, par exemple, l'émulsion peut passer d'un mélange monophasique (type cristaux ou microémulsion W IV) vers une émulsion E/H ou H/E : voir Figure 15.

Enfin, en modifiant les proportions d'eau et d'huile, la modification de l'humidité du gaz peut aussi impacter la stabilité des émulsions vis-à-vis des phénomènes de coalescence (paragraphe §2.3.5.2.1) et des phénomènes d'inversion de phase (paragraphe §2.3.5.3.2). Ce qui a pour conséquence de modifier les propriétés de ces émulsions (viscosité en particulier) ainsi que leur température de cristallisation (paragraphe §2.3.6.2)

3.5.6 Conclusion sur l'hygrométrie

Les analyses bibliographiques ont souligné l'importance de l'hygrométrie sur la totalité des phénomènes de gels et d'émulsions de blow-by. Elle agit à la fois sur la formation de givre, la formation des émulsions et la formation de la glace provenant de la solidification de condensat.

Afin de vérifier ces différents impacts, il est impératif de pouvoir contrôler ce paramètre par la suite. Il nous faudra donc en tenir compte pour la conception du banc, la réalisation des essais et la modélisation physique. En particulier lors de la conception du banc, afin d'écartier tout risque d'interaction, nous aurons besoin de pouvoir maîtriser l'hygrométrie indépendamment des autres paramètres tels que la température du gaz, la concentration en particules d'huile et le débit de gaz.

En ce qui concerne la plage de variation, nous avons vu que le domaine d'hygrométrie du gaz de blow-by est contenu dans un très large intervalle d'humidité. L'hygrométrie peut être très importante, proche de celle d'un gaz d'échappement qui condense même à la température ambiante (20°C). L'humidité du gaz peut être aussi très faible si on prend en compte les risques de déshydratation du gaz dans le circuit amont. Enfin, l'une des mesures effectuées sur EXXX montrait qu'à cause de la dilution par l'air d'admission, l'humidité peut aussi être relativement faible même avant tout phénomène de déshydratation par condensation.

Nous avons adopté les domaines d'humidité suivants :

Grandeur considéré	Valeur min	Valeur max
Point de rosée Td	-10°C	50°C
Humidité absolue Y	1.61 g/kg	86.81 g/kg
Pression partielle si Patm	1.949 mmHg	92.631 mmHg
En termes de HR si gaz à 20°C	11%	-

Tableau 2 : Domaine d'hygrométrie

3.6 Le débit et la turbulence

3.6.1 Le domaine de débit

Le débit de blow-by total est la somme du débit provenant de la fuite de la segmentation et des débits provenant des autres fuites telles que celles de la pompe à vide, de la pompe à huile et des turbocompresseurs. De plus amples détails sont disponibles dans les paragraphes §1.3 et §3.2

Théoriquement, en ce qui concerne la fuite qui passe à travers la segmentation, le débit varie avec plusieurs paramètres dont l'étanchéité de la segmentation, le nombre de cylindres, la pression dans la chambre de combustion et la pression dans le carter. En particulier, il est constaté que le débit augmente avec l'âge du moteur, la segmentation étant de moins à moins étanche quand le moteur est utilisé.

La contribution de ces divers paramètres sur le débit ne peut être prise en compte dans le cadre de cette étude. On partira donc des mesures de débit et des cartographies expérimentales effectuées sur banc à rouleaux. Comme le montre la Figure 56, les cartographies prennent en compte des paramètres directement accessibles sur les moteurs tels que le type de moteur, le régime et la charge.

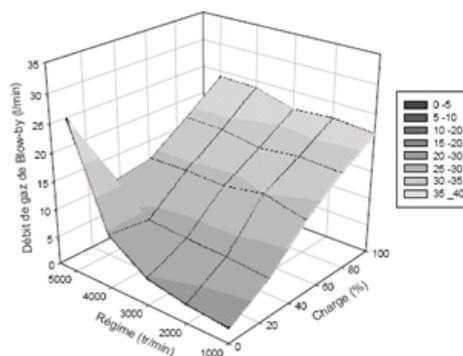


Figure 56 : Exemple de cartographie de débit de blow-by

En observant les cartographies des débits de blow-by pour les différents moteurs choisis dans le cadre de cette étude (détails expliqués dans la référence [1]), il s'avère que le débit de blow-by est généralement plus important pour les moteurs Diesel que pour les moteurs à essence. En outre, le débit est relativement constant pour les différents régimes. Par contre, il varie d'un moteur à un autre et augmente avec la charge. Ce qui est évident puisque cette dernière a un impact positif sur la pression dans la chambre de combustion.

Enfin, le sens de variation du débit n'est pas entièrement monotone en fonction des régimes et des charges, cela pourrait s'expliquer par l'effet de plaquage des segments qui ne varie pas de manière uniforme avec ces deux paramètres.

3.6.2 Le régime de turbulence

Le nombre de Reynolds (Re) permet de caractériser l'écoulement dans les tubes (laminaire/turbulent). On a:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (3-6)$$

- ρ est la densité
- V représente la vitesse du gaz
- D est le diamètre du tube
- ν est la viscosité cinétique
- μ est la viscosité dynamique

En appliquant ce nombre adimensionnel sur les débits mesurés dans les moteurs ainsi que sur les plages de diamètre de tuyau de blow-by correspondant, on obtient le domaine de Re de la Figure 57. Notons que le domaine de diamètre utilisé prend en compte le diamètre minimal et le diamètre maximal retrouvé le long du parcours du gaz (tuyau amont, tuyau aval, piquage amont, piquage aval).

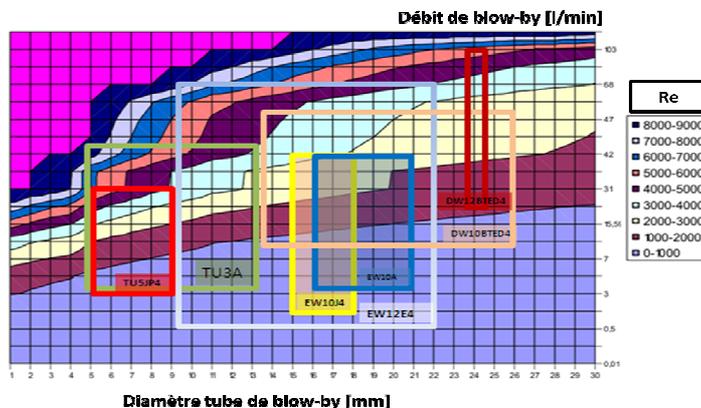


Figure 57 : Cartographie du nombre de Reynolds

Si nous supposons que le régime d'écoulement intermédiaire se trouve entre $Re = 2000$ et $Re = 3000$, on peut constater qu'à l'exception de ExxA les régimes d'écoulement couvrent à la fois le domaine laminaire, intermédiaire et turbulent.

3.6.3 Analyse des influences du débit et de la vitesse du gaz

L'influence de la vitesse et du débit de gaz se manifeste de trois manières différentes sur les phénomènes qui se déroulent à l'intérieur du tube de blow-by.

3.6.3.1 Impact de la vitesse ou du débit à travers les coefficients de transfert

Le premier impact concerne les coefficients de transfert thermique et massique à l'intérieur des tubes. Comme il a été montré à travers les diverses corrélations dans le chapitre précédent (§2.4.4.3 ; §2.4.5.6 ; §2.4.5.7 ; §2.4.5.8) les coefficients de transfert total augmentent avec le débit, plus précisément avec le nombre de Reynolds du gaz.

- Pour la condensation, cela entraîne une augmentation de la quantité de chaleur échangée ainsi qu'une augmentation du flux de condensation au niveau de la paroi. Ce qui entraîne l'augmentation des températures locales de paroi et par la suite l'empêchement de la solidification des condensats en glace.
- Pour les phénomènes de givrage, théoriquement, l'augmentation du débit entraîne surtout la formation d'un givre plus dense mais l'épaisseur ne change que très faiblement (voire annexe : § A1.5).

Rappelons toutefois que, d'une manière générale, l'impact de la vitesse augmente de manière logarithmique. A partir d'une certaine vitesse de gaz, le régime devient entièrement turbulent le coefficient de transfert ne change presque plus avec la vitesse.

3.6.3.2 Impact de la vitesse ou du débit sur la quantité de chaleur et la quantité d'eau introduite.

L'existence des phénomènes de convection et de condensation implique que le gaz de blow-by subit une déshydratation et un refroidissement partiel au fur et à mesure qu'il se déplace dans les conduites. En appliquant le bilan matière et le bilan énergétique sur une section de conduite donnée, on constate que pour un coefficient transfert identique, le gaz sortant du volume étudié est d'autant plus froid et plus sec que le débit est faible.

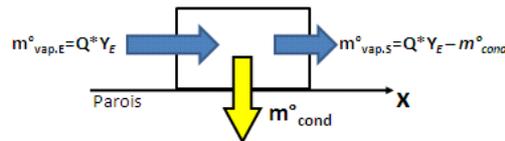


Figure 58 : Bilan eau sur une portion élémentaire de conduite

Ainsi, même si l'impact du débit sur le coefficient de transfert local est négligeable à vitesse de gaz élevée, son impact sur l'évolution de la température et de l'humidité le long de la conduite ne peut être ignoré :

- Dans le domaine de la condensation, l'augmentation du débit permet de maintenir élevées l'humidité et la température du gaz le long de son parcours (faible temps de séjour). Par conséquent, la quantité de chaleur totale échangée et la quantité totale d'eau qui condense dans tous le volume sont élevées. La même tendance est attendue pour la température du gaz : Si le débit est élevé, la température du gaz évolue peu et les échanges thermiques totaux seront plus importants.
- Dans le domaine de givrage, l'augmentation du débit permet de maintenir constante l'humidité du gaz le long du parcours, ce qui entraîne l'homogénéité de la densité et de l'épaisseur du givre dans tout le tube. Par contre, pour un débit faible, la vapeur disparaît très vite et la quantité de givre diminue progressivement au fur et à mesure que le gaz avance.

3.6.3.3 Impact sur le déplacement du film de condensat

L'impact de la vitesse de gaz sur les films de condensat et sur les gouttes de condensat est détaillé dans les paragraphes § 2.4.6 et §2.4.7. A travers ces analyses bibliographiques, il est évident que plus la vitesse des gaz est élevée, plus le coefficient de transfert local se rapproche du cas idéal pour lequel, les films et les gouttes de condensat sont aux mêmes températures que la paroi interne de la conduite (étalement des films, renouvellement du surface de contact par l'entraînement des gouttes).

Dans le meilleur des cas, en favorisant la formation d'irrégularités sur les surfaces des films, l'augmentation de la vitesse pourrait même conduire à une augmentation du coefficient de transfert par rapport aux coefficients de transfert sur une paroi sèche. Enfin, en arrachant une partie du film de condensat, l'augmentation de la vitesse du gaz peut conduire à la création de particules de liquide à l'intérieur de la phase gazeuse. Ce qui peut entraîner un changement radical des phénomènes observés en termes de solidification de condensats ou de formation d'émulsions.

3.6.3.4 Autres impacts

En dehors de ces différents impacts, rappelons que la vitesse des gaz peut aussi influencer les dépôts des particules d'huile présents dans le gaz de blow-by sur la paroi du tube. Ce qui pourrait entraîner la modification des phénomènes d'émulsions résultants.

3.6.4 Conclusion sur le débit et la turbulence

Nous avons montré que le débit ainsi que la vitesse des gaz sont des paramètres incontournables pour l'étude des gels et des émulsions de blow-by. Le débit et la vitesse des gaz agissent à travers différents paramètres intermédiaires dont les coefficients de transfert côté gaz, le transfert de chaleur côté condensat et le transport de particules de liquide. Ils impactent aussi bien les phénomènes de condensation et de givrage que le phénomène d'émulsion.

En se basant sur les résultats d'essais sur banc climatique, les domaines de débit et du nombre de Reynolds sont reportés dans le tableau suivant :

	Min	Max
Débit [L/min]	0	105
Re	0	9000

Tableau 3 : Domaine de débit et de turbulence

Dans la pratique, on prendra un débit maximal de 50 L/min. Les débits les plus élevés ont été obtenus dans des conditions opératoires moins souvent rencontrées dans les différentes situations de vie du véhicule : débit de pompe à vide important, fonctionnement en pleine charge.

3.7 La température du gaz

Avant d'expliquer l'influence de la variation de la température des gaz, il est nécessaire de souligner la différence entre l'impact de la modification de la température avec une humidité relative constante et avec une humidité absolue constante.

Si l'humidité relative est constante (par exemple si le gaz est toujours saturé), la modification de la température est associée à un changement de la concentration en vapeur. Pour le gaz de blow-by, ce cas de figure est envisageable si la variété de températures du gaz à l'entrée du circuit est la conséquence d'un refroidissement (et condensation) d'un gaz saturé dans le circuit amont du tube à étudier.

Par contre, si l'humidité absolue est constante, la variation de la température correspond seulement à la modification de chaleur sensible apportée par le gaz mais la quantité de vapeur ne change pas. Le gaz devient donc plus ou moins saturé selon l'humidité relative résultante. Pour les gaz de blow-by, ce cas de figure est possible si la variété de la température du gaz provient d'un réchauffement ou d'un refroidissement partiel du gaz dans le circuit amont du tube sans pour autant atteindre la saturation.

La figure suivante résume les deux manières de faire varier la température d'un gaz humide:

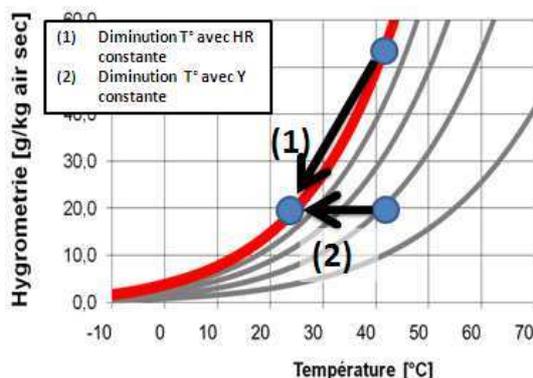


Figure 59 : Exemple de diminution de température de gaz humide dans le diagramme psychrométrique

Au niveau du tuyau de blow-by proprement dit (sortie déshuileur), le scénario (1) semble être favorisé compte tenu du fait que les gaz initialement chauds et humides sortant du carter, sont d'abord exposés aux parois froides des déshuileurs (importante surface de contact) avant d'atteindre le tuyau. Les quelques mesures d'humidité relatives disponibles confirment que le gaz à cet endroit est proche de la saturation.

3.7.1 Plage de température du gaz de blow-by

La température des gaz au niveau du tuyau de blow-by dépend à la fois de la caractéristique du gaz à la sortie du carter et de la perte thermique qu'il a subi à l'extérieur du carter. D'une part la température en sortie carter est liée au type de moteur et aux conditions de fonctionnement à travers divers paramètres intermédiaires tels que l'environnement dans le carter (température de l'huile, température du bloc moteur, agitation interne), les débits et l'humidité au niveau des fuites des segmentation, le débit de l'air venant de la pompe à vide, etc. D'autre part, les pertes thermiques dans le circuit externe dépendent de la géométrie, de la longueur et de la taille du circuit de blow-by (tuyau et déshuileur). Elles sont aussi fonction des conditions de températures externes et de l'environnement sous capot (coefficient de convection externe) qui est lui-même fonction de la vitesse du véhicule et de la disposition des pièces.

Afin de ne pas surcharger inutilement l'étude, nous partirons directement de la température mesurée pendant les essais de roulage sur banc climatique. Ce qui nous permettra d'avoir le contrôle sur un paramètre indépendant, facilement reproductible et mesurable. La figure suivante montre un exemple typique des températures mesurées lors de ces essais.

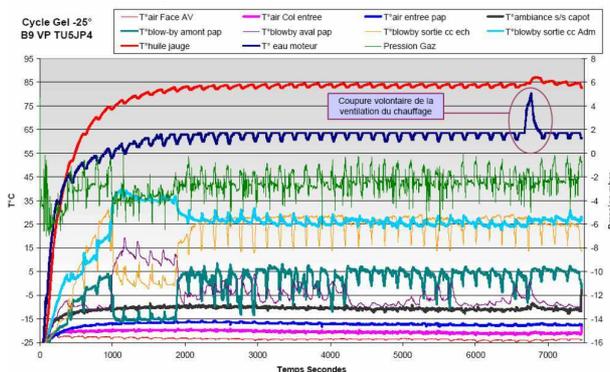


Figure 60 : Profil de température essais gel

Comme le montre la Figure 60, les températures sont différentes pour les différents points de circuit de blow-by. Elles diminuent avec le parcours et sont de plus en plus faibles vers l'aval du circuit. Le profil comporte une phase transitoire correspondant à la montée en température du moteur (en particulier de l'huile) suivie par une phase assez stable malgré la fluctuation des régimes utilisés lors des essais.

Comme les bouchons de glace et d'émulsions sur véhicules sont observés essentiellement après un temps relativement long et que la durée de la phase stationnaire est assez importante par rapport à la durée de la phase transitoire initiale, on concentrera l'étude sur la partie stable des profils de températures.

Afin de définir notre domaine de température pour l'étude, nous avons exploité la base de données d'essais que nous avons construite. Elle comporte les résultats des 140 essais de gels et d'émulsions effectués sur les moteurs DV, EW, DW et TU.

3.7.2 Analyse des influences

Distinguons le cas de la condensation, du givre, de l'émulsion et de la formation de glace.

3.7.2.1 Condensation

Pour la condensation, l'influence de la température peut être constatée à travers l'équation (2-81). Ce qui montre que l'augmentation de la température fait augmenter le flux d'énergie échangé à travers les parois, elle devrait donc conduire à l'augmentation de la température interne des parois et par conséquent à la diminution du flux de condensation (diminution du gradient d'humidité défini par l'équation (2-74)).

3.7.2.2 Émulsion

En réchauffant les émulsions, la montée en température des gaz peut entraîner une inversion de phase (modification de la HLD décrit dans §2.3.4.1) ainsi que la modification du type d'émulsion qui se forme. Comme il a été montré dans la partie bibliographique (§ 2.3.4.2), la montée en température de l'émulsion peut être accompagnée par le passage d'une émulsion stable H/E vers une émulsion instable triphasique (type WIII), inversement on peut aussi avoir le passage d'une émulsion triphasique vers une émulsion stable E/H.

De plus, la montée en température des gaz peut aussi écarter la possibilité de cristallisation des émulsions. Cette influence peut jouer un rôle important sur la possibilité de bouchon par émulsion

sachant que la température de solidification des émulsions peut être plus faible que celle de l'eau pure.

3.7.2.3 Givre

Pour les givres, théoriquement, l'augmentation de la température du gaz impacte la compacité des givres qui se forment. A terme, la montée en température du gaz peut même entraîner la fusion de la surface du givre ainsi que sa transformation en glace compacte (phénomène de perméation). Les détails de ces phénomènes sont présentés en annexe (§A1.5).

3.7.2.4 Glace

Enfin, en faisant augmenter la température locale, la montée en température du gaz devrait être plus favorable à la formation des glaces par condensation/solidification au lieu du givrage.

3.7.3 Conclusion sur la température des gaz

L'analyse des essais a permis de déduire que la température des gaz varie de -10°C à 80°C.

Compte tenu du rôle de **saturateur** joué par le déshuileur exposé au froid, nous allons concentrer notre étude sur l'impact de l'humidité absolue des gaz et choisir les températures correspondantes de manière à obtenir un gaz saturé (T1, T2, T3 sur la Figure 61). Ce qui ne nous empêche pas toutefois de travailler avec quelques cas de gaz surchauffés tout en choisissant les couples « Humidités relatives/Températures de gaz » de manière à garder constante les humidités absolues (T4,T5,T6 sur la Figure 61).

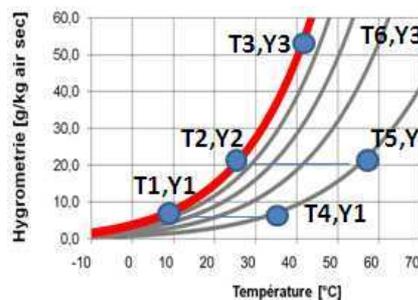


Figure 61 : Choix des températures de travail

3.8 La température de paroi

3.8.1 Plage de température de paroi

Les températures des parois sont influencées à l'intérieur par les caractéristiques du gaz de blow-by circulant dans les pièces (coefficients de transfert thermique, débits, compositions en huile, températures) et à l'extérieur par l'ambiance sous capot (convection sous capot, température ambiante). Elles sont donc fonctions des conditions de fonctionnement, du type de moteur ainsi que du véhicule. Comme dans le cas de la température du gaz, elles peuvent évoluer de manière significative le long du parcours du gaz à l'intérieur des tubes.

La température de paroi est dans la pratique beaucoup plus élevée que la température ambiante elle-même. Elle est impactée de manière importante par la convection sous le capot et l'exposition des pièces concernées au flux d'air froid sous le capot. Ainsi, par exemple, des essais sur banc climatique ont montré qu'un même moteur monté sur des véhicules différents peut donner des résultats de gels de blow-by différents. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les diverses pièces du circuit de blow-by sont portées à des températures différentes selon la configuration du véhicule.

Comme le montre les mesures représentées sur la Figure 60, la température de paroi change avec la fluctuation des régimes du véhicule lors des tests sur banc climatique. Ce qui est évident sachant que la température du gaz de blow-by, le débit du gaz de blow-by, le coefficient de transfert sous capot

varient tous avec le régime. Néanmoins les variations sont assez faibles par comparaison au domaine de température qui nous intéresse.

Pour établir notre domaine d'étude, on partira des résultats de mesure de température lors des essais sur banc climatique et en même temps on prendra en compte les gammes de température ambiantes utilisée dans ces essais.

	Min	Max
Température de paroi mesurée	-30	30°C
Température ambiante des gammes d'essais Gels/Émulsions	-30 °C	-10°C

Tableau 4 : Domaine de températures de paroi

3.8.2 Analyse des influences

Comme il a été détaillé dans le paragraphe §2.3.6, il existe une température ou une plage de température au-dessus de laquelle la solidification de l'eau ou d'une émulsion n'est plus possible (température critique de nucléation). La température au sein du liquide étant plus liée à la température de la paroi qu'à la température du gaz (résistance thermique plus importante côté gaz : voir §2.4.5.3), il est clair que la température de paroi jouera un rôle important sur tous les processus de formation des bouchons de glace ou d'émulsion. En outre, comme dans le cas de l'impact de la température du gaz, la modification de la température de paroi peut engendrer la déstabilisation de l'émulsion (inversion de phase, changement du type d'émulsion).

En ce qui concerne les givres, nous savons vu que la diminution de la température de paroi entraîne à la fois une augmentation de la porosité du givre, une augmentation de l'épaisseur givre et la modification de la morphologie du givre elle-même. Les détails de ces impacts sont disponibles en annexe (§A1.5).

Enfin, l'impact de la température de paroi sur le transfert d'énergie peut être constaté à travers les équations (2-81). Ce qui montre que la diminution de la température de paroi engendre une augmentation de l'énergie extraite au gaz.

3.8.3 Conclusion sur la température de paroi

La température de paroi constitue l'un des paramètres les plus importants pour l'étude de gels et d'émulsions de blow-by. Il est donc nécessaire de pouvoir la maîtriser indépendamment des autres paramètres. Toutefois, pour être représentatif des réalités sur les véhicules, il n'est pas recommandé de travailler sur une température de paroi interne constante le long du tube mais il est nécessaire de permettre à la paroi d'adopter un profil de température capable d'évoluer avec le parcours de gaz.

En ce qui concerne la plage de température à adopter dans le cadre de notre étude, nous nous concentrons seulement sur les températures de paroi négatives, pour lesquelles la formation de bouchons solides est envisageable. Notre plage de travail s'étalera donc de 0 à -30°C.

3.9 Les dispositions des circuits de blow-by

3.9.1 Les différentes dispositions des circuits de blow-by

La disposition du circuit de blow-by peut être caractérisée par trois paramètres dont la position du tube à considérer par rapport aux carters, l'emplacement de la conduite par rapport aux moteurs (internes ou externes) et l'agencement des divers circuits. Les dispositions des circuits de blow-by varient d'un moteur à un autre. On peut les classer en deux grandes familles.

3.9.1.1 Les moteurs à essence

Pour les moteurs à essence (Figure 4), le déshuileur est généralement monté directement dans le couvre-culasse. La récupération du gaz de blow-by pollué se fait donc directement au niveau des

couvre-culasses déshuileur. L'huile retenue par le déshuileur se déverse dans le bas carter à travers des cheminées tandis que le gaz de blow-by partiellement dépollué est amené vers le piquage d'admission via des durites. Les déshuileurs peuvent être uniques ou séparés en deux selon les modèles. La réadmission des gaz se fait via un unique tube de blow-by ou via deux tubes différents qui débouchent respectivement en amont et en aval du papillon. La longueur des différents tuyaux varie d'un moteur à l'autre.

Dans d'autres cas, les déshuileurs peuvent être des pièces séparées montées en aval du couvre-culasse. Ils sont dans ce cas reliés à la culasse et au carter grâce à des durites amont déshuileur. Le retour d'huile se fait à travers de durites reliées au bas carter.

3.9.1.2 Les moteurs Diesel

Pour la première famille des moteur Diesel (schéma détaillé disponible dans la référence [1]), le déshuilage se fait aussi via un couvre-culasse déshuileur, les gaz sont récupérés in situ ou pour certains cas via des durites externes reliant le couvre-culasse au carter moteur. Le gaz partiellement purifié est ensuite amené directement vers le piquage d'admission via une unique durite de blow-by (tube à part entière ou un simple raccord).

Pour la deuxième famille de moteur Diesel, le déshuilage du gaz de blow-by se fait d'abord dans des décanteurs montés en amont du couvre-culasse. Le gaz est ensuite amené dans le couvre-culasse déshuileur avant d'être réadmis au piquage d'admission grâce à un unique tube de blow-by.

Dans la troisième catégorie, les moteurs n'ont aucun couvre-culasse apparent. Ainsi le déshuilage s'effectue dans une boîte de décantation montée directement sur le carter. Comme dans le cas des autres moteurs Diesel, la réadmission des gaz s'effectue via un unique tube de blow-by.

3.9.2 Analyse des influences des dispositions des circuits

3.9.2.1 Impact de la position de la portion du tube considérée

Un circuit de blow-by peut être caractérisé par sa position vis-à-vis du carter. Selon cette position, les phénomènes observés peuvent être très différents.

Dans les portions amont des circuits de blow-by, c'est-à-dire dans la partie proche du carter, les gaz sont encore chauds, riches en eau et riches en particules d'huile. Ce qui implique que :

- L'eau a tendance à rester à l'état liquide, et la formation des émulsions est favorisée à la place des givres ou des glaces.
- La possibilité de bouchon est réduite à cause de la température locale.

Dans les parties avales, les températures et l'humidité sont de plus en plus faibles. Il en est de même pour la concentration en huile et la granulométrie des huiles. En particulier, de part et d'autre des déshuileurs, une chute importante de la concentration en huile et des granulométries des huiles est attendue. Dans ces conditions, la formation de glace voire de givre est envisageable. Les hypothèses en question ont été confirmées à travers les essais préliminaires sur dispositif simple de laboratoire. Le résultat est le suivant [101]:

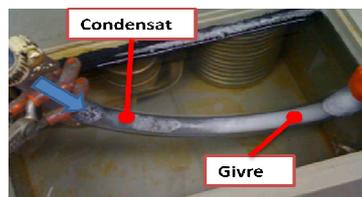


Figure 62 : Impact de la position de la portion de tube sur les phénomènes observés (Essai préliminaire)

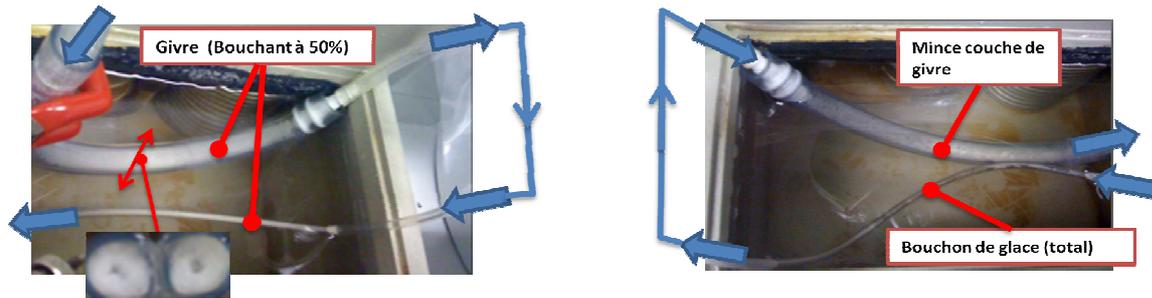
Comme le montre la Figure 62, une même portion de tube est le siège de deux phénomènes différents selon sa position par rapport à l'entrée du gaz chaud : condensation en amont et givre en aval.

3.9.2.2 Impact de l'emplacement de la conduite par rapport au moteur

La quantité d'huile transportée ainsi que les températures sont différentes selon le type circuit. Les configurations de blow-by ayant une partie externe importante sont plus exposées au froid que les configurations à dominance circuits internes. On retrouve donc les divers impacts relatifs à la température de paroi.

3.9.2.3 Impact de l'agencement des circuits

Les essais préliminaires ci-dessous, représentent deux cas de figure d'agencement de deux tubes de diamètres différents. Dans le premier cas de figure, le tube de faible diamètre est précédé d'un tube de grand diamètre, alors que dans le deuxième cas de figure on a l'inverse.



(A) Circuit amont plus gros

(B) Circuit amont plus petit

Figure 63 : Impact de l'agencement des circuits (essais préliminaire)

Les résultats montrent une différence nette entre les phénomènes observés dans les deux parties des tubes ainsi qu'entre les deux essais. Pour le cas où le tube de diamètre élevé est en amont, le bouchon est causé par du givre et il se développe progressivement. Par contre si le tube à faible diamètre est en amont, le bouchon est causé par des condensats solidifiés et la montée en pression se fait de manière rapide. Elle ne concerne que cette partie amont du circuit.

3.9.3 Conclusion sur les dispositions du circuit

La disposition des circuits de blow-by varie d'un moteur à l'autre, les tubes peuvent être plus ou moins proches du carter, avec des agencements différents les uns des autres, et peuvent comporter plusieurs ramifications induisant des mélanges et des séparations de gaz. La disposition du circuit joue un rôle important sur les phénomènes attendus. Ainsi, selon la position du point considéré, les phénomènes peuvent être totalement différents. Toutefois, la disposition n'a aucun impact particulier sauf de modifier l'humidité, la température et la concentration en particules du gaz entrant dans la portion du tube à étudier. Par conséquent, son impact peut être étudié en agissant sur ces différents paramètres sans devoir reproduire le circuit de blow-by dans son ensemble.

Remarquons qu'en plus de ces divers impacts, il se peut que le déshuileur génère une certaine quantité d'eau liquide (ou d'émulsion) qui sera par la suite transportée sous forme fluide dans les conduites. Ainsi, bien qu'il nous est impossible dans le cadre de cette étude d'utiliser un déshuileur entier avant l'entrée des échantillons, il est recommandé de tenir compte de ce paramètre en permettant aux échantillons d'essais d'avoir une portion purement **condensante** (zone de condensation) dans leur partie amont. Il nous est donc nécessaire de pouvoir permettre l'établissement d'un profil de température non uniforme dans tout le tuyau.

3.10 L'orientation des pièces

3.10.1 Les différentes orientations des pièces

La connaissance de l'orientation des circuits de blow-by est très importante dans la compréhension des phénomènes de gels et d'émulsions. En particulier, en cas de condensation, comme il a été expliqué dans la partie bibliographique, l'orientation des surfaces d'échange peut changer l'intensité

des phénomènes de transfert. En outre, en modifiant le parcours du condensat liquide à l'intérieur des tuyaux, le changement d'orientation des tubes peut entraîner une modification de la vitesse et du lieu d'accumulation des condensats. Ce qui modifie évidemment la vitesse de croissance et le lieu de formation de la glace et des émulsions qui en résultent.

3.10.2 Analyse des influences

Les essais sur banc climatique montrent que dans de nombreuses occasions, la glace est localisée sur les points bas des conduites. Ce qui signifie que le déplacement des condensats liquides par la gravité joue un rôle non négligeable dans la localisation et l'envergure des blocs de glace.

A travers nos essais préliminaires [102], nous avons constaté que les émulsions, l'eau liquide, ainsi que les huiles ont tendance à s'accumuler sur les points bas des échantillons d'essais. En lessivant les parois, ces derniers empêchent la formation de givre sur les point bas ou au contraire s'y solidifient après un certain temps et se transforment en bouchon.

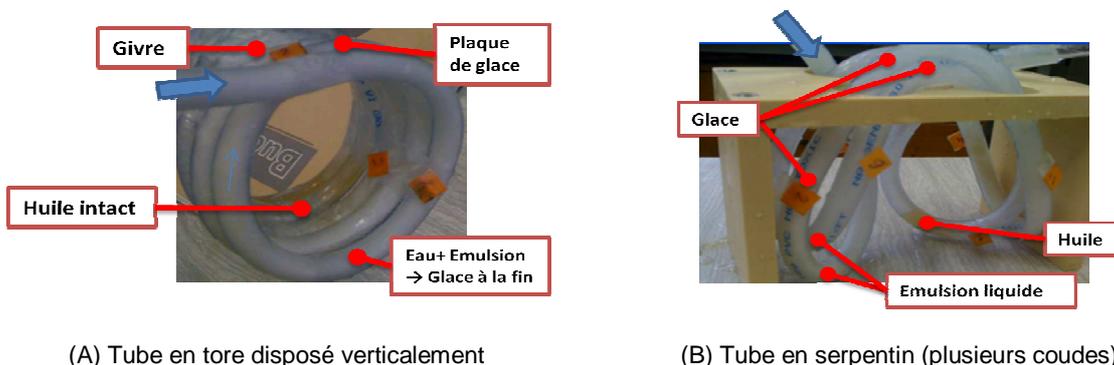


Figure 64 : Impact de l'orientation des tubes selon les essais préliminaires

Par contre, pour les givres ainsi que certaines glaces provenant de la solidification progressive des condensats liquides, le lieu concerné est indépendant de la hauteur, dans ce cas, la cristallisation est possible dès que les conditions de température et d'humidité locales le permettent (Figure 64 et Figure 65)[101].

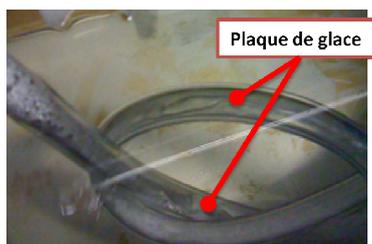


Figure 65 : Cristallisation de l'eau liquide sur un point haut et un point bas (Essai préliminaire)

De plus, comme détaillé dans les paragraphes §2.4.6.1 et §2.4.7.4, en agissant sur le comportement des condensats liquides, le changement d'orientation peut entraîner la modification des coefficients de transfert thermique. Entraînant ainsi une modification de la distribution de la température à l'intérieur des conduites ainsi que la modification des risques et des lieux d'apparitions des bouchons de glace ou d'émulsion.

Enfin, nous avons vu que dans le cas de la condensation, le changement d'orientation entraîne la modification de l'aspect des films de condensat. Pour les configurations horizontales, les films se limitent à un aspect stratifié, annulaire, ondulé ou intermittent alors que la formation de poches ou de bulles de gaz est envisageable pour les configurations verticales.

3.10.3 Conclusion sur l'orientation

Les pièces peuvent avoir des géométries simples ou complexes et sont orientées dans des directions très variées (verticale, oblique, horizontale, vers le haut, vers le bas).

L'aspect orientation joue un rôle considérable seulement si les condensats sont capables de se déplacer à l'intérieur des tubes. Il concerne donc essentiellement les cas où le phénomène de condensation est envisageable et si la quantité de condensats est suffisamment importante pour pouvoir perturber le déplacement des gaz.

L'orientation des pièces est certes impactant sur la formation des bouchons, il est donc utile d'en tenir compte. Toutefois, étant donné le nombre de paramètres à considérer dans cette étude, nous avons choisi de nous limiter aux configurations horizontales et de réserver les autres orientations pour des travaux ultérieurs.

3.11 La géométrie des pièces

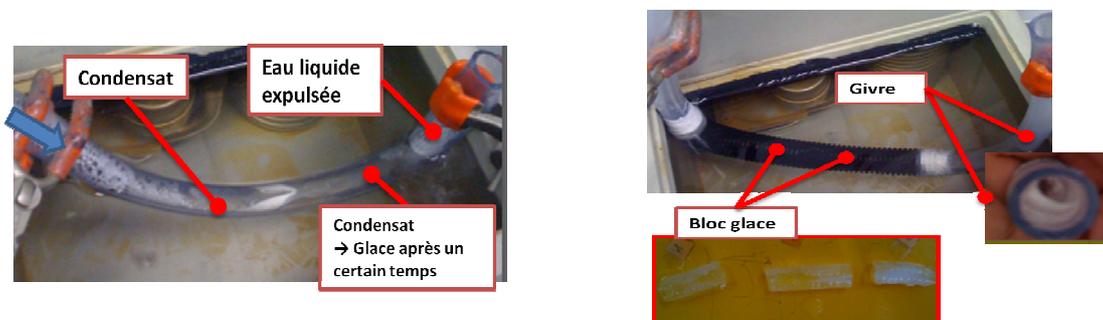
3.11.1 Les différentes géométries des pièces

Les diverses pièces du circuit de blow-by ont des géométries très diversifiées. Ce sont des éléments à libre parcours tels que les tubes et les raccords ou aussi des éléments avec obstacles comme les chicanes ou les dispositifs à cyclone à l'intérieur des déshuileurs. Les géométries sont plus compliquées au niveau des vannes de régulation de pression dont le principe consiste à poser une membrane régulatrice amovible au sein même du flux gazeux. En outre, le circuit comporte diverses ramifications dans lesquelles les gaz se mélangent, se séparent ou les deux simultanément. Enfin, pour les tubes de blow-by, on distingue des tubes lisses ou des tubes annelés. Notons aussi que les tubes de blow-by comportent dans la plupart des cas des coudes dont les angles peuvent varier d'un angle droit à un angle plat.

3.11.2 Analyse des influences

3.11.2.1 Influence vis-à-vis du déplacement des condensats liquides

La connaissance des géométries et des orientations sont nécessaires pour élucider les résultats observés lors des phénomènes de gels et d'émulsions. En effet, ils pourront avoir des impacts importants sur la possibilité de bouchon en permettant ou non l'accumulation locale des condensats (ou des émulsions). Afin d'éclaircir le sujet, nous avons testé lors des essais préliminaires deux configurations différentes de tubes : une configuration lisse et une configuration annelée. Les résultats confirment que, bien que les deux configurations conduisent toutes les deux au bouchon, la quantité et la vitesse de formation de bouchon sont différentes. Comme le montre les photographies suivantes, la configuration annelée piège la totalité de l'eau, empêchant ainsi son évacuation dans la partie aval du tube (d'où la présence de givre sur la partie non lessivée en aval). La formation du bouchon est donc plus rapide pour le tube annelé que pour le tube lisse.

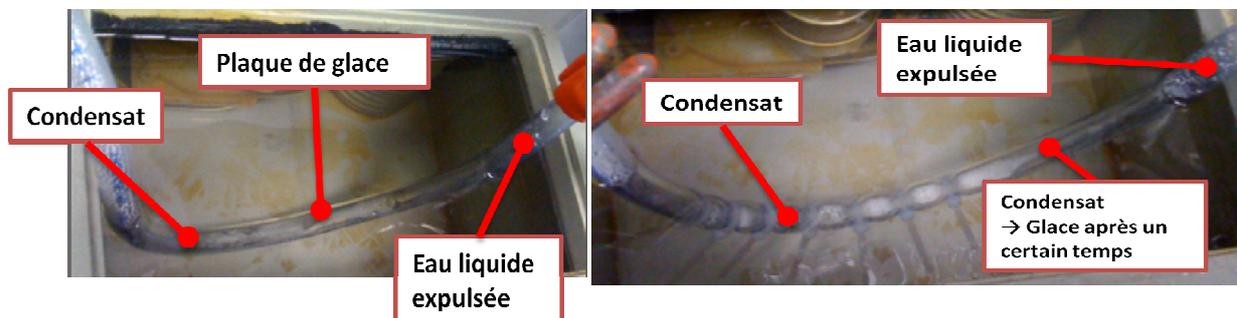


(A) Configuration lisse

(B) Configuration annelée

Figure 66 : Exemple d'impact de l'annelure (essais préliminaire)

Soulignons toutefois que cette impact est constatée seulement si le pouvoir de rétention de la géométrie est suffisamment fort pour maintenir l'eau immobile jusqu'à sa cristallisation. Ainsi, de simples étranglements tels que ceux représentés sur la Figure 67-B suivante n'ont pas suffi pour obtenir un résultat différent de ceux observés avec des configurations lisses (Figure 67-A).



(A) Configuration lisse (B) Configuration lisse avec strangulation
Figure 67 : Exemple d'impact d'une configuration avec étranglement (essais préliminaire)

3.11.2.2 Autre influence

En perturbant les couches limites de concentration et les couches limites thermiques au voisinage des parois, la géométrie peut affecter les coefficients de transfert de masse et coefficient transfert thermique.

Enfin, rappelons que l'impact de la géométrie est toutefois négligeable sur les phénomènes de formation de givre (détails disponibles en annexe §A1.5) [101].

3.11.3 Conclusions sur la géométrie

Comme dans le cas de l'orientation des tubes, la géométrie joue un rôle important quand le phénomène inclut la présence de condensat liquide. De plus, des modifications des coefficients de transfert eux-mêmes sont envisageables. Ainsi, nous avons choisi de tenir compte de l'aspect géométrique dans le cadre de cette étude. Pour cela, on étudiera en particulier les tubes annelés qui sont les configurations les plus complexes rencontrés dans les tuyaux de blow-by d'automobile.

3.12 Le diamètre des tubes

3.12.1 Les différentes dimensions des tubes

Les dimensions des pièces varient avec les circuits considérés. Les diamètres des tubes peuvent être très petits pour les circuits travaillant avec des débits de blow-by faibles ou très grands pour des débits plus élevés. En général, PSA se fixe comme critère de dimensionnement maximal un rayon l'ordre de 6 à 12 mm pour un circuit amont ainsi qu'une vitesse de gaz maximale de l'ordre de 5 m/s.

En exploitant la base de données des circuits de blow-by qui a été construite, on a établi le domaine des diamètres des pièces selon le tableau suivant:

D min	D moy	D max	Min Angle coudes
4 mm	20 mm	32 mm	21°

Tableau 5 : Diamètres des pièces sur moteur

3.12.2 Analyse des influences

L'impact du diamètre des tubes et de la vitesse des gaz sont étroitement liés. Toute diminution du diamètre entraîne l'augmentation de la vitesse des gaz ainsi que du nombre de Reynolds. On retrouve donc tous les impacts de la vitesse cités dans les paragraphes précédents (modification coefficient de transfert, modification aspect des films de condensat, etc.)

Outre, l'impact via la vitesse du gaz, le diamètre du tube devrait aussi affecter la durée de formation des bouchons de glace. Plus le diamètre est élevé plus la quantité de glace nécessaire pour boucher le tube est importante.

Dans les domaines de condensation, les essais préliminaires montraient que les phénomènes mis en jeu sont totalement différents pour les diamètres élevés que pour les faibles. Pour un diamètre élevé, les condensats se déplacent et s'accumulent avant de se solidifier, alors que pour les faibles diamètres, aussitôt formées, les gouttes de condensat sont amenées indépendamment les unes des autres le long des tubes jusqu'à certains endroits en aval où elles se solidifient en gouttes solides.

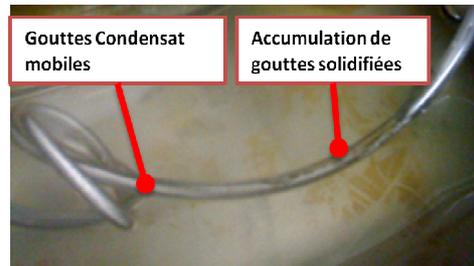


Figure 68 : Phénomène observé en diamètre très faible D=3mm (Essai préliminaire)

3.12.3 Conclusion sur les géométries et orientations des tubes de blow-by

Les pièces, en particulier les tubes de blow-by, ont des dimensions très variées. Le diamètre constaté est de l'ordre de 4 à 32 mm.

L'impact de la géométrie doit être considéré dans toutes les études suivantes. Comme dans le cas du débit, il a un impact non négligeable aussi bien sur le transfert thermique que sur le phénomène de formation des bouchons.

3.13 La longueur des tubes

3.13.1 Plage de longueur

En se servant de la base de données établie à partir des schémas 3D des différents circuits de blow-by, la longueur des tubes peut être résumée par le tableau suivant :

L min	L moy	L max	Min Angle coudes
36 mm	260 mm	690 mm	21°

Tableau 6 : Longueur des tubes sur moteurs

3.13.2 Analyse des influences

En agissant sur la surface de contact entre le gaz humide et la paroi froide, la longueur du tube influence la température et l'humidité adoptée par le gaz le long de son parcours. On retrouve donc intégralement les différentes influences de ces deux paramètres (humidité et température) dans l'influence de la longueur du tube.

Mathématiquement, l'influence de la longueur du tube sur les énergies totales transférées sur la paroi ainsi que sur la quantité totale de condensat est représentée par la surface de condensation **A** du tube dans les équations suivantes :

$$Q_{tot} = \int_L \dot{q} \cdot dA \quad (3-7)$$

$$\dot{m}_{tot} = \int_L \dot{m}_{vap,cond} \cdot dA \quad (3-8)$$

Les composants locaux \dot{q} et $\dot{m}_{vap,cond}$ représentent les flux de chaleur et les flux de condensation locaux en un point quelconque du tube. Ils ont été présentés dans le Chap. 2.

De même, en agissant sur la durée et la surface de contact entre les condensats liquides (ou les émulsions) et les parois froides, l'augmentation de la longueur du tube a une incidence directe sur la possibilité de cristallisation des condensats liquides qui se forment. Comme on le voit sur les figures suivantes, les essais préliminaires ont montré qu'une certaine portion amont du tube ne contient que du condensat liquide, puis après une certaine longueur, les condensats commencent à se solidifier et des cristaux de glace sont observés. A mi-parcours, la totalité des condensats peut se solidifier et la portion du tube non lessivée par l'eau devient le siège de la formation de givre.

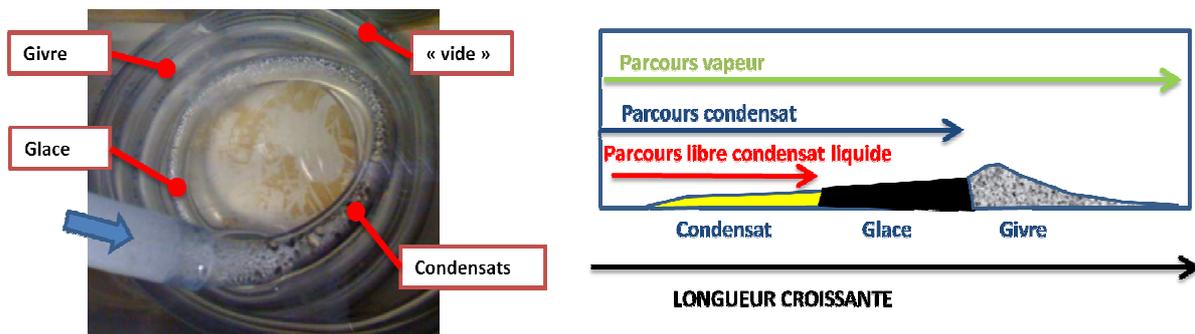


Figure 69 : Etat de l'eau le long du tube (Essai préliminaire)

3.13.3 Conclusion

Les longueurs des tuyaux de blow-by sont variables. Les tuyaux peuvent être sous forme d'un simple raccord très court mais aussi très long (700 mm).

La longueur des tubes constitue l'un des facteurs les plus importants dans la formation des bouchons en **conditions condensantes**. La longueur agit aussi sur le transfert thermique total entre le gaz et la paroi. En outre, compte tenu de la conductivité limitée des matériaux constituant les tubes de blow-by, l'impact de la longueur peut aussi se faire sentir au niveau de la distribution spatiale de la température de paroi interne et donc des phénomènes observés : plus les tubes sont longs, plus les phénomènes de formation de glace et de givre prédominent.

D'un point de vue pratique, la plus petite longueur de tube permettrait de résoudre la totalité des équations des transferts thermiques locaux. Par contre, cela empêcherait l'observation des phénomènes liés à la formation de condensats suivis de la solidification. Inversement, une longueur élevée des tubes permettrait de comprendre l'évolution des phénomènes le long des tubes, néanmoins, cela rendrait impossible l'analyse des phénomènes de transfert puisque la température du gaz à la sortie serait proche de la température de paroi.

Afin de pouvoir tenir compte de ces deux effets et pour limiter le nombre d'essais expérimentaux, on prendra une longueur limite maximale des tubes de blow-by. Puis on utilisera des modèles de plusieurs tubes courts montés bout à bout pour déterminer les transferts locaux. Toutefois, si nécessaire, on réduira la longueur des tubes d'essais jusqu'à aboutir à un compromis.

Dans tous les cas, il est recommandé d'identifier les lieux d'origine des bouchons au lieu de se fier tout simplement à la pression finale.

3.14 Les matériaux

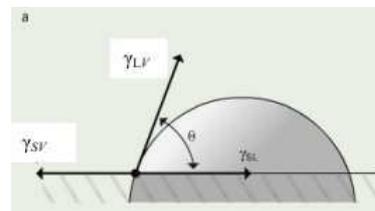
Les matériaux du circuit de blow-by sont essentiellement à base de polyamide dont des PA66, des PA11, des PA12. Dans de rares cas, on peut aussi avoir des caoutchoucs ou des gommes comme dans le cas des tubes de blow-by tel que celui du moteur DWxx.

Comme les phénomènes de givrage, de condensation et d'émulsion sont des phénomènes d'interfaces, les matériaux peuvent être caractérisés par leurs angles de contact vis-à-vis des composés mis en jeu dans les différents phénomènes. Pour le givrage et la condensation, la mesure de l'angle de contact de l'eau suffit amplement pour caractériser les surfaces. En ce qui concerne les émulsions, en plus de l'angle de contact de l'eau, on considèrera aussi l'angle de contact de l'huile.

3.14.1 Les angles de contact

L'angle de contact mesure l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface par mouillabilité. Elle varie avec la nature du liquide et celle de la paroi. L'état d'équilibre entre les trois phases en présence (liquide, air atmosphérique, paroi solide) peut être décrit selon l'équation de Young :

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (3-9)$$



θ_0 représente l'angle de contact

γ_{SV} est la tension interfaciale entre le solide et le gaz

γ_{SL} est la tension interfaciale entre le solide et le liquide

γ_{LV} est la tension interfaciale entre le liquide et le gaz

Comme les surfaces ne sont jamais parfaitement homogènes, la présence de défauts physiques ou chimiques entraîne l'existence d'une plage d'angles de contact (θ) autorisés autour de l'angle de contact statique θ_0 , les valeurs minimale θ_r et maximale θ_a à l'intérieur de la plage en question sont appelés respectivement angle de contact de recul et angle de contact d'avancée [103]. La largeur de la plage ($\theta_a - \theta_r$) est l'hystérésis de l'angle de contact. Pour une goutte placée sur un plan incliné, $[\theta_r, \theta_a]$ représente l'intervalle possible que peut prendre l'angle de contact en haut et en bas de la goutte avant que celle-ci se déplace vers le bas à cause de la gravité.

Si des tensioactifs sont présents dans le liquide, ils migrent vers les interfaces et les tensions interfaciales sont modifiées. L'angle de contact diminue donc (ou augmente selon la tensioactif) progressivement avec le temps [104]:

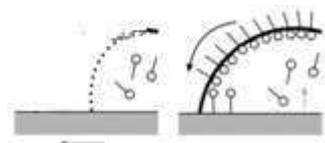


Figure 70 : Evolution de l'angle de contact d'une goutte en présence de tensioactifs

3.14.2 Choix des matériaux testés

Les matériaux ont été choisis en fonction de l'occurrence formation de gels et d'émulsions observée lors des essais sur banc climatique. Par soucis de représentativité vis-à-vis des moteurs réel, on a utilisé des pièces brutes, sans traitement ni polissage particulier des surfaces.

Les pièces sont essentiellement prélevées sur des tuyaux de blow-by, mais aussi des couvre-culasse, des reniflards ainsi que des raccords au niveau de piquage sur la ligne d'air. Les pièces proviennent aussi bien des moteurs à essence que Diesel.

Au total, nous avons choisi 13 pièces, sur les 255 pièces référencées dans la base de données établie.

3.14.3 Méthode de mesure

Pour mesurer l'angle de contact, nous avons utilisé un goniomètre numérique automatisé. La méthode consiste à déposer à l'aide d'une seringue une goutte du liquide sur la pièce à caractériser et de mesurer l'angle de la tangente du profil de cette goutte.



Figure 71 : Méthode de mesure de l'angle de contact (Essai en laboratoire)

3.14.3.1 Angle de contact vis-à-vis de l'huile

La formation de l'émulsion nécessite la présence simultanée de l'eau et de l'huile sur la paroi. En connaissant l'angle de contact respectif des deux éléments, il est possible de déterminer comment se forme l'émulsion sur la paroi. Si l'huile mouille beaucoup plus que l'eau, il est évident que l'huile a tendance à s'étaler sur toute la paroi et servira de matrice de réception de l'eau en condensation. Inversement, si c'est l'eau qui s'étale, elle servira de matrice qui recevra les gouttelettes d'huile.

En outre, en connaissant, l'angle de contact de l'huile, il est aussi possible d'estimer le rôle que jouera la surface sur tous les phénomènes qui se déroulent à l'intérieur des conduites. Pour une mouillabilité élevée vis-à-vis de l'huile, l'huile formera une couche protectrice au dessus de la surface et les phénomènes de condensation, de formation de givre ou de solidification vont se dérouler au dessus de cette nappe d'huile. Par contre si l'angle de contact de l'huile est élevé, de même si l'angle de contact de l'eau est aussi élevé, la condensation et la formation de givre se fera essentiellement sur une couche propre et les parois joueront un rôle important (condensation en gouttes).

La mesure de l'angle de contact des huiles se fait directement en déposant une goutte d'huile sur la matrice à caractériser. Les résultats sont résumés dans le Tableau 7. Les détails des huiles ainsi que leur mode de sélection seront expliqués plus tard.

3.14.3.2 Angle de contact vis-à-vis de l'eau

Comme il a été énoncé précédemment, l'angle de contact de l'eau aura un effet sur le comportement de l'émulsion. Comme l'huile, elle dictera le rôle de la surface vis-à-vis des phénomènes de condensation et de givrage.

En particulier, l'angle de contact de l'eau permet de prédire le type de condensation qui se déroulera sur la surface ainsi que la sursaturation requise à l'air humide pour que la nucléation de la vapeur puisse s'y dérouler. Les détails de ces phénomènes sont présentés dans les paragraphes §2.4.3, §2.4.2 et en annexe (§A1.2).

Pour les différents types de polyamides, il a été montré que l'angle de contact avec l'eau varie avec les différentes fonctionnalités du polymère. En particulier, l'angle diminue quand le nombre de fonction amide augmente [105].

A cause de l'évaporation, la mesure directe de l'angle de contact n'a pas été possible. En effet, la goutte d'eau rétrécit avec le temps alors que sa surface de contact avec la paroi ne diminue pas avec la même vitesse, l'angle de contact ainsi mesuré diminue donc avec le temps et est totalement inutilisable. Pour contourner ce problème, nous avons mesuré l'angle de contact de plusieurs solvants non volatils puis calculé indirectement l'angle de contact de l'eau en se servant des tensions superficielles de chaque solvant par le modèle suivant [106] :

$$Y_{SL} = \frac{2 * \gamma}{1 + \cos(\theta)} \quad (3-10)$$

Pour chaque pièce à étudier, la procédure fut la suivante :

- Mesurer l'angle des 8 solvants de référence de tension superficielle connue (γ : 27,7 à 64 N/m) : Glycérol, Formamide, formiate d'éthanolammonium, nitrate d'éthylammonium, Ethylène glycol, Bromonaphtalène, dinonylphthalate, Bromoethylpyridinium tetrafluoroborate.
- Déterminer la tension interfaciale $Y_{S/L}$ entre les différents solvants et le support en se servant de l'angle de contact mesuré et du modèle (3-10).
- Tracer la droite $Y_{SL} = f(\gamma)$

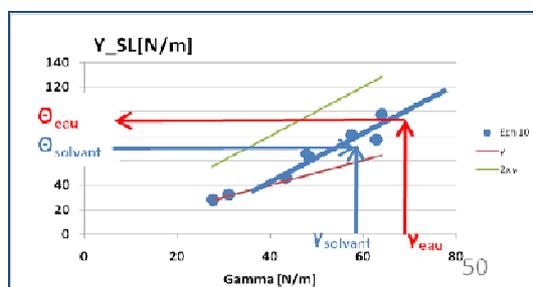


Figure 72 : Détermination de l'angle de contact de l'eau

- Déduire $Y_{S/L}$ entre l'eau et la matrice solide connaissant la tension superficielle de l'eau ainsi que la droite modèle.
- Déduire l'angle de contact de l'eau en se servant de l'équation (3-10).

3.14.4 Résultats et conclusion

Les résultats obtenus pour l'eau et pour les différentes huiles sont résumés dans le tableau suivant :

	Couvre Culasse Déshuileur					Tube de Blow-by	
	Txxx Adm (Capot)	Txxx Adm (Fond)	Exxx (Capot)	Exxx (Fond)	DVxxx	Dxxx	Exxx
Quartz 9000	7/±2	6/±2	29±5	28±4	28±4	41±5	23±7
Quartz 9000 Energy	25/±5	7/±2	26± 3	23±4	22±12	48±2	13±1
LUB MA4	27±5	9±4	39±2	29±3	28±71	49±3	13±4
Eau	69	70	64	59	59	71	69

Tableau 7 : Résultats des mesures d'angles de contact.

3.14.4.1 Conclusion sur l'angle de contact vis-à-vis de l'huile

Comme le montre le tableau, l'angle de contact des huiles est relativement faible. Les gouttes d'huile ont tendance à s'étaler et couvrir rapidement la surface de contact, ce qui est en accord avec les propriétés des huiles de moteurs. La présence de tensioactifs dans l'huile entraîne une affinité exceptionnelle de l'huile même pour les substrats polaires tels que les polyamides. Les détails sur la composition de l'huile sont disponibles en annexe (§ A2.3).

A part celui du Quartz 9000 sur le couvre-culasse Txxx, aucune différence notable de l'angle de contact n'a été constatée entre les différentes huiles. Les angles de contact sont autour de 7° pour les fonds de couvre-culasse Txxx et de 25° pour le reste (sauf Dxxx). Notons toutefois que l'angle de contact est particulièrement élevé pour Dxxx (46°), qui contrairement aux autres pièces, est fabriqué en caoutchouc et non en polyamide.

3.14.4.2 Conclusion sur l'angle de contact vis-à-vis de l'eau

La valeur de l'angle de contact de l'eau est relativement élevée, autour de 66° pour les différents matériaux testés. Elle est de 70° pour les deux tuyaux de blow-by testés. Ainsi, bien que les parois ne soient pas totalement hydrophobes, on peut dire que la goutte ne s'étale pas sur la paroi et garde une bonne partie de sa sphéricité au dessus de celle-ci.

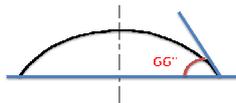


Figure 73 : Apparence des gouttes d'eau pour les matériaux testés

Si, on utilise la valeur de l'angle de contact ainsi obtenue sur la courbe de température de nucléation proposé par Byeongchul [107], on peut en déduire que la nucléation des condensats ou des givres ne peut commencer qu'à -10°C au dessous de la température de condensation prévue par le diagramme psychrométrique. Notons toutefois, que la valeur obtenue n'est donnée qu'à titre indicatif puisque les gels et les émulsions de blow-by ne concernent pas une paroi propre mais une paroi déjà couverte d'un film d'huile ainsi que d'autres impuretés (émulsion, eau, glace etc.).

Dans tous les cas, il est clair que l'huile s'étale beaucoup plus sur les parois que l'eau. Pour la suite de l'étude, on assimilera les parois à des matrices couvertes de film d'huile. De même pour les émulsions, il est évident qu'au moins une partie de l'huile s'étale sur les parois quelle que soit la nature de la phase dispersée dans l'émulsion.

A travers toutes ces constatations, on en déduit qu'en présence de lubrifiant, la paroi ne jouera qu'un rôle minime dans les phénomènes mis en jeu et les résultats attendus. Ce qui nous permettra pour la suite de l'étude d'utiliser d'autres matériaux transparents à la place des polyamides qui sont opaques (à condition que les huiles gardent toujours leur mouillabilité élevée).

3.15 La nature de l'huile

Les huiles sont différentes les unes des autres par leur composition et leur domaine d'utilisation (fabricant, climat, marque, etc.). En ce qui nous concerne, nous nous concentrerons sur les huiles recommandées par PSA dont les huiles Total. Pour affiner davantage notre choix, considérons sur la figure suivante les gammes de température d'utilisation préconisée pour diverses huiles [108]:

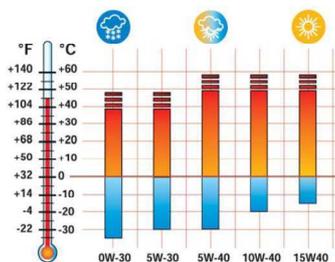


Figure 74 : Grade SAE⁴ et température d'utilisation

⁴ Les différents grades de lubrifiant sont disponibles en annexe

Nous limiterons notre domaine d'étude aux huiles utilisées ou pouvant être utilisées dans les conditions climatiques froides. Ce qui limitera notre choix aux huiles de grade SAE 0W30, 5W30, 5W40.

Grade SAE	Huile choisie	Base	Autres variantes
0W30	Quartz 9000 Energy	Base de synthèse	Activa 9000 Energy 0W30
5W30	LUB MA4	Base de synthèse	Ineo ECS 5W30 Activa C2 5W30
5W40	Quartz 9000	Base de synthèse	Activa 9000 5W40

Tableau 8 : Les huiles choisies

3.15.1 Influence de l'huile : Analyse théorique et rappel de l'état de l'art

Les études théoriques du paragraphe § 2.3 nous rappellent que pour qu'une émulsion puisse se former, la présence simultanée d'huile (ou phase organique), d'eau et de tensioactifs, une source d'atomisation (ou d'agitation) est obligatoire. Pour le cas des circuits de blow-by, à partir du moment où l'eau peut apparaître sous forme liquide, on peut dire que les quatre conditions sont systématiquement satisfaites vu que les lubrifiants contiennent, par nature, d'importantes quantités de tensioactifs (émulsifiant, dispersant, etc. – voir §A2.3.2 en annexe) et que l'eau et les huiles sont déjà à l'état dispersées (particules d'huile, vapeur d'eau) avant même leur entrée en contact.

Nous avons vu aussi qu'une émulsion n'est pas forcément stable. L'émulsion peut « se casser » en deux phases lorsque les conditions de son environnement changent (température, effet de dilution, sédimentation, etc. voir §2.3.5.2).

Aussi, comme la stabilité de l'émulsion est assurée en premier lieu par l'action des tensioactifs qui sont présents dans l'huile (§2.3.5.1). On peut en déduire que l'huile, plus précisément les tensioactifs dans l'huile, jouent un rôle très important sur la subsistance d'une émulsion dans le circuit de blow-by. C'est ce qui a été démontré par Total en observant le comportement d'une émulsion préparée avec plusieurs types de formulation d'huile [109].

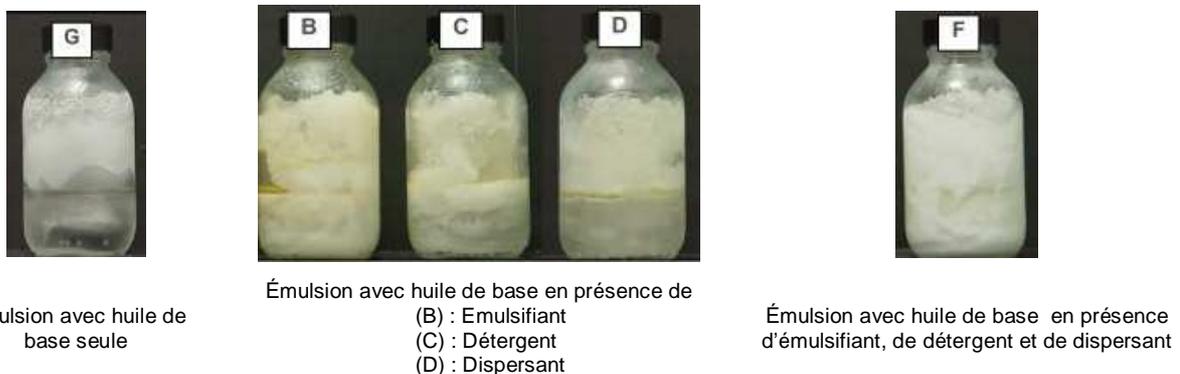
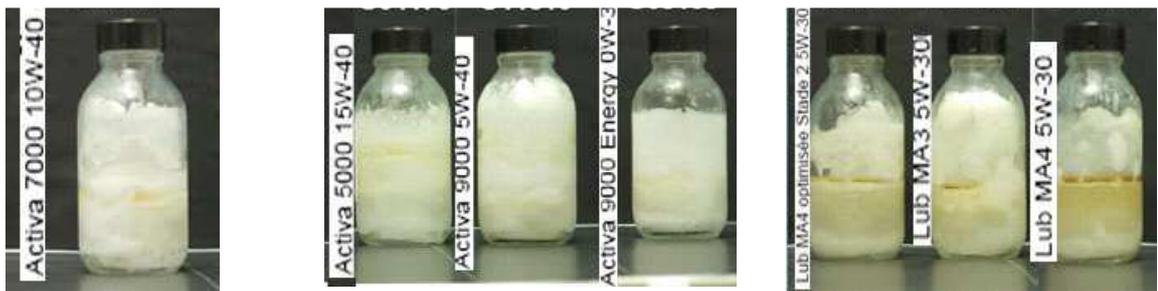


Figure 75 : Comportement de l'émulsion Ultra turrax selon la formulation des huiles (Total)

Comme le montre la Figure 75, bien que les émulsions aient été préparées dans des conditions d'agitation extrême (Agitation par Ultra turrax), l'émulsion de l'huile qui ne contenait aucun élément tension actif (G) se casse facilement pour former deux couches. Alors que celles qui contenaient au moins un de trois types de tension actif sont beaucoup plus stables. Rappelons que la même tendance a été observée sur moteur [110].

Enfin, en influençant la morphologie (voir Figure 13 et Figure 15) et la stabilité des émulsions, la composition de l'huile aura une influence sur la température de cristallisation du mélange ainsi que sur la possibilité de cristalliser (voir § 2.3.6). Ce qui a été constaté par Total en observant le comportement des émulsions préparées avec plusieurs types d'huiles après un conditionnement à -5°C pendant plusieurs jours [111].



Émulsions assez stables
(début démixtion)

Émulsions partiellement cassées (émulsion
surnageante + glace)

Émulsions cassées (démixtion totale)

Figure 76 : Comportement des émulsions préparées avec différentes huiles à -5°C après 7 jours (Total)

La figure montre une différence nette entre les évolutions des émulsions. Ainsi l'émulsion préparée avec les huiles à base minérale Activa 7000 semble être particulièrement stable alors que celles préparées avec l'huile à base synthèse (Lub MA4) sont toutes cassées.

3.15.2 Corrélation entre la tension interfaciale et la stabilité des émulsions

Nous avons vu qu'une émulsion est stable si des tensioactifs s'adsorbent entre les interfaces Huile/Eau de manière à les stabiliser malgré la surpression de Laplace qui règne à l'intérieur des gouttes dispersées (paragraphe 2.3.5.1). Ce qui laisse croire que, la mesure de la tension interfaciale entre l'eau et l'huile en présence de ces tensioactifs pourrait être un bon indicateur de la stabilité d'une émulsion.



γ_{int} élevé → Émulsion déstabilisée

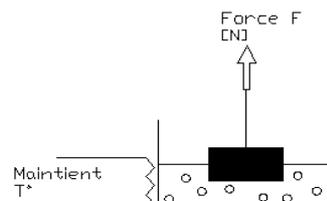
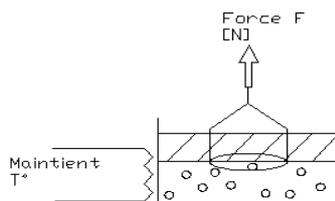
γ_{int} faible (action des tensioactifs) → Émulsion stable

Figure 77 : Hypothèse relation entre tension interfaciale et stabilité

Pour confirmer notre hypothèse nous avons mesuré les tensions interfaciales Eau/Huile des différentes huiles choisies et confronter les résultats obtenus avec la stabilité des émulsions préparées en laboratoire.

3.15.2.1 Mesure des tensions interfaciales

Pour mesurer les tensions interfaciales Eau/Huile, nous avons utilisé un tensiomètre Krüss. Le principe consiste à déposer une couche de lubrifiant au dessus d'une couche d'eau puis de mesurer la force nécessaire pour que l'anneau de mesure en platine, initialement plongé dans l'eau traverse l'interface entre les deux phases (Figure 78 - A) :



(A) Mesure de tension interfaciale Eau/huile

(B) Mesure de tension superficielle

Figure 78 : Caractérisation des interfaces

Afin de s'assurer que la différence de tension interfaciale est propre à l'interface eau/huile seulement, les tensions superficielles de chaque huile ont aussi été mesurées (Figure 78 - B). De plus, pour s'assurer que la différence de stabilité est essentiellement de nature interfaciale et non liée à la différence de densité entre les huiles (impact du crémage et sédimentation- voir paragraphe § 2.3.5.2.4), ces dernières ont été également déterminées.

Les résultats obtenus sont les suivants :

	Quartz 9000	Quartz 9000 Energy	LUB MA4
Densité	0,88	0,84	0,85
γ_{huile} [N/m]	30,4	29,6	30,3
$\gamma_{\text{Huile/eau}}$ [N/m]	20,8	29,6	30,3

Tableau 9 : Résultats des caractérisations des interfaces

Le Tableau 9 montre que l'huile Quartz 9000 a la tension interfaciale la plus faible alors que les tensions interfaciales sont comparables pour les deux autres huiles. Aussi, si notre hypothèse valable, le Quartz 9000 devrait former l'émulsion la plus stable.

Pour les autres paramètres, les valeurs sont proches pour les trois huiles.

3.15.3 Confirmation à travers les essais émulsion en laboratoire

Afin de vérifier l'adéquation entre la stabilité et la tension interfaciale et par la même occasion de choisir l'huile principale qu'on utilisera dans la suite de l'étude, nous avons effectué des essais de préparation d'émulsions à l'échelle du laboratoire avec les trois huiles considérées.

3.15.3.1 Choix des conditions d'agitation

Les essais ont été effectués en mélangeant de l'eau et de l'huile à 50% puis en les mélangeant avec un Ultra turrax avec une vitesse d'agitation et une durée d'agitation données.

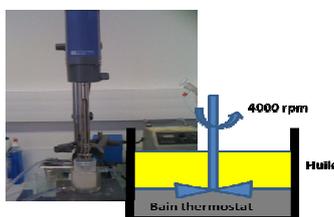


Figure 79 : Préparation des émulsions avec Ultra turrax en laboratoire

Afin de déterminer la condition d'agitation optimale, nous avons testé l'émulsion de l'huile Quartz 9000 avec diverses combinaisons de vitesse et de durée d'agitation. Une fois préparée, l'émulsion est partagée sur deux récipients puis laissée en au repos pendant une heure. Les résultats observés sont détaillés dans le Tableau 12.

A partir de ces résultats, nous avons pris comme conditions de préparation celles qui ont permis d'observer une bonne séparation de l'émulsion de Quartz 9000 en moins d'une heure (optimisation de durée des futurs essais) sans toutefois donner une émulsion trop instable pour être caractérisable en terme de vitesse de démixtion (en effet, une instabilité élevée avec le quartz 9000 signifierait que toutes les autres émulsions seraient aussi instables et la comparaison entre les émulsions ne serait plus possible). Pour toutes ces raisons, nous avons choisi la vitesse d'agitation de 5200 rpm pendant 5 minutes comme condition de préparation des émulsions.

3.15.3.2 Résultats avec les différentes huiles

Après deux temps de décantation (une journée et un mois), les essais émulsion contenant 50% d'eau ont donné lieu aux résultats suivants :

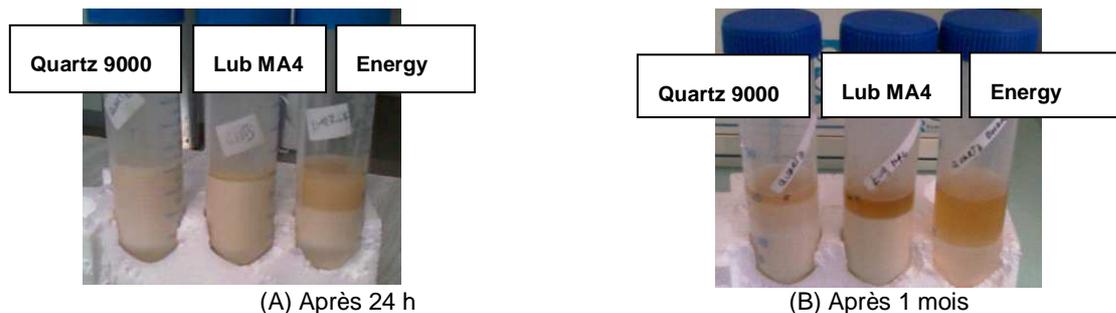


Figure 80 : Evolution des émulsions préparées en laboratoire après décantation à température ambiante

Après une journée de décantation le Quartz 9000 reste toujours homogène. Le LubMA4 commence à se séparer en une couche d'émulsion et une fine couche d'huile. Le Quartz 9000 Energy se sépare en deux couches : une couche huileuse et une couche d'émulsion à priori riche en eau.

Après un mois de décantation le Quartz 9000 et le LubMA4 se séparent en trois couches : une couche huileuse, une couche d'émulsion intermédiaire et une couche d'émulsion plus opaque. Le Quartz 9000 Energy se sépare en deux couches bien distinctes : une couche d'huile et une couche aqueuse. Ceci confirme le fait que le Quartz 9000 est effectivement l'huile qui donne l'émulsion la stable parmi les trois. L'huile Quartz 9000 Energy donne une émulsion exceptionnellement instable alors que sa tension interfaciale avec l'eau est comparable avec celle du LubMA4.

3.15.4 Confirmation par les essais préliminaires

Nous avons démontré que, dans une condition statique, à l'intérieur des béchers de laboratoire, les émulsions sont plus ou moins stables selon la composition de l'huile. Toutefois, dans les circuits de blow-by, les émulsions se forment puis s'évacuent en permanence de sorte que la déstabilisation des émulsions n'arriverait jamais à terme l'intérieur des tubes. Aussi pour pouvoir confirmer la nécessité de prendre en compte la nature de l'huile parmi nos paramètres de travail, nous avons effectué des essais préliminaires dans des tuyaux en polyéthylène avec l'huile Quartz 9000 (l'huile qui donne l'émulsion la plus stable en laboratoire) et le Quartz 9000 Energy (l'huile qui donne l'émulsion la moins stable). Le schéma du dispositif d'essai est détaillé sur la Figure 41.

Dans la première expérience, l'huile a été pré-déposée sur le tube échantillon avant d'envoyer l'air humide dans le tube refroidi. Comme le montre la Figure 81, aucune différence significative n'est constatée pour les deux huiles. Chacun des essais montre que dans tous les cas, l'huile se transforme très vite en émulsion blanche qui tapit le tube et la majeure partie de l'eau se transporte à l'état libre à travers le tuyau.

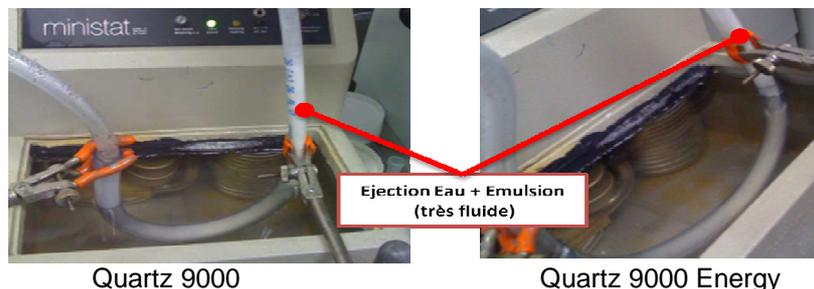
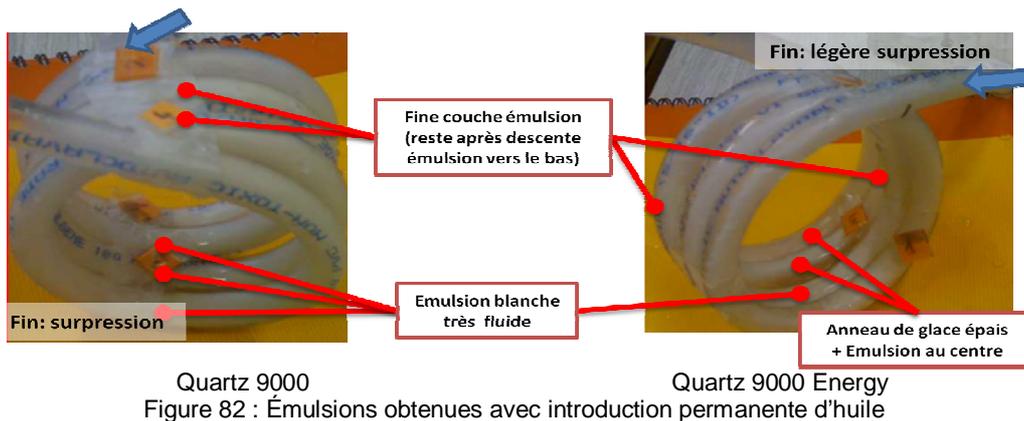


Figure 81 : Émulsions obtenues avec un film d'huile pré-déposé (Essai préliminaire)

Dans la deuxième expérience, l'huile a été introduite simultanément avec le gaz via une nourrice d'huile. Les résultats montrent que la totalité de l'huile reste sous forme d'émulsion blanche très fluide et non cristallisable à l'intérieur des tubes. Dans les deux cas, une partie de l'eau a été trouvée à l'état libre (eau liquide ou glace) à l'intérieur du tube.



3.15.5 Conclusion sur le choix des huiles

La nature de l'huile peut jouer un rôle important dans la stabilité et la cristallisation des émulsions. Toutefois, dans la gamme d'huiles étudiées (huiles pour pays froid), un impact n'a été constaté qu'au niveau des essais en bécher de laboratoire, et même dans ces conditions, il a fallu laisser les émulsions décanter pendant au moins une journée pour les différencier. Aussi, on considérera la nature de l'huile comme un paramètre d'ordre deux dans l'étude en cours. On prendra qu'un seul type d'huile pour le reste de l'étude et pour cela on choisira l'huile qui a donnée l'émulsion la plus stable et ayant une tension interfaciale minimale avec l'eau. Ce qui nous permettra de maximiser la possibilité de mettre en évidence les impacts apportés par l'huile.

3.16 Granulométrie et concentration en huile

3.16.1 Distribution granulométrique des particules

3.16.1.1 Rappel des paramètres influant sur la distribution granulométrique

Les distributions granulométriques des particules d'huile dans le gaz de blow-by varient en fonction des caractéristiques des agitations mécaniques qui les ont générées. Les grosses gouttes étant piégées au niveau des déshuileurs, il est clair que la majorité des gouttes qui atteignent le circuit de blow-by externe sont les gouttes de petites tailles. Ce sont en général des gouttes d'huiles atomisées au niveau de la segmentation.

La distribution granulométrique est donc liée essentiellement à la différence de pression entre la chambre de combustion et le bas carter, la température à l'atomisation, la quantité d'huile disponible au niveau de la segmentation et sa nature (tailles des orifices de fuite, géométries, longueurs de parcours des fuites, etc.). En reproduisant le phénomène d'atomisation dans la zone SPC (Segment, Piston, Chemise), Lecompte [100] a montré que les distributions des gouttes tendent vers les granulométries faibles quand la pression d'atomisation augmente. Par contre, l'augmentation du débit d'huile tend à favoriser la formation de grosses gouttes et l'augmentation de l'épaisseur de l'orifice entraîne la diminution des diamètres moyens. En fonction de la charge, Yilmaz [112] a mis en évidence que les gouttes tendent vers des granulométries plus faibles quand la charge augmente. Concernant la concentration totale des gouttes, l'auteur a montré que la quantité de gouttes amenées dans le gaz de blow-by augmente avec le régime.

En outre, la distribution granulométrique et la quantité d'huile peuvent évoluer le long du transport des gouttelettes à travers le circuit de blow-by. Les grosses gouttes ont tendance à se déposer sur les parois et sont en majorité éliminées avant même d'atteindre le tuyau de blow-by. La distribution granulométrique tend donc vers un diamètre moyen plus faible dans la partie aval du circuit.

3.16.1.2 Les résultats de mesure sur ELPI

Les mesures granulométriques à notre disposition ont été effectuées à l'aide d'un impacteur ELPI. Le principe consiste à envoyer le gaz à caractériser à travers un chargeur corronna de manière à donner des charges électriques aux particules d'huile. Le gaz passe ensuite à travers plusieurs étages d'impacteur dans lesquels les particules sont retenues progressivement selon leurs diamètres aérodynamiques. La détermination des quantités retenues se fait ensuite par la détection du courant électrique apporté par les particules piégées dans les divers étages de l'impacteur.

Considérons $(Qm)_{Di}$ la quantité d'huile retenue par le plateau i (caractérisé par la taille de classe D_i) situé entre le plateau $(i+1)$ et le plateau $(i-1)$. On obtient la distribution granulométrique $(Qm)_{Di}$ en traçant la quantité retenue sur chaque plateau i en fonction des diamètres de classe D_i du plateau. Le résultat est donné par la figure suivante:

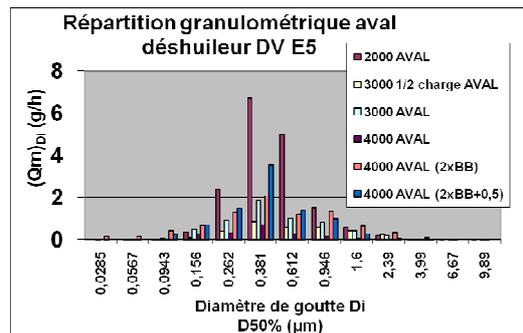


Figure 83 : Mesure granulométrique aval déshuileur sur les moteurs DV

Le résultat s'exprime sur une base de D50%. Ce qui veut dire que la moitié des particules retenues dans le plateau i , caractérisé par la taille de classe D_i ont un diamètre inférieur à D_i . Les particules en question sont distribuées autour de D_i et leurs tailles sont essentiellement comprises entre l'intervalle D_{i-1} et D_{i+1} .

L'analyse de ces résultats de mesure ont permis de déterminer la concentration en particules du gaz de blow-by pour le cas des moteurs DV. Les résultats sont résumés par le tableau ci-dessous (détails des calculs disponibles dans la référence [1]):

Régime	2000	3000 1/2 charge	3000	4000	4000 (2xBB)	4000 (1,5xBB+PAV)	4000 AVAL (1,5xBB+PAV)
Qm [mg/h]	32156	652	1174	381	1697	1693	9504
Qm [ug/l]	643,5	128,9	229,4	82,0	190,1	211,2	898,7
Cv [$\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$]	6,8E+05	1,4E+05	2,4E+05	8,7E+04	2,0E+05	2,2E+05	9,5E+05
Cn [particule/ cm^3]	3,5E+07	1,2E+07	3,9E+07	2,1E+07	9,7E+07	3,5E+07	1,8E+08

Tableau 10 : Concentration totale et débit total en particules pour les moteurs DV

Si nous considérons la distribution granulométrique des particules, on obtient le tableau suivant :

	2000 AVAL	3000 1/2 Charge	3000	4000 AVAL	4000 (2xBB)	4000 (2xBB+0,5)	4000 AVAL (1,5xBB+PAV)
$QT_{particule}$	2,40E+11	1,43E+11	2,22E+12	2,43E+11	2,28E+13	5,75E+11	4,55E+12
$(Dp)nl$	0,21	0,11	0,05	0,11	0,03	0,13	0,11
$(S)m$	1,11E-01	8,37E-02	4,62E-02	6,19E-02	2,07E-02	7,00E-02	5,88E-02
$(Dp)nl$	0,42	0,48	0,37	0,30	0,27	0,34	0,35
$(S)nl$	2,48E-01	4,23E-01	3,70E-01	2,81E-01	3,23E-01	2,37E-01	2,96E-01

Tableau 11 : Paramètre granulométrique des particules d'huile pour les moteurs DV

Ce qui montre que le diamètre moyen massique après déshuileur varie d'environ 200 à 500 nm. Ces valeurs sont plus faibles si on raisonne en termes de distribution numérique.

Pour les mesures sur moteurs DV, en traçant la distribution cumulée des gouttes en fonction du diamètre particulaire, on obtient la courbe de la figure ci-dessous. Ce qui montre qu'à première vue, la majorité des gouttes amenées à la sortie du déshuileur ont des tailles inférieures à 1 µm.

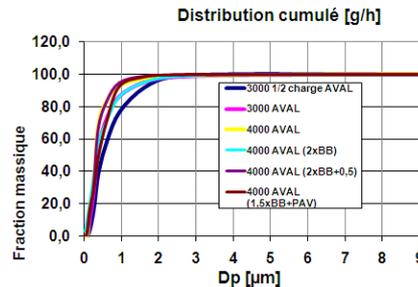


Figure 84 : Distribution granulométrique cumulée pour les moteurs DV

Le diamètre spécifique D_α peut être calculé à partir de la fonction cumulative de la distribution, en calculant le diamètre D_i nécessaire pour obtenir $F = \alpha$. Autrement dit, D_α signifie qu'une fraction α du volume du spray est contenue dans des gouttes dont les diamètres sont inférieurs ou égaux à D_α .

En considérant les résultats de mesures sur DV, on obtient les diamètres spécifiques suivants :

$$D_{25\%} = (D_{10\%})_{min} = 0,2 \mu m$$

$$D_{75\%} = (D_{75\%})_{max} = 0,75 \mu m$$

Ce qui confirme que la granulométrie après déshuileur est particulièrement faible car 75% des gouttes ont une taille inférieure à 750 nm et 25% ont une taille inférieure à 200 nm.

3.16.2 Analyse des influences

3.16.2.1 Influence sur la possibilité d'émulsion

Les travaux effectués par le Certam [97] ont montré que les émulsions se forment que les huiles soient introduites sous forme dispersées ou sous forme de film. Les dispositifs de tests correspondants à ces essais sont illustrés ci-dessous :



(A) Huile introduite sous forme de particules

(B) Huile introduite sous forme de film

Figure 85 : Mode de formation d'émulsions en présence de gaz humides (Certam)

La combinaison de ces deux cas de figure représente les phénomènes attendus dans les circuits de blow-by. Le premier correspond aux cas où l'huile s'accumule sous forme de film à l'intérieur des conduites avant la formation de l'émulsion et le deuxième cas de figure représente le contexte où l'huile et l'eau se déposent simultanément sur la paroi pour former l'émulsion.

A travers des essais préliminaires, nous avons constaté que les huiles se transforment systématiquement en émulsion blanche quelque soit le mode d'administration de l'huile. Trois cas ont été testés : dans le premier cas l'huile a été introduite sous forme de liquide à travers une nourrice d'alimentation en huile comme dans le cas du Certam (voir Figure 85-A). Dans le deuxième cas, l'huile a été introduite en quantité importante dans le tube d'essai avant d'envoyer le froid et l'air humide (voir

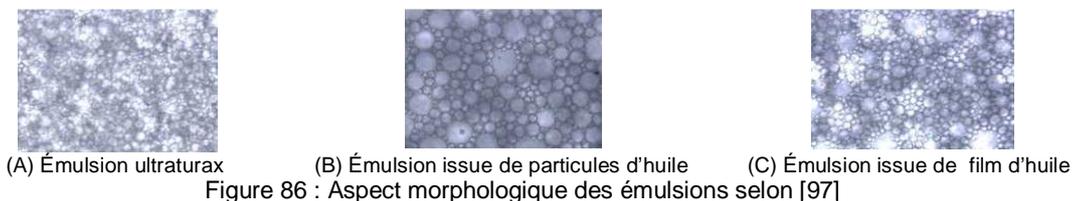
Figure 87-A) et dans le troisième cas l'huile est introduite en faible quantité sous forme de couche mince étalée sur la paroi du tube testé (voir Figure 87-B).

3.16.2.2 Influence des particules d'huile sur la morphologie et le type d'émulsion

Influence de la granulométrie sur la morphologie et le type d'émulsion

Du point de vue théorique, les particules d'huile ainsi que la vapeur d'eau peuvent toutes les deux se déposer sous forme dispersée. Il est alors difficile de conclure lequel des deux éléments constitue la phase dispersée des émulsions de blow-by. Dans le meilleur des cas, les deux éléments seront simultanément dispersés à l'intérieur de l'émulsion pour donner une émulsion multiple. Toutefois, si l'on se réfère à la règle d'Ostwald, les gouttelettes d'huile ont plus de chance d'être la phase dispersée compte tenu de leur faible teneur dans les émulsions de blow-by. Dans tous les cas, il est clair que la distribution granulométrique de l'huile jouera un rôle important dans la morphologie de l'émulsion obtenue.

La distribution des gouttes à l'intérieur de l'émulsion varie avec le mode de formation de l'émulsion. Par analyse microscopique, les travaux du Certam et de l'ENSCP [97] ont montré que les émulsions obtenues avec de l'huile atomisée (D numérique moyen 270 nm) ont des distributions de gouttes plus grandes que les émulsions obtenues en laboratoire sur Ultra turrax.



Influence de la quantité d'huile sur la morphologie et le type d'émulsion

Dans les circuits de blow-by, la quantité d'huile est liée directement à la concentration en particules dans le gaz ainsi que le taux de capture de ces particules le long des conduites.

Comme nous l'avons expliqué auparavant (paragraphe §2.3.4.1.2 et §2.3.5.3), la modification de la proportion de l'huile dans une émulsion peut entraîner une inversion de phase de celle-ci. Ainsi, dans les circuits de blow-by, les émulsions observées peuvent être totalement différentes selon l'endroit où l'on se place dans le circuit. En particulier, une différence importante de morphologie est attendue entre le circuit amont du déshuileur, le circuit aval du déshuileur ainsi qu'à l'intérieur du déshuileur lui-même.

3.16.2.3 Influence sur la stabilité des émulsions

Influence de la distribution granulométrique des gouttes dispersées

Théoriquement, plus la taille des gouttes d'une émulsion est faible, plus l'émulsion mettra du temps pour se scinder en deux couches distinctes.

En laboratoire, nous avons pu constater l'impact de la dispersion des gouttes en mélangeant l'eau et le lubrifiant et en jouant sur l'intensité et la durée d'agitation subie par le mélange. Pour cela, nous avons utilisé le lubrifiant Quartz 9000 avec 50% d'eau que nous avons mélangé avec l'Ultra turrax pendant 5 à 10 min. Les résultats des essais sont détaillés sur la figure suivante:

	4000 rpm	5200 rpm	6400 rpm
5 minutes			
	Démixtion en moins de 10 minutes	Démixtion en moins d'une heure	Démixtion impossible en une heure
10 minutes			
	Démixtion en moins d'une heure	Démixtion impossible en une heure	Démixtion impossible en une heure

Tableau 12 : Résultats d'essais émulsion Ultraturax avec différentes conditions d'agitation

Le Tableau 12 montre que plus l'agitation est intense, plus l'émulsion est stable.

- A 6400 rpm, l'émulsion reste homogène après une heure de décantation quelle que soit la durée d'agitation. Le degré de dispersion étant dicté par l'agitation subie par le mélange, il est clair qu'une telle émulsion est caractérisée par une faible dispersion des particules.
- Pour une faible intensité d'agitation, les émulsions se cassent en deux couches en moins d'une heure et cela quelle que soit la durée d'agitation. Théoriquement, cette émulsion est caractérisée par une dispersion grossière des gouttes.
- Pour une intensité d'agitation moyenne, la stabilité varie avec la durée d'agitation. Cinq minutes d'agitation conduisent à une émulsion instable alors que dix minutes d'agitation ont permis d'obtenir une émulsion stable dans la première heure de décantation.

A travers les essais préliminaires (Figure 41), nous avons pu constater que, même en absence d'agitation mécanique du mélange ou d'atomisation mécanique de l'huile, une émulsion blanche se forme toujours (à une nuance près, dans ce cas la majeure partie de l'eau est généralement retrouvée à l'état libre à l'intérieur des émulsions). Ce qui signifie que l'émulsion qui se forme est très instable ou perd sa capacité d'absorber l'eau à partir d'une certaine composition. Ce qui entraîne l'apparition de blocs de glace purs à l'intérieur des émulsions à la fin des essais (figure suivante)



(A) Blocs de glace au milieu des émulsions



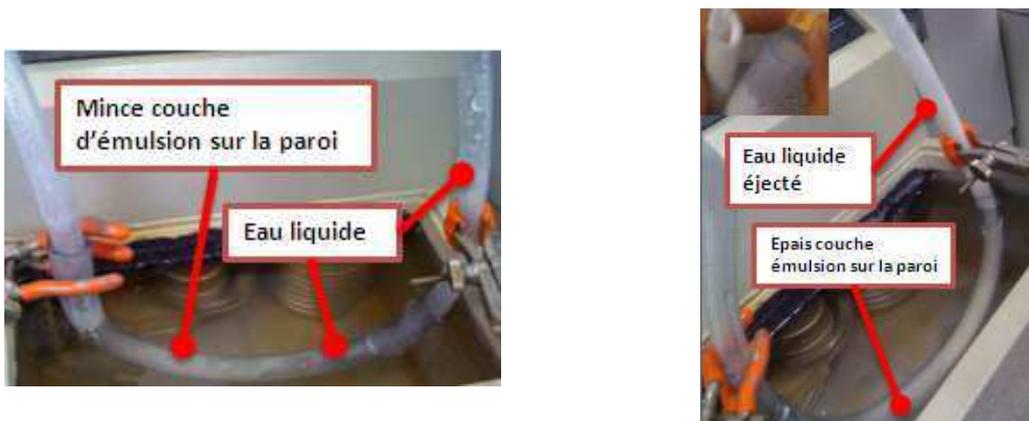
(B) Émulsion évacuée à la sortie

Figure 87 : Exemple d'émulsions obtenues avec un film d'huile (Essai préliminaire)

Comme on le voit sur la Figure 87, au lieu d'obtenir une émulsion très diluée, des blocs de glace sont présents à l'état libre à l'intérieur des tubes (Figure 87-A) alors qu'une partie de l'émulsion s'est déplacée librement jusqu'à la sortie (Figure 87-B).

Influence de la quantité d'huile

Nous avons constaté, à travers nos essais préliminaires, que dans le cas des émulsions obtenues à partir d'un film d'huile, aucune différence notable n'est constatée entre une mince couche et une importante quantité d'huile déposée. Les deux cas conduisent à l'apparition d'une couche d'émulsion blanche qui tapit la paroi ainsi qu'un flux de condensats traverse librement à travers les couches d'émulsion (Figure 88). La seule différence entre les deux cas réside sur la quantité de l'émulsion observée. Ce qui s'explique sans recourir aux diverses théories sur la stabilité des émulsions.



(A) Mince couche de Quartz 9000 déposée

(B) Importante quantité de Quartz 9000 déposée

Figure 88 : Formation d'émulsions avec une mince couche et une importante quantité d'huile pré-déposée (Essai préliminaire)

3.16.2.4 Influence de l'huile sur la température de cristallisation et sur la viscosité

Impact de la distribution des gouttes

En cas d'émulsions multiples, si l'eau est dispersée dans les particules d'huile, sa cristallisation peut varier avec la distribution granulométrique de l'huile. Comme nous avons expliqué dans le paragraphe §2.3.6.2, plus ces gouttes d'eau sont petites, plus la température de cristallisation est faible.

La relation entre la granulométrie de l'huile et la température de cristallisation peut être dans ce cas expliquée par les figures suivantes :

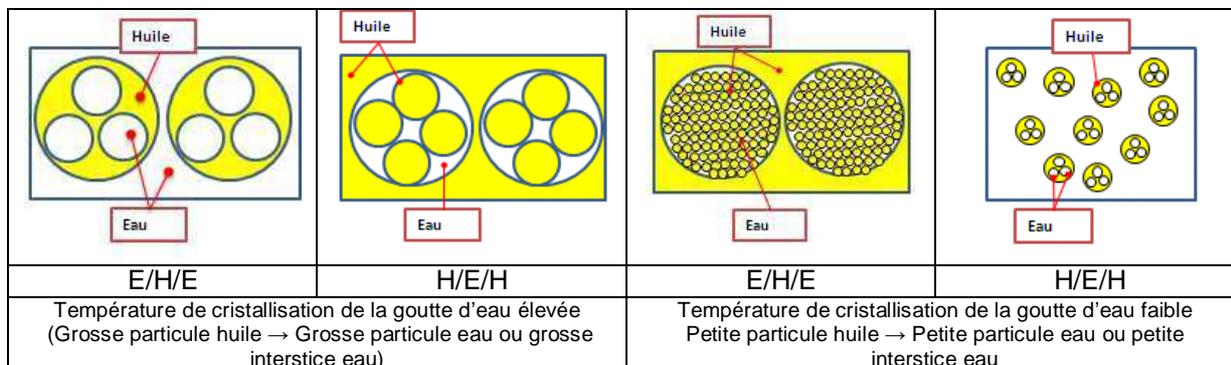


Figure 89 : Émulsion multiple et température de cristallisation des gouttes d'eau en fonction de la granulométrie de l'huile

En outre, en agissant sur la possibilité de séparation des phases en deux couches, la distribution des gouttes a un impact direct sur la possibilité de cristalliser l'eau. C'est le cas par exemple des résultats

observés par l'ENSCP [113][114] en étudiant le comportement thermique de deux émulsions de lubrifiant préparées dans des conditions d'agitations différentes.

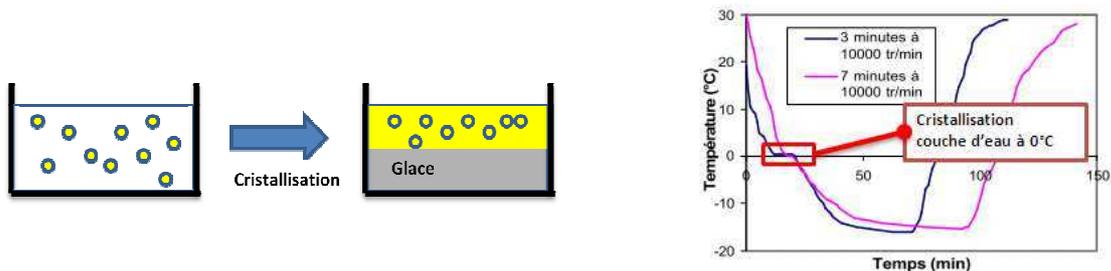


Figure 90 : Impact de l'agitation sur la cristallisation de l'émulsion Ultra turrax selon [113]

Comme le montre la figure, le refroidissement de l'émulsion fait apparaître une palier de cristallisation à 0°C pour l'émulsion préparée à faible durée d'agitation. Ce qui n'est pas le cas si l'agitation est à 1000 rpm.

Impact de la quantité de l'huile

En agissant sur la morphologie de l'émulsion, la quantité d'huile mise en jeu ou plus précisément la quantité d'huile déposée par le gaz de blow-by joue un rôle important sur la température de cristallisation:

- Si la quantité de l'huile est faible, l'eau a plus de chance de devenir la phase continue. L'émulsion aura donc une température de cristallisation élevée. La température en question sera fonction du volume ainsi que la fraction en huile (ou en eau) du mélange.
- Si la quantité de l'huile est élevée, l'eau sera dispersée à l'intérieur de la matrice huile et la température de cristallisation sera plus faible. La température de cristallisation s'étalera sur un intervalle de température qui est lié à la granulométrie de l'eau dispersée. Les détails de ces approches sont exposés dans le paragraphe §2.3.6.2.

La figure suivante résume le comportement à froid de diverses émulsions préparées avec Ultra turrax disponibles dans la référence [113]

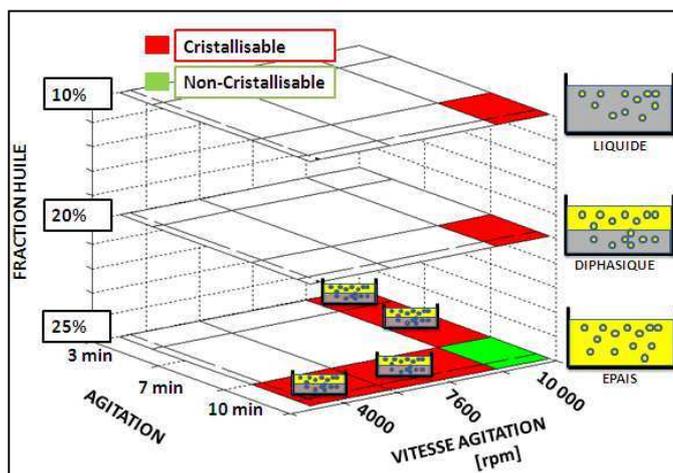


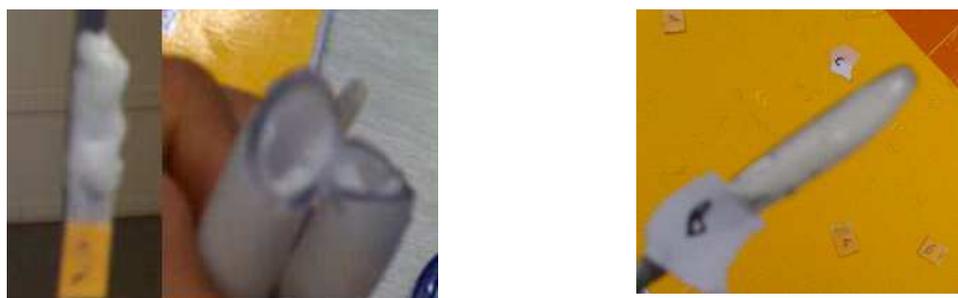
Figure 91 : Impact de la quantité d'huile sur la cristallisation d'une émulsion Ultraturax selon [113]

Ces résultats indiquent qu'à une concentration en huile supérieure à 10% dans l'émulsion, la cristallisation provient exclusivement de la solidification d'une phase aqueuse qui se dépose après démixtion de l'émulsion. En outre, pour une concentration en huile de 25%, la cristallisation n'a été possible que pour des conditions d'agitation particulières.

Afin de confirmer la nécessité de prendre en compte l'aspect huile vis-à-vis des études de la possibilité de cristallisation de l'eau, nous avons testé sur notre dispositif d'essais préliminaires deux cas : avec et sans huile. Les résultats confirment que la présence d'une quantité importante d'huile dans le dispositif a permis d'inhiber la cristallisation de l'eau à l'intérieur du tube. Ainsi, les anneaux de glace qui ont été identifiés en régime sans huile (Figure 92-A) ne sont plus retrouvés en présence d'huile (Figure 92-B). A la place de la glace, une couche d'émulsion visqueuse non cristallisée tapis la paroi sans pour autant entraîner une surpression notable. En outre, une fraction d'émulsion très fluide ainsi qu'une certaine quantité d'eau sont dégagées en permanence en dehors du tube (figures suivantes).



(A) Essai avec air humide pur (B) Essai avec film d'huile pré-refroidi
Figure 92 : Impact de l'huile sur la cristallisation (Essai préliminaire)



(A) Émulsion visqueuse non cristallisée dans le tube (B) Émulsion très fluide éjectée à la sortie du tube
Figure 93 : Émulsion obtenue avec film d'huile pré-refroidi (Essai préliminaire)

3.16.2.5 Impact de l'huile vis-à-vis de la nucléation

Afin de comprendre le rôle joué par les émulsions et les huiles sur la condensation et la formation de givre, nous avons effectué un test dans lequel l'air humide est envoyé sur une couche d'émulsion ou une couche d'huile maintenue froide. Le dispositif est le suivant :

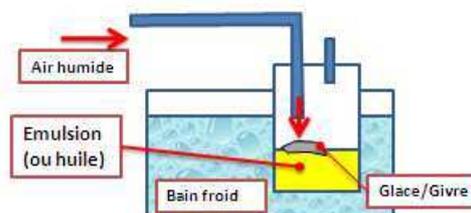


Figure 94 : Dispositif d'essai de condensation et de formation de givre sur une couche d'émulsion ou d'huile

Les résultats montrent que la condensation se déroule de façon normale au-dessus de l'émulsion. Les condensats se sont accumulés sous forme d'amas et par la suite se transforment en blocs de glace pure au milieu de la couche d'émulsion et à la périphérie du récipient. Le reste de l'émulsion est resté intact et la dilution de l'émulsion par l'eau ne semble pas être observée. Du givre est aperçu

partiellement enfoui à la périphérie du récipient, probablement à cause de la température qui y règne. Le phénomène est similaire pour les deux types d'émulsion Ultraturax préparées sous 6400 et 5200 rpm (temps d'agitation 5 min).

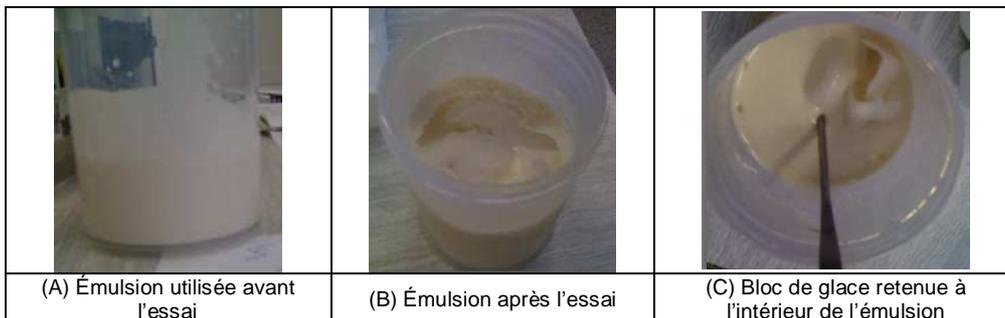


Figure 95 : Essai de condensation et de givre au-dessus d'une émulsion Ultraturax 6400 rpm/5 min

Les phénomènes de condensation et de formation de glace ont aussi été constatés en-dessous d'une couche d'huile froide. Comme le montre la figure suivante, la majorité de la glace a été identifiée à la périphérie du récipient, partiellement enfouie sous l'huile. Le reste de l'huile semble être intact. Cela pourrait s'expliquer à la fois par la différence de température entre la périphérie du récipient et le milieu ainsi que l'impossibilité de nucléation au-dessus de l'huile dans les conditions de température et d'humidité qui règnent à l'intérieur du récipient : le récipient devient le site de nucléation préférentiel.

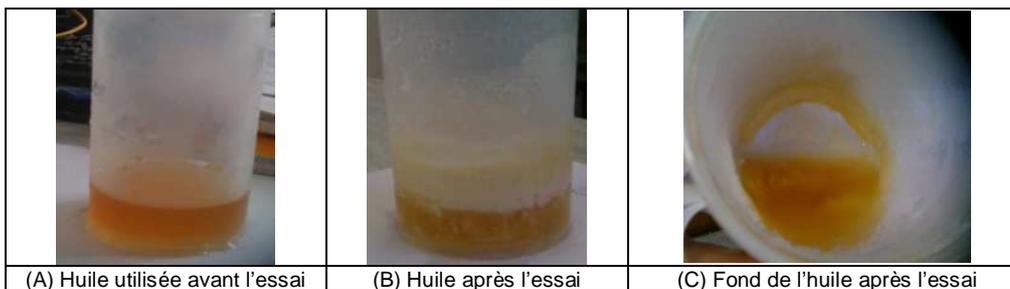


Figure 96 : Essai de condensation et de givre au-dessus d'une huile Quartz 9000

3.16.3 Conclusion sur la granulométrie, le mode d'administration et la concentration en huile

Les particules d'huile dans le gaz de blow-by après le déshuileur sont centrées sur un diamètre moyen de l'ordre de 200 à 500 nm. En termes de masse, plus de 75% des gouttes ont des diamètres particuliers inférieurs à 750 nm. Pour les concentrations totales en particules d'huile, la valeur est de l'ordre de 100 à 900 µg/l.

La taille et la concentration en particules du gaz dépendent de plusieurs facteurs. Elles sont liées au moteur, à la condition de fonctionnement ainsi qu'à la configuration du circuit de blow-by externe.

La formation d'une émulsion est systématique dès que l'huile est en contact avec l'eau et cela quelque soit le mode d'administration de l'huile (sous forme de film, sous forme de gouttelette, via une alimentation en continu) et quelle que soit la quantité introduite. Néanmoins, l'émulsion n'est pas forcément « homogène » mais peut contenir deux couches différentes dont une couche émulsion et une phase aqueuse.

La granulométrie des phases dispersées d'une émulsion (donc logiquement la granulométrie des particules d'huile amenées par le gaz de blow-by) a un impact direct sur sa stabilité. Toutefois, avant d'essayer de voir l'impact de ce paramètre sur le phénomène observé, il serait plus intéressant de travailler sur la granulométrie minimale pour voir la différence entre une **condition condensante** pure (sans huile) et une condition hautement **émulsionnante** (avec de l'huile sous formes de très petites

particules). Les autres conditions de granulométrie devraient être un intermédiaire entre ces deux cas limites.

La concentration en huile joue aussi un rôle important sur la morphologie, la stabilité et la cristallisation de l'émulsion. Il doit être pris en compte lors des futurs essais. Toutefois, comme dans le cas de la granulométrie, il serait intéressant de commencer l'étude avec une quantité maximale afin de constater la dérive maximale sur les phénomènes de condensation et de givre.

La condensation et la formation de givre se réalisent sans problème au-dessus d'une couche d'émulsion. Elles semblent toutefois défavorisées au-dessus d'une couche d'huile pure.

3.17 Les autres paramètres

3.17.1 Le déroulement des essais et les profils de roulage

Comme il a été exposé dans les paragraphes précédents, tous les paramètres liés aux conditions de fonctionnement du véhicule varient avec le temps (débits, températures, humidités, etc.). En particulier, pendant la phase de macération effectuée entre les essais de gel et d'émulsion, le véhicule est laissé dans le froid pendant plusieurs heures. Ce qui a pour conséquence de solidifier les émulsions ou les condensats qui sont retenus sur certaines parties des circuits.

Les essais préliminaires que nous avons effectués montraient qu'une pause toutes les 5 minutes entre les essais d'émulsion conduit au bouchon après la reprise des essais. Dans certains cas, les bouchons sont dus à la cristallisation de l'eau à l'état libre piégée dans les émulsions (Figure 97-A). Par contre, dans d'autres cas, aucune quantité significative de composés solidifiés n'a été détectée, le bouchon semble être simplement causé par l'entassement des émulsions fluides sur la partie basse de l'échantillon (Figure 97-B).

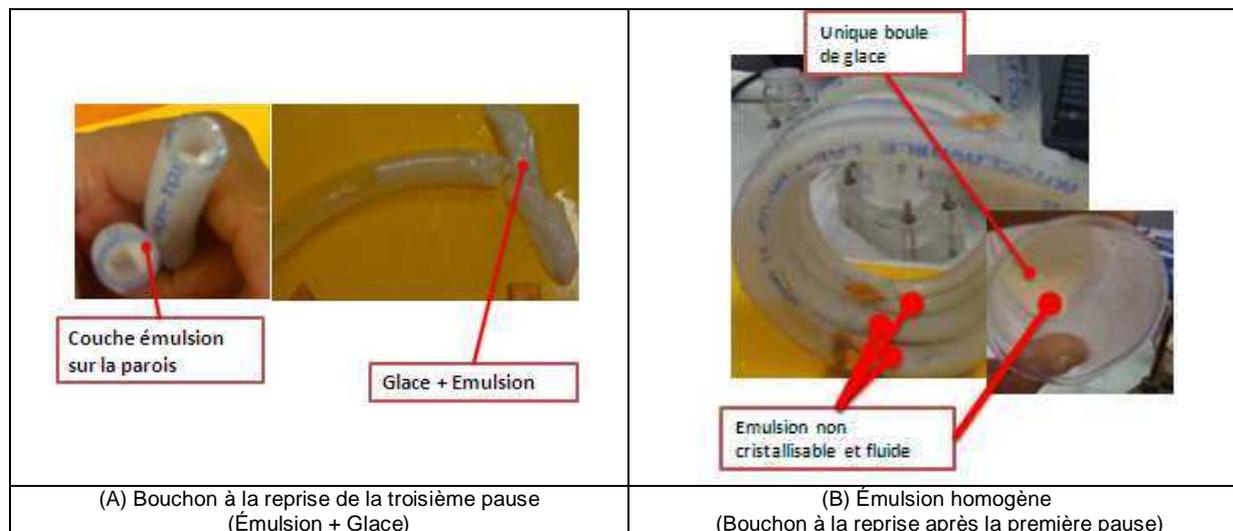


Figure 97 : Phénomène d'émulsion par envoi discontinu de gaz humide (Essai préliminaire)

Pour la suite de l'étude, comme les phénomènes mis en jeu eux-mêmes ne sont pas encore élucidés dans le cas des régimes stationnaires, on se contentera dans le cadre de la thèse de travailler avec des valeurs de paramètres constantes. Ce qui n'empêche pas toutefois d'estimer les résultats attendus en régime cyclique en superposant les différents résultats en conditions stationnaires.

3.17.2 La pulsation des débits

A priori, l'impact de la pulsation de débit se limite à la modification des coefficients de transfert par convection. L'existence des corrélations (§2.4.4.5) entre les deux paramètres nous permettent d'appréhender cet impact de manière théorique.

3.17.3 La présence de carburant

Pour des raisons de sécurité au niveau des expérimentations, l'impact du carburant ne sera pas traité dans cette étude. Rappelons toutefois que théoriquement, la présence de carburant peut avoir les impacts suivants :

- Compétition entre la condensation de la vapeur d'eau et de carburant (existence d'azéotrope éventuel).
- « Réchauffement » de la paroi à cause de la condensation de la vapeur d'essence.
- Augmentation de la température de cristallisation des émulsions ou de l'eau à cause de la présence d'essence liquide (non cristallisable).
- Dilution des émulsions par l'essence : donc stabilisation ou déstabilisation de l'émulsion et modification de la viscosité.

3.17.4 La température des particules d'huile

La température des particules d'huile ne peut pas être évaluée ni mesurée dans le cadre de la thèse. On peut toutefois estimer qu'elle est au moins égale à la température du gaz et ne dépasse pas la température de l'huile dans le carter. L'analyse des résultats d'essais sur banc climatique a montré une température de gaz pouvant descendre jusqu'à -30°C (phase transitoire) et une température d'huile pouvant monter jusqu'à 108°C .

3.18 Conclusion partielle

En se basant sur les analyses bibliographiques et sur les essais préliminaires en laboratoire, nous avons pu déterminer les paramètres et les phénomènes pertinents pour l'étude de gels et d'émulsions de blow-by.

Les phénomènes élémentaires attendus dans la formation de gels et d'émulsions de blow-by comprennent la formation d'émulsions à partir d'un mélange de film d'huile ou de particules d'huile avec les condensats, la condensation de la vapeur d'eau sur les parois, la formation de givre, la cristallisation de l'eau en glace et la condensation homogène suivie de l'accrétion des particules de glace ou d'eau qui en découle.

Les paramètres qui nous ont semblé les plus importants dans le cadre de notre étude sont : l'hygrométrie du gaz, la température du gaz, le débit du gaz, les diamètres des tuyaux, la température de paroi, l'orientation des pièces, la géométrie des pièces, la longueur des pièces, les granulométries des particules d'huile et leurs quantités.

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrerons sur la température de rosée (ou l'humidité absolue), le diamètre des tuyaux, le débit des gaz ainsi que la température de paroi. Leurs plages de variation sont données par le tableau suivant :

	Td	Débit	T° paroi	Diamètre
Min	-10 °C	0 L/min	0 °C	4 mm
Max	50 °C	105 L/min	-30 °C	32 mm

Bien que la température du gaz joue un rôle important, il n'est pas impératif de l'étudier séparément dans la mesure où elle est déduite implicitement du point de rosée du gaz. Pour être optimale, l'étude de l'orientation des pièces et de la géométrie des pièces (coude etc.) nécessite une définition préalable des phénomènes prépondérants. La longueur des tuyaux joue un rôle important aussi bien sur les phénomènes prédominants que sur le transfert thermique et de masse. Expérimentalement, l'étude de son impact ne nécessite pas forcément la modification de la longueur des tuyaux. En effet, l'étude peut être faite en travaillant avec des tubes longs transparents, permettant d'observer les phénomènes en un point quelconque du tube et en associant les essais avec des modèles thermiques appropriés.

L'huile Quartz 9000 est recommandée pour les études de l'émulsion, il a pour avantage de conduire à l'émulsion la plus stable. Pour la quantité d'huile et la granulométrie, il faudrait d'abord partir de leurs

valeurs jugées optimales (zéro puis maximum d'impact) puis si nécessaire, on peut les faire varier pour l'étude de leurs sensibilités respectives.

Les mesures goniométriques montrent que l'angle de contact de l'huile est beaucoup plus faible par rapport à celui de l'eau. L'influence de l'angle de contact est donc de moindre importance dans la mesure où l'huile garde une mouillabilité élevée vis-à-vis de la surface.

Glossaire

$(m.huile)_N$	Masse d'huile retenue sur le plateau N	[kg]
$(Cn.particule)_{Di}$	Concentration numérique en particules de taille de classe Di	[particules/cm ³]
$(Cv.particule)_{Di}$	Concentration volumique en particules de taille de classe Di	[µm ³ /cm ³]
$(Dp)_{nl}$	Diamètre moyen numérique	[µm]
$(Dp)_{nl}$	Diamètre moyen volumique	[µm]
$(m.goutte)_{Di}$	Masse d'une goutte de taille Di	[g]
$(Qn.particule)_{Di}$	Débit numérique des particules de taille de classe Di	[Particule/s]
Cm	Concentration massique totale en particules	[µg]
Cn	Concentration numérique totale des particules	[particules/cm ³]
Dp_N	Diamètre particulaire caractéristique du plateau N	[µm]
F	Distribution cumulée des gouttes $F(Di) = \frac{\sum_0^{Di} (Qm)_{Di}}{\sum_0^{Di=9,89} (Qm)_{Di}} * 100$	
pi	Fréquence de particule i	
QBB	Débit du blow-by	[L/min]
σ	Ecart type	

Subscript :

Air	Dans l'air
BB	Dans le blow-by
Echap	A l'échappement
m	Massique
nl	Numérique
vl	Volumique

Chapitre 4 :
ETUDES EXPERIMENTALES EN ABSENCE DE
PARTICULES D'HUILE
ET CORRELATIONS

CHAP. 4: ETUDES EXPERIMENTALES EN ABSENCE DE PARTICULES D'HUILE ET CORRELATIONS

4.1 Introduction

A travers les chapitres précédents, nous avons vu que le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by regroupe de nombreux phénomènes élémentaires qui sont surtout la condensation, la formation de givre, la solidification, et la formation d'émulsions. Actuellement, peu d'informations sont disponibles en ce qui concerne la dominance, l'interaction et l'enchaînement respectif de ces divers phénomènes dans un environnement de type blow-by. En outre, à part quelques études sur la formation de givre dans les échangeurs cryogéniques, la relation entre ces divers phénomènes avec la montée en pression dans les circuits reste à éclaircir. Il en est de même de la relation entre l'ensemble de ces phénomènes et les transferts thermiques correspondants.

Aussi pour pouvoir avancer, nous avons effectué des séries d'études expérimentales pour reproduire les différents phénomènes mis en jeu, observer leur déroulement et analyser l'influence des divers paramètres d'intérêt.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons en particulier aux cas de la condensation, de la formation de givre et la formation de glace en absence de particules d'huile. L'impact de l'huile peut être étudié dans un second temps, une fois que les divers phénomènes simples seront éclaircis. Les études expérimentales en présence d'huile seront traitées dans le Chap. 6.

Dans un premier temps, nous allons d'abord décrire le banc d'essais qui a été utilisé lors des expériences, puis nous détaillerons les protocoles expérimentaux et la matrice des essais prévus. Puis, nous décrirons qualitativement et quantitativement les différents phénomènes observés lors des essais. Ensuite nous étudierons l'impact de ces différents phénomènes ainsi que l'impact des différents paramètres sur le profil de la montée en pression à l'intérieur des échantillons tests. Dans un troisième temps, nous nous focaliserons sur l'aspect thermique des différents résultats mesurés afin d'établir des corrélations expérimentales. Enfin, en se basant sur les diverses études mentionnées ci-dessus (études thermiques, caractérisation des phénomènes, études des profils de pression), nous établirons des critères expérimentaux nous permettant de définir les zones de prédominance des divers phénomènes et de déterminer les conditions favorables au bouchon du tube.

4.2 Le banc d'essais

4.2.1 Intérêts et principe

Nous avons vu que les gels et les émulsions de blow-by mettent en jeu de nombreux paramètres ainsi qu'une multitude de phénomènes. Afin de comprendre le déroulement de ces phénomènes ainsi que l'influence de chaque paramètre, il est nécessaire de pouvoir reproduire et d'étudier ces différents phénomènes sur des dispositifs d'essais dans lesquels chacun des paramètres peut être mesuré et modifié tout en restant dans des conditions proches des conditions moteurs.

Le principe du banc d'essais consiste à envoyer un gaz modèle représentatif du gaz de blow-by dans un tube échantillon extérieurement refroidi par un bain cryothermostaté. Ce dernier représente les conditions froides sous capot.

Notons que même si le chapitre en cours est dédié aux essais en absence de particules d'huile, nous décrirons le banc en entier en y incluant aussi bien les systèmes servant à générer l'air humide que les systèmes utilisés pour générer les particules d'huile.

4.2.1.1 Les paramètres contrôlés

Compte tenu des diverses recommandations établies dans le chapitre précédent. Le gaz modèle utilisé est constitué par de l'air humide contenant une certaine quantité de particules d'huile.

Vis-à-vis de l'air humide, les paramètres à contrôler comprennent la teneur en eau, la température et le débit. Vis-à-vis des particules d'huile, les paramètres à contrôler sont la granulométrie, la quantité d'huile ou la concentration en particules ainsi que la composition de l'huile. Au niveau de l'échantillon test, les paramètres d'intérêts comprennent la température de la paroi, la géométrie du tube, son orientation ainsi que sa composition.

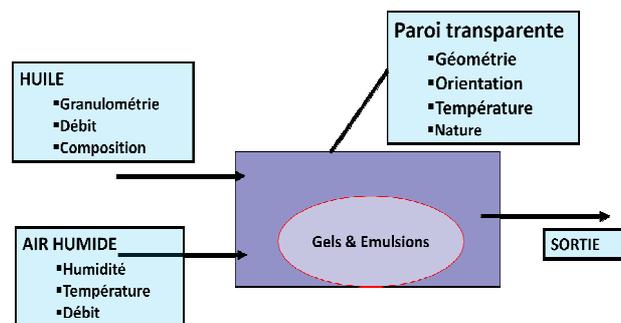


Figure 98 : Les paramètres contrôlés

4.2.1.2 Les paramètres suivis

Pour pouvoir contrôler le banc et établir les points de fonctionnement, les différentes pressions, les températures et les humidités aux différents endroits du banc sont mesurées. Cela concerne les divers endroits traversés par le gaz humide, les divers endroits traversés par le gaz amenant les particules d'huile ainsi que les endroits traversés par le mélange des deux gaz.

De nombreux paramètres sont suivis de près afin de caractériser le déroulement des essais et d'établir le bilan thermique et le bilan matière à l'intérieur de l'échantillon :

- Les températures des parois externes en amont, au milieu et en aval de l'échantillon sont mesurées. De même, nous avons aussi mesuré la température du bain près de l'entrée et près de la sortie du liquide de refroidissement.
- Pour pouvoir estimer la température interne du tube échantillon, un capteur de flux thermique est placé sur la paroi externe du tube. Sa place est choisie de manière à pouvoir estimer la température maximale sur les parois internes (le plus proche possible de l'entrée) tout en facilitant le démontage des échantillons. Tel qu'il est montré sur la Figure 108, le capteur de flux est placé à 150 mm du premier contact entre le gaz entrant chaud et le bain froid.
- Les températures et les humidités du gaz à l'entrée et à la sortie du tube sont suivies de près.
- Pour caractériser les bouchons du tube échantillon, la pression à l'entrée du tube échantillon est suivie en temps réel.
- Le débit du gaz traversant l'échantillon ainsi que le débit de brouillard d'huile introduit sont aussi suivis de près.

4.2.2 Composition du banc et matériels

Le banc est composé par quatre grands systèmes connectés en série et en parallèle. On distingue le système de purification de l'air comprimé utilisé, le système de génération de gaz humide, le système de génération de brouillard d'huile et le système de refroidissement de l'échantillon.

Pour les dispositifs de suivi des essais, on distingue les capteurs et les dispositifs d'acquisition.

Les divers éléments constitutifs du banc sont détaillés sur la Figure 103.

4.2.2.1 Le système de purification de l'air

Le système de purification de l'air comprimé se trouve dans la partie la plus en amont du banc. Il servira à ramener l'air comprimé à la qualité requise pour le bon fonctionnement du banc. Le système comprend :

- Des filtres à huile servant à purifier l'air comprimé, issu du réseau, des éventuelles particules d'huile provenant des compresseurs (Composant A2 dans la Figure 103).
- D'un sécheur Zander à dessicant servant à déshumidifier l'air comprimé afin de pouvoir travailler avec des humidités faibles (A2).
- Des séries de détenteurs servant à contrôler et stabiliser la pression de travail à l'intérieur du banc d'essais (A3)

4.2.2.2 Le système d'humidification

Le système d'humidification sert à humidifier l'air et à amener son hygrométrie absolue ou sa température de rosée à la valeur de la consigne. La pièce maîtresse du système est constituée par une membrane d'humidification EnerFuel (A9) qui met en contact le flux d'air comprimé avec de l'eau à une température donnée circulant en circuit fermé.

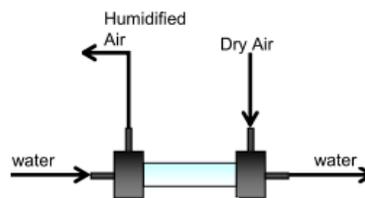


Figure 99 : Humidificateur

Afin d'optimiser le processus d'humidification, l'air comprimé est préchauffé à l'intérieur d'un échangeur de chaleur (A5), alimenté en eau chaude via un thermoplongeur (R1). En sortant de l'échangeur, l'eau chaude alimente aussi la membrane d'humidification avant de retourner vers le thermoplongeur.

L'humidité de l'air est contrôlée via la température du circuit d'eau. Idéalement, l'air humide sort à l'état proche de la saturation et a une température identique à celle du circuit d'eau.

Le circuit d'humidification comporte en parallèle de la membrane un circuit de by-pass (A11 à A13), permettant de diluer le gaz saturé sortant de la membrane. Le contrôle de l'humidité absolue se fait dans ce cas par la modification de la répartition du débit de gaz passant par la membrane et du débit de by-pass. Les deux flux de gaz humide et de gaz sec sont ensuite mélangés à travers un mélangeur statique (A14) avant de rejoindre le système de refroidissement et de chauffage du gaz situé en aval.

Les débits dans les différents circuits (côté air humide, côté eau chaude, côté by-pass) sont contrôlés via des vannes de précision (A7 et A11). Enfin, une vanne de purge (R3) a aussi été prévue pour pouvoir obtenir des débits d'air humide inférieur à 5 L/min.

4.2.2.3 Le système de refroidissement et de chauffage du gaz

Le système de refroidissement et de chauffage du gaz permet de contrôler la température et l'humidité relative du gaz indépendamment de la consigne d'humidité absolue. Le système est composé par un échangeur de chaleur (A17) servant à mettre en contact le flux d'air humide avec une boucle d'huile silicone portée à une température donnée. Le maintien en température de la boucle est assuré par un cryothermostat à circuit externe (R4).

La capacité de l'échangeur, le débit de la pompe du cryostat ainsi que la puissance thermique du cryothermostat ont été calculés de manière à ce que la température du gaz sortant de l'échangeur soit au maximum de 1°C plus élevée ou plus faible par rapport à la température de consigne donnée par le cryothermostat.

En outre, afin de s'assurer que le gaz ne se refroidit pas le long de son parcours à l'intérieur des tuyaux de raccordement (risque de condensation), les tubes sont réchauffés par des fils chauffant équipés de thermostat ainsi que des mousses d'isolation.

4.2.2.4 Le système de génération de brouillard d'huile

Le système de génération de brouillard d'huile sert à générer les particules d'huile requises pour les essais. La pièce maitresse du système est composée d'un atomiseur aérodynamique Palas (H2)

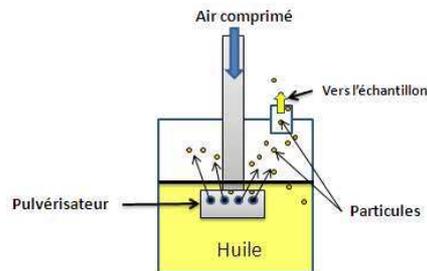


Figure 100 : Atomiseur

Le principe de l'atomiseur consiste à pulvériser l'huile sous forme de particules par l'intermédiaire d'une buse d'atomisation aérodynamique. La pulvérisation des particules est assurée par un jet d'air comprimé à travers la buse d'atomisation partiellement plongée dans l'huile. Le contrôle de la granulométrie se fait en agissant sur la température de l'huile alors que le contrôle du débit de particules peut être fait en agissant sur la pression de l'air comprimé.

La capacité de l'atomiseur a été choisie de manière à ce que le débit de particules d'huile couvre la plage retrouvée dans les moteurs (jusqu'à 5 g/h) tout en permettant d'obtenir un débit de brouillard ne dépassant pas les 10 L/min (pour permettre la dilution par l'air humide en aval).

Pour pouvoir contrôler avec précision la quantité de particules introduites dans l'échantillon d'essai, le brouillard d'huile issu de l'atomiseur est scindé en deux parties :

- La première partie du brouillard est éliminée du circuit via une pompe à vide (H8) muni de vannes de régulation (H5 et H6) et une série de filtres (H3 et H4).
- La partie restante est injectée dans la conduite amenant l'air humide pour être envoyée dans l'échantillon de test (A21). Le débit de brouillard d'huile (air + particules) introduit dans le système est mesuré à l'aide d'un débitmètre à pression différentielle (H9).

L'introduction du brouillard d'huile concentré dans le circuit à air humide est assurée par un raccord en Y (A19) montée à quelques centimètres de l'entrée de l'échantillon.

Afin de mesurer le débit total des gaz introduits (air humide + brouillard d'huile), un débitmètre à vortex (R11) a été placé à la sortie de l'échantillon.

4.2.2.5 Le bain cryogénique

Le bain cryogénique est constitué par une cuve transparente à l'intérieur de laquelle circule en circuit fermé un flux d'eau glycolée refroidie entre -10 et -30°C.

La mise en circulation de l'eau glycolée est assurée par une pompe refulante (F3) tandis que son refroidissement est assuré par un échangeur de chaleur (F2) lié à un groupe froid (F1) situé au laboratoire du CNAM.

Le débit en eau glycolée ainsi que les échangeurs ont été dimensionnés de manière à ce que l'eau glycolée ne se réchauffe pas de plus 2°C le long de son parcours dans la cuve contenant l'échantillon.

Deux configurations de bain cryogénique ont été construites. Une configuration horizontale permettant d'effectuer les essais avec des tubes disposés horizontalement et une configuration verticale pour les tubes disposés verticalement.

4.2.2.6 L'échantillon

Les échantillons sont constitués par des tubes en PVC ou en PFA (pour les essais émulsions) de 1 à 2 mm d'épaisseur. Rappelons toutefois que le type de matériaux n'a pas beaucoup d'importance dans le cas des véhicules puisque les parois sont dans la majorité des cas recouvertes de film d'huile.

De par leur transparence, ces tubes ont pour avantage de permettre l'observation en temps réel des phénomènes qui s'y déroulent. En outre, contrairement aux tubes métalliques qui sont de très bons conducteurs thermiques, ces tubes en plastique permettent dans une certaine mesure de faire apparaître des profils de température de paroi interne non constante reflétant ainsi ce qui est observé dans les tubes du circuit de blow-by. Par contre, malgré leur faible conductivité, les tubes sont suffisamment minces et s'approprient bien à l'étude des transferts thermiques par convection dans la mesure où le flux de chaleur échangée reste suffisamment faible (cas des gaz secs).

Afin de protéger du froid (risque de condensation précoce), les raccords métalliques situés à l'entrée et à la sortie du tube échantillon sont protégés par des récipients cylindriques vides et étanches.

4.2.2.7 Les capteurs et le système d'acquisition

Les hygromètres

L'humidité relative et les températures des gaz sont mesurées avant l'entrée et après la sortie du gaz humide dans l'échantillon. Comme le montre la Figure 101, l'hygromètre en entrée est placé dans le flux du gaz. Bien qu'il y ait un risque de perturbation du flux, aucun dispositif de stabilisation hydrodynamique n'a été placé compte tenu du risque d'encrassement par des particules d'huile. Ce choix est d'autant plus justifié que dans les moteurs, les tubes de blow-by se trouvent dans la plupart des cas immédiatement en aval des pièces équipées de passages non libres tels que les chicanes du déshuileur et les soupapes de surpression.

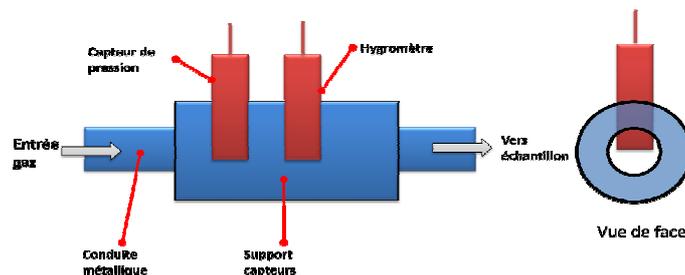


Figure 101 : Mesure des paramètres à l'entrée

Les hygromètres utilisés sont de types vaissala HMT 330 (R6 et R10). Ils mesurent à la fois les humidités relatives du gaz et leurs températures. Les températures de rosée et les humidités absolues sont ensuite obtenues par calcul au niveau des systèmes d'acquisition.

Les signaux de sortie des capteurs sont des tensions analogiques de 0 à 10 V.

Les capteurs de température

Les capteurs de températures utilisés sont des thermocouples de type T. Ils sont au nombre de dix au total. Leurs tailles et leurs types de gaines de protection ont été choisis selon leurs lieux d'utilisation dans le banc : thermocouples filières pour les parois, thermocouples avec isolant pour le bain cryogénique et thermocouples en tige pour les mesures à l'intérieur de la veine de gaz.

Avant leur utilisation, les thermocouples ont été étalonnés en se servant d'un cryothermostat. L'erreur maximale constatée est de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$.

Les thermocouples pour le suivi des températures sont liés directement au système d'acquisition, alors que les thermocouples pour la régulation des chauffages des tuyaux de raccordements sont

d'abord raccordés entre eux (calcul de la valeur moyenne de température) avant d'être connectés au thermostat.

Le fluxmètre

Dans la mesure du possible (tuyau à diamètre supérieur à D10), un capteur de flux thermique (Captec) a été placé sur la paroi extérieure du tube échantillon. Il servira à estimer le flux thermique local qui traverse la paroi à calculer la température de la paroi interne.

Le capteur de flux se présente sous forme d'une plaque mince métallique de 10x10mm de dimension. Afin d'éviter la formation de poche d'air entre la paroi à caractériser et le capteur de flux, une certaine quantité de pâte thermique a été posée entre les deux éléments.

Le capteur de flux thermique donne comme signal de sortie une tension de quelques μV . Le signal en question est directement envoyé aux modules d'acquisition pour le calcul de la valeur exacte du flux mesuré.

Le transmetteur de pression (R5)

Le transmetteur de pression utilisé est de type piezorésistif. Son domaine d'utilisation varie de -1 à 0,6 barG avec une précision de 0,5% de la plage d'utilisation. La pression mesurée sort du transmetteur sous forme d'un signal analogique de 0 à 10 V. Le signal est renvoyé directement au système d'acquisition.

Le débitmètre à pression différentielle (H9)

Le débitmètre à pression différentielle est utilisé pour la mesure du débit de brouillard d'huile introduit. Sa plage d'utilisation est de 0 à 10 L/min, avec une précision de 1% par rapport à la plage.

Ce type de débitmètre a pour avantage d'avoir un grand diamètre de passage empêchant ainsi l'encrassement des particules (modification de la distribution granulométrique) tout en permettant la mesure en temps réel des débits. En outre, si nécessaire, le débitmètre en question peut être retiré du banc sans conduire à une quelconque déstabilisation du point de fonctionnement (perte de charge maximale 3 mbar).

Le débitmètre à vortex (R11)

Le débit total du gaz qui traverse l'échantillon est mesuré via un débitmètre à vortex (Labcell) placé à la sortie de celui-ci. L'utilisation de ce type de technologie permet d'obtenir une bonne précision et une bonne tenue vis-à-vis de l'encrassement. Toutefois, contrairement au débitmètre différentiel, il ne permet pas de préserver la quantité et la granulométrie de l'huile qui le traverse. C'est qui n'est pas important compte tenu de l'endroit où il est placé.

Afin d'empêcher l'inondation du débitmètre par les condensats liquides issus de l'échantillon, le débitmètre est précédé d'un récipient de décantation monté juste à la sortie de l'échantillon.

Comme les autres appareillages, le débitmètre sort un signal analogique de 0 à 10 V.

Le système d'acquisition

Le système d'acquisition est composé par deux modules ES 410 et ES420 d'Etas. Il permet d'envoyer vers le logiciel d'acquisition les signaux analogiques provenant des différents capteurs ainsi que les micro-tensions envoyées par les thermocouples.

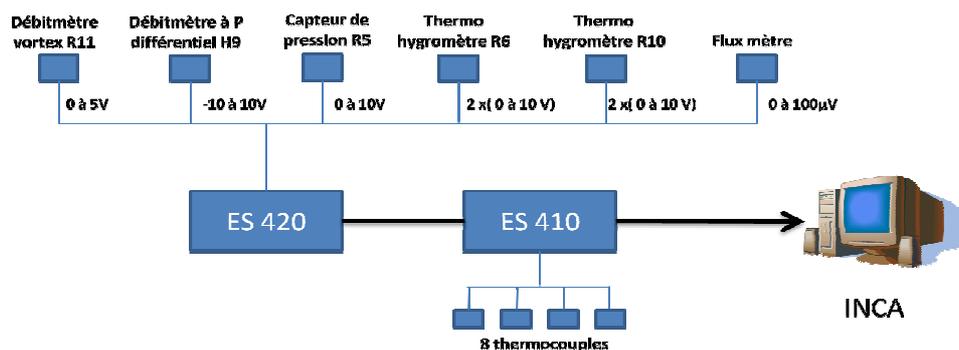


Figure 102 : Montage du système d'acquisition

L'acquisition et le traitement des données sont effectués en temps réel par le logiciel d'acquisition INCA. L'interface d'acquisition est présentée dans la Figure 104. Comme le montre cette figure, les différents paramètres mesurés sont affichés et enregistrés en permanence. En outre, les paramètres d'intérêt sont affichés sous forme graphique.

4.2.2.8 Les dispositifs de sécurité

Le banc comporte un certain nombre de dispositifs de sécurité garantissant son bon fonctionnement. Ce sont des soupapes de surpression (A1,A4) , des déverseurs de pression de précision (A8,A12), des filtres (A23, A24) de traitement de l'air pollué avant son rejet dans l'atmosphère ainsi qu'un extracteur d'air (A25).

4.2.3 La précision et la plage couverte

La Figure 105 résume la plage des paramètres couverts par le banc ainsi que leurs précisions respectives. Les quatre axes représentent respectivement le débit du gaz entrant dans l'échantillon, le point de rosée du gaz (ou l'humidité absolue), la température du gaz et la concentration en huile. Les plages des paramètres mesurés sur les véhicules sont marquées. De même, nous avons mis sur la figure les divers points qui ont été testés durant notre campagne d'essais pour la thèse.

Les valeurs des précisions tiennent compte à la fois de la précision des appareils de mesure ainsi que de la sensibilité des divers appareils de régulation (précision des vannes, efficacité des échangeurs de chaleurs, précision du régulateurs de pression de l'atomiseur). Pour le contrôle de la température de rosée, la précision varie avec le point de rosée lui-même ainsi que les autres conditions opératoires (débit, température), la valeur affichée est la précision minimale constatée expérimentalement.

Enfin pour la température du bain, la plage varie de -10 à -30°C, la précision de contrôle est de 1°C.

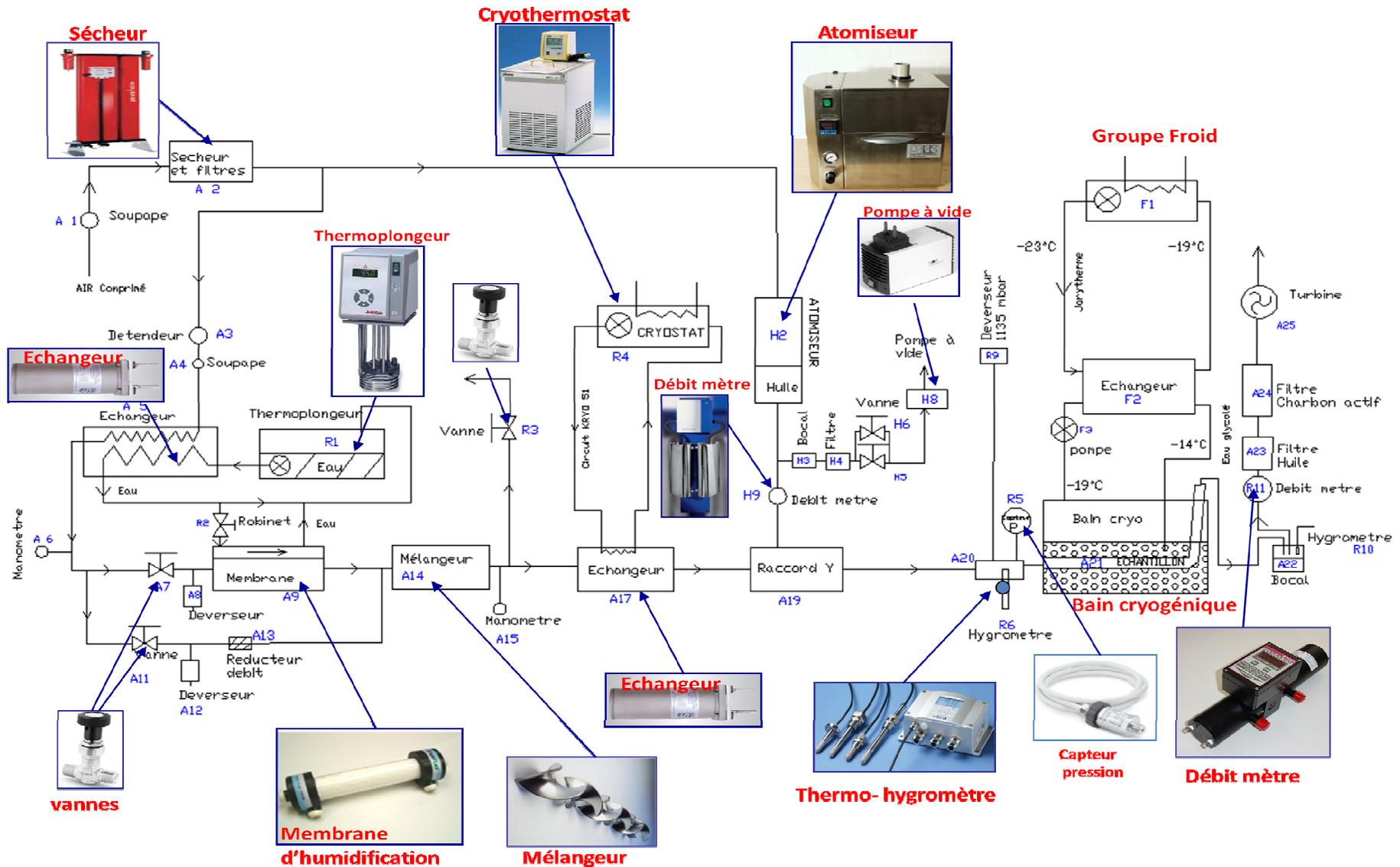


Figure 103 : Schéma du banc et appareillages

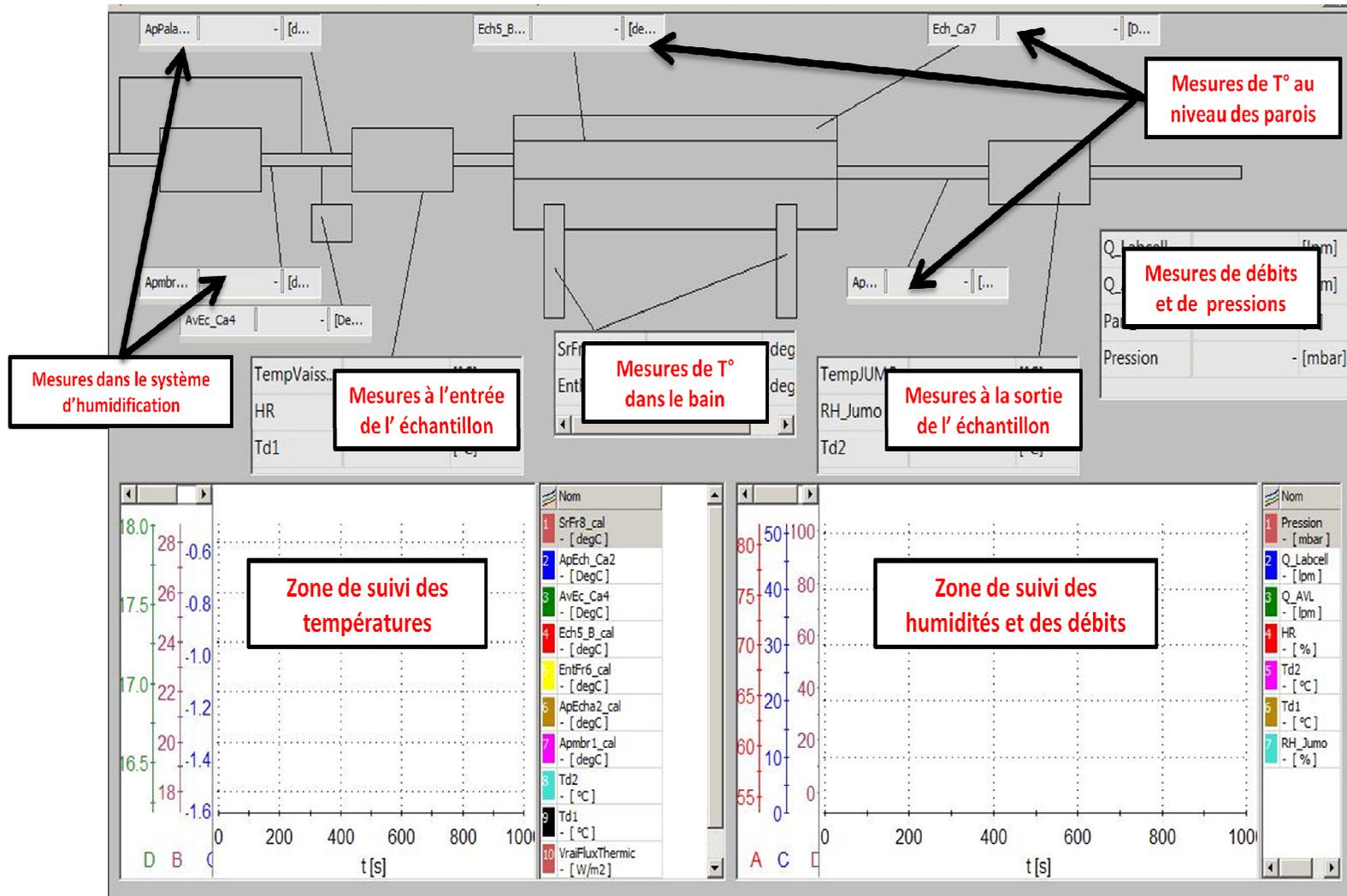


Figure 104 : Interface du logiciel d'acquisition INCA

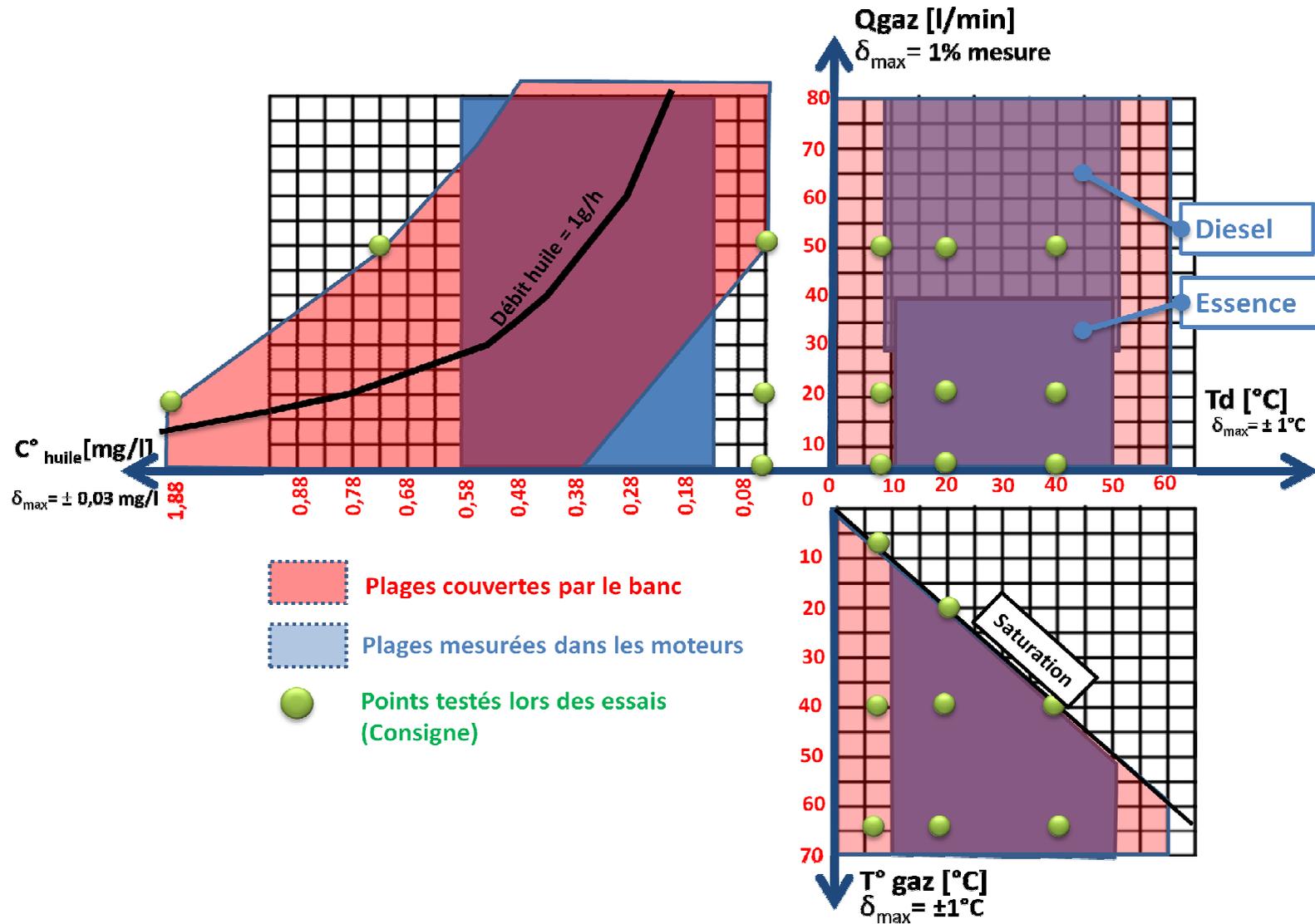


Figure 105 : Plages des paramètres couvertes par le banc et précisions

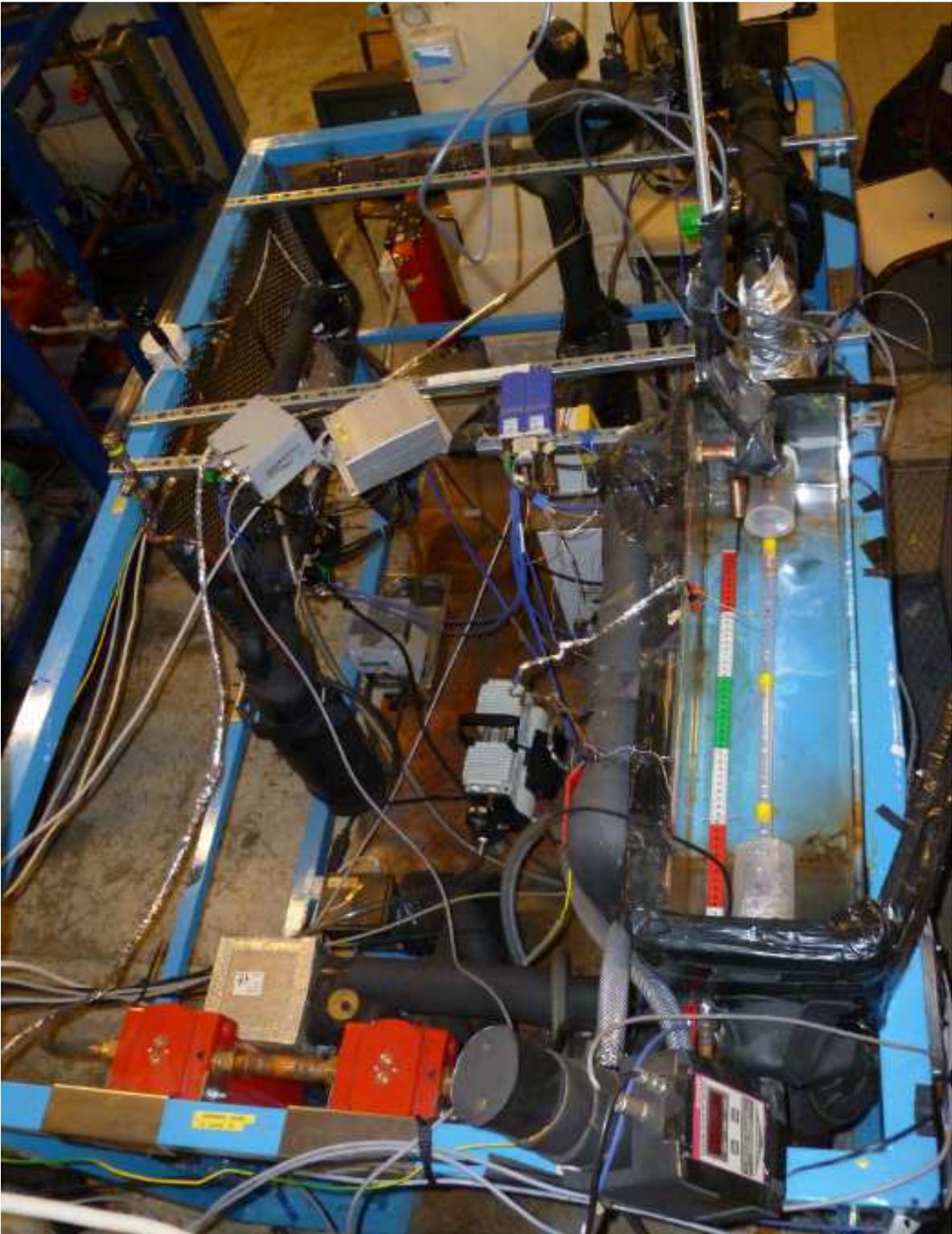


Figure 106 : Le banc d'essais

4.3 La matrice d'essais

4.3.1 L'humidité et la température du gaz

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la température du gaz et l'humidité sont étroitement liées. Si on se fixe une humidité relative donnée, choisir la température du gaz revient à choisir en même temps l'humidité absolue et vice et versa.

4.3.1.1 Essais avec du gaz saturé

En tenant compte des recommandations et de la plage d'humidité justifiées dans la partie dédiée à l'analyse des paramètres, nous avons choisi d'adopter trois niveaux d'humidité absolue dans l'intervalle de 0 à 80 g/kg d'air sec. Comme les phénomènes mis en jeu relèvent surtout du changement d'état de l'eau, nous avons donc choisi d'exprimer les valeurs d'humidité en termes de température de rosée. Les points choisis sont :

Td _E [°C]	
Niv. -1	7°C (Y _E = 6,24 g/kg)
Niv. 0	20°C (Y _E = 14,76g/kg)
Niv. +1	40°C (Y _E = 49,13g/kg)

Tableau 13 : Valeurs d'hygrométrie testées lors des essais sur banc

Du point de vue pratique, la première valeur (Td = 7°C) correspond à un gaz à faible humidité absolue dont la condensation ne peut s'effectuer que par refroidissement des parois. Pour le blow-by, elle correspond à un gaz fortement dilué par l'air sec ambiant (Dilution jusqu'à 12 fois) ou fortement déshydraté par la condensation dans le déshuileur. Rappelons que la quantité d'eau dans le gaz diminue fortement avec l'humidité. Il n'est donc pas nécessaire de travailler en-dessous de cette valeur.

Le gaz à température de rosée Td = 20°C correspond à un gaz d'humidité moyenne. Le gaz en question est susceptible de conduire à la condensation même à la température ambiante, cette valeur est assez proche des températures de rosée mesurées sur Exxx. Elle représente un gaz de combustion dilué jusqu'à 5 fois ou aussi un gaz partiellement déshumidifié par la condensation dans le déshuileur.

Le gaz à Td = 40°C correspond à un gaz d'humidité élevée et qui condense même si les parois sont réchauffées au-delà de la température ambiante. Ce point représente la valeur minimum de l'humidité des gaz de combustion pure. Notons qu'une valeur plus élevée aurait pu être choisie, toutefois les essais montrent qu'au-delà de ce point, les phénomènes que nous avons observés sont figés sur la condensation (à 50 L/min) quelle que soit la température des parois.

4.3.1.2 Essais avec du gaz surchauffé

Comme il a été expliqué dans le paragraphe §3.7.3, nous avons décidé de maintenir constante l'humidité absolue (donc les points de rosée) même pour les gaz surchauffés. Les températures ont été choisies en tenant compte de l'intervalle adopté (§3.7.3) ainsi que de la possibilité d'avoir trois gammes d'humidité relative pour chacune des trois températures de rosée choisies précédemment. La matrice pour l'humidité et la température est synthétisée dans tableau suivant :

HR [%]	T _{gaz} [°C]			
	7	24	44	66
7	100	33	11	4
20	28	100	26	9
40			100	28

Gamme HR 30% (indicated by red arrows pointing to the 7, 20, and 40 rows)

Gamme HR 9% (indicated by red arrows pointing to the 7, 24, 44, and 66 columns)

Tableau 14 : Optimisation de la matrice d'essais

Comme il est montré sur le Tableau 14, les gammes d'humidités relatives sont les suivantes :

- Gamme des faibles humidités relatives : HR_E aux environs de 9 % (9 à 11%)
- Gamme des humidités relatives moyennes : HR_E aux environs de 30% (26 à 33%)
- Gamme des gaz saturés (HR_E 100%)

Selon la température des gaz, chaque gamme correspond à une température de rosée de 7, 20 ou 40°C.

4.3.2 La température de paroi

Nous avons choisi d'utiliser trois températures de bain, avec un pas de 10°C. On a :

	Tliq [°C]
Niv -1	-10
Niv 0	-20
Niv +1	-30

Tableau 15 : Température du bain testée

Des essais à -5°C ont aussi été effectués mais ils aboutissent systématiquement à une condensation pure dans tous les tubes et ont été abandonnés.

4.3.3 Le débit et la dimension des échantillons

Trois niveaux de débit ont été choisis dans la plage de débit que nous avons établie dans les chapitres précédents. En tenant compte de la plage de fonctionnement du débitmètre, les valeurs adoptées sont:

	Qgaz [L/min]
Niv -1	6
Niv 0	20
Niv +1	50

Tableau 16 : Débits de gaz testés

En ce qui concerne le diamètre de l'échantillon, nous avons choisi la valeur de $D = 18\text{mm}$. Cette valeur est non seulement proche des diamètres moyens des tubes de blow-by mais surtout elle permet d'obtenir trois gammes de vitesse et deux régimes d'écoulement (intermédiaire et turbulent) pour les trois niveaux de débit choisis.

	Qgaz [L/min]	Vitesse [m/s]	Re (Régime)
Niv. -1	6	2,6	3169 (Intermédiaire)
Niv. 0	20	4,8	5932 (Turbulent)
Niv. 1	50	7,7	9173 (Turbulent)

Tableau 17 : Débit, vitesse et régime d'écoulement avec le D18

Des essais avec des dimensions plus grande (D31) et plus petite (D10) ont aussi été effectués. Toutefois, contrairement aux essais avec D18 qui sont construits sur une matrice complète d'essais, ces essais ont été arrêtés dès que des tendances en termes de phénomène prépondérant et de risque bouchon ont été identifiées.

4.3.4 La longueur et l'orientation des échantillons

Nous garderons constante la longueur des échantillons (voir chapitre 3). Les tubes étant transparents, les phénomènes observés à une position donnée peuvent toujours être identifiés bien que la longueur des tubes ne figure pas parmi les variables.

La longueur des tubes est fixée à 700 mm dont 440 mm de longueur utile. La longueur restante a été utilisée pour supporter la protection servant à isoler le raccordement de l'échantillon contre le froid.

En ce qui concerne l'orientation, comme expliqué dans le paragraphe § 3.10.3, nous avons choisi de travailler exclusivement en configuration horizontale.

4.3.5 Conclusion sur la matrice d'essai avec l'air humide pur

Pour conclure, quatre séries d'essais ont été planifiées, les trois premières séries correspondent aux trois niveaux de température de rosée construits autour d'une matrice d'essais à différentes températures de bain et à différents débits de gaz. La quatrième série d'essais comprend les essais avec les gaz surchauffés, à différentes températures de rosée et à différentes températures de gaz (donc différentes humidités relatives) mais à une température de bain unique, égale à -30°C.

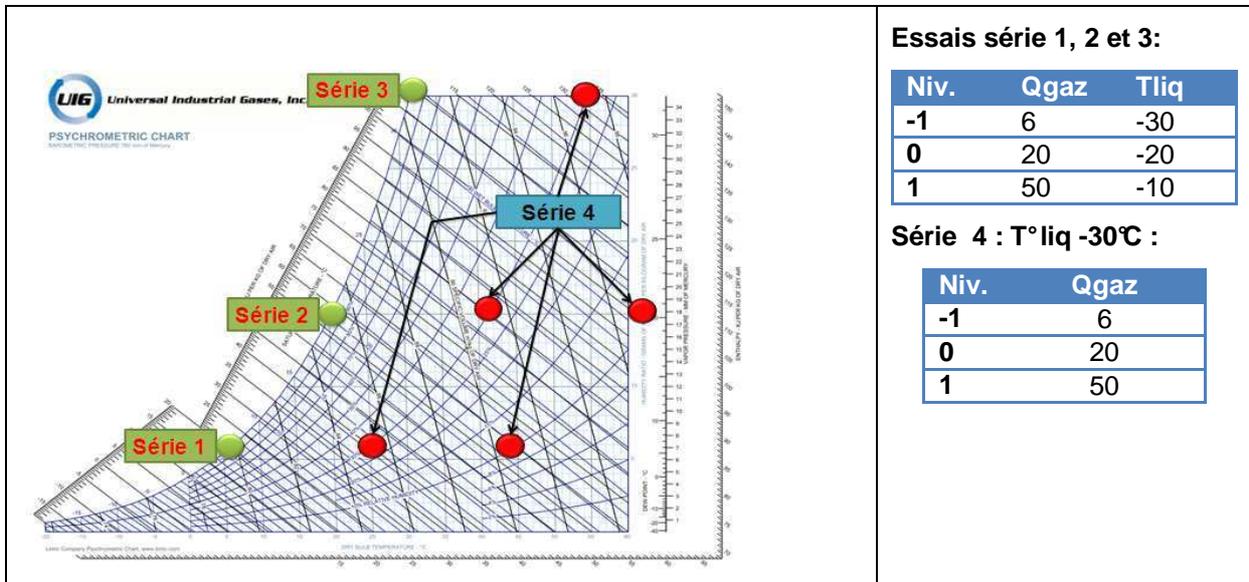


Figure 107 : Paramètres d'essais sur le diagramme psychrométrique

4.4 Conduite des expérimentations

4.4.1 Schémas de principe

Le principe des essais est illustré par la figure suivante :

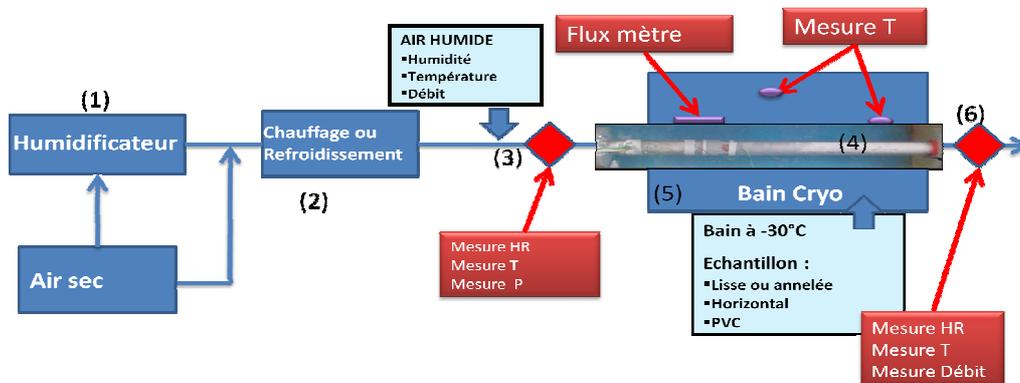


Figure 108 : Principe des essais sur banc

Selon les conditions d'humidité et de température voulues, on a les différents protocoles d'essais suivants :

- Pour obtenir un gaz saturé avec une température de rosée supérieure à la température ambiante ($T_{dE} > 20^{\circ}\text{C}$), l'air sec est humidifié dans la membrane d'humidification (1) puis envoyé dans l'échantillon (4).
- Pour obtenir un gaz surchauffé ayant une température de rosée supérieure à la température ambiante, l'air est d'abord humidifié dans la membrane. L'air saturé obtenu est ensuite réchauffé dans l'échangeur (2) pour obtenir la température et l'humidité relative souhaitées.
- Pour obtenir un gaz saturé avec une température de rosée plus faible que la température ambiante, l'air est d'abord saturé et amené à un point de rosée proche de 20°C par la membrane. Ensuite il est dilué par du gaz sec afin d'obtenir l'humidité et la température de rosée voulues. Puis, le gaz surchauffé issu de ce mélange est refroidi jusqu'à la saturation ($T_{\text{gazE}} \sim T_{dE}$).
- Pour obtenir un gaz surchauffé avec un point de rosée inférieur à 20°C , on procède comme précédemment mais au lieu de refroidir le mélange d'air sec et d'air saturé obtenu, on le chauffe jusqu'à la température et l'humidité relative voulues.

4.4.2 Protocole expérimental

Selon l'humidité et la température à imposer à l'entrée, les protocoles d'essais sont légèrement différents.

Pour un gaz saturé à l'entrée avec un point de rosée élevé ($\geq 20^{\circ}\text{C}$), le bain est d'abord pré-refroidi puis le gaz humide est envoyé. La température et l'humidité à l'entrée augmentent rapidement jusqu'à la consigne et la stabilité des paramètres d'entrée dans l'échantillon est atteinte après environ 10 minutes. L'instant auquel on envoie le gaz humide dans l'échantillon est retenu comme l'instant de début de l'essai.

Pour un gaz ayant une température de rosée plus faible (7°C), la durée de stabilisation des paramètres d'entrée est beaucoup trop importante pour être négligeable. Pour contourner le problème, le gaz est envoyé dans l'échantillon pendant environ 30 minutes. Le circuit de refroidissement étant encore fermé, le bain se trouve encore à la température ambiante et le risque de condensation précoce est évité. Quand les conditions en entrée sont stabilisées, la boucle de refroidissement du bain est alors mise en marche. La consigne de température de bain est atteinte après environ une quinzaine de minutes. Cela n'entraîne pas beaucoup d'erreur compte tenu de la faible quantité d'eau qui se dépose pendant ces premiers instants. Le début de l'essai est attribué à

l'instant où la température du bain commence à descendre au-dessous de 0°C, c'est-à-dire à l'instant où la glace est susceptible d'apparaître et de s'accumuler dans l'échantillon.

Les différents paramètres liés aux essais sont mesurés et enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 1 hertz. En outre, pour pouvoir comprendre les phénomènes en jeu, l'échantillon est filmé tout au long de l'essai. La cadence de prise des vues est fixée à 40 secondes au début de l'essai puis à une minute quand l'évolution des phénomènes commence à ralentir (après environ une heure d'essais).

Pour avoir un point de comparaison avec les essais véhicule, l'essai est arrêté au bout de 3 heures ou pour une pression d'entrée supérieure à 135 mbars, cette valeur étant la consigne adoptée pour les soupapes de sécurité retrouvées dans les circuits de blow-by automobile.

A la fin de l'essai, l'alimentation en air ainsi que tout le système de chauffage sont arrêtés, le circuit froid est maintenu pendant une dizaine de minutes de manière à stabiliser la glace ou l'eau retenues dans l'échantillon. L'échantillon est ensuite examiné puis pesé pour déterminer les origines de la surpression ainsi que la quantité de glace qui est en jeu.

4.4.3 Les paramètres suivis

Les paramètres suivants sont mesurés au cours des essais. Ils sont évalués en temps réel par le système d'acquisition (INCA) et sont enregistrés et affichés en permanence.

4.4.3.1 L'humidité absolue

Les étapes de calcul de l'humidité absolue sont les suivantes :

- Calcul de la pression de vapeur saturante en fonction de la température : Equation (2-2).
- Calcul de la pression partielle de l'eau en fonction de la pression de vapeur saturante et de l'humidité relative : Equation (2-4).
- Calcul de l'humidité absolue en fonction de la pression partielle et la pression totale : équation (2-9).

4.4.3.2 Le point de rosée

Comme nous l'avons expliqué, la température de rosée constitue l'un des principaux paramètres de consigne que nous avons à suivre et à contrôler de près pendant les essais. Elle se calcule comme suit :

- Calculer la pression vapeur en fonction de l'humidité absolue : équation (2-9).
- Calculer la température de rosée en fonction de la pression vapeur : équation (2-12).

4.4.3.3 L'enthalpie

L'enthalpie est calculée à partir de l'humidité relative et la température du gaz mesurée. On a les étapes suivantes :

- Calculer l'humidité absolue en fonction de la température et de l'humidité relative selon le paragraphe §4.4.3.1
- Calculer l'enthalpie en fonction de l'humidité absolue et de la température selon la relation (2-8).

4.4.3.4 La température de paroi interne

La température de paroi interne $T_{w_{int}}$ à l'entrée est calculée à partir de la température de paroi externe $T_{w_{ext}}$ et le flux thermique Φ mesuré par le fluxmètre et l'épaisseur e de la conduite e selon :

$$T_{w_{int}} = T_{w_{ext}} + \Phi \cdot \frac{e}{k} \quad (4-1)$$

4.4.3.5 Le coefficient de débit kv

Le coefficient de débit kv est calculé à partir du débit Q_{gaz} et de la perte de charge ΔP entre l'entrée et la sortie de l'échantillon selon :

$$Q_{gaz} = 547.Kv \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 10^3}{\rho_E \cdot (T_{gazE} + 273)}} \quad (4-2)$$

Théoriquement, le coefficient de débit est le débit d'eau en L/min mesuré à 4°C passant à travers un orifice donné sous une ΔP de 1 bar. Généralement, il est utilisé pour caractériser les vannes de régulation.

Pour les différents débits testés, la pression en amont de l'échantillon correspondant à un bouchon de $kv=1$ est donnée par le tableau suivant :

Qgaz [L/min]	50	20	6
ΔP [mbar] si $kv = 1$	10,4	1,6	0,15

Tableau 18 : Perte de charge pour $kv=1$

4.4.4 Protocole de post-traitement des résultats

4.4.4.1 L'observation des phénomènes

Malgré les nombreux essais effectués sur véhicule jusqu'à maintenant, les phénomènes de formation de bouchons ne sont pas encore totalement éclaircis. Aussi notre but est avant tout d'identifier les phénomènes prépondérants et les origines de ces bouchons puis de comprendre leur mode de formation ainsi que leur évolution dans les conduites. Pour atteindre cet objectif nous, avons exploité les différentes photos prises qui retracent le déroulement des essais et nous les avons confrontées avec les divers paramètres mesurés.

4.4.4.2 L'extraction des paramètres thermiques

L'étude du phénomène thermique repose sur le bilan matière et le bilan énergétique entre l'entrée et la sortie de l'échantillon. Elle est donc basée sur la connaissance de l'humidité relative et de la température au niveau de ces deux points.

Bien que les conditions en entrée soient stables, les paramètres en sortie évoluent avec le temps. Toutefois, le dépouillement des divers résultats montre que les paramètres en sortie sont suffisamment stables pendant au moins les dix premières minutes d'essais. Ce laps de temps correspond généralement à la phase initiale de formation de glace et de condensation dans l'échantillon. C'est-à-dire l'instant où la quantité de glace ou de liquide à l'intérieur de l'échantillon est encore suffisamment faible pour modifier les phénomènes d'échange de chaleur. On peut attribuer les valeurs des paramètres mesurées à ce stade comme des paramètres caractéristiques d'un phénomène de transfert de chaleur et de masse vis-à-vis d'une paroi sèche. La physique de ce phénomène est détaillée dans le paragraphe §2.4.5

Quand la quantité de glace ou de liquide présente dans l'échantillon devient importante, la température et l'humidité en sortie diminuent progressivement. Ce qui peut s'expliquer par une amélioration des coefficients de transfert de matière et de chaleur ainsi qu'une diminution du débit à cause des bouchons (augmentation du temps de séjour du gaz).

Les figures suivantes illustrent les profils mesurés lors des essais

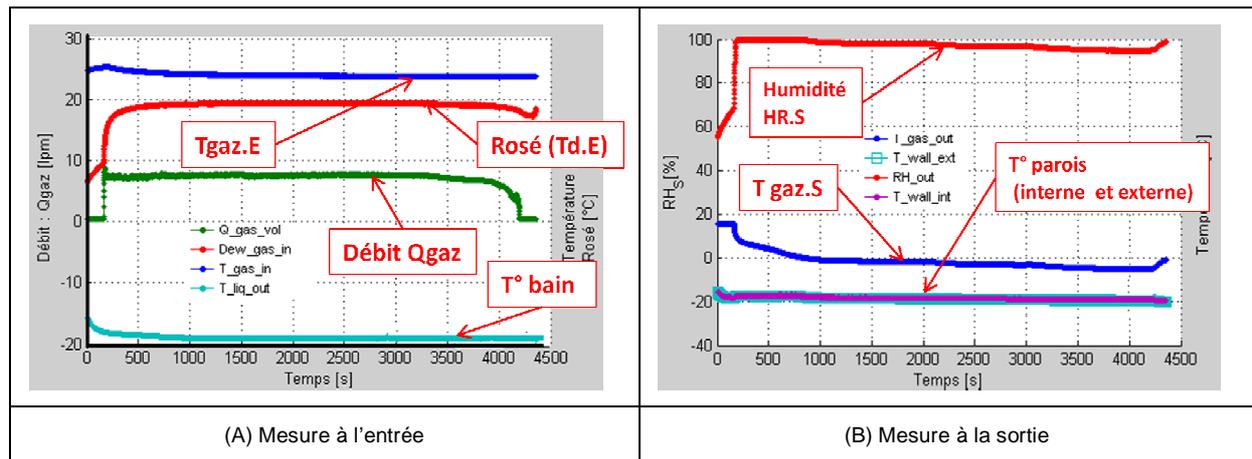


Figure 109 : Profil de mesure sur essais sur banc

L'aspect thermique des phénomènes est déduit à partir des résultats mesurés dans la zone stable des conditions en sortie. Les résultats en question sont les températures et les humidités à l'entrée et la sortie des tubes, la température du bain et les températures aux parois. L'humidité relative étant systématiquement proche de 100% à la sortie, on a choisi la température du gaz à la sortie comme base de comparaison entre les essais.

Rappelons que, mesurés sur la base de la condensation de l'air humide sur une paroi sèche, ces paramètres ne permettent pas de constater l'aspect temporel de l'évolution des bouchons. Toutefois ils permettent de caractériser le système et sa prédisposition à l'apparition des bouchons.

4.4.4.3 Extraction des profils de pression

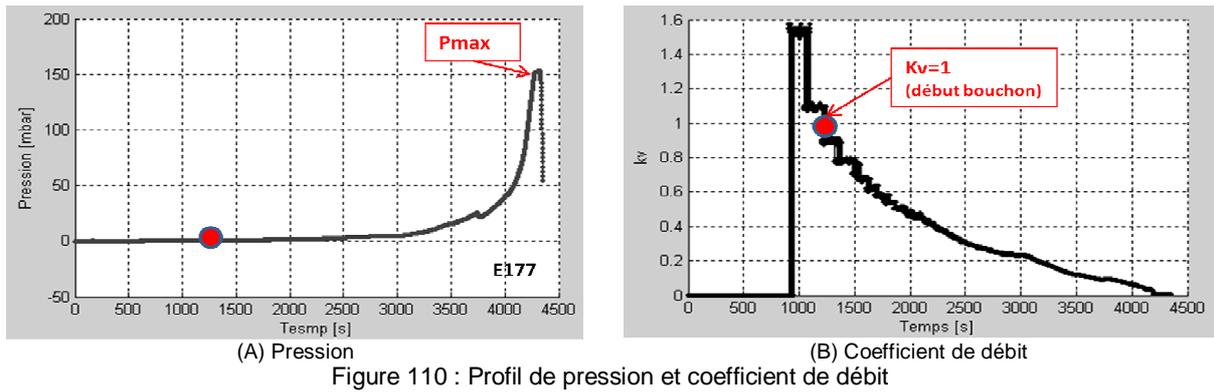
Le profil de pression constitue un élément essentiel dans la caractérisation des bouchons de glace qui se forment à l'intérieur des tubes. Comme la pression évolue de manière différente d'un essai à l'autre, trois paramètres ont été choisis pour caractériser chaque profil. Ce sont :

- La durée qui s'écoule avant que la première montée en pression soit constatée. Physiquement, elle caractérise la durée d'apparition d'un bouchon tangible. On la note « **durée avant début montée en pression** » ou « **Durée_kv1** »
- La durée entre l'instant où la première montée en pression est constatée et l'instant où la pression atteint sa valeur maximale. Physiquement, elle permet de caractériser la vitesse d'évolution du bouchon qui s'est formé. On la note « **durée montée en pression** »
- La pression maximale (généralement la pression à la fin des essais). Elle permet de caractériser la gravité du bouchon en termes de surpression. On la note « **pression finale** »

Pour un même bouchon, la pression mesurée varie d'un débit à un autre. Ainsi, pour caractériser les bouchons, le coefficient de débit est utilisé à la place de la pression. Il est unique pour une restriction donnée et est indépendant des paramètres hydrodynamiques du gaz tels que la pression et le débit. Il est donné par la relation (4-2).

La croissance d'un bouchon se fait de manière progressive. Il est donc impossible de définir de manière absolue son existence ou non. Ce qui nous a conduits à choisir un critère unique de référence du coefficient de débit pour pouvoir affirmer ou non la présence d'un bouchon.

Pour les tubes sur lesquels nous avons focalisé nos essais, la valeur de $Kv=1$ a été choisie comme référence de début de bouchon. En effet la comparaison des divers profils de pression a montré que presque tous les essais qui sont passés par le point $k_v=1$ ont fini par entraîner une montée en pression considérable après les 3 heures d'essais ($P_{max} > 50$ mbars). La figure suivante montre le profil de pression et de coefficient de débit avec le temps.



Pour les différentes valeurs de débit, la pression correspondant à $kv = 1$ est différente. Elles sont reportées dans le Tableau 18.

Les différents paramètres extraits à partir des courbes ont été par la suite réunis dans une base donnée pour être traités.

4.4.5 La base de données

Etant donné le nombre important d'essais (268 essais) et pour faciliter l'exploitation des résultats, les conditions opératoires, les paramètres mesurés, les paramètres caractéristiques des profils de pression ainsi que la description des phénomènes ont été réunis dans une base de donnée unique.

Outre, les données d'entrée introduites directement dans la base (19 paramètres : température, humidité, débit, type de phénomènes, ...), de nombreux paramètres secondaires ont aussi été calculés in situ. Cela comprend des paramètres qui dérivent directement des paramètres primaires précédents (26 paramètres : débit de condensation, enthalpie échangée, ...) ou aussi les paramètres de corrélation (33 paramètres : Re , Nu , $DTML$, ...).

4.4.6 Résumé des protocoles d'essais

La figure suivante résume le protocole d'essai adopté :

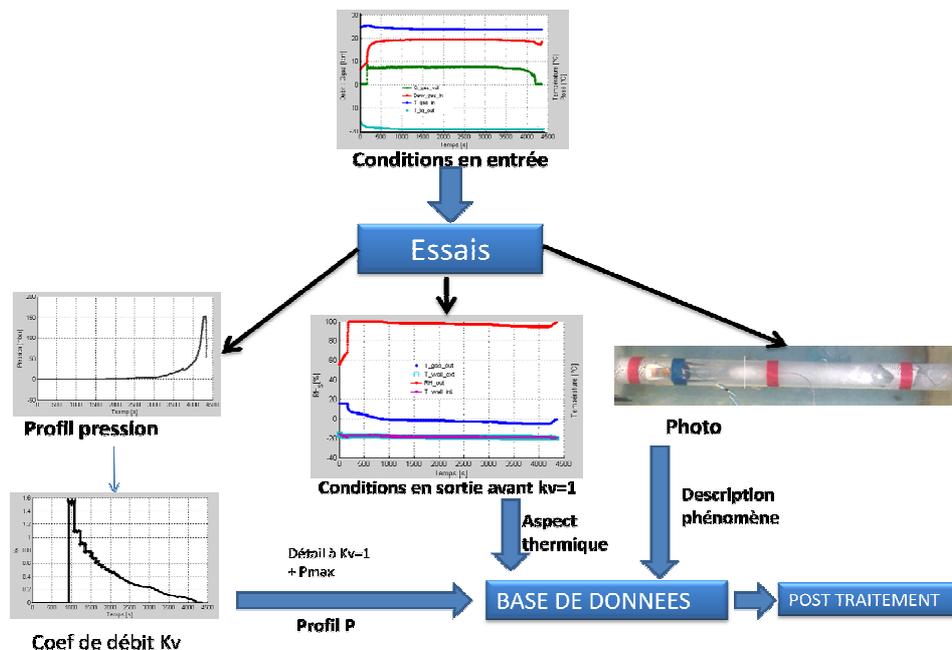


Figure 111 : Résumé du protocole d'essais

4.5 Les phénomènes observés

4.5.1 Distribution des phénomènes en fonction des conditions opératoires

L'exploitation des photos prises lors des essais a montré l'existence de trois types de phénomènes élémentaires dont la formation de givre, la solidification et la condensation. Le givre est facilement identifiable par l'obtention d'une certaine couche de glace poreuse blanche dans tout le tuyau alors que la condensation est caractérisée par l'obtention de l'eau exclusivement à l'état liquide dans toute la conduite.

Par contre, le phénomène de solidification (formation de glace) est assez complexe car il intervient rarement seul. Dans certains essais, il peut être précédé, accompagné ou suivi de phénomène de givrage alors que dans d'autres cas il est associé à la condensation, voire à la condensation et au givrage simultanément. Nous regroupons ces différents cas mettant en œuvre plus d'un phénomène élémentaire par ce que nous appellerons par la suite « **phénomène mixte** ».

Les figures suivantes retracent la répartition des différents phénomènes observés lors des essais avec du gaz saturé ainsi que les risques de bouchon correspondant.

- L'axe des abscisses représente le débit du gaz qui s'échelonne sur les trois niveaux : Q_{gaz} : 6 L/min, 20 L/min et 50 L/min.
- L'axe des ordonnées correspond à l'humidité du gaz, représentée ici par le point de rosée qui s'échelonne sur trois niveaux : T_d : 7°C, 20°C, 40°C
- L'axe des z, représente la température des bains. Elle est échelonnée sur trois niveaux : T_{liq} : -10°C, -20°C et -30°C.

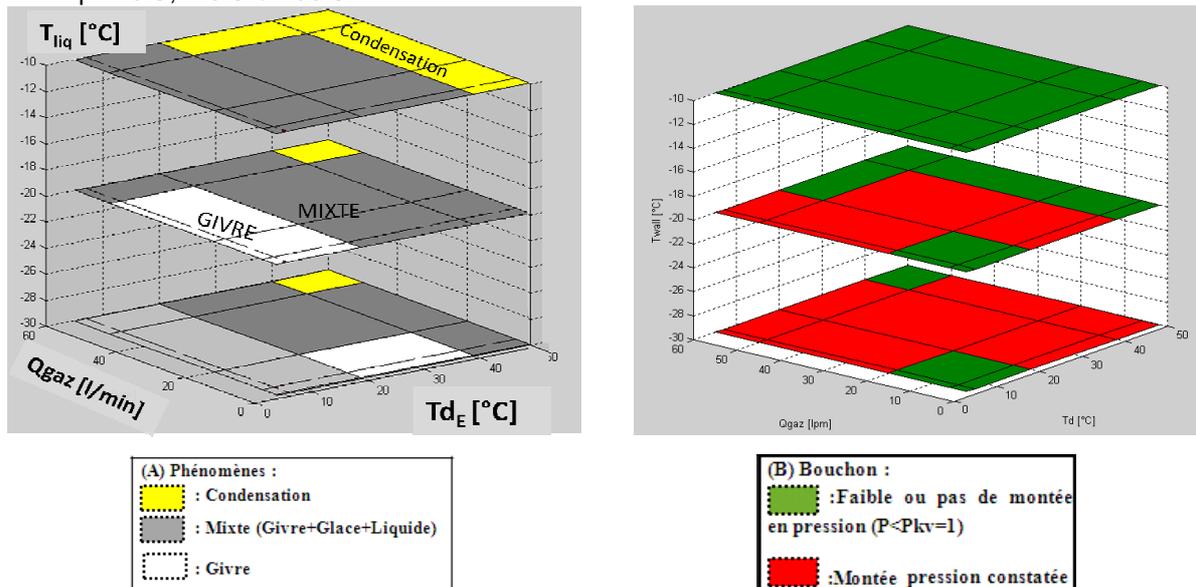


Figure 112 : Répartition des phénomènes observés et des risques de bouchon pour gaz saturé

La Figure 112 – (A) montre que les trois phénomènes élémentaires prévus par le diagramme d'état de l'eau sont effectivement identifiés lors des essais. Dans les conditions de température (T_{gaz} , T_{parois}), d'humidité et de débit élevés, la condensation est favorisée. Dans le domaine de température, d'humidité et de débit faibles, la formation de givre est favorisée. Dans les conditions intermédiaires, on a les **phénomènes mixtes**, pour lesquelles la formation de givre, la condensation ainsi que la formation de glace apparaissent dans un même essai.

La Figure 112 – (B) montre qu'aussi bien les phénomènes de givrage que les **phénomènes mixtes** sont susceptibles de conduire au bouchon du circuit.

Dans le cas de la condensation, l'eau reste liquide le long de l'échantillon, elle est donc en permanence évacuée par le gaz et la formation de bouchon est évitée.

Pour faciliter la lecture, les différents termes utilisés pour décrire les phénomènes observés sont détaillés en annexe.

4.5.1.1 La formation de givre

Le givre a été identifié essentiellement pour les gaz à faible humidité et faible température. Il a aussi été observé pour les gaz à humidité et à température moyennes mais avec une température de bain et un débit faibles.

Le phénomène se déroule comme suit (Figure 113):

- Des gouttelettes d'eau apparaissent d'abord sur la paroi. Les gouttelettes sont de plus en plus grosses vers l'amont de l'échantillon.
- Après un certain temps (une quinzaine de minutes), les grosses gouttes deviennent solides et opaques.
- La paroi se recouvre petit à petit de mince couche de glace blanche jusqu'à devenir complètement opaque.
- L'observation à la fin des essais permet de distinguer l'existence d'une couche de givre poreuse, **partiellement ou totalement bouchante** à l'intérieur des tubes.



Figure 113 : Processus formation givre

En laissant l'échantillon à l'air libre pendant quelques minutes, on constate que le givre situé en aval fond très rapidement en ne laissant que quelque trace d'eau liquide alors que le givre en amont reste stable pendant beaucoup plus longtemps. Le contraste est d'autant plus important que le débit du gaz est faible.

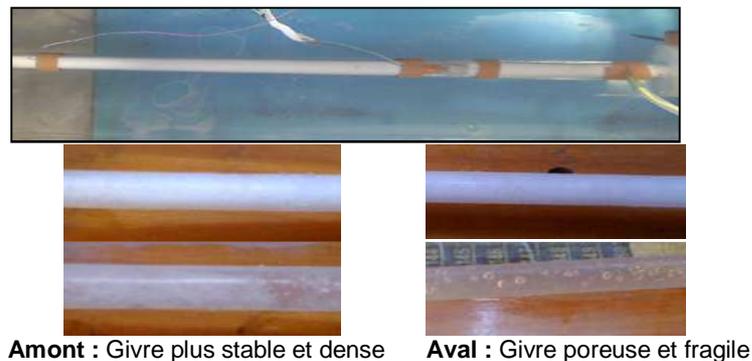


Figure 114 : Apparence des givres non bouchant

On voit donc que la formation du givre concerne essentiellement l'amont de l'échantillon. Toutefois, si le débit est suffisamment élevé, le givre peut être retrouvé vers l'aval. Dans tous les cas le givre est de plus en plus poreux et en faible quantité quand on se déplace vers l'aval.



Figure 115 : Répartition du givre

Le givre se développe de manière progressive et à terme peut conduire au bouchon partiel ou total du tube. Une montée en pression a été constatée au bout de 70 à 120 minutes et continue progressivement jusqu'à la fin de l'essai. La valeur maximale de la pression à la fin des différents essais est de l'ordre de 100 mbars mais continue toujours à progresser. Notons toutefois que tous les essais conduisant au givre n'ont pas conduit systématiquement à un **bouchon total** du tube dans les 3 heures d'essais. En outre, en cas de bouchon, la montée en pression est lente, elle est de l'ordre de 0,1 à 1 mbar/min.

Le givre **non bouchant** est caractérisé par une très faible quantité de givre dans la partie amont et un passage dégagé dans tout le reste du tube. Il est constaté si le débit et l'humidité sont tous les deux à leurs valeurs minimales. L'absence de montée en pression s'explique dans ce cas par la faible quantité de vapeur qui a été introduite. Ce qui veut dire qu'à long terme, ces points risquent eux aussi d'entraîner le bouchon du tube.



Figure 116 : Exemple de givre non bouchant

On peut donc en déduire que le givre constitue une source potentielle de bouchon dans les tubes, ils se développent de manière lente mais finit à moyen ou à long terme par générer la montée en pression dans le tube. Il est toutefois très fragile et se dégrade très vite dès que la température locale augmente. En **condition givrante**, il est donc important pour les moteurs, de considérer l'aspect temporel des conditions d'entrée (cycle de roulage, phase transitoire au démarrage des véhicules).

4.5.1.2 La condensation

On qualifie de condensation, l'apparition de l'eau à l'état liquide dans l'échantillon sans aboutir à la formation de glace ou d'éventuel bouchon.

La condensation se déroule comme suit :

- Des gouttes minuscules se forment sur la paroi du tube. Les gouttes sont réparties de manière très dense donnant au tube initialement transparent un aspect grisâtre (Figure 117- A)
- Les gouttes deviennent de plus en plus grosses et leur contour devient visible à l'œil nu. Les gouttes en amont se développent plus rapidement que les gouttes en aval (Figure 117- B)
- Les gouttes grossissent davantage et entrent en coalescence pour donner de grosses gouttes en laissant un important espace vide entre elles (Figure 117- C)
- Les gouttes descendent par gravité sur la partie basse du tube et sont entraînées progressivement par le flux du gaz (Figure 117- D)
- Les départs des grosses gouttes laissent derrière elles une surface propre. Les surfaces ainsi libérées deviennent à nouveau le siège de condensation et ainsi de suite.

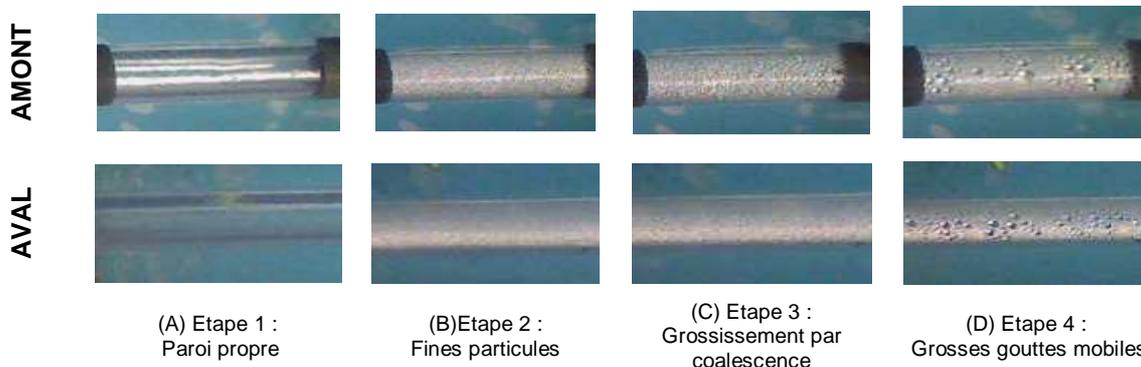


Figure 117 : Déroulement du phénomène de condensation

Les gouttes qui atteignent leur taille critique sont en permanence entraînées et évacuées sous forme liquide à la sortie du tube. Ainsi, aucune accumulation d'eau n'est constatée dans le tube durant des 3 heures d'essai.

4.5.1.3 Les phénomènes mixtes

Contrairement au givre et à la condensation, le **phénomène mixte** est caractérisé par la répartition non uniforme de glace, de l'eau ou du givre à l'intérieur de l'échantillon.

L'apparition de la glace ou du givre débute de plus en plus en aval quand les conditions de débit, de température et d'humidité augmentent. Physiquement cela peut être expliqué par l'existence d'une zone chaude en amont et une zone froide plus favorable à la solidification de l'eau en aval. On a donc à l'intérieur de la flaque d'eau l'existence d'un gradient de température parallèle à l'axe du tube schématisé :

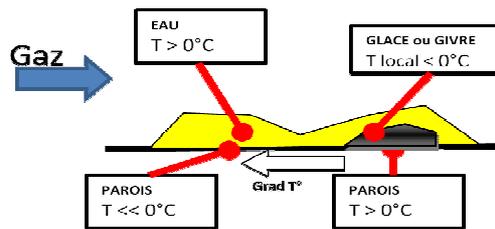


Figure 118 : Physique de la formation de la glace avec le gradient de température axial

De plus, on peut aussi observer la coexistence de l'eau liquide et de la glace sur un point quelconque du tube. Ce qui s'explique par l'existence d'un gradient de température orienté perpendiculaire à la paroi :

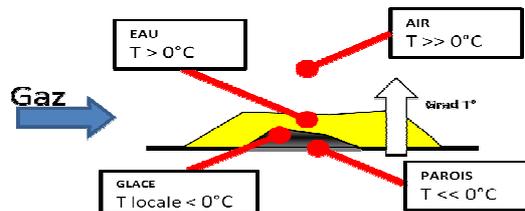


Figure 119 : Physique de la formation de la glace avec le gradient de température radial

On voit donc qu'en cas de phénomène mixte, non seulement les phénomènes observés sont multiples (condensation, formation de glace, givrage) mais aussi, leur répartition se fait dans les deux dimensions du tube (parallèle et perpendiculaire à la paroi).

Les essais ont montré que les phénomènes prépondérants et leurs répartitions évoluent aussi avec le temps. Dans les descriptions qui vont suivre, nous ne considérerons ni la phase initiale des phénomènes dans laquelle au moins un des paramètres d'entrée (débit, température, humidité, etc.) n'atteint pas sa valeur de consigne, ni la phase finale dans laquelle toutes les conditions tendent vers leurs valeurs minimales à cause de la diminution du débit due aux bouchons.

Les **phénomènes mixtes** observés peuvent être classés en plusieurs groupes :

4.5.1.3.1 La formation de givre humide

L'analyse des essais montre que ce phénomène est rencontré essentiellement pour les conditions de débit faible (6 L/min).

Ce phénomène est caractérisé par la formation d'une couche de glace compacte et de liquide au dessus d'une couche de givre qui se développe préalablement au dessus de la paroi. Le processus de développement peut être résumé comme suit :

- Le givre se développe au dessus de la paroi tel qu'il est exposé au paragraphe §4.5.1.1.

- La surface de givre devient partiellement humide : l'eau à l'état liquide est alors observée (en particulier en amont de l'échantillon).
- La partie humide devient compact et le givre initial est remplacé progressivement par de la glace et de l'eau.
- La partie touchée par le phénomène de mouillage peut s'étendre progressivement vers l'aval du tube signifiant le déplacement vers l'aval de l'eau liquide qui se forme en amont ou encore la propagation du phénomène de mouillage lui-même vers l'aval.



A terme, ce phénomène conduit à une couche de givre intact en aval et une couche de glace granuleuse en amont du tube. Le bouchon est généralement localisé sur l'interface entre la partie compactée amont et le givre aval.

La pression observée en fin d'essai pour ce type de phénomène varie de 0 à 230 mbars. Autrement dit, le phénomène n'aboutit par forcément au **bouchon total** de l'échantillon, notamment pour les températures de paroi élevées.

Ce phénomène est décrit par plusieurs auteurs comme une conséquence de l'augmentation de l'épaisseur du givre conduisant à la montée de température à sa surface. L'apparition de l'eau liquide est dans ce cas causée par la substitution du phénomène d'ablation à l'endroit concerné par la condensation et la fusion du givre.



Figure 121 : Apparence du givre humide

Nos observations indiquent que les phénomènes de mouillage sont limités dans la partie amont des tubes, autour du premier contact entre le froid et le gaz humide.

4.5.1.3.2 Givre humide avec inondation par capillarité

Ce phénomène se rapproche du phénomène précédent par la présence du givre au début de l'essai puis le remplacement progressif de ce givre par un mélange de givre et d'eau liquide. Toutefois, contrairement aux cas précédents, la présence de l'eau ne se limite pas au dessus du givre mouillé mais s'étend dans à une grande partie du givre plus en aval.



Les photos prises lors des essais montrent que la progression de l'eau vers l'aval est rapide (de l'ordre de 1 cm/s) et se fait de proche en proche. La totalité du givre est atteinte presque au même instant quelle que soit sa position angulaire par rapport à l'horizontale. Ce qui laisse croire que l'eau qui se forme en amont se déplace vers l'aval par capillarité.

Dans certains cas, notamment pour les gaz surchauffés, la partie amont peut être entièrement remplacée par un film de liquide et de glace, sur lequel on observe la condensation de l'eau. Ce dernier alimentera en eau une grande partie du givre en aval pour le rendre plus compact.



Figure 123 : Lessivage des givres en amont du tube par l'eau

A termes, ce phénomène conduit à la formation d'une glace granuleuse plus compacte que le givre initial. Selon le cas, le phénomène peut conduire ou non au bouchon. La pression maximale identifiée est égale à 144 mbar.

4.5.1.3.3 Condensation avec important phénomène d'inondation

Ce cas de figure est caractérisé par la dominance de la condensation en amont qui, à cause de l'entraînement par le gaz, se déplace sous forme de film de condensat inondant toute la partie aval initialement dominé par du givre.

Contrairement au phénomène décrit précédemment, le déplacement de l'eau est ici causé par le cisaillement du gaz et non seulement par capillarité. Le condensat est réparti sur le tube de manière asymétrique et s'accumule essentiellement dans la partie inférieure du tube. Au fur et à mesure que le condensat se déplace, il est partiellement solidifié en laissant derrière lui une mince trainée de couche de glace.

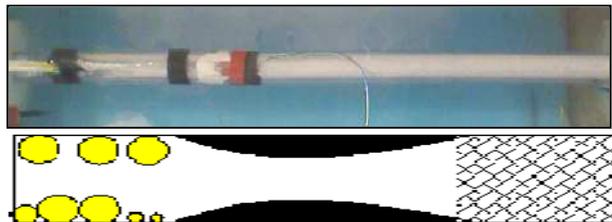


Figure 124 : Condensation avec important phénomène d'inondation

Ce phénomène a été observé pour certains essais à température de bain élevée si les autres paramètres étaient suffisamment bas pour aboutir à la solidification partielle de l'eau (Température de gaz faible, débit faible ou les deux). Il a aussi été observé pour les gaz surchauffés mais avec une température de bain de -30°C .

Malgré la présence de glace dans les échantillons, ce type de scénario est moins favorable au bouchon. La glace tapisse la paroi sous forme de plaque alors que le givre est détruit par l'eau liquide. Seul un des cinq essais correspondant à ces conditions a conduit à une montée en pression.

4.5.1.3.4 La formation de glaçons

La formation de bloc de glace compact se trouve à la frontière du **phénomène mixte** avec le phénomène de condensation. Il est rencontré essentiellement pour une température de paroi faible (-30°C) et une **condition condensante**. Il est également rencontré dans les conditions de gaz surchauffé, à condition que la température de bain reste basse.

La formation de glaçon est caractérisée par l'apparition d'un bloc compact de condensat qui se solidifie à l'intérieur du tuyau. Elle se déroule comme suit :

- L'amont du tube est dominé par la condensation en gouttes alors que la partie aval est le siège de la formation de givre. (Figure 125- Etape 1)
- Les gouttes en amont sont entraînées par le gaz et inondent progressivement le givre qui s'est déposé en aval.

- Progressivement, le givre en aval est entièrement lessivé et remplacé par de l'eau liquide.
- Une partie du liquide se solidifie petit à petit sur place et donne naissance à des blocs de glace. D'autre partie du liquide parvient toutefois à atteindre la sortie du tube sans se solidifier (Figure 125- Etape 2)
- Le bloc de glace est en permanence balayé par de l'eau liquide fraîchement condensée provenant de l'amont du tube. Il évolue donc avec le temps aussi bien en termes de taille que de position (Figure 125- Etape 3).

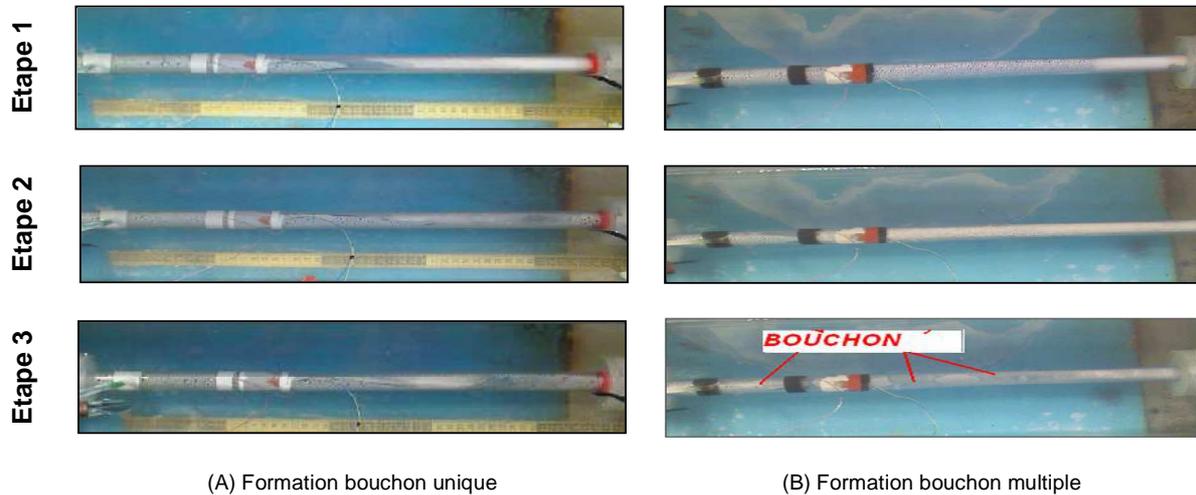


Figure 125 : Formation de bloc de glace unique ou multiple

Si le premier bouchon est suffisamment loin de la sortie du tube, l'eau liquide qui passe au dessus du bouchon stagne un peu plus en aval dans le tube et forme un nouveau glaçon. Le phénomène se répète le long du tube et aboutit à la formation de bouchons multiples sur un même tube échantillon (Figure 125- B et Figure 126).



Figure 126 : Bloc de glace multiple

L'examen des enregistrements vidéo pris lors des essais indique que les particules d'eau (donc le gaz qui les entraîne) ne sont à pas la même vitesse selon les endroits concernés. Au niveau des bouchons, qui sont dans la plupart des cas sous forme de restriction à passage conique, le gaz et le liquide sont éjectés à une vitesse très élevée par rapport au gaz dans la partie sans restriction. L'important coefficient de transfert par convection associé à ce phénomène tend à faire fondre la partie aval des blocs de glace conduisant ainsi à sa diminution avec le temps. Dans la plupart des cas, la fusion du bloc aval de la glace est compensée par la solidification d'une partie de l'eau liquide retenue en amont du bloc de glace. On observe alors la migration de la glace vers l'amont du tube.

L'ensemble de ces constatations nous permet de déterminer le minimum de phénomènes physiques qu'il nous faut prendre en compte pour effectuer une étude analytique de la formation des blocs de glace. Aussi, en dehors des études de la convection et de la condensation classique, il s'avère que les points suivants doivent aussi être pris en compte :

- Concernant le coefficient de transfert de chaleur : l'évolution des coefficients de transfert par convection quand les bouchons grossissent (augmentation de la vitesse locale). Ce qui implique que la taille maximale des glaçons estimée à partir des coefficients de transfert à l'intérieur d'un tube non bouché sera forcément plus élevée que la taille réelle possible si on prend en compte l'impact de la turbulence créé par la restriction (Figure 127).
- Au niveau du bilan énergie : le rôle de l'énergie apportée par l'eau liquide qui passe au dessus des blocs de glace déjà formés.

- Au niveau du phénomène : les modèles de condensation en gouttes sont plus appropriés pour décrire les zones condensantes et les modèles de condensation en film qui sont plus adaptés au niveau des bouchons et ainsi que dans les zones où l'eau stagne.
- Pour les gammes de débit et de point de rosée élevés, le phénomène de lessivage et la naissance d'une importante zone de turbulence à l'aval des blocs de glace doivent être pris en compte pour décrire la fonte partielle des glaçons, leur déplacement vers l'amont ainsi que la naissance d'une zone de condensation en plein milieu du tube.

Les différentes physiques mentionnées ci-dessus peuvent être schématisées comme suit :

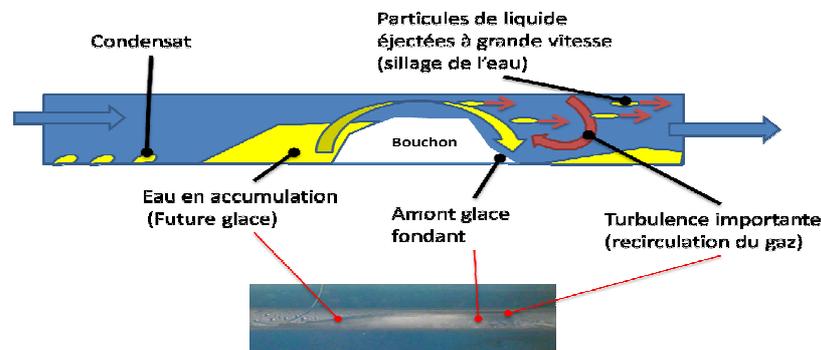


Figure 127 : Phénomène physique à prendre en compte dans la formation de blocs de glace

4.5.2 Quantification des phénomènes

Les descriptions qualitatives précédentes permettent de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu mais ne donnent aucune grandeur mesurable pouvant être liée aux conditions opératoires. Pour compléter l'étude, nous avons envisagé de considérer un paramètre quantifiable permettant de distinguer les phénomènes les uns des autres.

En examinant les essais, nous avons pu constater que l'ensemble des phénomènes peut être décrit par l'état de l'eau dans les divers endroits de l'échantillon et par la mobilité de cette eau à travers l'échantillon. Ainsi par exemple un givre peut être décrit par de l'eau solide immobile alors qu'un condensat peut être considéré comme de l'eau liquide extrêmement mobile (à cause du déplacement en permanence des gouttes). L'état de l'eau elle-même et de sa mobilité sont liés entre eux, nous avons donc choisi de quantifier les phénomènes par un seul paramètre qui est **la mobilité de l'eau**.

Cinq niveaux de **mobilité de l'eau** sont proposés. Les notations sont les suivantes :

- Le givre est figé. Tant qu'il est à l'état solide, il reste à l'endroit où il s'est formé. On lui attribue la **mobilité zéro**.
- Le **givre humide** est partiellement figé. Comme il a été décrit précédemment, une partie de l'eau qui participe à l'apparition de la couche humide peut se propager un peu plus en aval. On lui attribue donc la **mobilité 1**.
- Pour le **givre avec inondation par capillarité**, une partie de l'eau liquide en amont peut se déplacer assez loin dans l'échantillon pour rendre humide le givre en aval entier. On lui attribue le niveau de **mobilité 2**.
- Si le phénomène est dominé par la formation de **blocs de glace multiples**, on peut considérer que l'eau a une mobilité moyenne. Ce qui explique son aptitude à raser le givre présent initialement en aval et atteindre la sortie du tube. La mobilité n'est toutefois pas à sa valeur maximale puisque la présence de plusieurs blocs glace signifie qu'une bonne partie de l'eau a pu stagner localement pour se transformer en glace. On attribue le niveau de **mobilité 3** à ce phénomène.
- Le niveau suivant est attribué au phénomène de **condensation avec une importante inondation**. On donne une mobilité de **niveau 4** si le condensat se présente sous forme de courte trainée moins de 5 cm et **niveau 5** s'il se présente sous forme de longue trainée de liquide allant au delà de 10 cm. La comparaison des différents essais indique une similarité de ce phénomène avec le début des phénomènes de formation de **bloc de glace unique** décrit auparavant (voir Figure 125- A).

- Le niveau maximal de mobilité est attribué à la condensation et l'apparition d'un **bloc de glace unique** de la Figure 125- A. Il correspond à un contexte dans lequel la majeure partie de l'eau est sous forme liquide libre à la sortie du tube peu importe la présence ou non de glace à l'intérieur de l'échantillon.

En reprenant les différents niveaux de **mobilité de l'eau** ainsi obtenus sur les diagrammes des paramètres, on obtient les schémas suivants :

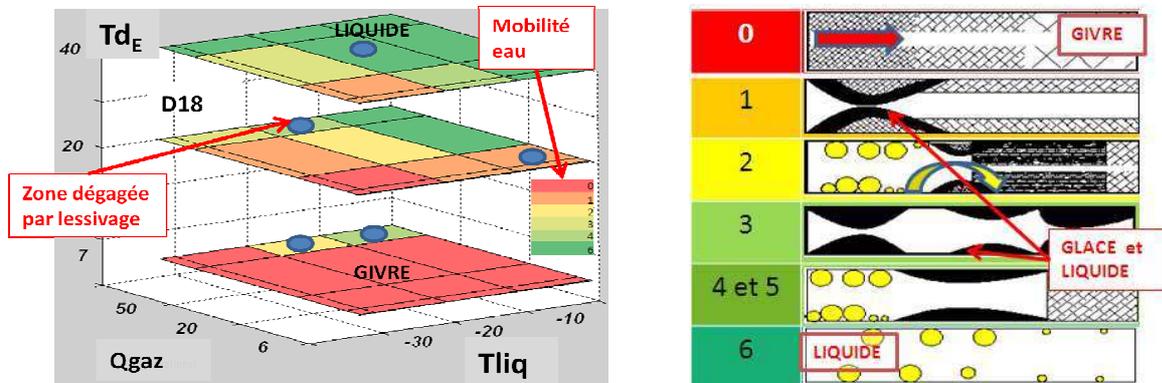


Figure 128 : Mobilité de l'eau avec D18

Ce qui montre que chacun des phénomènes peut être identifié à partir de **la mobilité de l'eau** et que cette mobilité augmente avec la température de paroi, le débit du gaz et la température du gaz. Notons toutefois que la mobilité seule ne permet pas de caractériser la possibilité ou non de bouchon du circuit. En effet, une mobilité importante de l'eau peut dégager le passage (cas de la condensation ou de la condensation avec inondation) ou au contraire favoriser le bouchon en faisant accumuler l'eau sur un point du circuit (cas des blocs de glace). Toutefois, elle constitue une base qui permettra par la suite de déterminer les physiques à prendre en compte selon les conditions opératoires. En particulier, elle permettra d'estimer l'importance des géométries et de l'orientation des tubes sur les phénomènes en question.

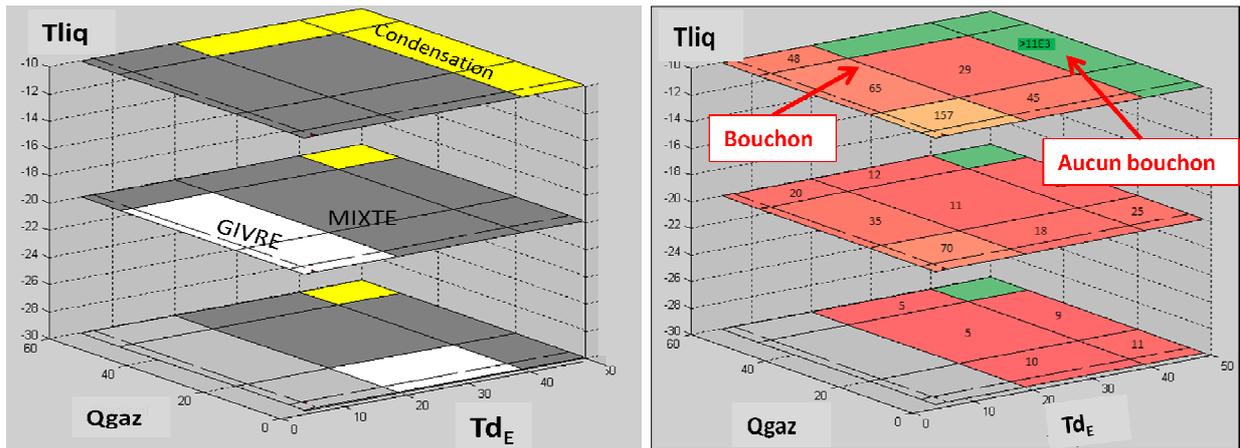
4.5.3 Impact des diamètres

Afin d'établir l'impact des diamètres sur les phénomènes en question, des essais avec des diamètres plus faibles (D10) et plus élevés (D31) ont aussi été effectués.

Remarquons que, contrairement aux essais précédents, les essais avec D10 et D31 sont effectués avec des tubes moins épais (1 mm d'épaisseur). Ce choix a été fait afin de minimiser la résistance causée par la conduction thermique à travers la paroi. C'est qui n'était pas possible avec les essais précédents puisque nous avons initialement prévu de reconduire les essais avec des tubes coudés (il est impossible de plier les tubes si leur épaisseur est trop faible).

4.5.3.1 Diamètre faible D10

Le digramme des phénomènes observés ainsi que les paramètres correspondant sont décrits par les figures suivantes.



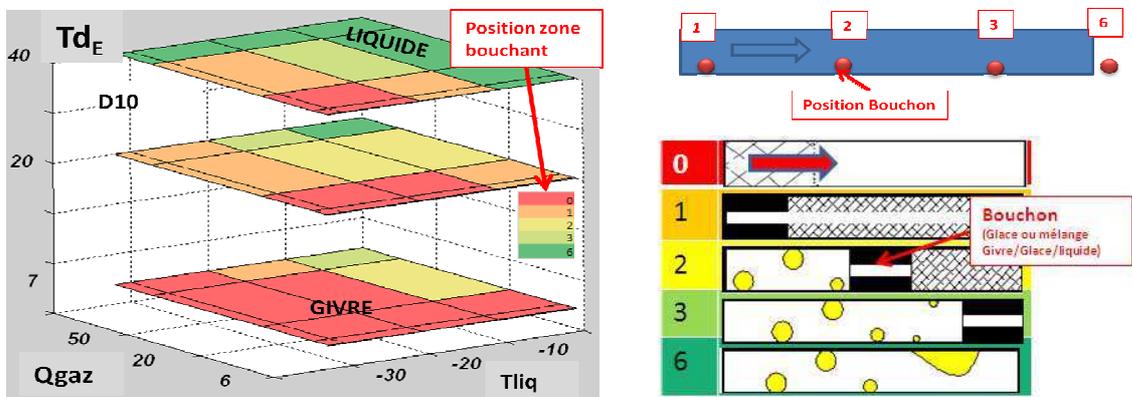
(A) Distributions des phénomènes (B) Distribution des bouchon
 Figure 129 : Distribution des phénomènes et des bouchons avec D10

La superposition des deux figures montre que seuls les phénomènes de condensation pure ont permis d'éviter le bouchon des tubes dans les trois heures d'essais. Pour les autres, dès que les premiers cristaux sont apparus, quelque soit leur forme et leur mode de formation, la propagation des bouchons est inévitable. Ce qui est évident puisque, vu la section de passage des gaz, même une moindre quantité de glace suffit pour boucher partiellement le tube et entraîner par la suite la diminution du débit et la solidification des liquides restants.

En comparant la Figure 129-A avec la Figure 112-A, on constate que la zone de condensation a été réduite au détriment de la zone mixte. Cela pourrait s'expliquer par l'épaisseur du D10 qui est de 1 mm et donc plus faible que celle du D18.

L'examen des phénomènes qui se sont déroulés dans le tube D10 montre qu'on retrouve les mêmes phénomènes qu'avec le D18 notamment l'existence de givre, la formation de condensat, la solidification et le mouvement de l'eau liquide. Néanmoins, contrairement aux cas observés avec le D18, les diverses phases évoluent très vite (de l'ordre de dizaine de minutes) de sorte qu'il est impossible d'identifier les phénomènes clés liés à chaque combinaison de paramètre. Cela s'explique par le fait que le diamètre du tube est suffisamment petit par rapport à la hauteur de glace qu'il pourrait retenir. Ainsi, le système est toujours dans une phase transitoire jusqu'à atteindre le **bouchon total** du tube.

Bien que les phénomènes observés ne puissent être défini de manière précise. La comparaison des photos obtenues lors des essais montre une corrélation entre l'endroit où naissent les premiers bouchons et les conditions opératoires. En positionnant sur le diagramme des conditions opératoires la coordonnée axiale du lieu de début des bouchons, on obtient les figures suivantes :



(A) Position de bouchon dans le diagramme des paramètres (B) Notation des positions de bouchon dans le tube

Figure 130 : Position des bouchons dans le D10

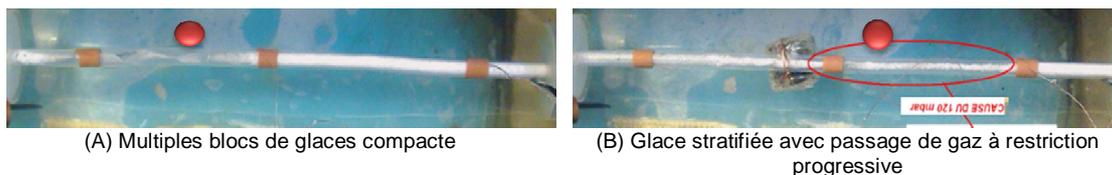
La figure montre que plus la température des gaz, la température des parois et le débit sont élevés, plus l'origine du bouchon se déplace vers l'aval du tube. Ainsi, pendant les premiers instants des essais, il est possible d'identifier en amont du tube une certaine portion qui est exclusivement le siège de condensation. En aval, une certaine portion du tube est le siège de la solidification (glace, givre, mélange de glace, de givre et d'eau liquide). Dans tous les cas, quand les bouchons se développent, le débit diminue et le bouchon se propage sur toute la longueur du tube.

Comme le montre les images ci-dessous, indépendamment de sa position, le bouchon peut être sous différente forme.

- A la **position 1**, le bouchon peut être sous forme de plaque de **glace annulaire** signe d'une solidification progressive de l'eau (fig. A) ou sous forme de bloc de **glace compacte** issue de la solidification d'un amas de condensat (fig. B).



- **Position 2** : au milieu du tube, le bouchon peut se présenter sous forme de **plusieurs blocs de condensat solidifié**, signe d'un important déplacement de l'eau à l'état liquide au dessus d'un **bloc de glace** déjà en place (fig. A). Il peut aussi être sous forme d'une **glace stratifiée** avec restriction progressive du passage, conséquence de la solidification progressive de l'eau au fur et à mesure de son déplacement (fig.B).

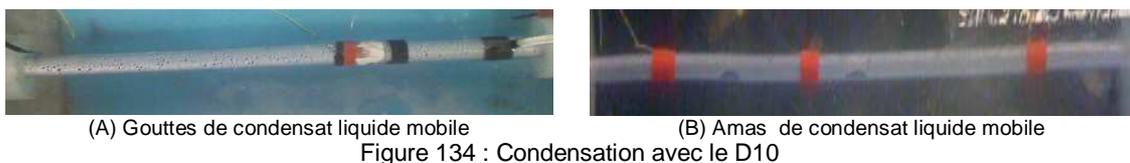


- **Position 3** : comme pour le cas précédent, on peut observer de la glace stratifiée avec une restriction progressive du passage (fig.A). Cette restriction peut prendre un aspect ondulé comme le montre la figure B.



- **Position 6** : Un bouchon en position 6 est utilisé ici pour décrire la condensation. Cela signifie que le bouchon pourrait se trouver au-delà de la sortie de l'échantillon (si tube plus long).

Deux cas de condensation ont été constatés. A débit élevé, la condensation se fait sous forme de gouttelettes et chaque gouttelette est entraînée séparément les unes des autres jusqu'à la sortie (fig A). A faible débit, les gouttes coalescent pour former un amas d'eau liquide, qui avec le temps, est lentement entraîné par le gaz vers la sortie du tube (fig. B)



- Le phénomène de givrage pur laisse obligatoirement plus d'eau en amont qu'en aval, on lui attribue la **position 0** comme point origine de bouchon.

Malgré la possibilité d'observer un important phénomène d'inondation comme dans le cas du diamètre D18. La position des premiers cristaux de glace identifiés devient dans la majorité des cas la zone de bouchon. Ainsi contrairement au D18, les bouchons ne se déplacent ni ne disparaissent avec le temps. Le bouchon peut se propager en aval ou en amont quand le débit diminue mais l'endroit le plus affecté par la restriction reste le même.

4.5.3.2 Diamètre élevé D31

Pour les tubes de diamètre D31, la répartition des phénomènes et des zones bouchant peut être résumé par la Figure 135. Nous avons toujours commencé les essais par la température de bain la plus basse (-30°C dans notre cas). Si aucun bouchon (total ou partiel) n'est observé à cette température, les tests à plus haute température seront automatiquement abandonnés.

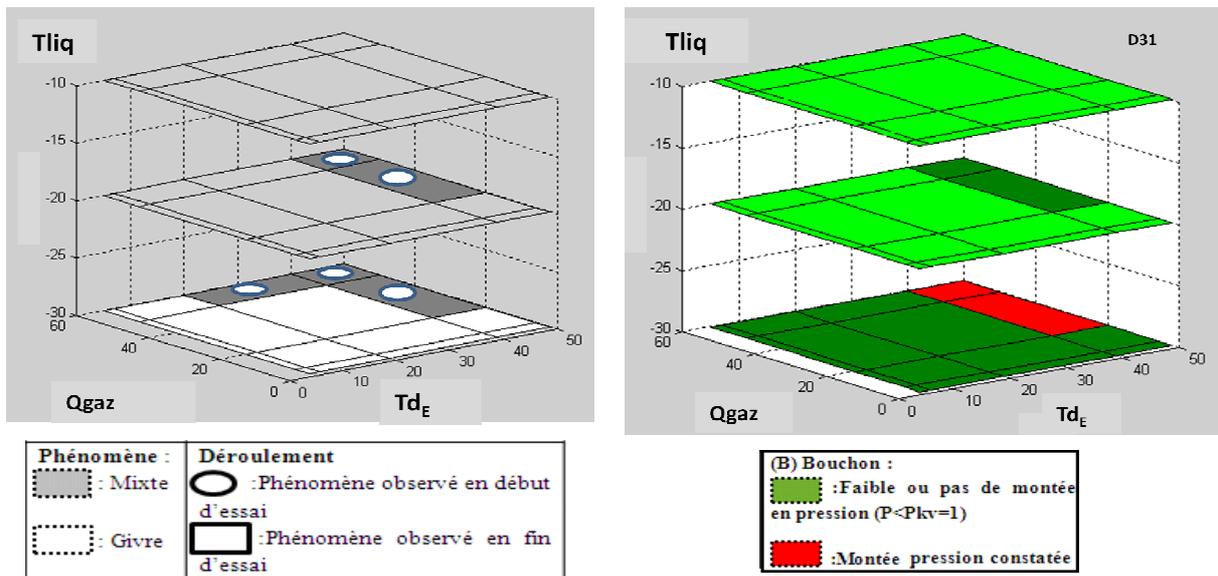


Figure 135 : Distribution des phénomènes pour le D31

A $T_{liq} = -30^\circ\text{C}$ et $T_{liq} = -20^\circ\text{C}$, les essais avec les tubes de diamètre élevé sont largement dominés par les phénomènes de givrage (Figure 136). Cela s'explique par la faible turbulence à l'intérieur des échantillons (faible vitesse de gaz) empêchant ainsi l'exposition de la glace qui se dépose à l'agressivité du gaz chaud et humide circulant dans la veine.

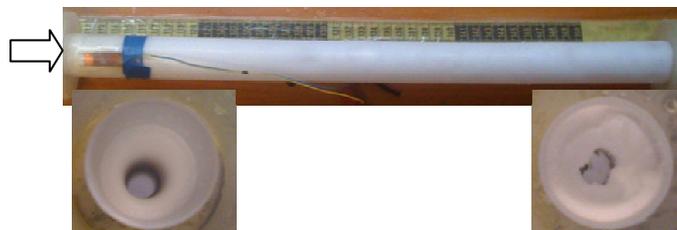


Figure 136 : Givre partiellement bouchant avec le D31

Si le débit est élevé et la température du gaz moyenne, l'impact de flux gazeux chaud se limite au phénomène de fonte cyclique de la couche de givre conduisant ainsi à l'obtention d'une couche alternée de givre et de glace (Figure 137-A). La physique de ce phénomène est détaillée dans les références [115] et [116]. Selon les auteurs, une telle couche de givre se développe suivant une marche d'escalier de sorte qu'à chaque fin du cycle, le givre s'arrête de grandir mais devient plus compact en laissant l'eau apparaître à sa surface (Figure 137-B).

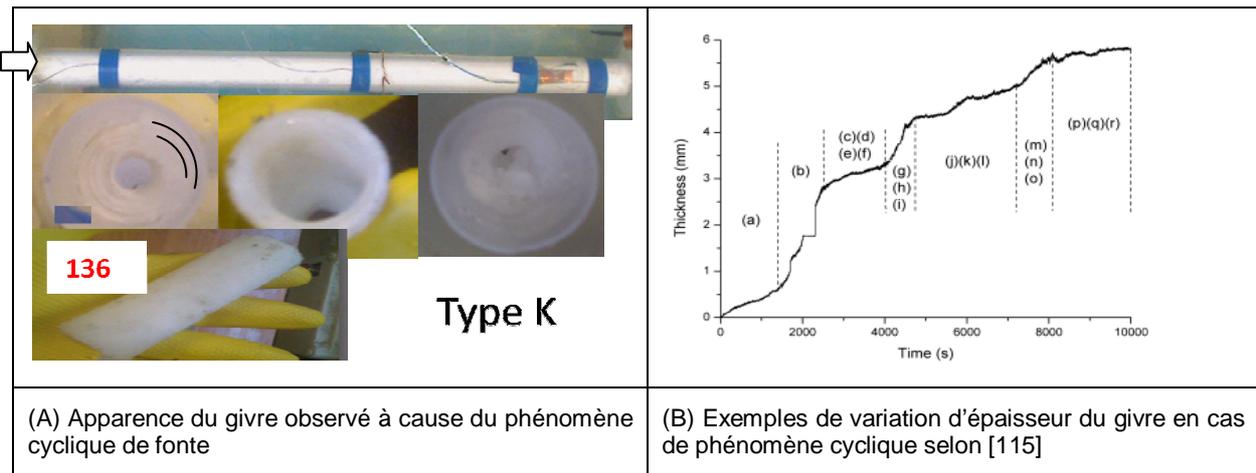


Figure 137 : Couche de glace et de givre alternées avec le D31

Dans les conditions de température élevée, il arrive la partie amont du tube soit le siège d'un important phénomène de condensation. L'eau liquide formée à cet endroit se déplace ensuite et inonde le givre en aval de manière à le rendre plus compact (Figure 138-A) ou en le transformant complètement en bloc de glace (Figure 138-B).

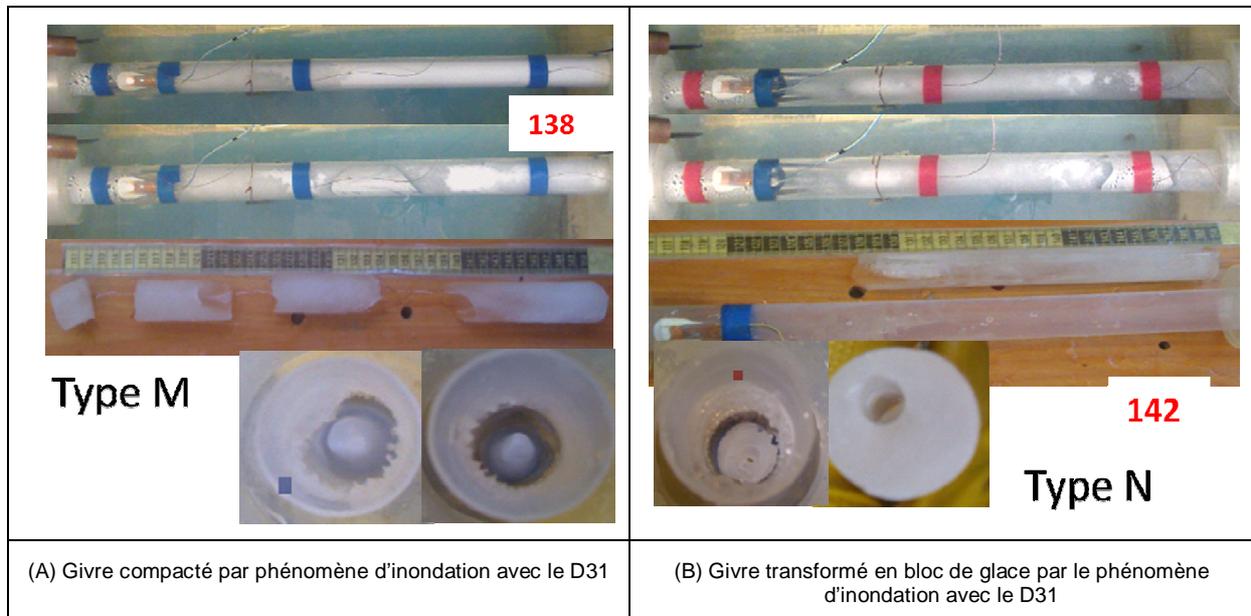


Figure 138 : Bloc de glace avec D31

Aucun des essais à température de rosée **inférieure à 40°C** n'ont abouti au bouchon. Compte tenu de la présence de givre dans tout le tube, ainsi que de l'absence d'eau liquide évacuée, on peut affirmer que seule l'insuffisance de l'eau nécessaire pour boucher totalement le tube peut justifier cette absence de bouchon. Par contre, si on poursuivait les essais pour des temps supérieurs à 3 heures, on pourrait accumuler assez d'eau pour conduire au bouchon total.

Aucun bouchon n'a été observée pour les trois points effectués pour une température de rosée de 40°C et une température bain de -20°C. En effet, ma Igré la quantité importante d'eau envoyée dans le tube, une grande partie n'y reste pas et est évacuée à la sortie de la conduite. Cela s'explique par le fait que la température de paroi, n'est pas suffisamment faible pour retenir l'eau liquide à l'intérieur l'anneau de glace qui se forme (Figure 139).

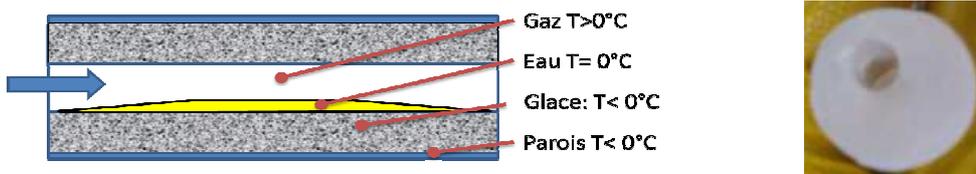


Figure 139 : Explication hauteur limite avec le D31

En effet, la surface du bloc de glace est exposée à la température du gaz alors que sa base est maintenue à la température de paroi. La présence d'un gradient de température à l'intérieur de la glace conduit à l'existence d'une hauteur maximale de glace. Au-delà de cette hauteur, l'eau ne peut plus se solidifier et la croissance de la glace n'est plus assurée (hauteur maximale pour que la surface de la glace soit maintenue à une température inférieure à 0°C). Si on considère les lois de Fourier, il est évident que plus la température de paroi est élevée, plus cette épaisseur limite est faible. Ce phénomène physique sera traité dans le paragraphe §5.9.5.

Enfin, pour les deux points réalisés à une température de rosée de 40°C et une température de bain faible, le bouchon a été possible puisque la quantité d'eau pouvant être retenue est suffisante et la température de paroi est assez faible pour la retenir.

4.5.4 Impact des annelures

Afin de mettre en évidence l'impact des annelures sur les phénomènes mis en jeu, des essais sur des tubes annelés ont été effectués. Pour réduire au minimum le nombre d'essais, trois essais représentatifs des trois phénomènes principaux ont été choisis (tous à -30°C). La matrice a été ensuite complétée en fonction des résultats ainsi obtenus.

La comparaison des résultats du tube annelé D18 avec le tube lisse correspondant peut être résumée par les Figures 140. Sur ces figures, les disques représentent les phénomènes observés avec les tubes annelés alors que les losanges qui les contiennent rappellent les phénomènes observés avec la configuration lisse dans les mêmes conditions opératoires.

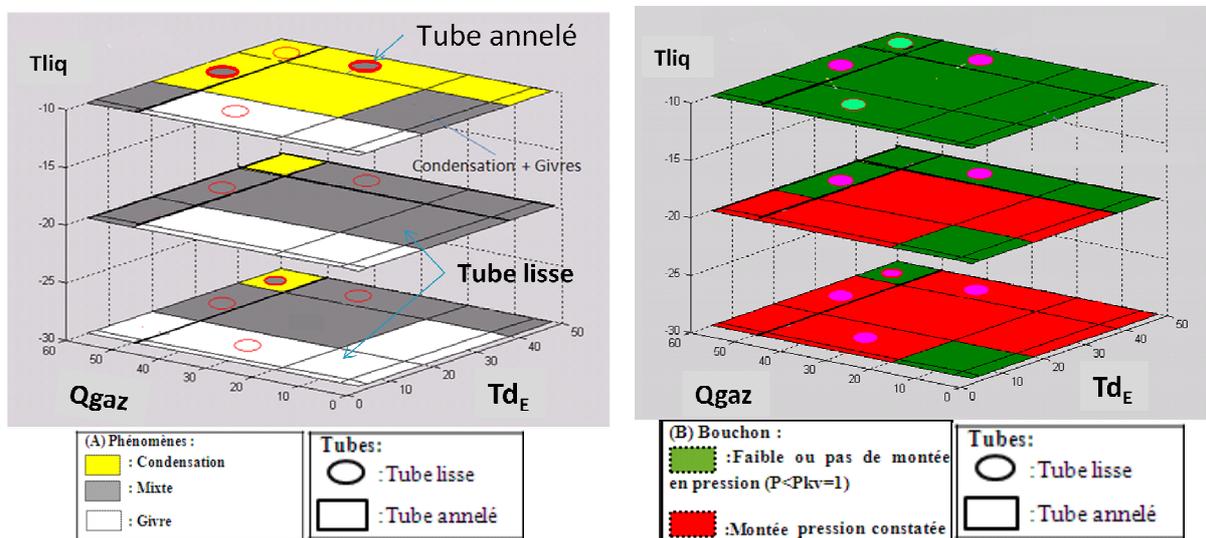


Figure 140 : Répartition des phénomènes avec le D18 annelé : Comparaison avec le tube lisse

Comme le montre la Figure 140-A, certaines zones qui correspondaient à des **conditions opératoires condensantes** avec la configuration lisse sont devenues le siège d'un **phénomène mixte** avec la configuration annelée. Les photos suivantes représentent l'un de ces essais :

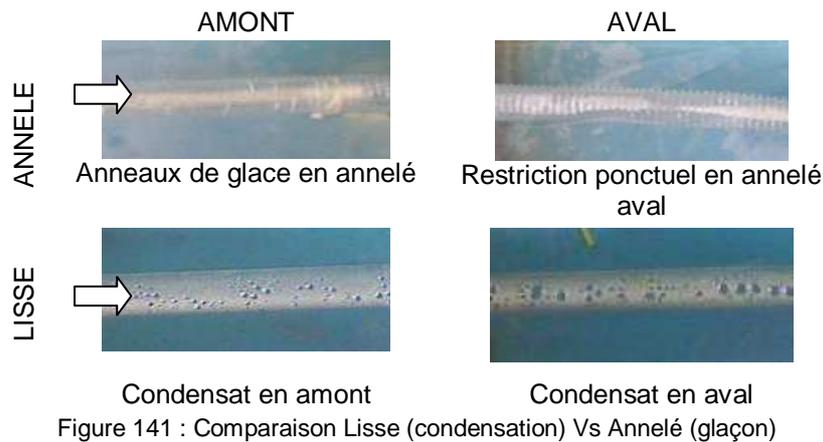


Figure 141 : Comparaison Lisse (condensation) Vs Annelé (glaçon)

En effet, en retenant temporairement les condensats (stagnation), la configuration annelée favorise la solidification de l'eau en glace **partiellement bouchante** (~ 20 mbars) voire en glace **totale bouchante** (> 135 mbars). La même tendance est observée pour les zones de conditions opératoires favorables **aux phénomènes mixtes**, en particulier ceux qui se trouvent à la frontière des **phénomènes mixtes** mais qui sont proches des **conditions condensantes**. Comme le montre la Figure 142, la mince couche de liquide et de glace tapissant la paroi en configuration lisse est remplacée, en configuration annelée, par une importante accumulation de condensat qui se solidifiera par la suite. La pression finale passe alors de 3 mbars à plus de 150 mbars pour les deux différentes configuration.



(A) Glace partiellement dégagée en configuration lisse (B) Importante accumulation de glace en annelé

Figure 142 : Comparaison Lisse (glaçon) vs Annelée (glaçon)

En outre, il a été constaté que la configuration annelée a tendance à faire apparaître **plusieurs blocs de glace** (Figure 143 et Tableau 19). Autrement dit, l'annelure a permis de solidifier une partie de l'eau en amont tandis que d'autres parties sont restées à l'état liquide pour se solidifier un peu plus en aval. Ce qui confirme de nouveau le fait que la solidification des condensats a été accélérée par le pouvoir de rétention des annelures bien que les conditions de température et de débit requises ne sont pas forcément satisfaites.

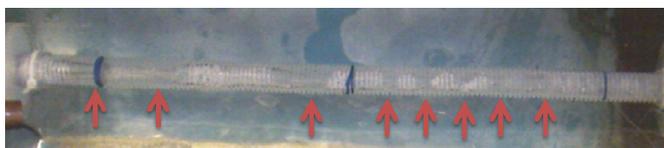


Figure 143 : Multiples blocs de glace en configuration annelé

Td1	T ^{liq}	Q _{gaz}	LISSE		ANNELE	
			Nb_bouchon	Nb_bouchon	Nb_bouchon	Nb_bouchon
20	-30	50	±	3	±	1
		50	±	1	±	1
		50	±	0	±	4
40	-30	20	±	2	±	2
		50	±	0	±	2
		20	±	1	±	2
		-10	±	0	±	2

Tableau 19 : Nombre de blocs de glace identifiés selon les conditions opératoires

Enfin, dans le domaine du givre, aucun changement notable des phénomènes n'a été constaté entre les deux configurations.

4.5.5 Impact de la surchauffe

4.5.5.1 Impact de la surchauffe si la température de rosée (ou humidité absolue) est constante

Dans cette partie de l'étude on se fixe de garder les humidités absolues ou les points de rosée comme des constantes et observer l'impact de l'humidité relative. Autrement dit, à partir des résultats des essais précédents avec les gaz saturés, nous allons observer l'impact d'une surchauffe amenant la température du gaz de sa température de rosée vers une température quelconque correspondant à une diminution d'humidité relative de 100 à 30% et de 100 à 9%. Les résultats observés peuvent être résumés par les figures suivantes.

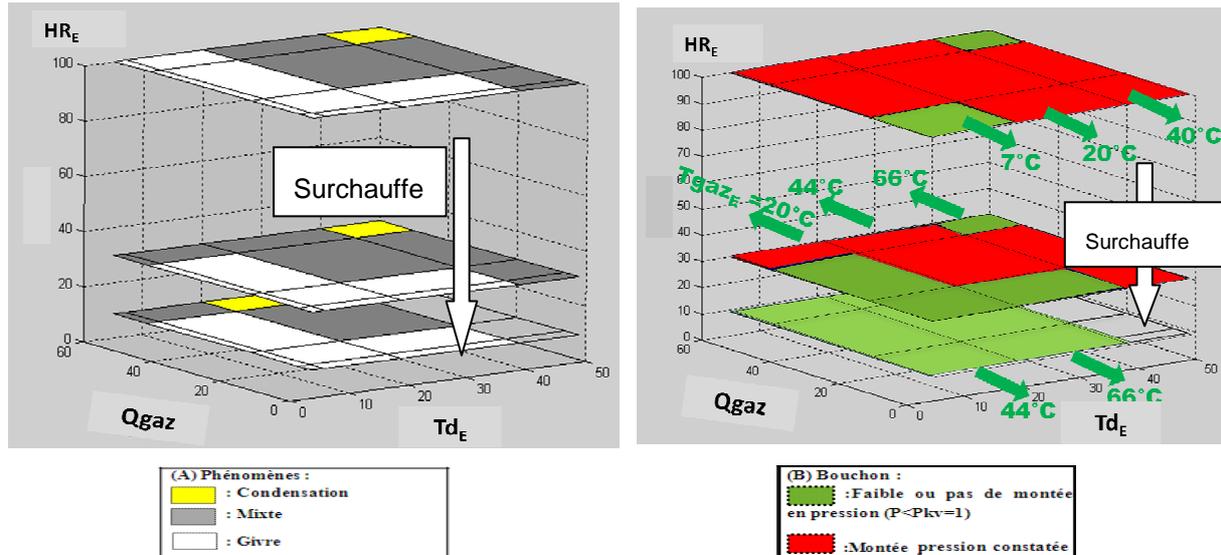


Figure 144 : Comparaison des phénomènes observés - Saturé vs Surchauffé

Comme le montre la Figure 144-A, la diminution de l'humidité relative (= montée en température) font passer certaine **condition givrante** en une condition favorable **au phénomène mixte** et certaine condition favorable **au phénomène mixte** en **condition condensante**. La surchauffe est accompagnée de la diminution de la pression en fin d'essai voire le dégagement total du passage (Figure 144 – B).

Pour les **conditions givrantes** en gaz saturé, la montée en température et la diminution de l'humidité relative conduisent à l'apparition en amont d'une certaine longueur de tube dans laquelle l'eau ne se condense ni ne se solidifie. En effet, dans cette portion du tube, l'énergie cédée aux parois servira essentiellement à refroidir le gaz jusqu'à sa saturation (échange sensible). En outre, la première trace de givre qui apparaît après cette portion intacte est en partie humide et affaissée d'où la faible montée en pression. La quantité et la qualité du givre dans la zone aval des tubes sont similaires pour les différentes valeurs d'humidité relative (Figure 145- A et Figure 145 - B).

La position de l'interface entre la partie intacte en amont du tube et la zone de givre en aval se déplace de plus en plus en aval quand le degré de surchauffe augmente (Figure 145 suivante).

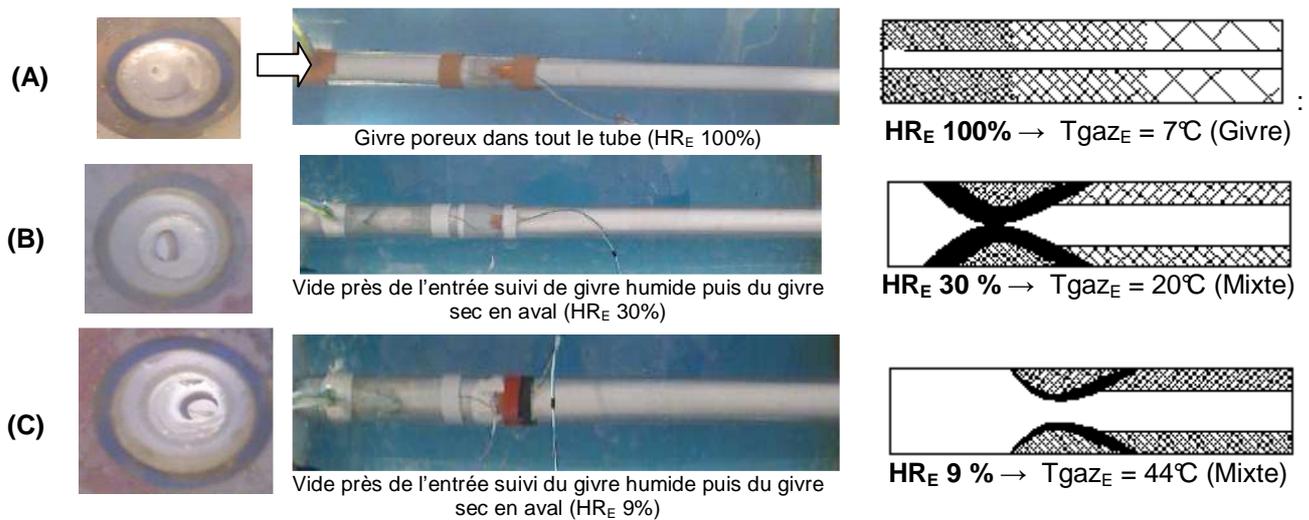


Figure 145 : Evolution du givre avec la surchauffe pour $T_{dE}=7^\circ C$ à $Q_{gaz}=50$ L/min et $T_{liq}=-30^\circ C$ (D18)

Pour les conditions opératoires dominées par du givre humide en condition saturée, non seulement la surchauffe implique la progression vers l'aval du tube de la zone dominée par la condensation, mais aussi elle favorise le déplacement de l'eau liquide vers la zone de givre en aval (Figure 146). Ce qui entraîne un dégagement partiel du passage et la diminution de la pression finale (de 100 à 5 mbars).

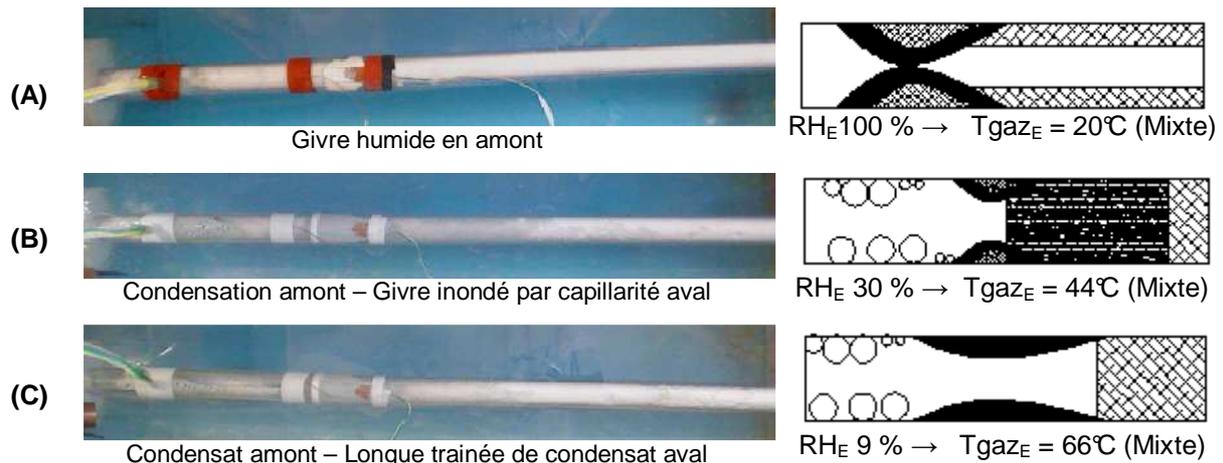


Figure 146 : Evolution givre humide avec la surchauffe pour $T_{dE} = 20^\circ C$, $Q_{gaz_E}=20$ L/min, $T_{liq}=-30^\circ C$ (D18)

Dans les conditions dominées par les **blocs de condensats solidifiés** en condition saturée, la surchauffe a fait déplacer la position du premier bloc de glace un peu plus en aval. En outre, le mouvement en permanence d'une importante quantité d'eau liquide dans la conduite a fait disparaître une grande partie des glaces qui était visible pour $HR=100\%$. La pression en fin d'essai est passée de 223 mbars (gaz saturé) à 20 mbars.

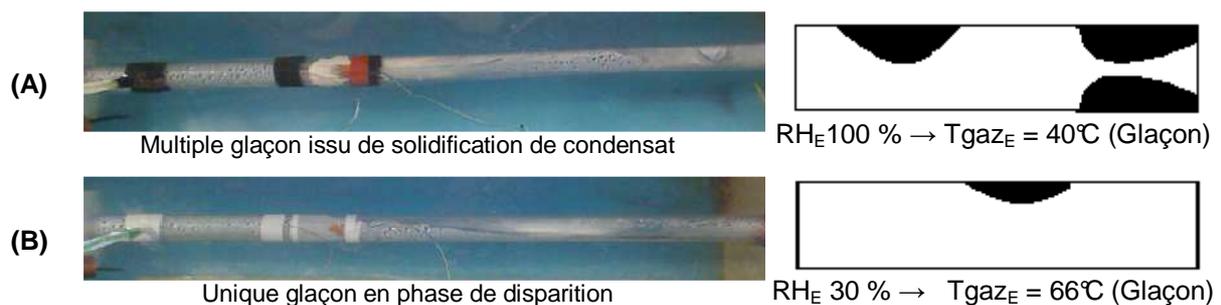


Figure 147 : Evolution des glaçons de condensat solidifié avec la surchauffe pour $T_{dE}= 40^{\circ}\text{C}$, $Q_{\text{gaz}}=20 \text{ L/min}$, $T_{\text{liq}}=-30^{\circ}\text{C}$ (D18)

4.5.5.1 Impact de l'humidité relative pour une température de gaz constante

Inversement aux approches précédentes, si nous fixons les températures de gaz (et non la température de rosée) et observons l'impact de l'humidité relative sur la possibilité de bouchon, nous obtenons la figure suivante :

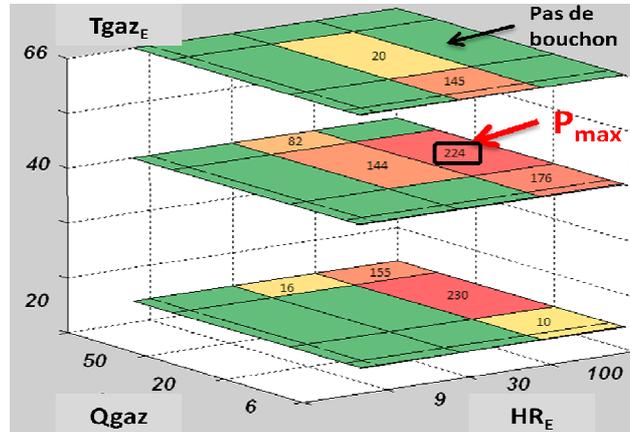


Figure 148 : Impact de l'humidité relative sur la pression en fin d'essai pour différentes températures de gaz ($T_{\text{liq}} = -30^{\circ}\text{C}$)

La figure montre que selon le cas, la diminution de l'humidité relative peut être accompagnée de la montée ou de la descente de la pression finale :

- Si le gaz est froid (20°C), la diminution de l'humidité relative diminue la quantité d'eau apportée par le gaz et la pression finale diminue.
- Si le gaz est à 40°C , deux cas peuvent se présenter :
 - Si le débit est élevé (50 L/min), la diminution de l'humidité relative entraîne une diminution de l'énergie échangée donc une diminution de la température de paroi. La pression monte.
 - Si le débit est faible ou moyenne (6 L/min , 20 L/min), la diminution de l'humidité relative diminue la quantité d'eau disponible et la pression finale diminue.
- Si le gaz est à 66°C , deux cas se présentent :
 - Le passage de l'humidité relative de 100 à 30% conduit à une diminution de la température de paroi interne et un bouchon se forme.
 - Par contre, le passage de l'humidité relative de 30 à 9% réduit considérablement la quantité d'eau disponible d'où la diminution de la pression.

4.5.6 Comparaison avec la littérature

4.5.6.1 Transport diphasique dans un tube horizontal : rappels

Comme nous l'avons expliqué dans la partie bibliographique (§2.4.6.1), le transport des films de condensat à l'intérieur d'un tube horizontal peut prendre plusieurs formes. Dans ce qui suit, nous allons présenter un à un les différents régimes d'écoulement de films et rappeler leurs domaines d'existence afin de les confronter avec les résultats expérimentalement observés en termes de morphologie de bouchons. Nous nous intéressons principalement aux **phénomènes mixtes**, qui ont conduit à différentes formes de bouchon.

Pour les phénomènes de condensation pure, de nombreuses cartographies du régime d'écoulement diphasique ont été proposées dans la littérature [70] [117]. Les caractéristiques des frontières entre les différents régimes varient avec de nombreux paramètres dont les vitesses du gaz, les vitesses du liquide, les densités, la position du point considéré, les viscosités etc.

Considérons le phénomène de condensation de la figure suivante :

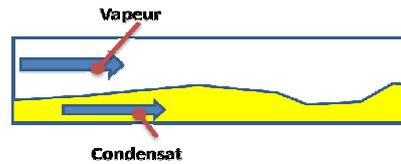


Figure 149 : Transport diphasique gaz/condensat

Selon les études [23] et [3], la cartographie du régime d'écoulement du condensat peut être décrite qualitativement comme suit.

Si le débit du liquide est faible, on a :

- A faible débit de gaz (vapeur pure dans la plupart des études), l'influence la gravité est importante et les condensats s'accumulent dans la partie inférieure du tube. Le film reste lisse et le régime d'écoulement est stratifié (Figure 150 - A).
- Quand la vitesse de la vapeur augmente, l'interface liquide/vapeur devient instable et donne naissance à des vagues de condensat dans la partie inférieure du tube. Dans la partie supérieure, les condensats sont sous forme annulaire. Le profil de condensation ainsi obtenu correspond au régime ondulé.
- A vitesse de vapeur élevée, les condensats s'éclatent et tapissent toute la paroi du tube pour donner un régime annulaire stratifié (Figure 150 - B) et à termes aboutir à un régime parfaitement symétrique qui est le régime annulaire (Figure 150- C).

Les différents régimes peuvent être schématisés par la figure suivante :

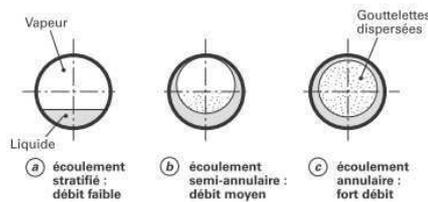


Figure 150 : Régime de condensation pour un débit de liquide faible

Pour les débits de liquide élevés, les mêmes tendances sont constatées sauf pour les faibles débits de vapeur, car les sommets des vagues de condensat peuvent alors atteindre la partie supérieure des tubes et conduire à un bouchon de liquide. On a alors un régime intermittent.

En ce qui nous concerne, nous partirons directement de la cartographie de condensation de la vapeur pure de la Figure 151-A, proposée par Delhaye [65].

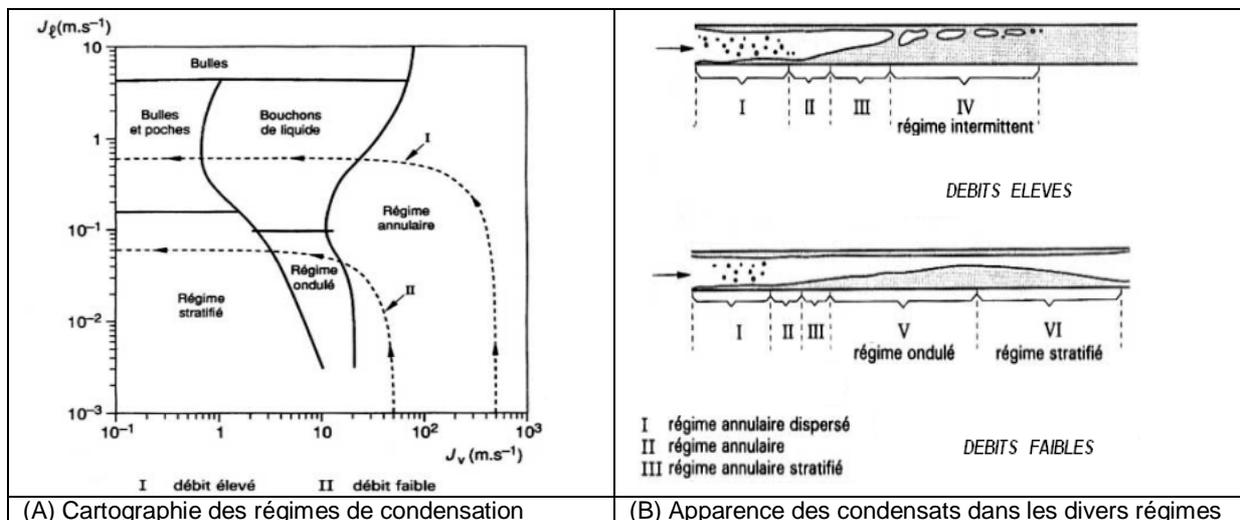


Figure 151 : Régime de films de condensat en configuration horizontale selon Delhaye [65] (vapeur pure)

4.5.6.2 Comparaison avec les essais

A travers les essais sur banc, nous avons vu qu'avant de se solidifier en bouchon, les condensats peuvent se déplacer d'une certaine distance. Ce qui nous incite à vérifier s'il existe une corrélation entre le comportement des condensats en phénomène de condensation pure et le bouchon qui pourrait se former si la température de paroi est inférieure à 0°C.

En se basant sur les résultats des essais sur banc, on peut faire correspondre les différents phénomènes de formation de bouchon de glace observés lors des essais avec les différents régimes théoriques de condensation qui existent. La correspondance est donnée par le tableau suivant.

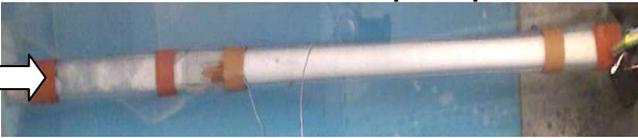
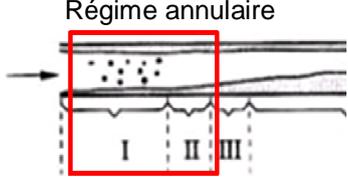
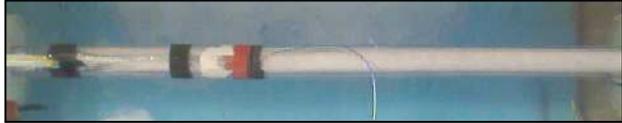
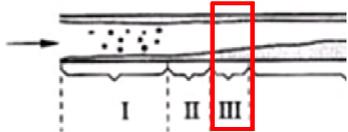
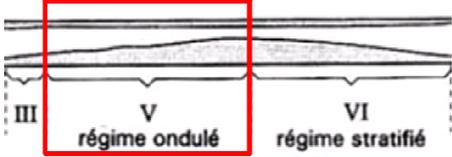
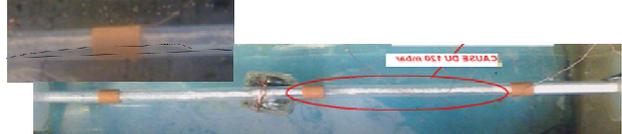
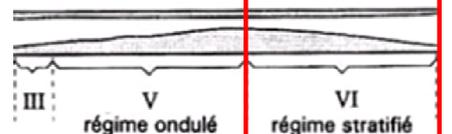
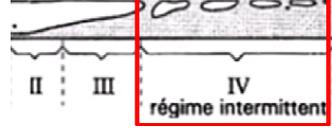
Phénomènes de bouchon observés expérimentalement	Régime théorique de condensation le plus proche
<p>Givre humide avec inondation par capillarité</p>  <p>Plaque condensat annulaire</p> 	<p>Régime annulaire</p>  <p>I régime annulaire dispersé II régime annulaire III régime annulaire stratifié</p>
<p>Condensation avec un important phénomène d'inondation</p> 	<p>Régime annulaire stratifié</p>  <p>I régime annulaire dispersé II régime annulaire III régime annulaire stratifié</p>
<p>Bouchon de glace ondulé</p> 	<p>Régime ondulé</p>  <p>III régime ondulé VI régime stratifié</p>
<p>Glace stratifiée ou Bouchon de glace stratifiée</p> 	<p>Régime stratifié</p>  <p>III régime ondulé VI régime stratifié</p>
<p>Bloc de glace unique ou Bloc de glace multiple</p> 	<p>Régime bouchon de liquide</p>  <p>II régime intermittent III régime intermittent IV régime intermittent</p>

Tableau 20 : Correspondance entre le type de bouchon et le régime de condensation

La confrontation de ces différents régimes identifiés expérimentalement avec la cartographie de la Figure 151 montre que le comportement des condensats observés ne correspond pas avec celui des transports diphasiques en général. Les cartographies de Delhaye [65] prennent en compte seulement les quantités de gaz et de condensat présent mais non la température des parois. Toutefois, cette dernière joue un rôle important en ralentissant le déplacement de l'eau liquide par cristallisation partielle et par la formation d'obstacles de glace. Pour comprendre cette influence, nous avons représenté sur la figure suivante les régimes théoriques de condensation correspondant à chaque type de phénomène de bouchon observé sur banc pour les différentes températures de paroi.

			T°liq			
			-30	-20	-10	
			+ -	+ -	+ -	
D	Td1	Qgaz	Regime	Regime	Regime	
10,00	7	6		Givre	Givre mouille	
		20		Givre	Bouchon de liquide	
		50		Annulaire	Stratifié	
	20	6		Givre	Givre mouille	Bouchon de liquide
		20		Givre mouille	Bouchon de liquide	Stratifié
		50		Bouchon de liquide	Ondulé	Goutte
	40	6		Bouchon de liquide	Bouchon de liquide	Stratifié
		20		Bouchon de liquide	Stratifié	Goutte
		50		Goutte	Goutte	Goutte
	18,00	7	6	Givre	Givre	Givre
			20	Givre	Givre	Givre
			50		Annulaire	Annulaire stratifié
20		6		Givre	Annulaire	Annulaire
		20		Givre humide	Annulaire	Goutte
		50		Bouchon de liquide		Goutte
40		6		Annulaire	Annulaire stratifié	Goutte
		20		Bouchon de liquide	Bouchon de liquide	Goutte
		50		Goutte	Goutte	

Figure 152 : Régime théorique de condensation associé au phénomène de bouchon observé lors des essais

La figure confirme l'impact de la température de paroi sur le régime théorique de condensation associé au phénomène de bouchon. La tendance peut être résumée comme suit

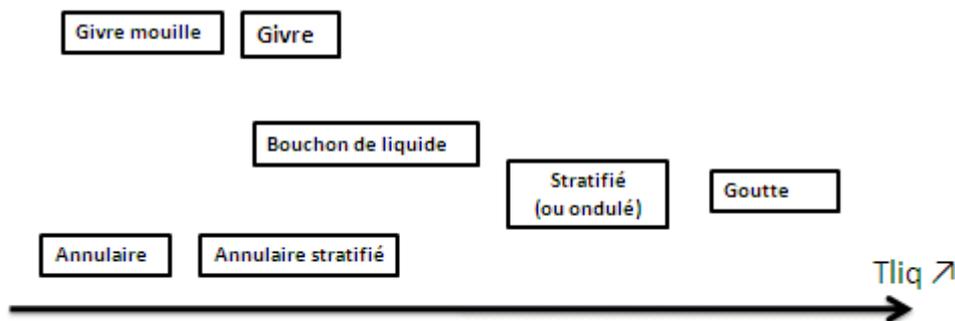


Figure 153 : Sens de modification des régimes en fonction de la température bain

Ce qui montre que quand la température de bain diminue, le régime de condensation en gouttes évolue d'un régime « stratifié » au « bouchon de liquide » puis enfin au régime « annulaire ».

Rappelons encore que les régimes mis entre guillemets (« stratifié », « annulaire », « bouchon de liquide », etc.) caractérisent le régime de condensation le plus proche des morphologies de bouchon observé mais ne correspondent pas au type de bouchon observé. Ainsi par exemple, un régime « bouchon de liquide » est associé au phénomène de formation de bloc de glace mais ne signifie pas que la montée en pression observée lors des essais est causée par du liquide.

4.5.7 Les physiques à considérer pour chaque phénomène

Nous avons vu que les phénomènes observés sont très variés et changent avec les conditions opératoires. Les phénomènes en jeu comprennent la condensation, la formation de givre, la solidification et la combinaison de ses trois phénomènes élémentaires que nous avons appelé « **phénomène mixte** ».

En se basant sur les observations expérimentales détaillées dans ce paragraphe et en se servant des théories correspondant à chaque phénomène expliqué dans la partie bibliographique, il est possible d'établir des recommandations pour les études analytiques des phénomènes de formation de bouchon dans les circuits de blow-by.

4.5.7.1 La condensation

4.5.7.1.1 Les physiques à prendre en compte

Dans les zones purement condensantes, la condensation en gouttes prédomine dans toutes les situations. Les physiques qui la gouvernent ainsi que l'état de l'art dans ce domaine ont été expliqué dans le paragraphe §2.4. Sans entrer dans les détails, rappelons que l'étude de ce phénomène nécessite la maîtrise :

- Côté gaz :
 - Des coefficients de transfert par convection
 - Des coefficients de transfert massique de la condensation
 - De la sursaturation requise selon l'angle de contact des parois.
- Côté gouttes :
 - De la conduction à travers les gouttes sphériques
 - De la résistance thermique causée par la courbure des gouttes
 - Du mouvement des gouttes causé par l'ensemble des forces extérieures (cisaillement par le gaz, gravité, tension de surface).
- Côté parois :
 - De la répartition des gouttes et des sites de nucléation disponible
 - De la constriction causée par la distribution non uniforme des gouttes.

Parmi ces divers phénomènes physiques, les paramètres liés aux mouvements des gouttes sont à considérer avec intérêt. Comme le montrent les essais, tout paramètre défavorable à ce mouvement (orientation, géométrie, annelure) déplace le phénomène vers la solidification locale de l'eau donc au bouchon.

Afin de simplifier le problème, il est envisageable de négliger le lessivage des gouttes en développement (en aval) par les gouttes mobiles. On pourra alors considérer le phénomène comme le développement de plusieurs gouttes indépendantes.

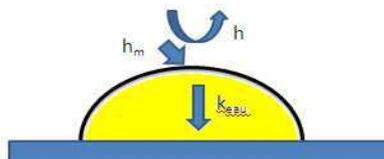


Figure 154 : Phénomène de transfert pour les zones condensantes

En effet, on a constaté lors des essais que la surface occupée par les gouttes qui partent vers l'aval est beaucoup plus faible par rapport à la surface occupée par les gouttes qui croissent. D'autre part, la majorité des gouttes mobile se déplace sur la partie basse du tube, laissant ainsi intact les gouttes sur la partie supérieure du tube.

4.5.7.1.2 Les paramètres jugés importants

La condensation seule ne conduit pas au bouchon. Sa maîtrise est toutefois capitale dans le cas où ce phénomène est accompagné en aval par d'autres phénomènes tels que la solidification ou la formation de givre. En effet, d'une part, les condensats sont susceptibles de dégager la glace et le givre formés à l'aval de l'échantillon. D'autre part, ils peuvent aussi se solidifier lors de leurs trajets et se transformer en bouchon de glace. En outre, dans le cas des configurations présentant des zones de rétention d'eau ou dans le cas où les paramètres d'entrées changent de manière cyclique (alternance **conditions condensantes** et conditions froides), la connaissance des quantités d'eau qui s'accumulent avec le temps est nécessaire pour estimer la quantité de glace qui se formera plus tard quand les conditions de températures locales diminuent.

Dans tous les cas, en cas de condensation, il est évident que la connaissance de la quantité (débit de condensation) et de l'énergie (température) des condensats est essentielle pour comprendre tout le phénomène.

4.5.7.2 Le givre

4.5.7.2.1 Les phénomènes physiques

La formation du givre est un phénomène à part entière dans la formation du bouchon. La physique liée à ce phénomène est détaillée en annexe. Les principaux phénomènes physiques sont :

- La convection côté air
- La diffusion à l'intérieur de la couche poreuse
- La perméation de l'eau liquide

Les essais montrent que le givre se développe localement. Il est de moins en moins important vers l'aval. Le problème peut alors être simplifié en considérant seulement le développement du givre sur une portion du tube puis en appliquant la physique qui en découlent sur un tube entier composé de plusieurs portions montées bout à bout.

Comme il a été expliqué en annexe, ce phénomène est essentiellement lié au gradient d'hygrométrie entre la paroi et le gaz, la température du gaz et le coefficient de transfert thermique global. La prise en compte de l'impact de la nature des parois (angle de contact, rugosité) ainsi que des turbulences locales ne sont pas donc impératives.

4.5.7.2.2 Importance des paramètres

La formation du givre est un phénomène très lent, ainsi dans les gammes de conditions climatiques très froides avec un gaz relativement sec, son impact n'est pas forcément détectable en 3 heures d'essais véhicule. Aussi, contrairement à la condensation, le facteur temps constitue aussi un paramètre important.

Dans le cas des paramètres cycliques (cycles d'essais véhicule, conditions clientèle, etc.), il est important de déterminer les phénomènes qui alternent avec le phénomène de givre. Ainsi, une condensation provoquera le lessivage du givre formé précédemment et le phénomène recommencera à chaque cycle. Par contre, si le phénomène qui le suit est un phénomène mixte, il faudra considérer l'accumulation de glace causée par l'alternance de la formation et de la fusion partielle du givre.

En outre, si le phénomène de givrage est suivi d'un phénomène de condensation ou d'un **phénomène mixte**, les phénomènes physiques à prendre en compte peuvent être totalement différents du phénomène de givrage initial. Dans ce cas, les phénomènes de lessivage, d'affaissement et de compactage du givre auront autant d'importance que la physique de croissance du givre lui-même.

4.5.7.3 Phénomène mixte

Le **phénomène mixte** est l'association de plusieurs phénomènes tels que la condensation, la formation du givre et la solidification qui sont observés simultanément ou les uns après les autres.

Si les phénomènes se déroulent les uns après les autres, le problème se résume à l'identification du phénomène clé qui peut être le phénomène le plus long, le plus tardif ou celui qui engendre l'apparition des premiers cristaux de glace. On peut par la suite appliquer la physique correspondant à ce phénomène clé pour comprendre le phénomène dans son entier.

Si les phénomènes se déroulent simultanément, trois cas de figure se présentent selon le diamètre du tube.

4.5.7.3.1 Diamètre moyen (~ D18)

Pour les diamètres moyens, les conduites peuvent être divisées en deux domaines, un domaine en amont du tube, siège de condensation et un domaine en aval siège de condensation avec solidification et/ou de givrage. En amont, la condensation en gouttes telles qu'elle est décrite dans le paragraphe précédent est toujours valide. En aval, le bilan énergétique local doit prendre en compte la convection et la condensation côté air ainsi que le déplacement de l'eau liquide à travers le circuit.

La possibilité de bouchon pourra être par la suite décrite en fonction des températures locales de paroi issues du bilan énergétique ainsi qu'en fonction de la quantité d'eau disponible.

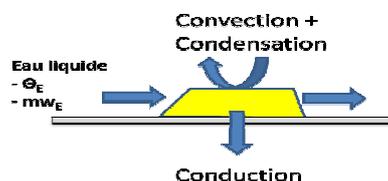


Figure 155 : Phénomène de transfert au niveau des bouchons avec D18

Compte tenu de l'énergie apportée par l'eau liquide, la température locale sera plus élevée que celle obtenue lors d'une condensation sans ruissellement du liquide. Autrement dit, si les bilans énergétiques sont établis à partir des coefficients de transfert sur une paroi sèche, le critère de température de formation de bouchon ainsi calculée sera beaucoup plus faible par rapport à la température de cristallisation de l'eau (0°C).

Afin d'améliorer cette approche analytique, la modification des coefficients de convection avec l'augmentation de la taille du bouchon peut aussi être prise en compte. Autrement, si le calcul se fait seulement par le bilan énergétique sur une paroi sèche, on s'attend à une sous estimation de la température locale des glaces et par la suite une diminution du critère de température requis pour la formation des bouchons.

4.5.7.3.2 Diamètre faible

Comme il a été expliqué précédemment, la présence de condensat liquide en cours d'essai n'a aucun impact sur l'évolution des bouchons. La position des bouchons peut alors être déduite de l'endroit de cristallisation des premières gouttes de liquide qui se forment et qui se déplacent par la suite vers l'aval. Il est donc possible d'ignorer l'impact énergétique de l'inondation et de traiter la formation du bouchon comme le déplacement d'un flux de liquide sur une paroi froide. Le lieu de cristallisation sera, dans ce cas défini par l'évolution de la température du liquide au cours de son trajet, notamment le parcours libre de l'eau avant d'atteindre une température négative. Vu la faible quantité de liquide mise en jeu, il serait possible de déterminer le lieu d'apparition du bouchon rien qu'en déterminant la distribution de la température de paroi elle-même dans les hypothèses de paroi sèche.

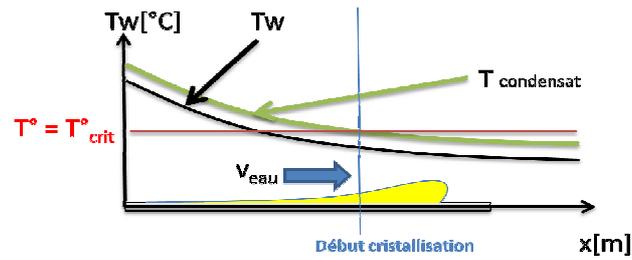


Figure 156 : Phénomène important pour D10

4.5.7.3.3 Diamètre élevé

Pour les diamètres élevés, la maîtrise du bilan énergétique dû au gaz et au liquide et la connaissance de la distribution axiale des températures est nécessaire comme dans le cas de diamètres moyens. En plus de cela, il faut aussi tenir compte de la distribution latérale de la température à travers les couches de glace et considérer par la même occasion l'aspect temporel compte tenu du volume de l'échantillon à remplir.

4.6 Le profil de pression

Nous avons vu que les phénomènes en jeu ainsi que l'ordre d'importance des physiques correspondantes sont différentes selon les conditions opératoires. Dans cette partie, on va montrer que, bien que chaque phénomène est susceptible d'entraîner la formation de bouchon, chacun d'eux a son propre profil de montée en pression. Pour cela on va considérer la **vitesse de montée en pression**, la **durée qui s'écoule avant qu'on constate cette montée en pression**, la **pression en fin d'essai** et le **nombre de pics**.

Nous insisterons sur les résultats obtenus avec les tube D18-2mm et D10-1mm qui ont des matrices d'essais suffisamment complètes pour permettre une comparaison générale. Afin de confirmer l'impact du diamètre que nous avons constaté à travers ces séries d'essais principaux, nous considérerons aussi les résultats partiels disponibles avec D18-1mm. Les diamètres D31 ne seront pas analysés compte tenu du nombre très faible de montée en pression supérieure à 10 mbars dans cette série d'essais.

4.6.1 Description des profils

La pression augmente au fur et à mesure que le bouchon à l'intérieur des échantillons se développe. Elle augmente donc généralement avec le temps mais peut toutefois fluctuer et diminuer si le bouchon se dissipe en cours d'essais.

Reprenons un profil typique de pression sur la figure suivante :

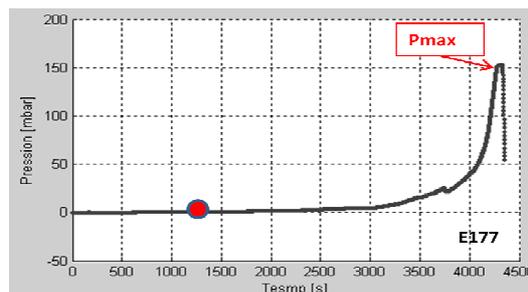


Figure 157 : Profil de pression

Au début de l'essai, la taille du bouchon est généralement négligeable par rapport à la section du tuyau et la pression reste très faible. Lorsque le bouchon se développe, la pression augmente petit à petit jusqu'à atteindre la pression de référence $P_{kv=1}$. La durée qui s'écoule est notée « **durée d'apparition du début de bouchon** ».

Le bouchon continue à se développer et la pression monte davantage avec le temps et peut dépasser 135 mbars qui sont considérée comme la pression maximale autorisé dans les tuyaux de blow-by. La durée qui s'écoule entre ces deux instants est défini comme « **durée de montée en pression** ». Le rapport entre le delta P et la durée nécessaire pour passer de $P_{kv=1}$ à la pression finale est définie comme la « **vitesse de montée en pression** ».

4.6.2 Les durées avant le début de montée en pression

La **durée avant le début de montée en pression** des essais avec le D18 et le D10 est présentée sur la figure suivante :

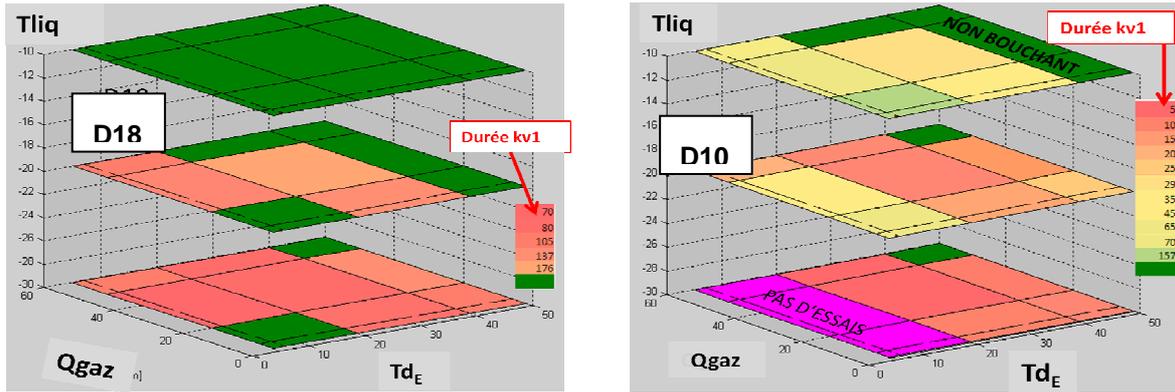


Figure 158 : Durée avant le début de montée en pression pour le D10 et le D18

Les trois axes représentent les paramètres opératoires dont le débit, le point de rosée et la température du bain. Les couleurs représentent la durée avant le **début de montée en pression**. Les zones en vert représentent les domaines dans lesquels la pression n'a pas dépassé la pression de référence $P_{kv=1}$, c'est-à-dire le domaine où la montée en pression était négligeable pendant les 3 heures que durait l'essai.

Pour le D18, la durée avant que le premier signe de bouchon n'apparaisse se situe au-delà de 70 à 170 minutes. Cela pourrait s'expliquer par la valeur élevée du diamètre de passage et la possibilité pour l'eau liquide à se déplacer davantage au lieu de s'accumuler au niveau de la zone froide en aval du tube.

Pour les deux cas de diamètres, on constate que l'apparition du **début de montée en pression** est beaucoup plus rapide dans les conditions de point rosée et de débit faibles. Cela s'explique par le fait que ces conditions mettent en jeu une faible quantité d'eau introduite. Comme le confirme la figure ci-dessous, les **durées de montée en pression** supérieures à 30 min sont caractérisées par des quantités d'eau introduites ne dépassant pas les 2,70 g/h. Remarquons que quelques exceptions subsistent pour le tube en D18, ils sont causés par la fusion partiels des glaces qui se forment à cause du phénomène d'inondation par des condensats.

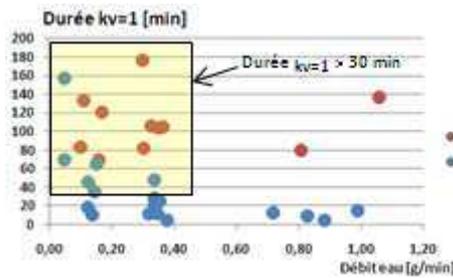


Figure 159 : Durée avant montée en pression en fonction du débit de condensation

Pour les pressions finales supérieures à 10 mbars, les **durées avant le début de montée en pression** pour les deux tubes peuvent être comparées par la figure suivante :

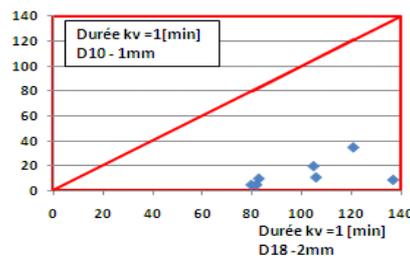


Figure 160 : Comparaison durée avant montée en pression (D10-1mm vs D18-2mm)

D'après la Figure 160, on remarque que le **début de montée en pression** est constaté beaucoup plus tôt pour le D10 que pour le D18. En effet, vue la taille du tube D10, une infime quantité de glace suffit pour le boucher.

Notons, toutefois, que la différence entre les deux mesures ne peut être attribuée seulement qu'à la seule différence de diamètre des deux tubes. La différence d'épaisseur de 1 mm entre les deux tubes peut jouer un rôle. Ainsi si on part des quelques points disponible à la fois en D18-1mm (au lieu de D18-2mm) et D10-1mm, on obtient la figure de comparaison suivante :

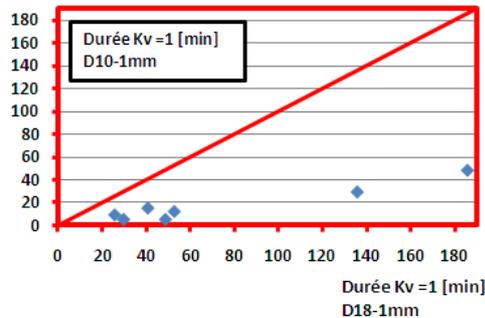


Figure 161 : Comparaison durée avant montée en pression (D10 vs D18-1mm)

La durée moyenne avec le D10-1mm est de 12 min alors qu'elle est de 56 min avec le D18-1 mm. La différence entre le D18 et le D10 est donc retrouvée bien que le contraste soit moins sévère.

En ce qui concerne les tubes D31, rappelons que deux essais seulement ont permis de constater une montée en pression suffisante dans toute la série d'essais. Ce sont les essais faits à -30°C et qui ont mis en jeu une importante quantité d'eau introduite.

4.6.3 Les durées de la montée en pression et la pression finale

La **durée avant début de montée en pression** renseigne sur la phase initiale du phénomène, elle est essentiellement liée à l'aptitude de la paroi à retenir l'eau (i.e à sa température) ainsi que la quantité de vapeur qui peut être transformée en glace. Toutefois, elle n'est pas suffisante pour expliquer l'évolution des bouchons à l'intérieur des conduites. En effet, la physique de la formation des bouchons peut évoluer au fur et à mesure que celui-ci grandit : amélioration des coefficients de convection, effet de l'inondation, etc.

Ainsi pour mettre en évidence la vitesse d'évolution des bouchons, on a tracé sur les diagrammes des paramètres, le **profil de montée en pression** de chaque essai (figures 163 et 164). La construction des cylindres représentatifs de chaque profil est illustrée par la figure suivante :

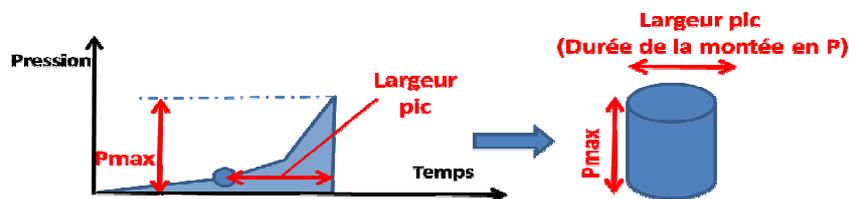


Figure 162 : Notation des cylindres de profil montée en pression

4.6.3.1 Diamètre D10

Pour le D10, la distribution des profils de pression peut être présentée par la figure suivante. Les axes représentent les conditions opératoires. Le diamètre de chaque cylindre représente la **durée de montée en pression** en minute (largeur du pic), et la hauteur des cylindres représente la **pression finale** à la fin de l'essai.

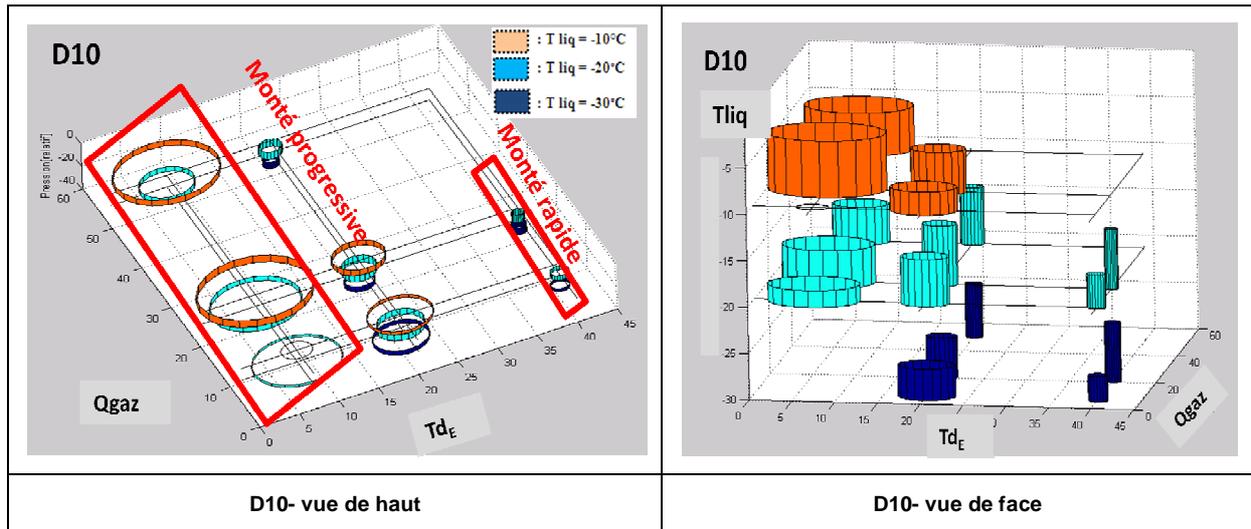


Figure 163 : Distribution profil montée en pression pour le D10 et le D18

La figure montre que pour le D10 le profil de pression est relativement comparable pour les trois valeurs de température de bain (-10°C, -20°C et -30 °C).

Le profil de la montée en pression est différent selon les phénomènes prépondérants :

- Dans les conditions opératoires favorables aux **phénomènes mixtes**, si des bouchons existent, ils se développent très vite et finissent par boucher totalement le tube au bout de 14 à 60 minutes. Une exception est toutefois constatée pour les températures de paroi élevées (-10°C) pour laquelle la montée en pression peut durer jusqu'à 125 minutes.
- Dans les **conditions givrantes**, la durée de montée en pression est beaucoup plus élevée. Elle varie de 50 à 120 minutes.

4.6.3.2 Diamètre D18

Pour le D18, l'impact de la température du bain vis-à-vis de la pression finale est très important. Comme le montre la figure suivante, à une température de bain supérieure ou égale à -20°C, la montée en pression est presque invisible voire nulle.

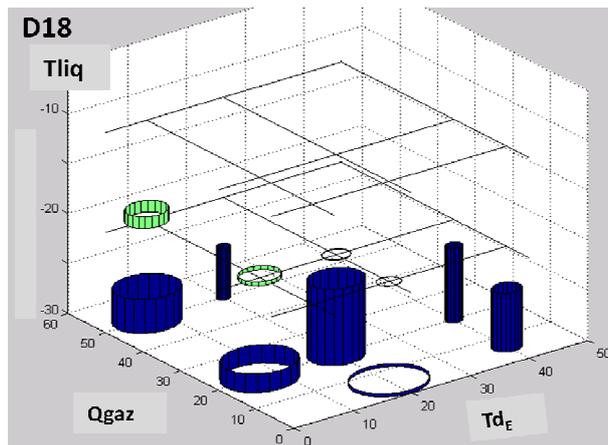


Figure 164 : Distribution profil de montée en pression avec le D18

Avec le D18, on observe la même disparité qu'avec le D10 entre la zone de givre et la zone mixte. En **condition givrante**, la **durée de montée pression** est de 39 minutes en moyenne. Dans les zones de conditions favorables aux **phénomènes mixtes**, elle est en moyenne aux environs de 100 minutes.

Notons toutefois que malgré leur faible valeur de pression finale, les profils de pression à -20°C méritent une attention particulière si les essais durent plus de 3h. En effet, les courbes de pression correspondantes (Figure 165) montrent que la pression évolue encore à l'interruption des essais et cela malgré la présence d'eau liquide à la place de la glace à l'intérieur des tubes.

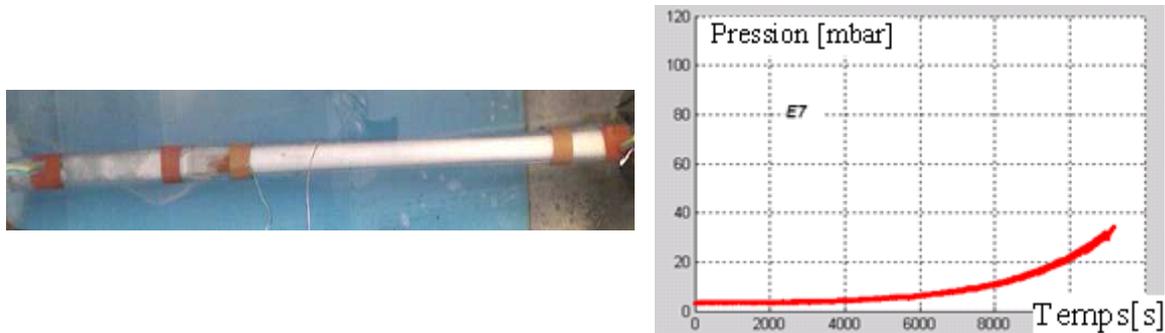


Figure 165 : Exemple d'un phénomène mixte à -20°C (source de bouchon partiel 40 mbars)

4.6.4 La vitesse de montée en pression

La **durée de montée en pression** et la **pression en fin d'essais** correspondante peuvent être réunie en un seul paramètre qui est la **vitesse de montée en pression**. Bien que cela ne renseignera pas directement sur l'entendue de la formation du bouchon, elle constitue un outil pour comparer la vitesse d'évolution des bouchons dans les conduites.

4.6.4.1 Diamètre D10

Le résultat obtenu peut être résumé par les figures 166 et 167. Les axes représentent les conditions opératoires, la couleur représente la **vitesse de montée en pression** et les valeurs numériques à l'intérieur des losanges représentent la pression en fin d'essais.

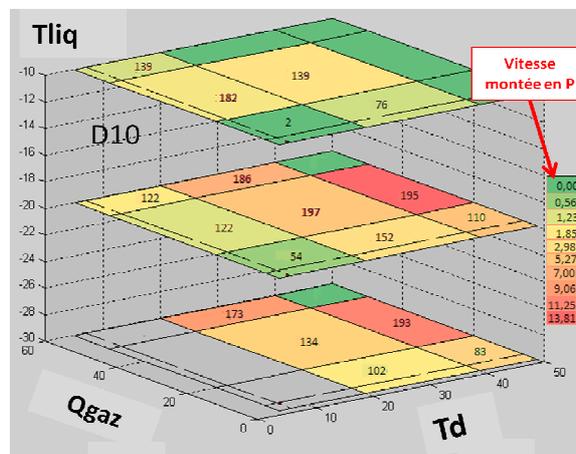


Figure 166 : Distribution vitesse et montée en pression avec le D10

Ces figures montrent que la **vitesse de montée en pression** est plus élevée dans les conditions opératoires favorables aux **phénomènes mixtes** les plus proches des **conditions condensantes**. Les mêmes tendances sont constatées dans les trois gammes de température de bain.

Les **vitesse de montée en pression** sont moins sensibles à la température du bain mais elles sont fortement impactées par la température de rosée et le débit. La **vitesse de montée en pression** est particulièrement élevée si l'un des deux paramètres (Température de rosée ou débit) est à sa valeur maximale et l'autre à sa valeur moyenne. Rappelons aussi que si les valeurs des deux paramètres sont simultanément élevées, il n'y aura pas de formation de bouchon.

D'une manière simplifiée, la vitesse de montée en pression peut être partagée en trois gammes :

- Une gamme de vitesse lente : 0,6 à 1,12 mbar/min pour les températures de rosée de 7°C
- Une gamme de vitesse moyenne : 1,7 à 9 mbar/min pour les températures de rosée de 20°C
- Une gamme de vitesse rapide : 4 à 14 mbar/min pour les températures de rosée de 40°C

Une nette tendance est aussi constatée à l'intérieur de chaque gamme pour les trois niveaux de débit de gaz. La **vitesse de montée en pression** augmente généralement quand le débit de gaz augmente.

4.6.4.2 Diamètre D18

Les tendances décrites pour le diamètre D10 sont valables également pour le D18:

- La vitesse de montée en pression est élevée à la frontière entre la **zone favorable aux phénomènes mixtes** et la **zone condensante**.
- La vitesse augmente si le débit ou la température de rosée augmente.
- Aucune montée en pression n'est constatée si les deux paramètres (Q_{gaz} et T_d) sont simultanément élevés.

Toutefois, contrairement au D10, la diminution de la température du bain accélère la montée en pression (voire figure suivante).

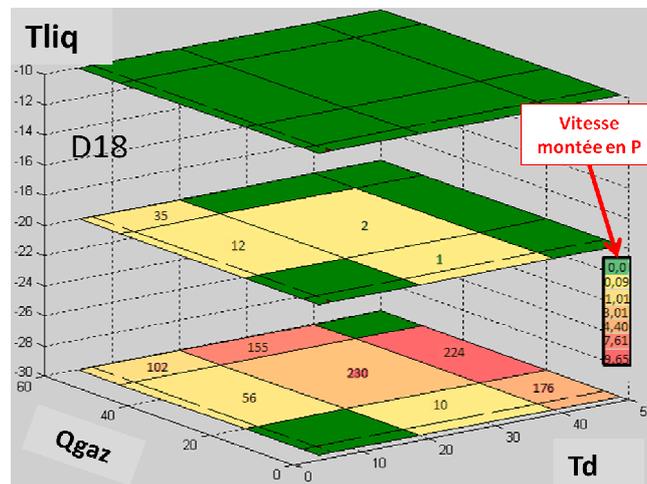


Figure 167 : Distribution de la vitesse de montée en pression pour le D18

Si on ignore les essais qui n'ont entraîné qu'une faible surpression (inférieure à 10 mbars), les vitesses de montée en pression de D10-1mm et D18-2mm peuvent être comparées (Figure 168-A)

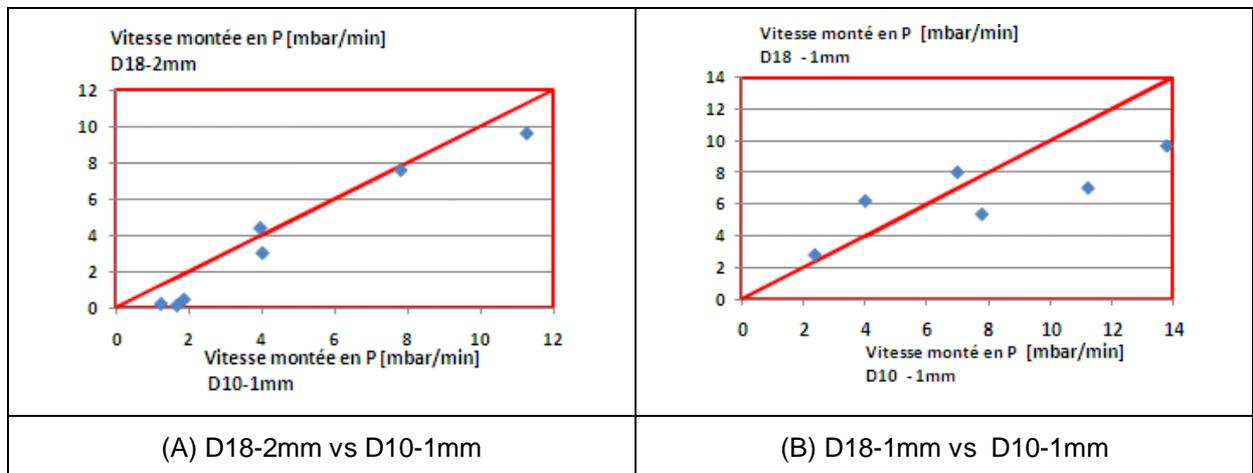


Figure 168 : Comparaison des vitesses de montée en pression

Afin d'écarter l'impact de la différence d'épaisseur entre les deux tubes, on a aussi présenté la figure Figure 168-B correspondant aux essais réalisés avec le D18-1mm et le D10-1mm. Les figures montrent que pour les deux diamètres, la vitesse de montée en pression avec D10 et D18 sont tout à fait comparables entre eux. La seule différence entre les profils de pression se résume ainsi à la différence de durée avant le **début de la montée en pression** (Cf. paragraphe précédent). Malgré la similarité, rappelons toutefois, que le risque d'apparition de bouchon n'est pas toujours identique pour les deux diamètres, autrement dit une condition opératoire bouchante pour le D10 n'entraîne pas forcément une montée en pression visible avec le D18.

4.6.5 Le nombre de pics de pression

La pression n'évolue pas toujours de manière continue. De fréquentes chutes de pression sont constatées en cours d'essais pour certaines combinaisons de conditions d'entrée. Ces chutes peuvent être temporaires, la pression remonte de nouveau de sorte que la pression en fin d'essais finit par dépasser la valeur critique de 135 mbars (Figure 169-A). Dans d'autres cas, la chute peut être permanente et la pression finale est beaucoup plus faible que la crête des pics de pression (Figure 169-B)

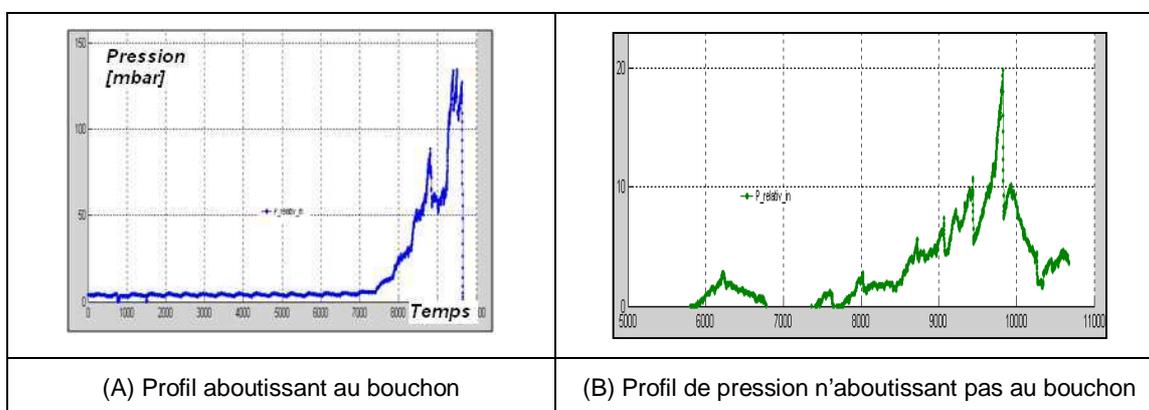


Figure 169 : Exemple de profil de pression à plusieurs pic

Afin de pouvoir constater l'étendue de ce phénomène ainsi que les paramètres influents, comparons un à un les résultats obtenus avec les différents tubes avec les résultats obtenus avec le tube D18-2mm.

La Figure 170-A montre que le passage du D18-2mm au D10-1mm a conduit à la multiplication du nombre de pics. Il est toutefois difficile d'attribuer cette transformation au seul changement de diamètre puisque la même tendance semble être observée si on compare les résultats du D18-2mm et du D18-1mm (Figure 170-B).

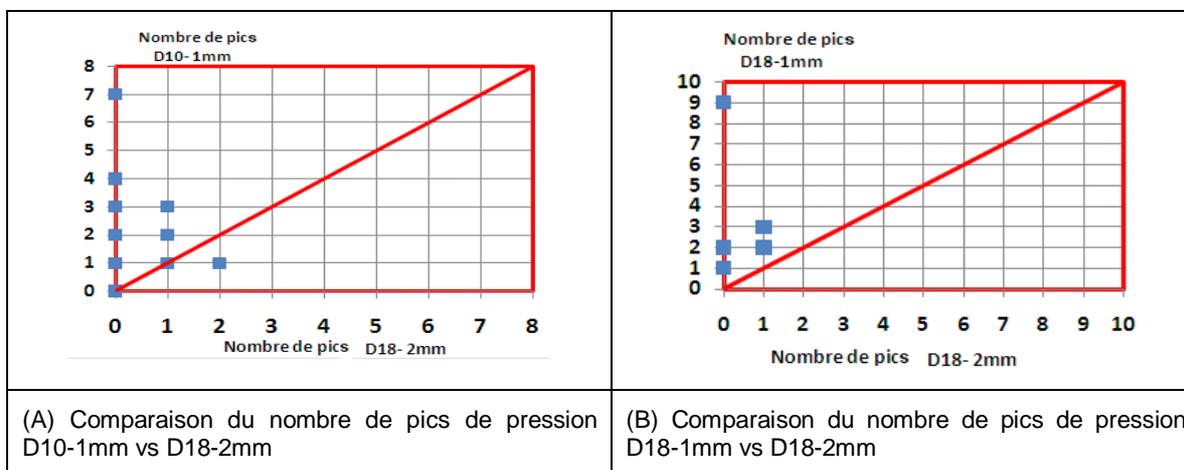


Figure 170 : Comparaison du nombre de pics de pression entre les deux tubes lisses

En recoupant les deux figures, on remarque que l'apparition de pics multiples est favorisée avec D10-1mm et D18-1mm si les essais avec le D18-2mm correspondant se trouvent dans une **zone condensante** (représentée sur la Figure 170 par un nombre de pics en abscisse égal à zéro).

Les essais ont aussi montré que la multiplicité des pics est favorisée en configuration annelée ainsi qu'en condition surchauffée. Les graphiques de comparaison sont les suivants :

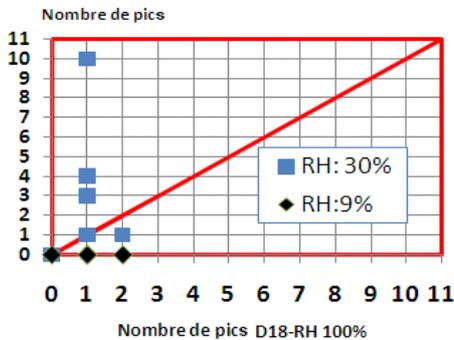


Figure 171 : Comparaison nombre de pics de pression pour différentes humidités relatives (T liq=-30°C)

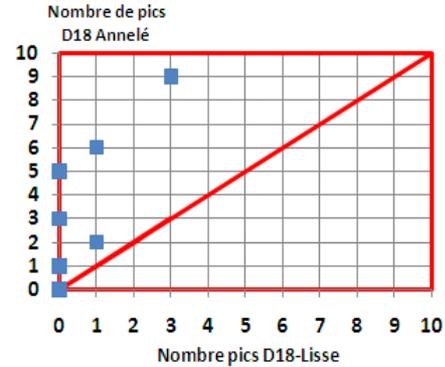


Figure 172 : Comparaison nombre de pics de pression en tube lisse vs tube annelé(T liq=-30°C)

Physiquement, les points communs entre les diverses conditions favorables aux pics multiples sont leur aptitudes à faire coexister les condensats et la glace dans un même essai. En résumé, les divers cas de figure sont:

- Des conditions bouchantes mais qui sont condensantes pour une autre dimension de tube (tube plus épais, tube ayant une autre géométrie).
- Des conditions en situation surchauffée tendant ainsi à déstabiliser toute forme de glace sans pour autant réussir à les éliminer totalement.
- Des configurations qui retiennent temporairement l'eau de manière à favoriser la solidification bien que les conditions de température et de débit locales soient défavorables.

4.7 Etablissement des corrélations

Nous avons vu que les phénomènes observés ainsi que les profils de pression qui en résultent sont très différents d'une condition opératoire à l'autre. Il a aussi été constaté que chacun de ces phénomènes ainsi que tous les paramètres thermiques associés évoluent avec le temps et l'espace. Il est toutefois possible, du point de vue thermique, de caractériser le système et d'établir une étude comparative en se référant aux paramètres mesurés lors de la phase stationnaire des essais (au début des essais). En particulier, il est envisageable de déterminer à partir de ces paramètres les conditions qui règnent à l'intérieur des échantillons juste avant le développement des bouchons de glace.

Ainsi, bien que ces paramètres thermiques concernent les phénomènes de convection et de condensation sur une surface sèche, ils permettent d'évaluer l'aptitude du système à faire apparaître la glace et à préserver son maintien vis-à-vis des autres contraintes qui surviendraient au fur et à mesure que l'essai avance : phénomène d'inondation, résistance thermique des condensats et des glaces, augmentation des coefficients de convection, accumulation de condensat, etc.

Dans ce paragraphe, nous allons d'abord rappeler les différentes équations que nous avons utilisées pour l'exploitation des mesures sur banc. Ensuite nous allons déterminer l'influence de chaque paramètre d'entrée sur le transfert thermique et proposer des corrélations qui les lient en se basant sur les résultats des mesures expérimentales.

4.7.1 Les équations utilisées

4.7.1.1 Calcul des paramètres caractéristiques de l'air humide

Les différents paramètres permettant de caractériser l'air humide ont été détaillés dans le Chap. 2. En ce qui concerne le suivi des essais, on s'est focalisé essentiellement sur le point de rosée, l'humidité relative, l'humidité absolue et la température. On considérera par la même occasion les aspects énergétiques dont les enthalpies. Les différentes étapes de calcul de ces paramètres sont expliquées dans le paragraphe §4.4.3.

4.7.1.2 Calcul des propriétés de transport de l'air humide

La littérature montre que l'étude des phénomènes de convection de l'air humide requiert une bonne maîtrise des propriétés de transport [118]. Cette maîtrise est importante pour notre cas compte tenu du fait que notre plage de travail s'étale dans un large intervalle de température et d'humidité.

Dans cette étude, on considérera surtout la densité, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la viscosité. On prendra en compte aussi les paramètres suivants : le nombre de Prandtl, la viscosité cinétique et le coefficient de diffusion. Enfin, on considérera également l'enthalpie de changement d'état de l'eau vu son rôle dans le bilan énergétique relatif à la condensation.

Généralement, les propriétés de transport sont évaluées en fonction de la température du gaz. Par contre, en tenant compte de l'interaction entre la nature de la couche limite de convection et le coefficient de transfert, Vepsäläinen [119] recommande d'évaluer ces propriétés vis-à-vis des températures de la couche limite qui est approximativement la moyenne entre la température du gaz et de la paroi. A travers nos travaux de corrélations, nous avons constaté que les deux approches aboutissent à des corrélations avec des précisions comparables. Nous avons donc choisi d'utiliser directement la température du gaz pour évaluer les propriétés de transport.

- La densité

La densité de l'air humide varie en fonction de la température et de l'humidité. Elle est calculée en se servant de la relation suivante [4] :

$$\rho = \left(\frac{P}{Ra \cdot T} \right) \left[\frac{(1+Y)}{1+Y \cdot \frac{Rw}{Ra}} \right] \quad (4-3)$$

Ra, Rw sont les constantes des gaz parfaits (air et vapeur)

- La viscosité et la conductivité

La viscosité et la conductivité de l'air humide peuvent être déduites de la viscosité et de la conductivité de ses éléments constitutifs selon relation de Mason et al. [120]:

$$P_{x,m} = \frac{P_{x,i}}{1 + G_{i,j} \frac{X_j}{X_i}} + \frac{P_{x,j}}{1 + G_{j,i} \frac{X_i}{X_j}} \quad (4-4)$$

P_x représente la propriété du mélange à considérer (viscosité ou conductivité)

i et j représentent les éléments constitutifs du mélange (air ou vapeur)

X_i, X_j représentent la fraction molaire de l'élément i (resp. j) dans le mélange

Les paramètres $G_{i,j}$ sont fonction de la viscosité des éléments constitutifs du mélange et peuvent être déterminés selon la relation de Wilke [120][121] :

$$G_{i,j} = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(\frac{M_j}{M_i + M_j} \right)^{1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (4-5)$$

μ_i est la viscosité de chaque élément i

M_i est la masse molaire de chaque élément i

La conductivité de l'air et de la vapeur à la température T est donnée par des corrélations polynomiales de type:

$$P_{x,i} = k0_{x,i} + k1_{x,i} * T + k2_{x,i} * T^2 \quad (4-6)$$

Les détails des coefficients k sont disponibles dans la référence [120]

La viscosité cinématique et la viscosité dynamique sont liées par la relation

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (4-7)$$

- La capacité calorifique

La capacité calorifique de l'air humide peut être calculée à partir de la capacité calorifique de l'air Cp_a et la capacité calorifique de la vapeur Cp_v d'eau selon :

$$Cp_m = \frac{1}{1+Y} (Cp_a + Y \cdot Cp_v) \quad (4-8)$$

L'impact de la température sur la propriété de transport est relativement important dans la plage de travail considérée. Le négliger peut engendrer une perte de précision importante dans la mesure où en présence de condensation, les énergies échangées sont multipliées à cause du changement d'état de l'eau.

- Le nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl constitue l'un des paramètres de corrélation les plus utilisés dans le transfert thermique par convection, il est liés à la propriété de transport du gaz selon :

$$Pr = \frac{\mu.Cp}{\lambda} \quad (4-9)$$

Pour l'air humide, le nombre de Prandtl varie avec la température et l'humidité. En se servant des relations (4-4) à (4-9), on peut représenter le nombre de Prandtl à différentes températures et humidités par le diagramme suivant :

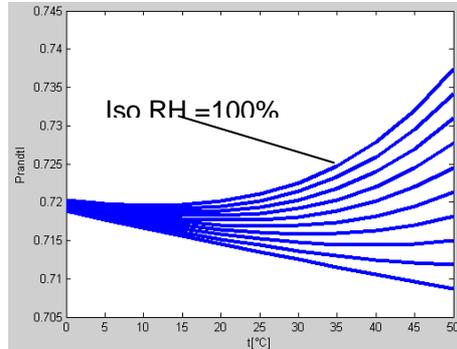


Figure 173 : Nombre de Prandtl de l'air humide

La figure montre que l'impact de la température et de l'humidité est important vis-à-vis du nombre de Prandtl.

- L'enthalpie de vaporisation

Par définition, les chaleurs latentes de vaporisation L_v , de fusion L_f de sublimation L_s correspondent à la variation d'enthalpie d'une unité de masse d'un corps pur en passant de l'état liquide à l'état vapeur ou respectivement de l'état solide à l'état liquide ou de l'état vapeur à l'état solide.

Les enthalpies de changement d'état de l'eau varient avec la température. Comme les calculs d'enthalpie de l'air humide se font par rapport à la température de référence qui est de 0°C, on fera l'hypothèse que les chaleurs latentes de changement d'état sont celles à la température de 0°C.

On a les valeurs suivantes [122] :

L_v	L_f	L_s
2 501,3 kJ/kg	333,40 kJ/kg	28 347 kJ/kg

Tableau 21 : Chaleur latente de changement d'état de l'eau à 0°C

4.7.2 Analyse de l'influence des paramètres

L'analyse de l'influence des paramètres nous est nécessaire pour établir l'approche adéquate dans les travaux de corrélation. Pour cela nous allons considérer les **paramètres d'entrée** suivants:

- T_{gaz_E} : Température du gaz à l'entrée
- T_{liq_E} : Température du bain cryogénique
- Q_{gaz_E} : débit volumique de l'air humide
- T_{d_E} : Point de rosée à l'entrée. (la correspondance entre le point de rosée et l'humidité est décrite par la Figure 10)

Les valeurs exactes des paramètres d'entrée diffèrent par rapport à la consigne qu'on avait adoptée. En particulier, l'humidité relative à l'entrée est en moyenne 28% plus faible par rapport à la consigne. L'erreur est maximale pour les gaz ayant une température de rosée de 7°C. Toutefois, par soucis de clarté nous utiliserons uniquement les valeurs de consigne.

Parmi les **résultats** à considérer, on distingue :

- T_{gaz_S} : Température des gaz à la sortie
- T_{d_S} : Point de rosée à la sortie

- RH_S : Humidité relative à la sortie
- Flux : Flux thermique mesuré en amont du tube
- $(H_E - H_S) \times Q_{\text{gaz}}$: Enthalpie totale échangée
- % Eau cond : Fraction de l'eau qui condense (et/ou qui se cristallise)
- % Chaleur latente : Fraction des échanges latents (voir plus bas)
- $T_{w_{\text{int}}}$: Température de la paroi interne en amont du tube
- $Y_S - Y_E$: Diminution de l'humidité absolue
- m_w : Débit de condensation

Nous allons concentrer l'analyse sur les essais avec le D18-2mm qui seront nos essais de références.

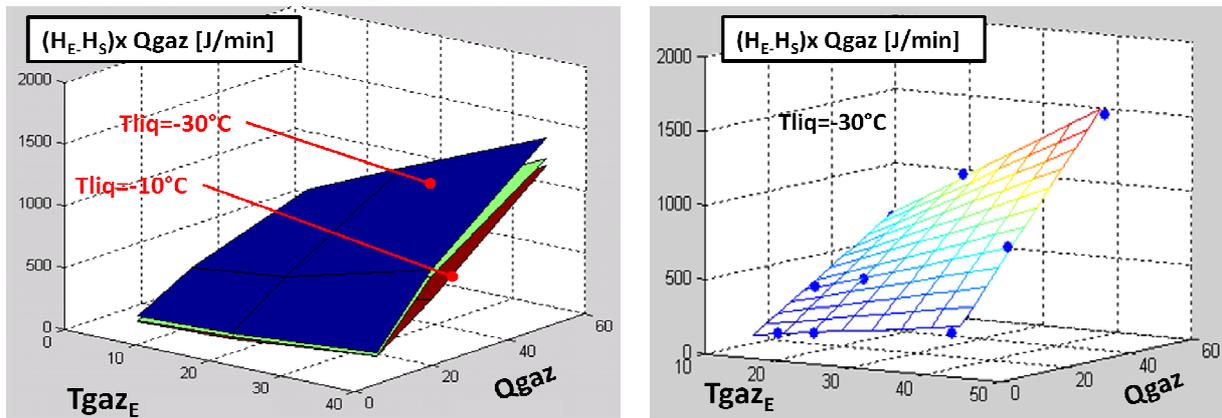
4.7.2.1 Cas du gaz sec

4.7.2.1.1 Energie

Avant de considérer le cas du gaz humide qui est notre principal objectif, il est intéressant de constater d'abord les résultats obtenus avec le gaz sec. Cela nous permettra d'isoler les aspects convectifs purs des phénomènes de transfert thermique à l'intérieur des tubes et par la même occasion de mettre en évidence plus tard l'impact de la présence de la vapeur d'eau dans le système.

Dans le cas du gaz sec, la méthode la plus directe consiste à étudier l'impact des conditions à l'entrée sur la température de sortie. Néanmoins, afin de pouvoir comparer avec les gaz humides, nous utiliserons à la place les enthalpies de sortie ainsi que les enthalpies échangées.

L'enthalpie échangée peut être calculée par le bilan énergétique du gaz entre l'entrée (H_E) et la sortie (H_S) du tube. Les enthalpies H_E et H_S ont été calculées en se servant de la relation (2-8). Les énergies échangées par le gaz sec peuvent être tracées en fonction des conditions opératoires selon la Figure 174-A suivante.



(A) Résultats des calculs directs basés sur les essais

(B) Corrélation linéaire et comparaison avec les essais

Figure 174 : Gaz sec - Energie échangée en fonction des conditions opératoires

La figure montre que :

- L'énergie échangée est maximale pour une température de gaz et un débit de gaz élevés.
- A faible débit, les sensibilités par rapport à la température du gaz et par rapport à la température du bain deviennent négligeables.

On constate que l'impact du débit est important dans la plage couverte. Trois gammes d'énergie échangée ont été identifiées : 101 à 247 J/min pour les débits de 6 L/min, 268 à 774 J/min pour les débits de 20 L/min et 563 à 1306 J/min pour un débit de 50 L/min.

Afin de déterminer l'ordre d'influence des paramètres, la température du bain a été fixée à -30°C et l'énergie échangée a été corrélée avec la température du gaz et le débit (Figure 174-B). En utilisant la méthode de régression linéaire, on obtient l'équation:

$$H_E - H_S = -21.17 + 3.59 * T_{gaz_E} + 6.84 * Q_{gaz_E} + 0.518 * T_{gaz_E} * Q_{gaz_E} \quad (4-10)$$

Ce qui confirme que le facteur lié aux débits est deux fois plus important à celui de la température de gaz.

4.7.2.1.2 Température de paroi

En se servant des mesures de flux thermique obtenues avec le fluxmètre et le thermocouple placés sur la peau externe du tube près de l'entrée du gaz, on peut tracer les températures de la paroi interne à cet endroit en fonction des conditions opératoires :

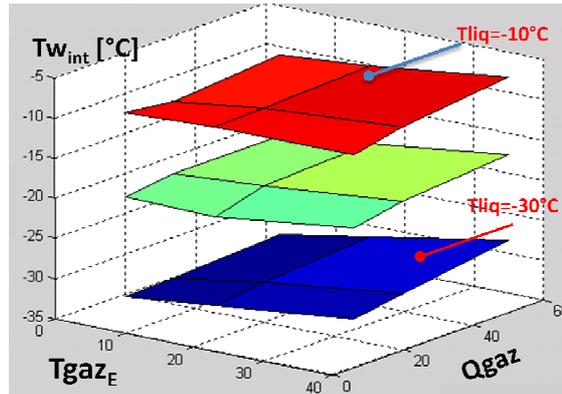


Figure 175 : Gaz sec - distribution température de la paroi interne à l'entrée

Pour une température de bain donnée, la température de paroi interne à l'entrée du tube est maximale si le débit et la température du gaz sont à leurs valeurs maximales. Avec du gaz sec, cette valeur maximale est tout au plus 5°C plus élevée que la température du bain. En outre, rappelons que la différence entre la température de la paroi interne est la température du bain diminue au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval du tube.

4.7.2.2 Cas des gaz humides

4.7.2.2.1 Psychrométrie

En passant à travers le tube froid, le gaz se refroidit partiellement et perd une partie de la vapeur sous forme de glace ou de condensat. L'évolution de la température et de l'humidité des gaz entre l'entrée et la sortie du tube peut être illustrée par le diagramme psychrométrique de la Figure 176. Pour des raisons de clarté, seul le résultat à température bain -30°C et température de rosée supérieure à 7°C ont été présentés.

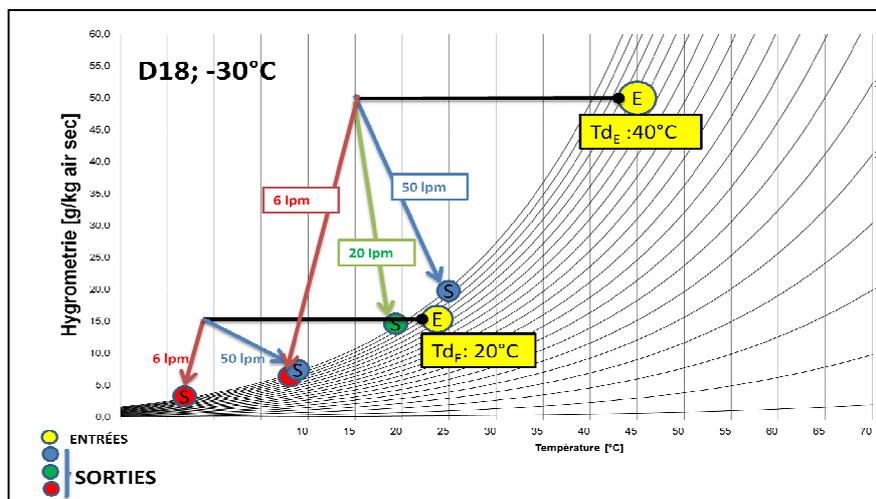


Figure 176 : Evolution des paramètres dans le diagramme psychrométrique (essais sur banc)

Le diagramme montre que:

- L'humidité absolue et la température des gaz diminuent simultanément. Ce qui indique que le phénomène en jeu comprend à la fois un échange de chaleur sensible et un échange de chaleur latente.
- L'humidité et la température en sortie s'éloignent de plus en plus de la condition en entrée quand le débit diminue.
- Les humidités relatives sont toujours plus élevées à la sortie. Le gaz est dans la plupart des cas saturé à la sortie de l'échantillon.
- La diminution de l'humidité et de la température pour les différents débits est plus importante à température de rosée T_{dE} élevée.

4.7.2.2.2 Energie

Le diagramme psychrométrique permet d'obtenir les détails de l'évolution des différents paramètres que sont les humidités et les températures. Pour simplifier le problème, il est plus commode de réunir ces différents paramètres en un seul qui est l'enthalpie échangée. Ce dernier prend en compte à la fois la diminution de la température du gaz et la diminution de l'humidité:

$$H_E - H_S = C_{p_{air}} (T_{gaz_E} - T_{gaz_S}) + L_v (Y_E - Y_S) + C_{p_{vap}} (T_{gaz_E} \cdot Y_E - T_{gaz_S} \cdot Y_S) \quad (4-11)$$

Y_E et Y_S étant faibles par rapport à 1, on peut aussi écrire :

$$H_E - H_S = C_{p_{air}} (T_{gaz_E} - T_{gaz_S}) + L_v (Y_E - Y_S) \quad (4-12)$$

En traçant les valeurs de l'énergie échangée en fonction des conditions opératoires, on abouti à la figure suivante :

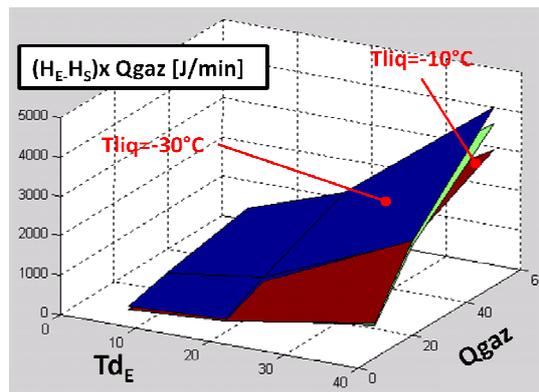


Figure 177 : Gaz saturé - énergie échangée en fonction des conditions opératoires

Comme le montre la Figure 177, pour le gaz saturé, la température du bain n'a qu'un faible impact sur les énergies échangées. Son impact maximal est constaté dans le domaine de débit et de point de rosée élevé (flux thermiques élevés).

L'énergie échangée monte rapidement avec la température de rosée (~ la température du gaz). L'impact est davantage plus significatif quand le débit augmente. Réciproquement, la montée en température de rosée fait aussi augmenter l'impact du débit. L'énergie mise en jeu est particulièrement importante (30 fois la valeur minimale) quand les deux paramètres sont à leur valeur maximale.

En comparant les énergies échangées avec les résultats d'essais secs à la même température, on constate que l'énergie échangée augmente de manière significative pour un gaz à température élevée (Figure 178-A). La différence est moins importante pour les gaz à température moyenne (Figure 178-A) et négligeable pour les gaz à faible température (Figure 178-A).

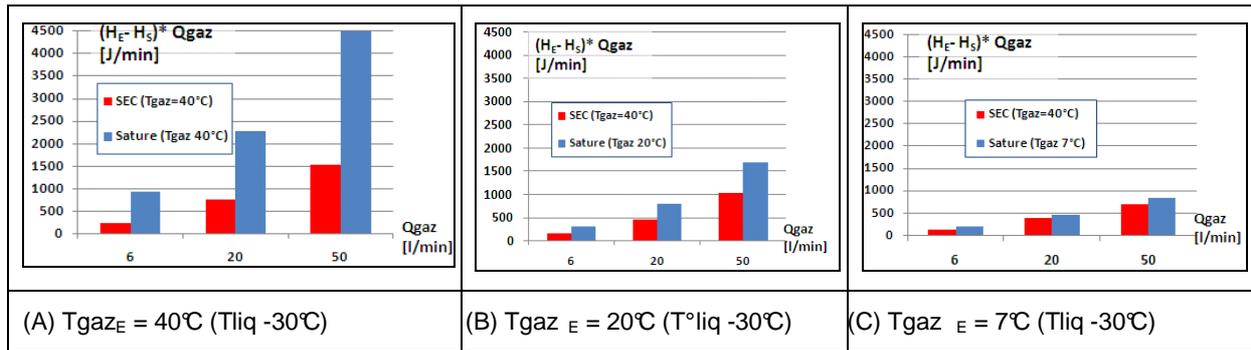


Figure 178 : Comparaison énergie échangé Gaz saturé vs Gaz sec

La différence entre les résultats obtenus avec les deux types de gaz s'explique par le surplus d'énergie apportée par le gaz humide en faisant condenser la vapeur qu'il contient. C'est l'échange latent. Elle est caractérisée par la composante $Lv (Y_E - Y_S)$ de l'équation (4-12) :

$$\phi_{lat} = Lv (Y_E - Y_S) \quad (4-13)$$

La composante restante est l'échange sensible :

$$\phi_{sens} = Cp_{air} (T_E - T_S) \quad (4-14)$$

En décomposant l'énergie échangée au gaz humide en sa composante latente x_{Hlat} et sa composante sensible x_{Hsens} , on peut écrire :

$$x_{Hlat} = \frac{Lv(Y_E - Y_S)}{H_E - H_S} \quad (4-15)$$

$$x_{Hsens} = \frac{Cp_{air}(T_E - T_S)}{H_E - H_S} \quad (4-16)$$

La chaleur latente due à la condensation de la vapeur a une part non négligeable dans les échanges d'énergie associés au gaz humide. Les essais montrent que la part de l'échange latent varie en fonction des conditions opératoires. Elle est presque insensible à la température du bain mais varie fortement avec la température de rosée du gaz. Elle varie aussi avec le débit mais l'impact est beaucoup moins important (Figure 179-B). Pour le cas du gaz humide à 40°C, cette part l'emporte sur le reste du transfert d'énergie, constituant ainsi la majeure partie de l'échange d'énergie en jeu (Figure 179-A).

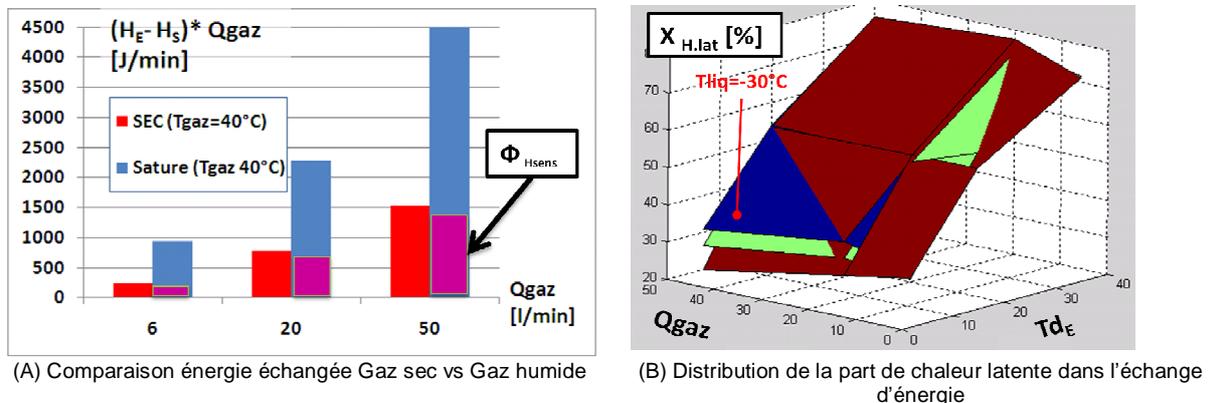


Figure 179 : Comparaison énergie échangé Gaz sec vs Gaz humide

La fraction de l'échange latent dans la chaleur échangée peut être divisée en 3 gammes selon la température de rosée du gaz (Figure 179-B):

- La première gamme correspond aux essais effectués avec des points de rosée de 7°C. La fraction de l'énergie latente se situe entre 20 et 35% de l'énergie totale. Notons toutefois que cette faible valeur ne peut être attribuée exclusivement à l'humidité et la température de rosée seules. Il faudra aussi tenir compte du fait que le gaz est assez loin de la saturation pour les essais à température de rosée faible.
- La deuxième gamme est obtenue avec des gaz ayant une température de rosée 20°C. La part de la chaleur latente est dans ce cas de 51 à 54%.
- La dernière gamme est obtenue avec les gaz ayant une température de rosée élevée. La part de la chaleur latente est aux environs de 71 à 76%.

4.7.2.2.3 Température de la paroi interne

Localement, l'augmentation de l'énergie échangée fait augmenter la température de paroi interne. En comparant la température interne mesurée par le couplage fluxmètre/thermocouple, on constate que la température de la paroi interne est beaucoup plus élevée pour le gaz humide que pour le gaz sec. La différence est d'autant plus importante que le débit et les températures des gaz (~ Point de rosée) sont élevés. A faible débit ou à faible température de gaz la température de paroi interne et la température du bain sont assez proche aussi bien pour le gaz humide que pour le gaz sec.

Prenons l'exemple des essais à $T_{\text{gaz}_E} = 40^\circ\text{C}$, température de bain -30°C et débit gaz 50 L/min. Le diagramme de la Figure 180 montre que la température de la paroi interne est d'environ -23°C si le gaz est sec alors que la qu'elle peut monter jusqu'à -6°C pour le gaz humide. Du point thermique, il n'est pas possible dans ce dernier cas de faire une approximation entre la température bain interne et la température de paroi interne puisque ce dernier est 24°C plus élevé par rapport à la température du bain (figure suivante).

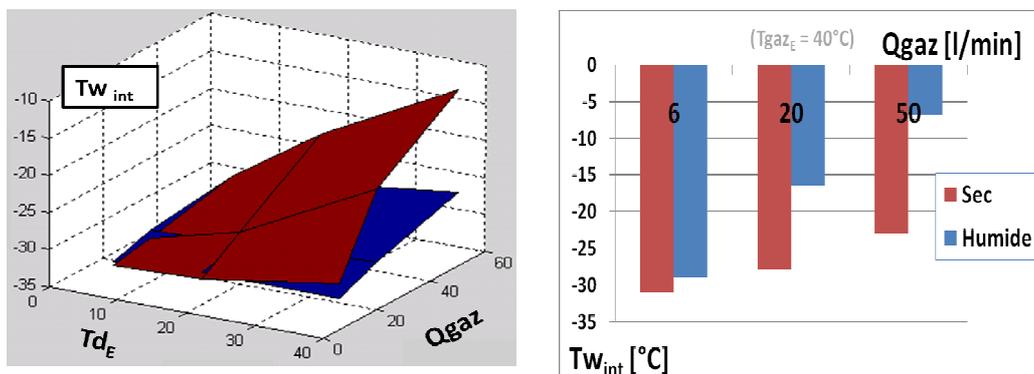


Figure 180 : Comparaison de la distribution de température de paroi interne mesurée en entrée ($T^\circ\text{bain} = -30^\circ\text{C}$)

4.7.2.3 Cas des gaz surchauffés

Dans la table psychrométrique, le gaz surchauffé se trouve sur une même température de rosée et une même humidité absolue que le gaz saturé (même ordonnée) mais avec une température de gaz plus élevée (abscisse différente).

Comme le montre la Figure 181, tant que l'humidité relative à l'entrée est supérieure à 30%, les gaz sortant du tube sont toujours saturés quelque soit le débit. Les deux figures montrent que plus les gaz sont surchauffés, plus les températures et les humidités en sortie augmentent.

Pour le gaz à température de rosée 20°C et à humidité relative 9%, la saturation n'est pas atteinte si le débit est élevé (50L/min). Si le débit est plus faible (6 L/min voire 20 L/min), le gaz sort à l'état saturé. Ce qui est évident compte tenu du temps de séjour plus faible à faible débit.

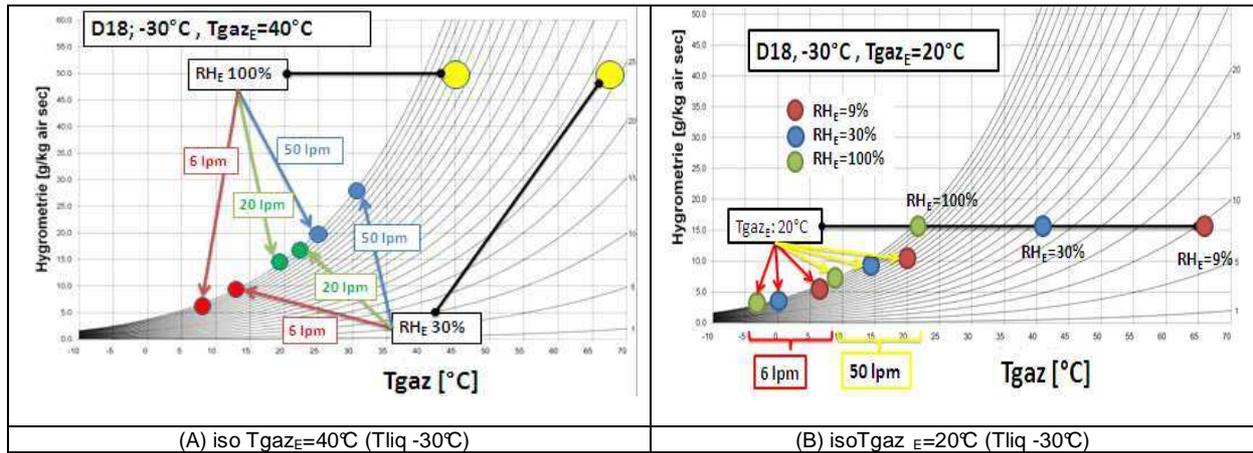


Figure 181 : Gaz surchauffé vs gaz saturé - Evolution des paramètres psychrométriques (Essai à iso Tgaz)

4.7.3 Vérification de la validité des lois théoriques

Les divers résultats précédents ont mis en évidence l'importance du débit, de l'humidité, de la température de paroi et de la température du gaz sur les phénomènes de transfert. Dans ce paragraphe, nous allons établir les corrélations qui permettent de lier mathématiquement ces différents paramètres aux résultats obtenus. Pour cela nous allons d'abord considérer le cas de l'air sec puis nous allons étudier le cas des gaz humide aussi bien du point de vue énergétique que du point de vue transfert de masse.

4.7.3.1 Gaz sec

Pour le cas des gaz secs, les transferts d'énergie à une coordonnée axiale x du tube peut être schématisé comme suit :

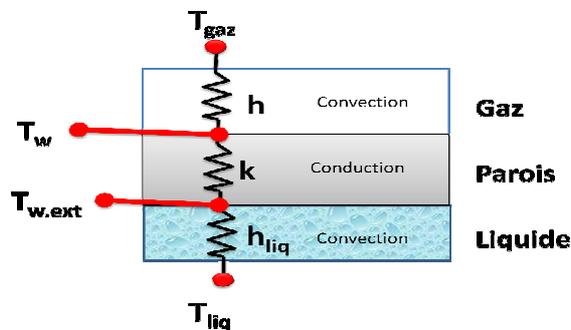


Figure 182 : Composition du coefficient de transfert

L'énergie transférée $d\phi$ entre le gaz et le bain liquide peut être écrit en fonction de la température entre les deux milieux et le coefficient de transfert global U par l'équation :

$$d\phi = U \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) \quad (4-17)$$

dA est la surface d'échange

Le transfert de chaleur est composé du transfert par convection entre le gaz et la paroi interne (h), du transfert par conduction à travers la paroi (k) et du transfert par convection entre la paroi externe et le bain (h_{liq}). On peut alors écrire l'équation du coefficient de transfert global U par :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{1}{k} + \frac{1}{h_{liq}} \quad (4-18)$$

Si le coefficient de transfert par convection est indépendant de l'espace, il est possible d'intégrer l'équation (4-17) le long du tube pour obtenir l'énergie totale échangée. Soit :

$$\phi = (H_E - H_S) \cdot Q_{gaz} = U \cdot A \cdot DTLM \tag{4-19}$$

DTML est la différence de température moyenne entre le gaz et le liquide, elle est donnée par :

$$DTML = \frac{\Delta T_{gaz_S} - \Delta T_{gaz_E}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{gaz_S}}{\Delta T_{gaz_E}}\right)} \tag{4-20}$$

ΔT_E est la différence de température entre le gaz et le liquide à l'entrée et ΔT_S est la différence de température entre le gaz et le liquide à la sortie :

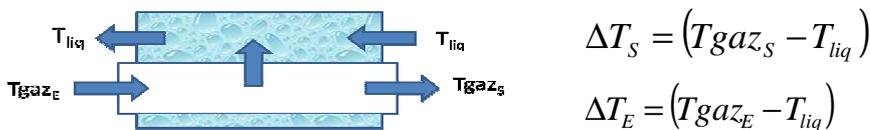


Figure 183 : Paramètre du DTML

Le coefficient de transfert global U peut être obtenu en traçant l'énergie échangée en fonction de DTML selon la figure suivante.

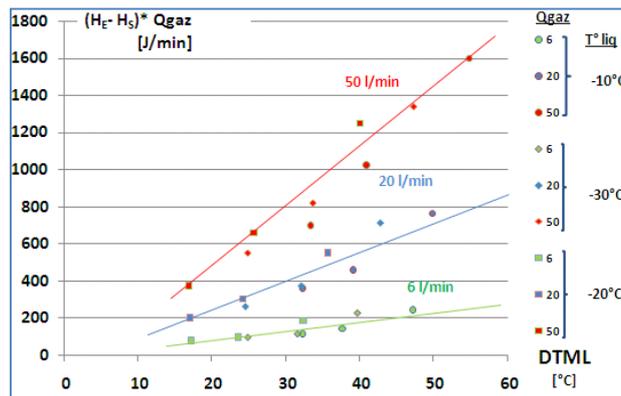


Figure 184 : Energie échangé en fonction de DTML

U est donné par la pente de la droite $(H_E - H_S) \cdot Q_{gaz} = f(DTML)$. Elle est constante pour un débit donné et elle augmente avec celui ci.

La courbe montre que l'énergie échangé augmente avec la température de paroi et diminue avec la température de bain. Plus précisément, elle augmente avec la différence de température de paroi et de gaz. L'énergie échangé augmente aussi avec le débit.

4.7.3.2 Gaz saturé

Dans le cadre de nos études, la concentration en vapeur d'eau reste relativement faible (4,7%). On peut alors réécrire l'équation (2-74) selon la relation suivante:

$$\dot{m}_w = \theta_m \cdot g_m \cdot dA \cdot (Y_\infty - Y_w) \tag{4-21}$$

\dot{m}_w : flux de condensation

g_m : coefficient de transfert massique par convection

θ_m : facteur de correction par rapport au phénomène d'aspiration

En faisant l'hypothèse que l'effet d'aspiration est négligeable, on peut mettre $\theta_m = 1$. On peut alors réécrire cette équation selon [123] :

$$\dot{m}_w = g_m \cdot dA \cdot (Y_\infty - Y_w) \quad (4-22)$$

En intégrant cette équation le long du tube, le débit de condensation totale peut être écrit comme suit [61] :

$$\dot{m}_{w,tot} = g_m \cdot A \cdot (DYLM) \quad (4-23)$$

Et

$$Y_S - Y_E = \frac{\dot{m}_w}{Q_{gaz}} = k \cdot (DYLM) \quad (4-24)$$

DYLM est la différence logarithmique moyenne de l'humidité du gaz dans la veine et de l'humidité du gaz au voisinage de la paroi.

$$DYML = \frac{\Delta Y_S - \Delta Y_E}{\ln\left(\frac{\Delta Y_S}{\Delta Y_E}\right)} \quad (4-25)$$

D'autre part, l'humidité absolue Y_w varie avec la température de paroi à la position du point considéré. Elle est supérieure à l'humidité absolue qu'aurait le gaz s'il est à la température du bain. Néanmoins, à basse température, Y évolue faiblement avec la température, on peut alors écrire l'approximation :

$$Y_{w,E} \approx Y_{w,S} \approx (Y_{Sat})_{T=Tw} \approx (Y_{Sat})_{T=Tliq} \quad (4-26)$$

Ce qui permet de calculer ΔY_S et ΔY_E avec les relations :

$$\Delta Y_S = (Y_S - Y_{T=Tliq}) \quad (4-27)$$

$$\Delta Y_E = (Y_E - Y_{T=Tliq}) \quad (4-28)$$

Pour vérifier la validité de l'équation (4-23) et (4-24), traçons le débit de condensation et de la diminution de l'humidité en fonction de DYLM. On obtient les figures suivantes:

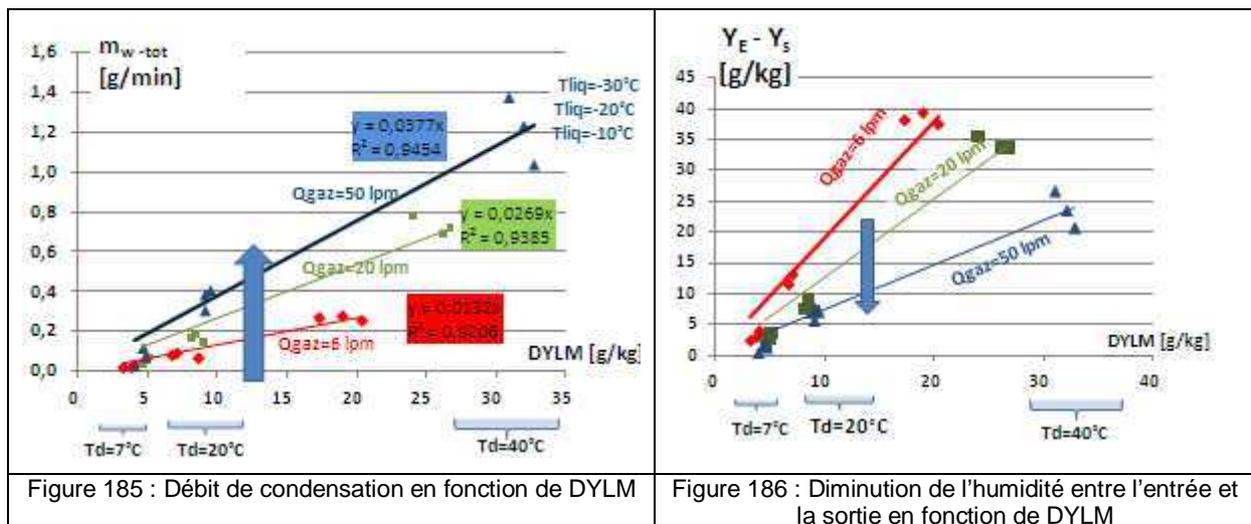


Figure 185 : Débit de condensation en fonction de DYLM

Figure 186 : Diminution de l'humidité entre l'entrée et la sortie en fonction de DYLM

Pour rappel, le débit de condensation a été déduit à partir du bilan matière entre l'entrée et la sortie du gaz :

$$\dot{m}_{w,tot} = \dot{m}_{air,sec} \cdot (Y_E - Y_S) \quad (4-29)$$

Avec :

$$\dot{m}_{air,sec} = \frac{\dot{m}_{air,humide}}{(1 + Y_E)} \quad (4-30)$$

Les figures 185 et 186 montrent que :

- Il existe effectivement une proportionnalité entre DYLM et le débit de condensation.
- En quantité absolue $\dot{m}_{w,tot}$, la quantité qui condense augmente avec le débit de gaz. Autrement dit, le fait d'envoyer plus d'eau fait augmenter la quantité totale d'eau qui condense.
- En quantité relative $(Y_E - Y_S)$, la quantité qui condense diminue avec le débit. Ce qui veut dire que plus le débit augmente, plus la fraction de vapeur qui se transforme en glace ou en liquide diminue. On parle alors d'efficacité de condensation plus faible.

Afin de généraliser, on définit $X_{eau,cond}$ l'efficacité de condensation. C'est le rapport entre la quantité d'eau introduite et la quantité d'eau qui condense. Elle caractérise donc la fraction de l'eau qui s'est transformée dans le tube. On a :

$$X_{eau,cond} = \frac{\dot{m}_{w,E}}{\dot{m}_{w,cond}} 100 \quad (4-31)$$

En traçant l'efficacité de condensation en fonction des conditions opératoires, on obtient les résultats de la figure suivante :

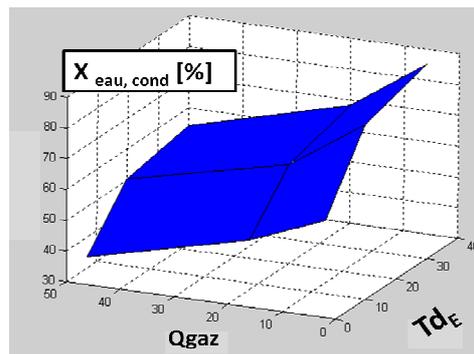


Figure 187 : Distribution de l'efficacité de condensation à T°liq=-30°C

Ce qui confirme que la condensation devient moins efficace si le débit augmente (faible temps de séjours)

4.7.3.3 Gaz surchauffé

Afin de comprendre l'influence de l'humidité, traçons l'efficacité de condensation à iso-point de rosée pour les différentes humidités relatives (Figure 188) :

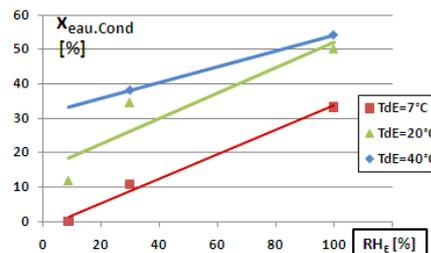


Figure 188 : Fraction d'eau qui condense en fonction de humidité relative (Qgaz: 50 L/min, Tliq :-30°C)

La Figure 188 montre que la diminution de l'humidité relative (augmentation de la température) entraîne une diminution de la fraction de vapeur qui condense. Ce qui s'explique par le fait que la surchauffe retarde la saturation du gaz et déplace la zone de saturation vers l'aval du tube. Nous verrons dans le chapitre 5 que cette entrée en saturation du gaz jouera un rôle important dans le débit de condensation total.

4.7.4 Corrélation du coefficient de transfert

Le transfert thermique qui se déroule entre le gaz et la paroi (ou le bain) froide peut être caractérisé par le coefficient de transfert thermique (ou plus précisément par le nombre de Nusselt). En le corrélant avec les diverses conditions opératoires, il est possible de mettre en évidence la contribution des différents paramètres en jeu sur les phénomènes de transfert thermiques à l'intérieures des tubes.

4.7.4.1 Gaz sec

4.7.4.1.1 Etablissement de la corrélation

Les équations (4-17) et (4-18) permettent d'écrire :

$$d\phi = U \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) = \frac{1}{1/h + (1/k + 1/h_{liq})} \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) \quad (4-32)$$

En se basant sur la conservation du flux, on peut également écrire:

$$d\phi = \frac{1}{1/h} (T_{gaz} - T_w) = \left(\frac{1}{1/k + 1/h_{liq}} \right) \cdot (T_w - T_{liq}) \quad (4-33)$$

En outre, dans tout l'essai, il a été constaté que la différence maximale de température entre les parois internes et le bain est de 5°C. Elle est donc au maximum de 10% par rapport à la différence totale de température entre le gaz et le bain (Figure 189).

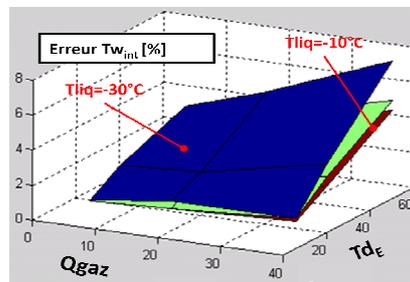


Figure 189 : Gaz sec - Différence entre la température du bain et la température de la paroi interne mesurée en entrée du tube (Erreur max approximation $T_{w_{int}} = T_{liq}$)

Ainsi, pour les gaz sec, il est possible d'écrire la relation (4-33) comme suit :

$$(T_{gaz} - T_w) \gg (T_w - T_{liq}) \quad \text{et} \quad \frac{1}{1/h} \gg \left(\frac{1}{1/k + 1/h_{liq}} \right) \quad (4-34)$$

La relation (4-17) devient alors :

$$d\phi = \frac{1}{1/h + (1/k + 1/h_{liq})} \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) \approx \frac{1}{1/h} \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) \quad (4-35)$$

Et

$$d\phi = U \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) \approx h \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_{liq}) \quad (4-36)$$

Ce qui permet d'écrire l'équation de transfert total Φ sur toute la longueur du tube selon :

$$\phi = (H_E - H_S) \dot{m}_{air.sec} = h.A.DTLM \quad (4-37)$$

DTLM est défini selon (4-20).

La relation (4-34) nous permet de faire l'approximation du coefficient de transfert par convection h selon : $h \sim U$. En se servant de la relation (2-28), la relation précédente peut être écrite sous la forme:

$$\phi = (H_E - H_S) \dot{m}_{air.sec} = \frac{Nu_{exp}}{k.D} . A . DTLM \quad (4-38)$$

De cette équation, on peut calculer le nombre de Nu des essais Nu_{exp} en se servant du bilan thermique entre l'entrée et la sortie du tube.

En utilisant la méthode de régression linéaire, nous avons pu corrélés ces nombres de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl selon la relation :

$$Nu_{modèle} = \alpha . Re^\beta . Pr^\gamma \quad (4-39)$$

Les nombre sans dimension Re, Pr ont été évalués à la température d'entrée des gaz. Les paramètres α , β , et γ varient avec le diamètre du tube. Leurs valeurs obtenues à travers les différents essais sont détaillées par les tableaux suivants.

	D10-1mm	D18-1mm	D18-2mm	D31-1mm	annelée D18
α	$1,12.10^{-2}$	$2,57.10^{-2}$	$2,53.10^{-10} (*)$	$4,12.10^{-2}$	$6,46.10^{-3}$
β	0,848	0,776	0,800	0,785	0,985
γ	0	0	-53,31	0	0

(*) L'introduction de cette valeur avec celui γ correspondant donnera une valeur de $\alpha . Pr^\gamma$ comparable aux autres diamètres.

Tableau 22 : Paramètre caractéristique du Nu_{sec} pour différent diamètre

Les figures suivantes comparent les corrélations ainsi obtenues avec les résultats expérimentaux :

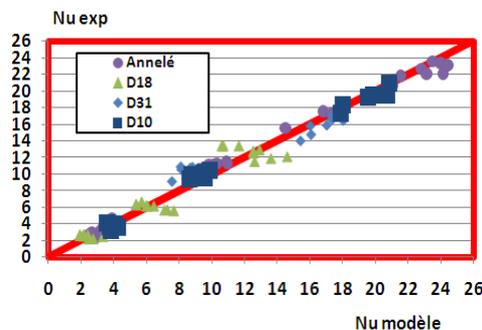


Figure 190 : Comparaison des corrélations de Nu_{sec} moyenne avec les essais (D10, D18, D31, annelé D18)

Seuls les tubes à épaisseurs élevées (D18-2mm) ou épaisseurs apparente élevée (D18-annelée) doivent faire appel à l'intervention du nombre de Prandtl pour être précis. Les autres tubes peuvent être corrélés directement avec le nombre de Reynolds selon :

$$Nu = \alpha . Re^\beta \quad (4-40)$$

Compte tenu de ces résultats, il est peu probable que le nombre de Prandtl présent dans les équations représente effectivement l'impact de la propriété du gaz en fonction de la température. Il représente plutôt la correction apportée à la corrélation compte tenu de l'erreur causée par la résistance de la paroi plus importante (épaisseur 2 mm). Néanmoins, pour la suite on utilisera la relation (4-39) afin de garder le maximum de précision.

4.7.4.1.2 Comparaison avec la littérature

Les coefficients du Tableau 22 sont précis mais sont propres à chaque diamètre. Néanmoins, le faible nombre de diamètre testé ne permet pas de déterminer l'impact de celui-ci sur les nombres de Nu. Pour contourner cela, nous allons comparer les résultats expérimentaux obtenus avec ceux de la littérature. Plusieurs corrélations de Nu sont disponibles, elles sont détaillées dans le paragraphe §2.4.4.4. En ce qui nous concerne, on prendra les corrélations de Colburn en régime turbulent (Equation (2-37)), de Sieder State en régime turbulent (Equation (2-38)), de Dittus Boelter en régime non établi (Equation (2-39)), de Dittus Boelter pour les conduites précédés de restriction (Equation)), de Gnielinski en régime transitoire (Equation(2-41)), de Hausen en régime laminaire (Equation (2-34)).

Les courbes de comparaison sont disponibles sur la figure suivante :

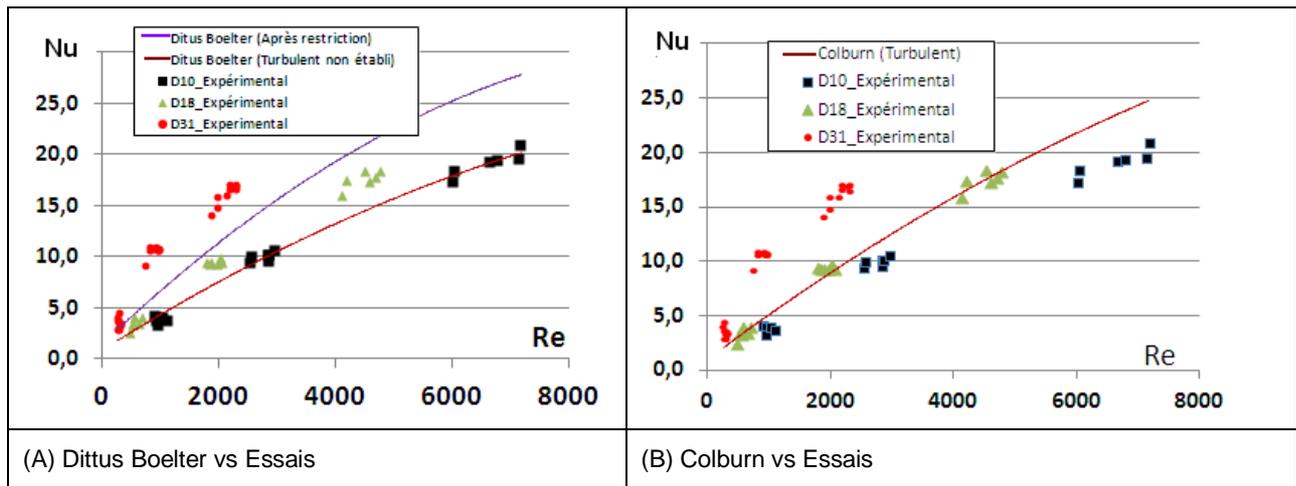


Figure 191 : Comparaison de Nu sec moyen avec la littérature

La figure montre que :

- La relation en régime d'établissement de Dittus Boelter est la corrélation la plus proche des résultats expérimentaux. Pour les diamètres faibles, la corrélation en régime non établi est la plus adéquate, alors qu'avec D31 la corrélation pour les circuits précédés d'une restriction est le mieux adaptée. Ce qui peut paraître correcte puisque, pour éviter un encrassement (cas des essais avec particules), les tubes D31 sont liés à la source de gaz par des simples raccords divergents.
- La corrélation de Colburn reproduit avec une seule équation presque tous les résultats, néanmoins elle est moins précise dans le domaine des diamètres élevés D31. La corrélation entraîne aussi une surestimation du Nu pour D10. Cette dernière constatation pourrait être attribuée à l'erreur engendrée par l'impact de la résistance de paroi qui devrait être importante (vitesses de gaz élevé → flux thermique échangé important)

La corrélation pour un régime transitoire de Gnielinski n'a pas pu être validée pour les débits supérieurs ou égaux à 20 L/min. De même, la corrélation de Hausen n'a pas pu être validée même pour le tube D31 qui devait permettre l'obtention d'un régime laminaire.

4.7.4.1.3 Conclusion sur les coefficients de transfert sec

On peut conclure que la relation de Colburn (régime établi dans le domaine turbulent) permet de retrouver les coefficients de transfert pour les tubes de diamètres inférieurs ou égaux à D18. Pour les diamètres plus élevés, le régime n'est pas laminaire (établi ou non) malgré la faible valeur de Re, le régime d'établissement après restriction de Dittus Boelter constitue la corrélation la plus appropriée pour décrire cette zone.

Pour comprendre la dérive des coefficients de transfert par rapport à la littérature, calculons la longueur d'établissement correspondant aux différents tubes pour les différentes conditions de débit (Tableau 23). Les équations utilisées sont détaillées dans la référence [1].

D	Qgaz	Regime	Entr_region	Part_Entr_region
10,00	6	Laminaire	95,60	21,73
	20	Intermediaire	100,00	22,73
	50	Turbulent	100,00	22,73
18,00	6	Laminaire	73,95	16,81
	20	Laminaire	244,44	55,56
	50	Intermediaire	180,00	40,91
31,00	6	Laminaire	86,68	19,70
	20	Laminaire	237,27	53,92
	50	Laminaire	588,05	133,65

Tableau 23 : Longueur d'établissement pour les différents tubes ($T_w = -30^\circ\text{C}$, $T_{gaze} = 40^\circ\text{C}$)

Le tableau montre qu'une partie non négligeable du tube sert de longueur d'établissement. Cette longueur est d'autant plus importante que le diamètre du tube augmente et que le débit diminue. Ce qui implique que le coefficient de transfert global est fonction du coefficient de transfert dans le régime d'établissement qui est lui-même fonction du circuit d'alimentation en gaz humide (voir Figure 103). Cet impact mérite une attention particulière si on se positionne sur un moteur dans la mesure où le circuit qui débouche sur le tuyau de blow-by varie d'un moteur à un autre (déshuileur, vanne, autre conduite, etc.).

4.7.4.2 Gaz humide

Comme il a été montré précédemment, avec l'air humide, l'influence de la conduction à travers la paroi ne peut plus être négligée. De plus, comme l'influence de la longueur n'a pas pu être testée. Il n'est pas possible d'établir une corrélation universelle des transferts thermiques.

Notre objectif dans ce paragraphe est ainsi d'établir une loi permettant de constater les paramètres en jeu, de comparer leur influence et de déterminer leur interaction. Pour cela, nous allons travailler avec les résultats des essais dont les matrices des conditions opératoires sont complètes (D18 et D10).

Soit U_{tot} le coefficient de transfert total correspondant au transfert de chaleur global entre le bain à la température T_{liq} et le gaz saturé à la température T .

$$U_{tot} = \frac{\Phi}{A \cdot DTML} \quad (4-41)$$

U_{tot} prend en compte le transfert latent (condensation) et sensible (convection thermique) côté gaz, la conduction dans les parois et la convection côté liquide. En exprimant U_{tot} sous sa forme adimensionnée Nu_{tot} , on obtient :

$$Nu_{tot} = \frac{U_{tot} \cdot D}{k} = \frac{D}{k \cdot A \cdot DTML} [\dot{m}_{air.sec} \cdot (H_E - H_S)] \quad (4-42)$$

En passant par des séries d'analyse par régression linéaire, le nombre de Nusselt total (sensible + latente) a pu être exprimé en fonction des conditions opératoires selon la corrélation ci-dessous.

$$Nu_{tot} = [(a \cdot DTML + b) \cdot (Y_E - Y_0) + R0] \text{Re}^\alpha \quad (4-43)$$

La présence des constantes a , b , $R0$, $Y0$ limite la validité de la corrélation aux dimensions testées. Ses valeurs sont disponibles dans le tableau suivant :

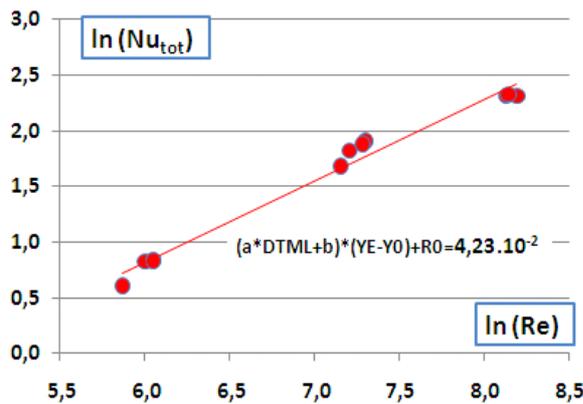
	D10- 1mm	D18-2mm
α	0,829	0,676
a	3E-5	3E-5
b	0,0019	0,026
R0	0,01	0,022
Y0	2	9

Tableau 24 : Constante des corrélations Nu moyen humides

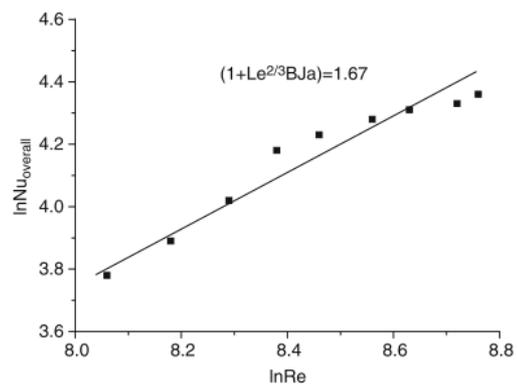
Comme le montre la relation (4-43), le débit intervient via le nombre de Re. Ce qui est comparable au transfert thermique pour les gaz secs. Comme α est inférieur à 1, l'impact de du débit décroît quand le débit augmente.

La corrélation (4-43) montre que l'humidité intervient dans les coefficients d'échange de chaleur. Plus l'humidité est élevée, plus le coefficient de transfert global est élevé. En outre, son impact est amplifié par le débit, c'est-à-dire que, plus le débit est élevé, plus l'impact de l'humidité est important.

Cette corrélation présente une certaine similarité avec l'équation (2-94) proposé par Yongbin Liang [37] et de Xiaojun Shi [64]. Toutefois dans notre cas, la différence de température ($T_{\text{gaz}} - T_w$) intervient sous la forme de DTML mais non via le nombre de Ja. Dans tous les cas, la présence de l'un ou de l'autre montre que plus la température du gaz est élevée, plus le coefficient de transfert global (représenté par Nu_{tot}) augmente.



(A) Corrélation en cours

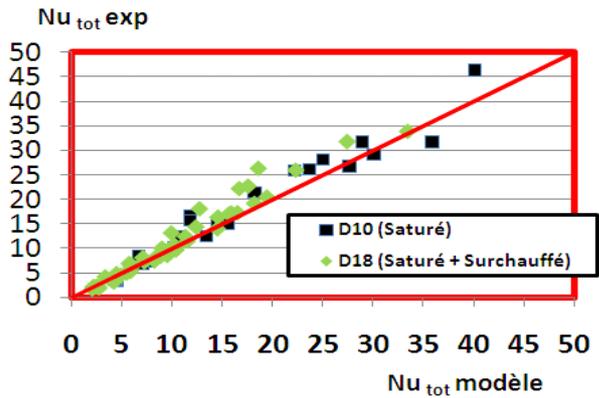


(B) Correlation de Yongbin

Figure 192 : Comparaison corrélation de Yongbin [37] et la corrélation en cours

L'origine exacte de la disparité entre la corrélation proposée ici et celle de Yongbin ne peut être identifiée clairement, néanmoins, on peut remarquer que contrairement aux cas de la condensation avec de l'air humide fréquemment traitée dans la littérature, le nombre Nu calculé contient ici deux autres résistances thermiques (conduction dans la paroi et convection dans le bain). On verra aussi dans le paragraphe suivant que, contrairement à la condensation classique avec faible humidité relative, le phénomène mis en jeu ici comprend d'autres phénomènes thermiques induits par l'entrée du système dans des conditions sursaturées.

La Figure 193 suivant compare la corrélation (4-43) avec les résultats d'essais :



	D10- 1mm Saturé	D18-2mm Saturé	D18- 2m Saturé + Surchauffée
Précision Nu	+/- 4,7	+/- 3,2	+/-4,3
Précision % plage de Nu	11%	9,9%	13,6%

Figure 193 : Gaz surchauffé et saturé - Comparaison des corrélations de Nu total avec les essais (D10, D18)

Les figures montrent que les corrélations sont assez précises aussi bien pour les gaz saturés que les gaz surchauffés en entrée.

4.7.5 Corrélations des échanges d'énergie

La corrélation (4-43) a permis de mettre en évidence l'action et l'interaction des différents paramètres sur le transfert thermique. Dans le paragraphe suivant, nous allons réunir les différents paramètres en jeu dans les enthalpies de l'air humide aux différents endroits. Ensuite, nous allons corréler ces différentes enthalpies avec les énergies échangées à l'intérieur des tubes de manière à identifier les différentes formes de transfert d'énergie qui s'y déroule.

4.7.5.1 Approche adoptée

Considérons un élément de volume défini par la figure suivante :

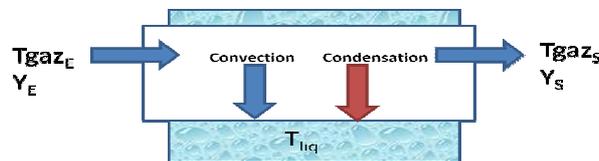


Figure 194 : Elément de volume dans la condensation de l'air humide

La chaleur échangée entre le gaz et la paroi est composée par l'échange sensible et l'échange latent.

$$d\phi_{tot} = d\phi_{sens} + d\phi_{lat} \quad (4-44)$$

L'échange sensible est dû aux gradients de température entre la paroi et le gaz. Dans la mesure où les phénomènes de convection reste les mêmes pour un gaz humide que pour un gaz sec, on peut reprendre l'équation (4-17):

$$d\phi_{sens} = h \cdot dA \cdot (T_{gaz} - T_w) \quad (4-45)$$

L'échange latent est causé par le changement d'état de la vapeur d'eau. Elle est donc proportionnelle à la quantité de vapeur qui condense à l'intérieur du volume élémentaire. En se servant de la relation (4-22), on peut calculer la chaleur latente selon :

$$d\Phi_{lat} = Lv \cdot \dot{m}_w = Lv \cdot h_m \cdot dA \cdot (Y_\infty - Y_w) \quad (4-46)$$

En combinant (4-44) avec (4-46). On obtient :

$$d\Phi = h.dA.(T_{\infty} - T_w) + Lv.h_m.dA.(Y_{\infty} - Y_w) \quad (4-47)$$

Et en servant de l'analogie de Lewis, cette équation devient :

$$d\Phi = h.dA.(T_{\infty} - T_w) + Lv.\frac{h}{cp.Le^{2/3}}.dA.(Y_{\infty} - Y_w) \quad (4-48)$$

Si $Le=1$ (faible concentration en vapeur), l'équation ci-dessous devient

$$d\Phi = \frac{h.dA}{Cp} . [(Cp.T_{\infty} + Lv.Y_{\infty}) - (Cp.T_w + Lv.Y_w)] \quad (4-49)$$

En se servant de l'enthalpie de l'air humide défini dans l'équation (2-8), on peut simplifier (4-49) par l'équation ci-dessous [123] :

$$d\Phi = \frac{h.dA}{Cp} . [H_{\infty} - H_w] \quad (4-50)$$

Le flux total est donc

$$H_E - H_S = \Phi = \int_L \frac{h}{Cp} [H_{\infty} - H_w] dA \quad (4-51)$$

Si le circuit de refroidissement est maîtrisé (circuit en double paroi, contrecourant, avec des conditions en sortie connues), il est possible de se passer de H_w et d'utiliser directement H_{liq} en se servant du coefficient de transfert enthalpique global h_H à la place de (h/Cp) . L'intégration de (4-51) donne dans ce cas la relation ci-dessous [124] [125] [59] :

$$H_E - H_S = h_H \cdot A \cdot LMED \quad (4-52)$$

LMDE représente la différence moyen d'enthalpie entre le gaz et au voisinage de la paroi. On a :

$$LMED = \frac{\Delta H_S - \Delta H_E}{\ln \left(\frac{\Delta H_S}{\Delta H_E} \right)} \quad (4-53) \quad \begin{cases} \Delta H_S = (H_S - H_{liqE}) \\ \Delta H_E = (H_E - H_{liqS}) \end{cases} \quad (4-54)$$

$$h_H = \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{d}{A_{ext} \cdot h_{liq}} + \frac{Cp_a}{A \cdot h} \right]^{-1} \quad (4-55)$$

d représente le coefficient de linéarité entre l'enthalpie de l'air saturé par rapport à la température. Il est donné par :

$$d = \frac{dH}{dT_w} = \frac{(H_{T=T_{liqS}})_{sat} - (H_{T=T_{liqE}})_{sat}}{T_{liqS} - T_{liqE}} \quad (4-56)$$

En ce qui nous concerne, le coefficient de transfert côté bain n'est pas connu. Il n'est donc pas possible pour nous de connaître ni la distribution de H_w , ni la détermination de h_H sans passer par des analyses itératives sur toute la longueur du tube. Pour contourner ce problème, nous allons considérer la totalité du tube comme un élément de volume et nous tacherons de déterminer directement la relation liant $(H_E - H_{liq})$ à l'entrée du tube au flux thermique total échangé.

Notons aussi que, bien que l'équation (4-52) soit assez pratique compte tenu de sa simplicité. Il devient inutilisable si les coefficients de transfert sont influencés par la condensation de l'eau : Effet d'aspiration [125]. (Voir §2.4.5.3)

4.7.5.2 Comparaison de la corrélation aux essais

En se servant des mesures expérimentales et en procédant par la méthode de régression linéaire, l'enthalpie échangée et le delta d'enthalpie à l'entrée peuvent être liés par la corrélation suivante :

$$H_E - H_S = \left[(a \cdot Re^\beta + b) \right] \left[(H_E - X_0) - H_{liq} \right] \quad (4-57)$$

Les paramètres a, b, β, X0 sont données par le tableau suivant :

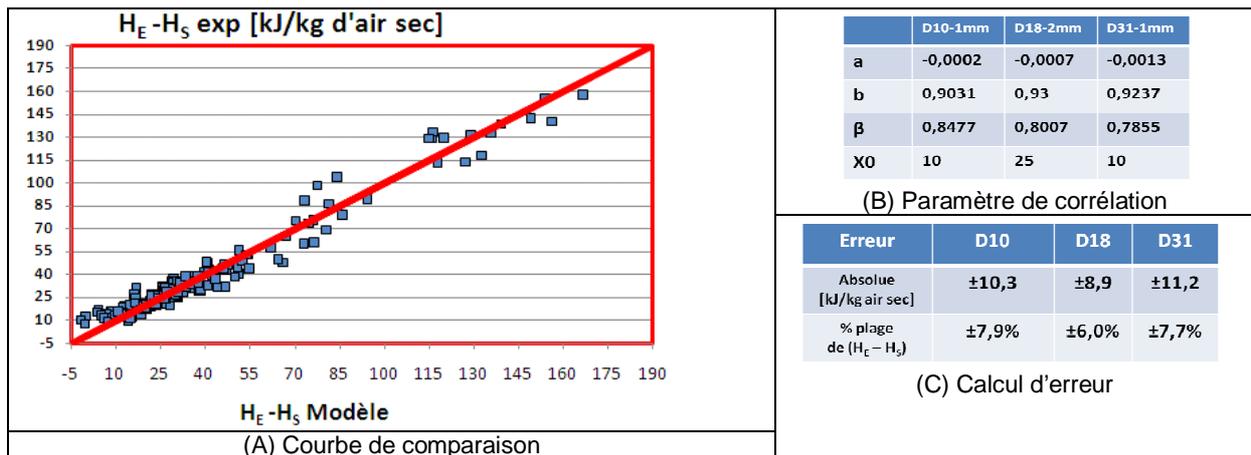


Figure 195 : Paramètres caractéristique de la corrélation enthalpique et comparaison avec les essais

Tel qu'elle, la corrélation donne une bonne précision mais fait intervenir de nombreux paramètres empiriques limitant son utilisation à la compréhension des phénomènes.

La corrélation (4-57) nous permet de comprendre les phénomènes de transfert thermique en jeu. Pour cela, établissons une interprétation physique de la corrélation obtenue et comparons avec la corrélation théorique de l'équation (4-51).

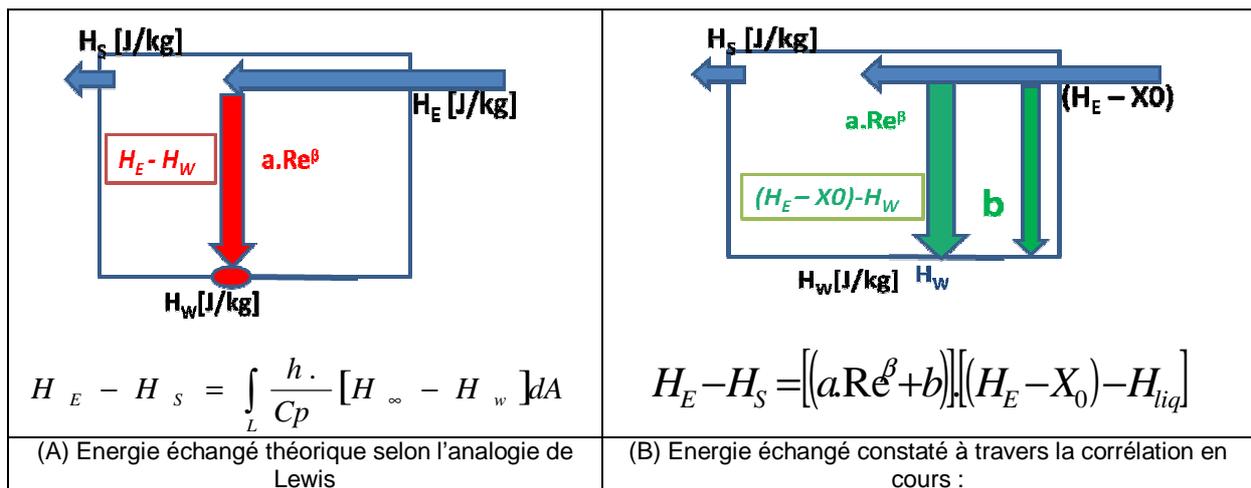


Figure 196 : Synthèse des phénomènes de transfert mise en jeu

Les deux corrélations contiennent le facteur Re^α qui est lié au coefficient transfert par convection :

- Dans la Figure 196-A, Re^α sert de « support » pour le transport du transfert de chaleur (latente et sensible) entre le gaz et la paroi : « support » du transfert causé par le gradient $(H_E - H_w)$.

- Dans la Figure 196-B, Re^a sert comme « support » des transferts de chaleur causés par le gradient d'enthalpie $\left[(H_E - X_0) - H_{liq} \right]$.

La présence de X_0 signifie que le gradient d'enthalpie $(H_E - H_{liq})$ doit être diminué de X_0 pour être valide. Cela peut s'expliquer par le fait que le gradient $(H_\infty - H_{liq})$ n'est pas constant mais diminue le long du tube et que la vraie température de la paroi interne T_w est toujours supérieure à la température qu'on avait prise comme référence qui est la température du liquide.

La Figure 196-B montre que les phénomènes comprennent aussi des transferts thermiques qui sont indépendants de la convection. Ils sont aussi véhiculés par le gradient d'enthalpie $\left[(H_E - X_0) - H_{liq} \right]$ mais contrairement aux phénomènes de transfert par condensation et par convection, les phénomènes sont indépendants de l'écoulement à l'intérieur du tube. Ces phénomènes sont représentés par le vecteur b qui est parallèle à Re^a dans la Figure 196-B. A travers les modèles AMESIM, nous verrons plus tard que le phénomène correspond à la stabilisation isothermique du système quand il est entré en condition de sursaturation. Les détails de ce phénomène sont disponibles dans le chapitre suivant.

4.8 Elaboration des critères

4.8.1 Choix des critères

Nous avons vu que l'origine des bouchons peut être du givre ou du condensat solidifié. Nous avons aussi montré que la formation de ces bouchons est influencée par de nombreux paramètres dont les températures (bain, gaz), l'humidité et le débit. Par contre, il s'avère que malgré la complexité des phénomènes, le transfert de chaleur pendant la phase qui se déroule avant le début de la formation des bouchons satisfait des corrélations communes quelque soit le phénomène en jeu et quelque soit le risque de bouchon. Il faut alors se demander s'il est possible de lier les paramètres thermiques (températures aux différents endroits, coefficients de transferts, flux de matières et de chaleur, etc.) aux phénomènes observés et aux risques de bouchon, de manière à obtenir des critères de prédiction de la formation de bouchons ou des critères de prédiction des phénomènes avec un nombre minimum de variables.

En se référant à la Figure 158, deux zones de conditions opératoires sont épargnées par les bouchons. La première zone se trouve dans les conditions de température froide ou chaude mais avec une quantité faible d'eau introduite (faible débit et faible température de rosée) tandis que la deuxième zone se trouve dans les conditions chaudes (température bain élevée, température gaz élevé, débit élevé) et humides (humidité élevée, débit élevé) de sorte que la glace ne puisse pas se former. De là on peut en déduire qu'il serait possible de réunir les différents paramètres en jeu dans deux nouveaux paramètres qui sont la température des condensats liquides et la quantité des condensats liquides qui se forment. Les paramètres thermiques utilisés étant déduits de la phase initiale des phénomènes (parois encore sèches), les deux paramètres en question se réduisent à la température moyenne des parois internes ainsi qu'au débit de condensation pendant la phase initiale.

4.8.2 Détermination des valeurs numériques des critères de bouchon

Afin de déterminer les valeurs des critères, traçons en ordonnée les températures moyennes des parois internes et en abscisse les débits de condensation. Le diamètre des taches représente les différentes mesures de pressions observées en fin d'essai. On obtient les figures suivantes :

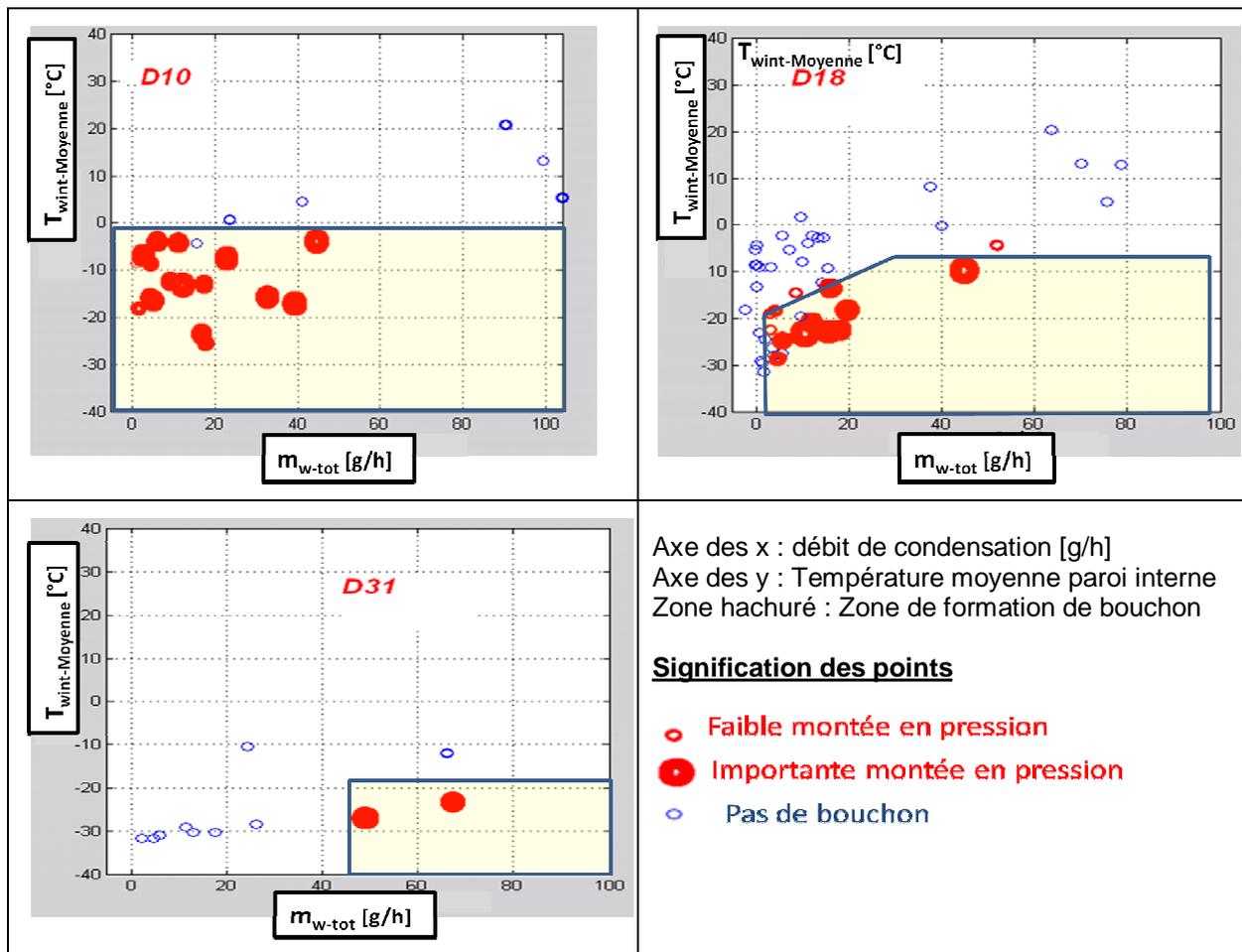


Figure 197 : Critère de bouchon vis-à-vis du débit de condensat et de la température de paroi interne moyenne

Pour rappel, en faisant l'hypothèse que la résistance liée à la convection du côté bain est négligeable, la température moyenne de la paroi interne peut être calculée à partir du bilan énergétique entre l'entrée et la sortie du tube, de l'épaisseur du tube et de la température du bain liquide selon l'équation :

$$T_{W_{int,moy}} = \frac{(H_E - H_S) Q_{gaz} \cdot e}{k_{PVC}} + T_{liq} \quad (4-58)$$

Le débit de condensation est calculé par l'équation (4-30).

Les figures montrent que :

- Pour le tube de faible diamètre (D10), quelque soit le débit de condensation, un bouchon est constaté dès que la température moyenne à l'intérieur du tube descend au dessous de 0°C.
- Pour le tube à diamètre moyen, les critères sont beaucoup bas :
 Pour un débit de condensation supérieur à environ 40 g/h, une température moyenne de paroi interne inférieure à -6°C est requise.
 Pour un débit de condensation plus faible, la température minimum requise peut descendre jusqu'à -18°C
 Dans tous les cas, le débit de condensation doit être au moins égal à 4 g/h.
- Pour le tube à diamètre élevé, le critère est beaucoup plus strict. Une température de paroi interne moyenne d'au moins -20°C est requise. De plus, le débit de condensation doit être supérieur à 45 g/h.

Pour expliquer ces différentes tendances, considérons une couche de glace (ou de givre) d'une certaine épaisseur séparant le gaz chaud et la paroi portée à une température négative :

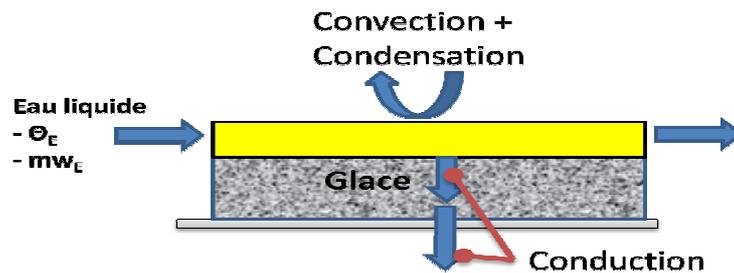


Figure 198 : Critère de croissance de la glace ou du givre

En appliquant la loi de Fourier sur les phénomènes de conduction à travers la glace et la paroi, il est évident que plus l'épaisseur de la glace requise pour boucher le tube est épaisse (i.e diamètre du tuyau important), plus la température de paroi interne requis pour maintenir la totalité de la glace sous forme solide ($T_{\text{surface}} < 0^{\circ}\text{C}$) est basse. Ce qui veut dire que si le diamètre du tube est élevé, non seulement il faut plus de condensat pour le boucher, mais aussi, il faut que la température des parois internes soit suffisamment basse.

4.8.3 Détermination des critères de givre

En reprenant les méthodes ci-dessus mais en remplaçant la signification des couleurs des points par le **type de phénomène** observé (givrage, condensation, mixte) au lieu du **risque de bouchon**. On obtient les figures suivantes :

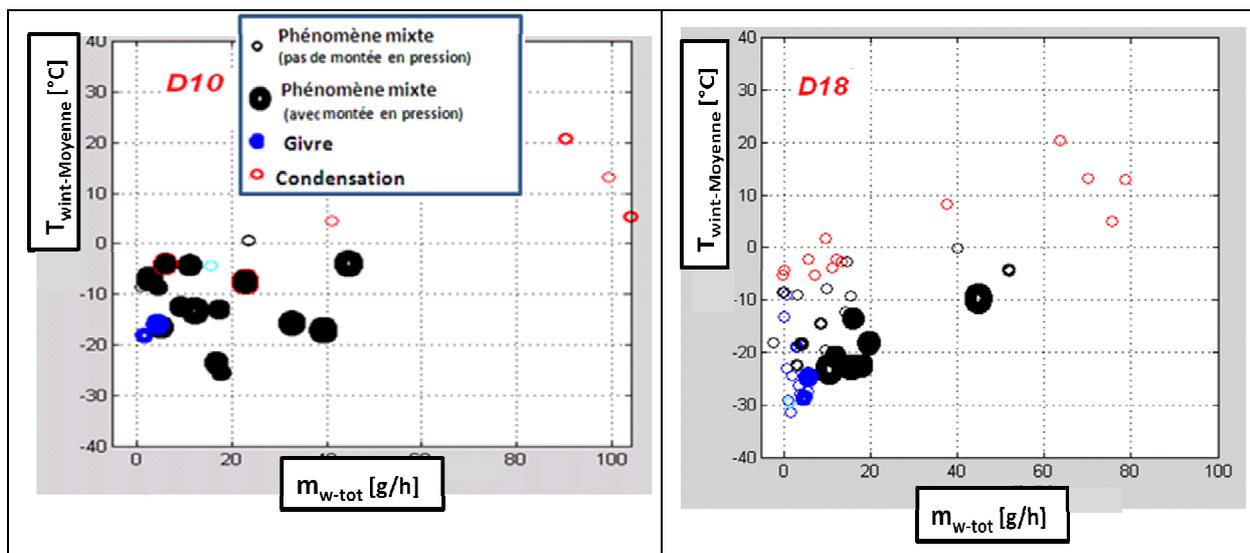


Figure 199 : Identification des zones de givre, des zones des phénomènes mixtes et des zones de condensation

Ceci montre que la température moyenne des parois internes permet de départager les phénomènes observés.

On constate que :

- Pour les deux tubes D10 et D31, la formation de givre n'est possible que si le débit de condensation ainsi que la température moyenne de la paroi sont suffisamment faibles.
- Pour D10, le phénomène de condensation n'est possible que si la température moyenne de la paroi interne est positive.
- Pour D18, la condensation peut commencer dès -5°C , surtout si le débit de condensation est faible. Pour des débits de condensation plus élevés, la température requise est légèrement plus élevée. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'à faible débit de condensat, l'eau ne

s'accumule pas mais reste sous forme de gouttelettes. Ces derniers se solidifient difficilement à cause des diverses résistances que nous avons discutées dans le paragraphe §2.4.7.2.

- Pour les deux diamètres, les **phénomènes mixtes** se trouvent dans la zone intermédiaire entre la zone condensante et la zone givrante. Leur domaine d'existence laisse croire qu'en termes de température de paroi une bonne partie du tube est dans le domaine givrant. Toutefois, à cause de l'importance des condensats liquides qui peuvent être générés en amont (fort débit de condensation), les givres sont inondés pour donner place à la glace ou à un mélange de givre, d'eau et de glace.

4.9 Conclusion partielle

Un banc a été construit pour pouvoir effectuer les essais nécessaires pour l'étude. Le principe du banc consiste envoyer un gaz modèle composé de particules d'huile et d'air humide dans un échantillon refroidi par un bain cryogénique. Les pressions, les débits, les températures et les humidités aux différents endroits du banc sont mesurés et contrôlés à travers des capteurs et des régulateurs. Le banc comprend, un système de purification d'air comprimé, un système servant à humidifier l'air, un système de génération de brouillard d'huile, un système chauffage et de refroidissement du gaz modèle, un bain cryogénique équipé d'un système de maintien de température et des dispositifs de sécurités.

Les essais sur banc avec du gaz humide ont permis de reproduire les phénomènes observés dans la formation des gels de blow-by, de comprendre leur déroulement et de définir leurs domaines de prédominance respectifs. En outre, il a été possible de les utiliser pour estimer l'impact des conditions opératoires sur les phénomènes observés et pour déterminer les critères de formation de bouchon.

4.9.1 Les phénomènes observés

Il a été montré que les phénomènes observés peuvent être classés en trois groupes. Dans les conditions de températures de paroi faible, de débit faible ou de point de rosée faible, le givrage prédomine. Dans les conditions de température de paroi élevée, de débit élevé ou de point de rosée élevé, on observe exclusivement la condensation. Enfin, dans les conditions intermédiaires, le givrage, la condensation et la cristallisation de l'eau peuvent apparaître simultanément ou les uns après les autres (phénomène mixte).

Le **phénomène mixte** se décline en plusieurs sous-groupes assez différents les uns des autres. En se servant de la notion de **mobilité de l'eau**, il a été possible en diamètre moyen de quantifier ces phénomènes et de trouver une corrélation avec les conditions opératoires. Pour des faibles diamètres, nous avons pu établir des corrélations entre la position des bouchons avec les conditions opératoires.

Pour les diamètres élevés, l'existence d'une certaine limite de hauteur de la glace (et/ou du givre) a été observée. Ainsi, quelles que soient les conditions opératoires, le **bouchon total** des tubes ayant des diamètres élevés n'a pas pu être observé.

Les essais avec des gaz surchauffés montrent que la montée en température du gaz tend à aplatir les givres qui se forment ou à déplacer vers l'aval du tube les lieux des bouchons de glace. En ce qui concerne l'impact de la géométrie, la présence des obstacles au déplacement des condensats entraîne l'accumulation de l'eau et favorise la cristallisation.

Enfin nous avons pu constater que la forme des bouchons ne peut être corrélée directement avec la cartographie classique des régimes d'écoulement diphasique. Toutefois l'établissement d'une nouvelle cartographie de la morphologie des bouchons est envisageable en prenant en compte le rôle de la cristallisation de l'eau comme un facteur participant à la rétention des condensats (équivalent aux tensions superficielles en condensation classique).

4.9.2 Le profil de pression

Le profil de pression peut être caractérisé par la durée qui s'écoule avant qu'on constate la première montée en pression ($P < P_{crit}$), par le nombre de pics de pression, par la pression maximale à la fin de

l'essai, ainsi que par la durée nécessaire pour passer de P_{crit} à P_{max} (ou plus généralement la vitesse de la montée en pression).

Les essais montrent que les givrages et les **phénomènes mixtes** peuvent conduire tous les deux à la montée en pression. Toutefois, la vitesse de cette montée est beaucoup plus lente pour les givres et l'obtention d'un bouchon total peut demander plus de 3 heures d'essai.

En ce qui concerne le nombre de pics de pression, la configuration annelée ou la surchauffe du gaz ont tendance à multiplier le nombre de pics.

4.9.3 Corrélation des transferts thermiques

Le passage de l'air humide à l'intérieur de l'échantillon s'accompagne de la déshydratation et du refroidissement. Ce phénomène est d'autant plus important que le débit du gaz est faible et que l'humidité et la température de gaz sont élevées.

Les flux thermiques échangés aux parois sont relativement faibles pour un gaz sec. Ainsi, malgré la faible conductivité de la paroi des tubes plastiques et la convection à l'intérieur du bain liquide, les coefficients de transfert sec moyens et les nombres de Nusselt moyens du côté du gaz peuvent être calculés par simple méthode DTML. La corrélation obtenue se rapproche de celle de Dittus Boelter.

La condensation de la vapeur d'eau joue un rôle important sur l'énergie totale échangée ainsi que sur la température des parois internes. Deux corrélations ont été proposées pour les essais en présence de gaz humide.

La première corrélation lie le Nu_{tot} avec les conditions opératoires. Elle a permis de mettre en évidence l'impact des différents paramètres sur les transferts thermiques. D'abord, nous avons constaté que la température du gaz, l'humidité absolue et le débit de gaz affectent simultanément le coefficient de transfert thermique total. En outre il s'avère que l'impact de la température ainsi que l'impact de l'humidité sont amplifiés par l'impact du débit et vice-et-versa. Enfin, il a été constaté qu'à débit élevé, la sensibilité vis-à-vis du débit devient de plus en plus faible.

La deuxième corrélation lie l'énergie totale échangée avec le gradient d'enthalpie entre le gaz à l'entrée du tube et le gaz au voisinage de la paroi. Elle a permis de constater deux types d'échange thermique qui s'effectuent en parallèle à l'intérieur du tube. L'un est lié à la convection du gaz tel qu'il est théoriquement attendu alors que l'autre n'en dépend pas. Il s'agit de la stabilisation spontanée d'un gaz sursaturé qui se forme dans le système.

4.9.4 Critère de givre et critère de bouchon

La formation de bouchon dans les trois heures d'essai peut être prédite par la combinaison de la température moyenne de paroi interne et le débit total de condensation. De même, en se servant de ces deux critères, il est possible d'estimer les phénomènes prépondérants parmi les trois phénomènes possibles (condensation, givre et phénomène mixte).

La température moyenne de paroi interne la plus faible pour boucher le tube diminue avec le diamètre. De même le débit de condensat requis augmente quand le diamètre du tube augmente.

Notons que les valeurs numériques des critères établis sont propres à la longueur de tube testée. Elle peut varier significativement pour les tubes très longs ou très courts. Néanmoins l'impact de la diminution de la longueur s'accompagne généralement de la diminution du débit de condensation ainsi que l'augmentation de la température moyenne de paroi interne. Il est donc possible qu'une partie de l'impact de la longueur sont implicitement pris en compte dans les critères qui ont été établis.

Glossaire

Notation	Variable	Unités
A	Surface de contact	[m ²]
C _p	Capacité calorifique à pression constante	[K/kg.K]
D	Diamètre interne du tube	[m]
DTML	Différence logarithmique moyenne de température entre la veine de gaz et la paroi	[°C]
Durée kv1	Durée qui s'écoule avant début de la montée en pression	[min]
DYLM	Différence logarithmique moyenne d'humidité entre la veine de gaz et la paroi	[g/kg]
g _m	Coefficient de transfert massique sans phénomène d'aspiration	[m/s]
h	Coefficient de transfert par convection du côté du gaz	[W/(m ² K)]
H	Enthalpie spécifique	[J/kg]
h _{liq}	coefficient de transfert par convection du côté du liquide	[W/(m ² K)]
h _m	Coefficient de transfert de masse	[m/s]
HR _E	Humidité relative du gaz à l'entrée du tube	[%]
J _c	Cas condensation vapeur pure : vitesse débitante de la vapeur à l'entrée de la conduite Cas air humide : vitesse débitante de l'air humide	[m/s]
J _l	Cas condensation vapeur pur : vitesses débitantes du liquide à l'entrée de la conduite. Cas air humide : vitesse débitante des condensats	(m/s)
k	Conductivité thermique de la paroi	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
K _v	Coefficient de débit	[L/min]
largeur pic	Durée nécessaire pour passer de P = P _{kv=1} à P _{max}	[min]
Le	nombre de Lewis	
LMED	Différence logarithmique moyenne d'enthalpie entre la veine de gaz et la paroi	[J/kg]
L _v , L _f , L _s	Chaleur latente de vaporisation, de fusion et de sublimation	[KJ/Kg]
m _{air.humide}	Débit massique de l'air humide	[kg/s]
m _{air.sec}	Débit massique de l'air sec	[kg/s]
m _w	Débit de condensation (dû au transfert par de masse par convection)	[g/min]
m _w tot	Débit de condensation total	[g/min]
Nu	Nombre de Nusselt	
Nu tot	Nombre de Nusselt (sensible + latente)	
P _{kv1}	Pression correspondant à Kv = 1 (référence d'un premier signe de montée en pression)	[mbarG]
P _{Max}	Pression maximale mesurée lors des essais (généralement à la fin de l'essai)	[mbarG]
Pr	Nombre de Prandtl	
Q _{gaz}	Débit volumique du gaz à l'entrée du tube	[L/min]
R _a	Constate des gaz parfait pour l'air 287.1 J/kg/K	
R _w	Constate des gaz parfait pour la vapeur 461.5 J/kg/K	
S	Section de passage du gaz	[m ²]
T _{dE} (ou T _{d1})	Température de rosée du gaz à l'entrée du tube	[°C]
T _{gazE}	Température du gaz à l'entrée du tube	[°C]
T _{gazS}	Température du gaz à la sortie du tube	[°C]
T _{liq}	Température du bain cryogénique	[°C]
T _w	Température de paroi interne en un point donné	[°C]
T _{wext}	Température de paroi externe	[°C]
T _{wint}	Température de paroi interne calculée par le flux mètre placé près de l'entrée du gaz	[°C]
T _{wint-Moyenne}	Température moyenne de paroi interne	[°C]
U	Coefficient de transfert thermique global (gaz+parois+liquide)	[W/(m ² K)]
U _{tot}	Coefficient de transfert thermique total (sensible + latente), moyenné sur le tube entier	[W/(m ² K)]
V	Vitesse	[m/s]

x	Coordonnées axial du point considéré	[m]
x	Fraction molaire	[%]
X_{Hlat}	Fraction de l'échange de type latente par rapport à l'énergie totale échangée	[%]
$X_{eau,cond}$	Fraction en eau qui condense	[%]
Y_E	Humidité absolue du gaz à l'entrée du tube	[g/kg d'air sec]
θ_E	Température du condensant entrant	[°C]
θ_m	Coefficient de correction du coefficient de transfert massique vis-à-vis du phénomène d'aspiration	
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
ν	Viscosité cinétique	(m ² /s)
ρ	Densité	[kg/m ³]
Φ	Flux thermique local	[W]

Subscript :

∞	Dans la veine de gaz
E	Entrée du tube
eau	Côté condensat
lat	Latente
S	Sortie du tube
sens	Sensible
w	Au voisinage de la paroi

Chapitre 5 :

MODELISATION DES PHENOMENES DE TRANSFERT

CHAP. 5: MODELISATION DES PHENOMENES DE TRANSFERT

5.1 Introduction

Nous avons vu qu'il est possible de prédire les phénomènes en jeu ainsi que le risque de bouchon à partir du bilan thermique et du bilan massique entre l'entrée et la sortie du tube (calcul de la température moyenne de paroi et du débit de condensat). Les modèles expérimentaux que nous avons établis permettent bien de retrouver ces paramètres. Néanmoins, ils sont propres à la longueur, aux épaisseurs et aux conditions de refroidissement des tubes qui ont été testés.

Pour contourner ces problèmes, nous allons établir des modèles théoriques des transferts thermiques en se basant sur la bibliographie et sur les phénomènes de transfert en jeu montrés par les corrélations précédentes (Figure 196). Nous allons ensuite les valider à travers les essais afin d'obtenir des modèles autonomes qui pourront être utilisés dans les moteurs.

En se servant des modèles ainsi établis, nous allons redéfinir les critères de formation de bouchon et les critères de formation de givre ou de condensation vis-à-vis de la distribution spatiale de la température de paroi interne. Par la même occasion, nous allons démontrer qu'il est possible de prédire la **mobilité de l'eau** ainsi que la position des bouchons définies dans le chapitre précédent en se servant des résultats de modélisation thermique. De même nous allons aussi voir que l'existence des hauteurs limites de glace en diamètre élevé peut être expliquée en utilisant le modèle en question.

Enfin, nous allons utiliser le modèle pour analyser la sensibilité des divers paramètres d'entrée vis-à-vis des paramètres que nous avons choisis comme critère de bouchon et critère de givre (ou de condensation). On étudiera par la même occasion l'impact de la nature des phénomènes de transfert mis en jeu sur la thermique dans le système. Nous considérerons en particulier l'impact thermique de la formation de brouillard et l'impact thermique de la cristallisation.

5.2 Les hypothèses

5.2.1 Coefficient de transfert par convection

Nous avons vu dans la partie théorique qu'en présence de condensation le coefficient de transfert par convection peut être modifié par les **phénomènes d'aspiration**. Nous avons aussi vu que cet impact est d'autant plus faible que la quantité de vapeur est faible. L'humidité maximale de notre plage de travail étant à 80 g/kg d'air sec (8%), nous allons considérer dans le modèle en cours que le coefficient de transfert par convection est insensible aux condensations. La correction θ_t du coefficient de correction de l'équation (2-68) est donc égale à l'unité [66] :

$$h = \theta_h \cdot h_0 \quad (5-1)$$

$$\theta_h = 1 \quad (5-2)$$

D'autre part, bien que la présence des films de condensat puisse affecter le phénomène de convection au-dessus des films, nous allons faire l'hypothèse que cet impact est négligeable. Cette hypothèse est d'autant plus réaliste que les paramètres thermiques sur lesquels nous travaillons concernent la phase initiale de la condensation et de la formation de glace.

En résumé, on fait l'hypothèse que le coefficient de transfert par convection est constant peu importe la quantité d'eau introduite. Ce qui nous permettra par la suite d'utiliser les coefficients de transfert calculés lors des essais sec pour modéliser les transferts en gaz humide. Comme nous l'avons vu auparavant, ces coefficients (transfert sec) ont pour avantage d'être facilement calculables à travers

les essais par simple méthode de DTML et de ne contenir qu'un faible impact de la conduction thermique à travers la paroi du tube.

5.2.2 Le nombre de Lewis

Pour le cas de l'air humide, on peut considérer que le coefficient de transfert massique par convection h_m n'est pas affecté par les **phénomènes d'aspiration** [35]. Ce qui permet de calculer directement le coefficient h_m en fonction de h selon l'équation (2-79) reprise ci-dessous :

$$\frac{h}{h_m} = \rho \cdot Cp \cdot \left(\frac{\alpha_{vap}}{D_{vap}} \right)^{2/3} = \rho \cdot Cp \cdot Le^{2/3} = F(Le) \quad (5-3)$$

La quantité d'eau mise en jeu étant faible, nous allons considérer que $Le = 1$. C'est qui est tout à fait cohérent avec les nombreuses études de la condensation de l'air humide [46][126][124]. La validité de cette hypothèse est toutefois à considérer avec précaution. Liang Xia [127] a rappelé que cette valeur peut varier de 0,6 à 1,1 et que même à l'intérieur de cette plage restreinte, le nombre de Lewis peut affecter considérablement la quantité d'eau pouvant condenser.

5.2.3 La distribution du coefficient de transfert

Le Tableau 23 montre que dans la plupart des essais, la longueur d'établissement ne peut être négligée. Il est donc clair que le coefficient de transfert est loin d'être constant le long du tube. Normalement, il est à sa valeur maximale à l'entrée du tube et atteint une valeur asymptotique à la terminaison de la longueur d'établissement. La figure suivante illustre un exemple de distribution de Nu dans un contexte similaire [119].

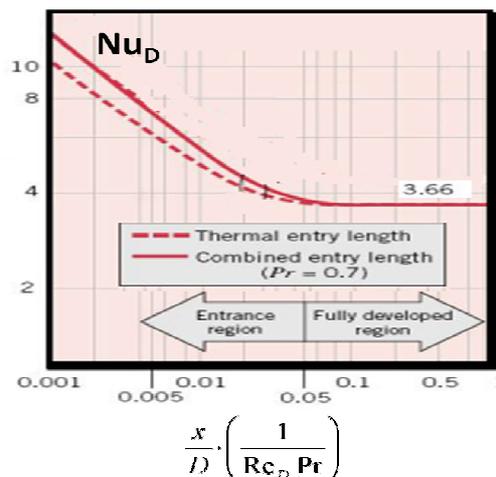


Figure 200 : Exemple de distribution de Nu en régime partiellement établi [119]

En ce qui nous concerne, on considérera dans la mesure du possible que les nombres de Nusselt moyens calculés lors des essais sont uniformément répartis sur toute la longueur du tube. Par contre, pour les utilisations futures des modèles, nous tacherons d'inclure dans le modèle 1D Amesim à construire, la possibilité d'utiliser des Nu qui évoluent en fonction de la position du point à étudier.

5.2.4 Les phénomènes à prendre en compte

5.2.4.1 Côté gaz

Du côté du gaz, les différents phénomènes attendus dans les circuits de blow-by des moteurs sont détaillés dans le paragraphe §3.3. En ce qui concerne les essais sur le banc en présence d'air humide seul, nous avons vu, à travers les résultats, que les phénomènes essentiels sont la condensation, la solidification de l'eau et la formation de givre. Dans le cadre de la modélisation thermique, nous

considérons que tous ces phénomènes peuvent être représentés par la condensation de l'air humide. En effet, l'enthalpie de condensation est plus importante que l'enthalpie de solidification, il est donc évident que l'impact thermique de la solidification est négligeable et que les phénomènes de condensation et de formation de givre sont thermiquement identiques.

$$L_f + L_v \approx L_v \quad (5-4)$$

$$L_v \approx L_s \quad (5-5)$$

Afin de constater la dérive que pourrait engendrer une telle approximation, nous tâcherons toutefois d'inclure dans les modèles une possibilité de prendre en compte plus tard le phénomène de cristallisation de l'eau (L_f) dans le bilan thermique.

Comme il a été constaté à travers la corrélation enthalpique (Figure 196-B), le phénomène de condensation comprend le transfert de masse par convection qui est causé par le gradient d'humidité entre le gaz et la paroi ainsi qu'un autre phénomène de condensation indépendant de la convection. Selon le cas, on attribuera ce phénomène par « **la formation de brouillard** » ou « **la stabilisation par condensation isothermique d'un gaz sursaturé** ». Les équations correspondantes seront traitées dans les paragraphes suivants.

Théoriquement, on pourrait aussi s'attendre à un transfert de masse causé par la différence de densité à l'intérieur du gaz (bouyance). Toutefois, compte tenu de l'orientation du tube ainsi que la nature de la convection en jeu, nous faisons l'hypothèse que ce phénomène est négligeable. De plus amples détails de l'impact de ce type de transport sur la condensation de l'air humide est disponible dans la référence [128].

5.2.4.2 Côté paroi et côté liquide de refroidissement

A l'intérieur de la paroi, le phénomène de transfert est essentiellement dû à la conduction (à travers une conduite annulaire isotrope d'épaisseur quelconque). La conduction à l'intérieur des films de condensats ou des gouttes de condensat est considérée comme négligeable et la température de la paroi interne sera la température de l'interface exposée aux gaz [64]. Ceci est plausible compte tenu de la faible quantité de condensat présent dans les tubes durant la phase qui nous intéresse ainsi que du fait que le maximum de résistance thermique se trouve du côté du gaz et non du condensat. Nous faisons l'hypothèse, par la même occasion, que la chaleur absorbée lors du refroidissement et le sur-refroidissement des condensats est aussi négligeable [129].

Du côté du bain, nous considérons que le coefficient de transfert du côté du liquide est beaucoup plus important par rapport au coefficient de transfert du côté du gaz (car $C_{p_{liq}} \gg C_{p_{vap}}$). Ce qui veut dire qu'on peut faire l'hypothèse que la température de paroi externe des tubes est proche de la température du bain. Néanmoins, afin de pouvoir constater la dérive que pourrait entraîner cette approximation, on s'efforcera d'estimer la valeur réelle des coefficients de transfert du côté liquide pour quelques essais (en se servant des mesures de température sur les parois des tubes) et on les utilisera dans les modèles pour faire une comparaison.

5.3 Les paramètres d'entrée du modèle

Les paramètres d'entrée du modèle sont : les phénomènes à considérer, les conditions à l'entrée du gaz, les caractéristiques du bain liquide, les caractéristiques du tube et les caractéristiques du coefficient de transfert du côté du gaz.

5.3.1 Les phénomènes à considérer

Le changement d'état à prendre en compte peut être choisi en modifiant la chaleur latente à utiliser. Pour la condensation, on prend L_v . Pour la condensation suivie de solidification ou le phénomène de givrage on utilisera $L_s = L_f + L_v$.

En outre, si les gaz entrent dans une condition de sursaturation, le phénomène de stabilisation des gaz sursaturés peut être choisi. Le premier cas consiste en la transformation iso-enthalpique du gaz de manière à former un mélange de brouillard et un gaz saturé. Dans le deuxième cas, la stabilisation du gaz sursaturé consiste en la condensation isothermique de l'eau en excès jusqu'à la saturation.

5.3.2 Condition à l'entrée des gaz

Les conditions des gaz à l'entrée prises en compte dans le modèle sont :

- La température du gaz
- L'humidité relative du gaz
- Le débit massique de gaz
- La pression de travail

5.3.3 Caractéristiques du bain liquide

Le bain d'eau glycolée est caractérisé par les paramètres suivants :

- La température du bain
- La composition du bain (Mélange Eau glycolée 40%)
- Le coefficient de transfert du côté du bain.

5.3.4 Caractéristiques du tube

Le tube peut être caractérisé par les paramètres suivants :

- Le diamètre du tube
- La longueur
- L'épaisseur
- Les propriétés : conductivité, capacité calorifique, la densité.

5.3.5 Caractéristiques du coefficient de transfert par convection

La convection du côté du gaz peut être caractérisée par les composantes du nombre de Nusselt ainsi que son mode de calcul.

Pour les composantes de Nu, on a les paramètres α , β et γ du Nu sensible :

$$Nu_{sens} = \alpha \cdot Re_{gaz}^{\beta} \cdot Pr_{gaz}^{\gamma} \quad (5-6)$$

Pour le mode de calcul de Nu sensible. Deux possibilités sont proposées :

- Dans le premier cas, le Nu sensible est unique quelque soit la position du point considéré. Il est calculé vis-à-vis de la propriété du gaz à l'entrée du tube puis la valeur obtenue est réutilisée pour chaque portion restante.
- Dans le deuxième cas, le Nu sensible est recalculé en fonction de l'évolution de la température et de l'humidité du gaz le long de son parcours.

Pour le mode de calcul des nombres sans dimension Re et Pr, Deux possibilités sont proposées :

- Dans le premier cas, les nombres sans dimension sont recalculés en prenant en compte l'humidité et la température du gaz pour les divers endroits du tube.
- Dans le deuxième cas, seule la température est prise en compte. Autrement dit, le coefficient de transfert établi en régime sec est repris sans prendre en compte la modification des propriétés de transport qui est causée par la présence de la vapeur.

5.4 Les paramètres de sortie du modèle

Le modèle est composé par l'enchaînement de plusieurs unités de condensation de petite taille représentant un tube de quelque mm de longueur. Ce qui nous permettra non seulement de déterminer les conditions en entrée et en sortie du gaz, mais aussi d'avoir une distribution spatiale des différentes caractéristiques du gaz dans chaque morceau du tuyau.

Les paramètres de sortie du modèle comprennent la distribution spatiale des propriétés du gaz, la distribution spatiale des échanges avec les parois, les températures aux parois, les conditions en sortie des gaz et les paramètres caractéristiques des échanges totaux.

5.5 Mise en équations

5.5.1 Les propriétés de transport et les nombres sans dimension

Les propriétés de transport sont nécessaires pour le calcul des nombres sans dimension utilisés dans l'équation (5-6). Ils sont évalués par rapport à la température et l'humidité du gaz ou par rapport aux conditions de température seulement (HR=0%). La conductivité thermique et la viscosité sont calculées selon les équations (4-4) à (4-6). La capacité calorifique est calculée selon la relation (4-8). La densité est calculée selon la relation (4-3). Les nombres de Prandtl et de Reynolds sont calculés selon les relations (3-6) et (4-9).

Selon le cas, les différentes propriétés sont calculées par rapport à la condition d'entrée du gaz dans le tube ou par rapport aux conditions d'entrée du gaz dans chaque portion du tube (tube subdivisé en plusieurs portions en série).

5.5.2 Les équations du transfert de chaleur par condensation si les gaz n'atteignent pas les conditions saturées.

Si le gaz n'est pas entré en condition saturée, on peut calculer directement l'énergie échangée en reprenant l'équation (2-81). Pour une paroi d'aire de convection A, on peut écrire :

$$Q = m_{\text{air.sec}} \cdot (H_E - H_S) = h \cdot A \cdot (T_\infty - T_w) + Lv \cdot m_w \quad (5-7)$$

Le débit de condensation m_w sur l'aire A peut être calculé en se servant de l'équation (2-74) reprise ci-dessous :

$$m_w = m_{\text{air.sec}} \cdot (Y_E - Y_S) = h_m \cdot A \cdot (Y_\infty - Y_w) \quad (5-8)$$

En tenant compte de notre hypothèse initiale, on calcule h_m par

$$h_m = \frac{h}{\rho \cdot Cp} \quad (5-9)$$

Le coefficient de transfert h est lié à Nu selon la relation :

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k_c} \quad (5-10)$$

La combinaison des trois équations permet de calculer l'humidité en sortie Y_s et la température T_{gaz_s} du gaz sortant de l'élément de condensation de surface A. Connaissant Y_s et T_s , on peut calculer l'humidité relative du gaz en sortie en se servant de l'équation (2-2), (2-4) et (2-9).

Sur le diagramme psychrométrique, l'évolution de la température et de l'humidité entre l'entrée et la sortie de la portion de tube peut être décrite par la figure ci-dessous.

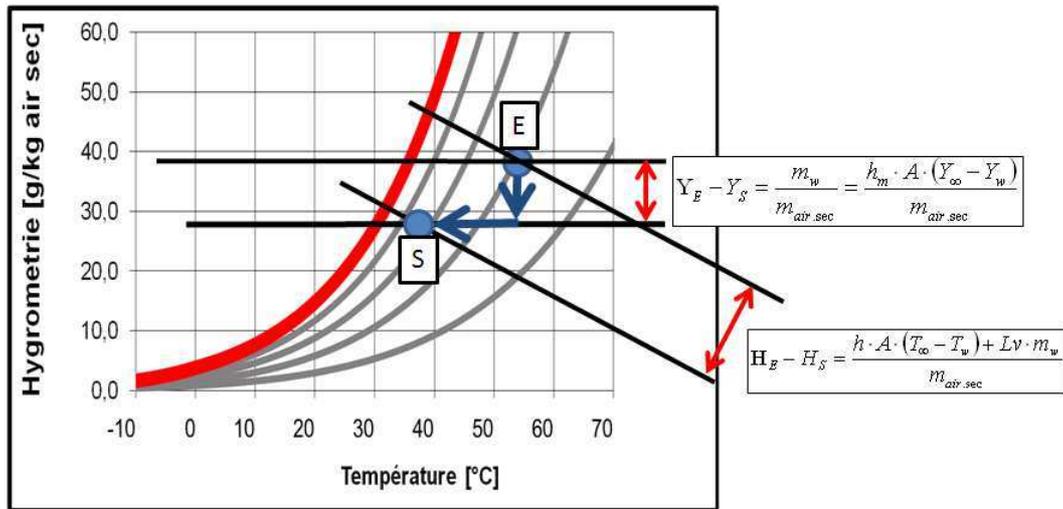


Figure 201 : Evolution de l'humidité et de la température du gaz s'il n'y a pas entrée en saturation

5.5.3 Les phénomènes de condensation si le gaz entre en condition saturée

Les théories précédentes sont valides tant que la condition en sortie ne tombe pas dans le domaine saturé ou sursaturé. Par contre, si les deux équations conduisent à une condition en sortie dans la zone sursaturée (c'est le cas par exemple si le gaz en entrée est déjà saturé) on aboutit à un point intermédiaire I qui est thermodynamiquement instable (figure suivante) :

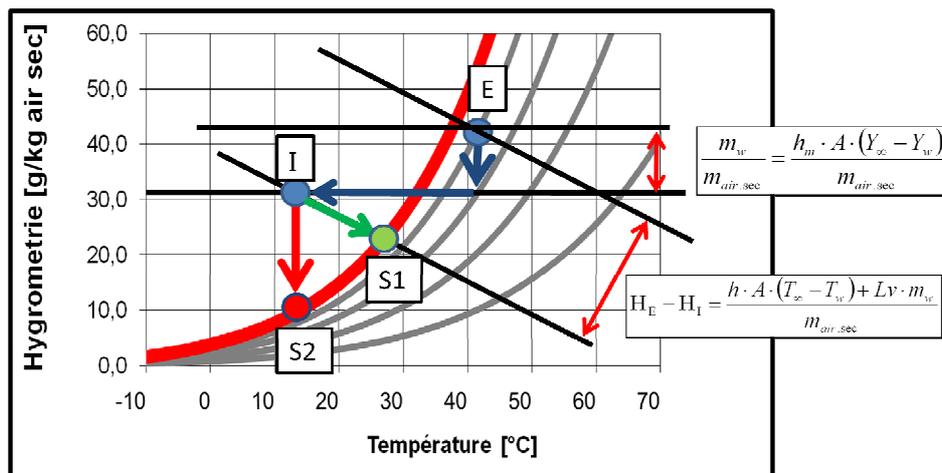
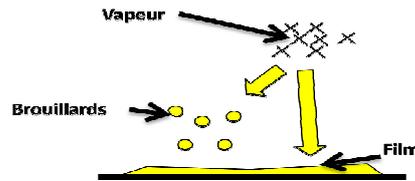


Figure 202 : Evolution de l'humidité et de la température du gaz s'il y a entrée saturation ou sursaturation

Le point sursaturé I peut ensuite évoluer vers une condition saturée stable de deux manières différentes : la **formation de brouillard** et la **stabilisation par condensation isothermique**.

5.5.3.1 La formation de brouillard

Dans ce cas de figure, l'évolution se fait de manière adiabatique (point S1 de la Figure 202). C'est-à-dire que le gaz libérera dans la veine de gaz, sous forme de condensat, la vapeur d'eau en excès. La chaleur cédée par cette transformation est absorbée par le gaz lui-même qui se réchauffe par la suite. La transformation se fait à l'intérieur du gaz sans aucun échange de chaleur avec la paroi, il est donc probable que les condensats se forment sous forme de brouillard en suspension.



Mathématiquement tout se passe comme si la condition en sortie est dictée par la combinaison de l'équation (5-11) avec l'équation de l'enthalpie d'un gaz saturé en fonction de la température (Courbe en rouge sur la Figure 202).

$$H_E - H_S = h.A.(T_\infty - T_w) + Lv \cdot h_m \cdot A.(Y_\infty - Y_w) \quad (5-11)$$

L'équation de l'enthalpie d'un gaz saturé à la température T est donnée par la combinaison des équations (2-2), (2-8) et (2-10).

Par la suite, nous appellerons cette série de phénomène aboutissant à la formation de brouillard « **Phénomène de condensation avec brouillard** ».

5.5.3.2 La stabilisation par condensation isothermique

Dans ce cas de figure, la stabilisation de l'air sursaturé I se fait à température constante (point S2 de la Figure 202). L'extraction de l'énergie requise pour effectuer cette transformation est assurée par la paroi froide d'où le maintient la température.

Pour le calcul, nous appliquerons successivement les équations (5-7) et (5-8) pour obtenir l'enthalpie H_I et l'humidité absolue Y_I du point intermédiaire I. L'enthalpie obtenue sera ensuite utilisée pour calculer la température T_{gaz_I} correspondant au point I en se servant de la relation (2-8). La température $T_{gaz_S} = T_{gaz_I}$ ainsi obtenue est ensuite utilisée dans (2-2) et (2-10) pour calculer l'humidité en sortie Y_S .

Contrairement au cas précédent, il est évident que le condensat qui se forme lors de la phase de stabilisation se forme au parois mais non dans la veine. C'est qui est tout à fait normal puisque l'extraction de l'énergie se fait à cet endroit. La quantité totale de condensat sera la somme des condensats issus de la transformation E-I et de la transformation I-S2. Elle est donc beaucoup plus élevée par rapport à la quantité qui condense s'il n'y avait pas sursaturation.

Pour la suite appelons le phénomène de condensation associé à une **stabilisation par condensation isothermiques** par « **Phénomène de condensation pure** ».

5.5.3.3 La stabilisation par condensation et formation partielle de brouillard

Dans ce cas de figure, une partie de la stabilisation du gaz sursaturé I se passe par la **formation de brouillard** tandis que la partie restante se fait par **condensation isotherme**.

Pour le calcul, nous déterminerons d'abord la température intermédiaire T_I de la même manière que précédemment (§5.5.3.2). Puis nous déterminerons l'enthalpie en sortie selon :

$$H_S = H_{noMist} + \alpha_{mist} (H_{Mist} - H_{noMist}) \quad (5-12)$$

H_{noMist} représente l'enthalpie du gaz en sortie si la stabilisation se fait exclusivement de manière isotherme. Il est calculé selon la méthode détaillé dans §5.5.3.2

H_{Mist} représente l'enthalpie du gaz en sortie si la stabilisation se fait exclusivement par formation de brouillard. Il est identique à l'enthalpie du point intermédiaire H_I .

α_{mist} représente la part du phénomène de brouillard dans la stabilisation du gaz sursaturé I. Il varie de 0 à 1.

Connaissant H_S , on pourra calculer ensuite l'humidité et la température du gaz en sortie en combinant les équations (2-2), (2-8) et (2-10).

5.5.3.4 Domaine d'existence

Physiquement, si l'air humide E (T_E, Y_E) est refroidi sur une paroi W à la température constante T_W , il subit un refroidissement et une déshydratation partiels de sorte que les coordonnées de la condition en sortie S (T_S, Y_S) (ou intermédiaire I (T_I, Y_I)) soient situées sur l'axe EW [130]. Les coordonnées exactes de S (ou de I) varient avec le transfert de chaleur qui existe entre la paroi et le gaz : Plus le transfert est important (Nu élevé), plus le point se trouve du côté de W (Figure 203)

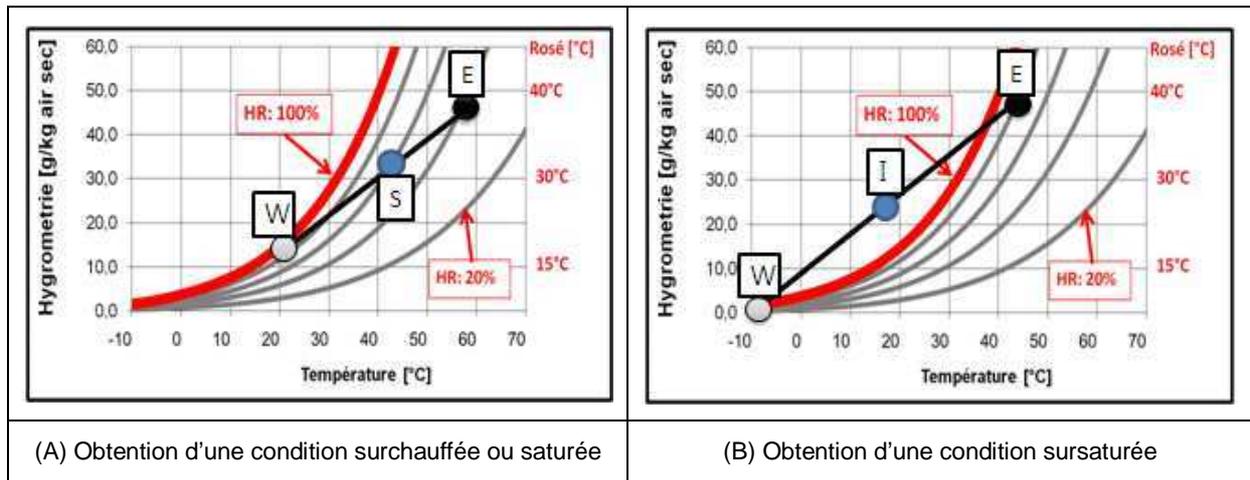


Figure 203 : Obtention des conditions en sortie S ou intermédiaire I en fonction de la température de paroi et des conditions en entrée E

Comme il montré dans les figures ci-dessus, l'obtention d'un point intermédiaire sursaturé I est envisageable seulement si l'axe EW passe dans la zone sursaturée (Figure 203-B). Ce qui nécessite à la fois une température de paroi très faible ainsi qu'une humidité relative importante. Autrement, le gaz restera surchauffé malgré les phénomènes de condensation (Figure 203-A).

5.5.4 La conduction à travers la paroi

Le phénomène de conduction à travers la paroi est pris en compte à travers un composant de conduction radial prédisposé dans AMESIM :

En régime stationnaire, le flux thermique Φ traversant la paroi est lié aux températures aux deux extrémités $T_{W_{int}}$ et $T_{W_{ext}}$ selon la relation suivante :

$$\Phi_w = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L_i}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)} \cdot (T_{W_{int}} - T_{W_{ext}}) \quad (5-13)$$

5.5.5 La convection côté bain

La convection côté bain est prise en compte par l'intermédiaire d'un composant de convection externe prédisposé dans AMESIM. Le flux thermique qui passe entre le bain liquide et la paroi est donné par :

$$\Phi_{liq} = h_{liq} \cdot (T_{W_{ext}} - T_{liq}) \quad (5-14)$$

Le coefficient transfert h_{liq} est donnée par :

$$h_{liq} = \frac{Nu_{liq}}{D_{ext}} \quad (5-15)$$

Le coefficient transfert Nu_{liq} est fonction de la vitesse ainsi que de la propriété de l'eau glycolée. En ce qui nous concerne, on imposera une valeur constante qui est déterminée expérimentalement ou aussi une valeur très élevée afin de pouvoir négliger la convection du côté du bain.

5.5.6 Les paramètres caractéristiques de l'air humide à l'entrée du tube

Les paramètres caractéristiques de l'air humide connus à l'entrée du tube se limitent à l'humidité relative et à la température du gaz. Les autres paramètres peuvent être calculés à travers les transformations suivantes :

- L'humidité absolue du gaz est calculé en selon la relation (2-2), (2-4) et (2-10).
- L'enthalpie est calculée selon la relation (2-8).

5.6 Présentation dans AMESIM

La simulation du système a été effectuée de manière 1D. L'enchainement des différents composants peut être schématisé comme suit. Le tube est subdivisé en plusieurs morceaux de quelques millimètres montés en série. Chaque morceau de tube est simulé par un motif comprenant un élément de condensation du côté air, un composant représentatif de la conduction à l'intérieur de la paroi du tube et un composant représentatif de la convection du côté du liquide.



Figure 204 : Division du tube en plusieurs éléments de condensation mis en série

Pour calculer les conditions en sorties de chaque morceau de tube, les éléments de condensations met en ouvre les différentes relations détaillées dans les paragraphes §5.5.1, §5.5.2 et §5.5.3.

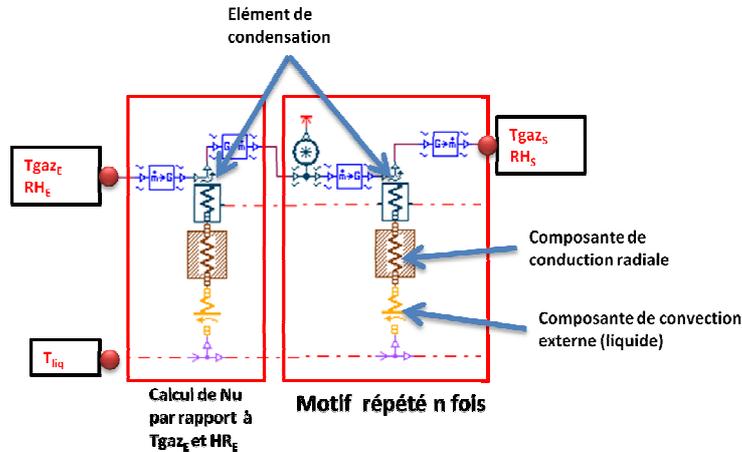


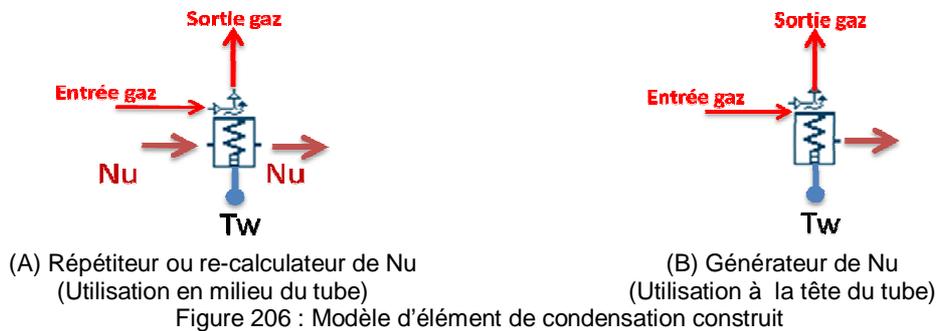
Figure 205 : Composition des unités de condensation qui constitue le modèle 1D

Deux types d'élément de condensation sont proposés :

- Le premier type d'élément de condensation permet de choisir le nombre de Nu utilisé. Selon le cas, il calculera Nu en prenant en compte la température (et éventuellement de l'humidité) du gaz qui y entre ou utilisera directement un nombre de Nu constante qui lui est transmis par l'élément de condensation qui lui précède. Dans ce dernier cas il transmettra à son tour le même nombre de Nu aux éléments de condensations qui lui suivent et ainsi de suite (utilisation si Nu est calculé par rapport aux conditions d'entrées seulement) : Figure 206-A
- Le deuxième type d'élément de condensation est utilisé à l'entrée du tube. Il fonctionne comme le premier type détaillé ci-dessus mais contrairement au cas précédent, il calculera systématiquement Nu par rapport à la température du gaz qui y entre (et éventuellement par rapport à l'humidité). La valeur ainsi obtenue est par la suite transmise aux autres éléments de condensation qui lui suivent : Figure 206-B

Dans la pratique, cette élément de condensation servira à simuler le cas où le l'expression du Nu n'est pas uniforme le long du tube : raccordement de plusieurs tube de différent diamètre, distribution spatial de Nu dans un régime non établi.

Les deux types d'éléments de condensation sont illustrés par les figures suivantes :



Au total, le système comporte 32 éléments de condensation pour le tube de 440 mm de longueur. Soit 14 mm de tube par élément de condensation.

5.7 Analyse des résultats

5.7.1 Estimation du coefficient de transfert côté liquide

Dans les travaux de corrélations précédents, nous avons fait l'hypothèse que l'impact du coefficient de transfert du côté du liquide et l'impact de l'épaisseur est négligeable lors des calculs de nombre de Nusselt sec. Pour améliorer la précision, nous avons utilisé directement le modèle AMESIM pour calculer le nombre de Nusselt sec correspondant à chaque essai en prenant en compte cette fois-ci ces deux paramètres. Pour cela, nous avons varié Nu (côté gaz) pour différents valeur de Nu_{liq} de manière à ce que la température de sortie de gaz donnée par le modèle soit identique à la température de sortie de gaz mesurée, tout en s'assurant que la température de paroi externe en amont du tube soit le plus proche possible de la valeur mesurée lors des essais.

A travers des comparaisons successif, sur le tube D18-2mm, nous sommes arrivé à un nombre de Nusselt moyen côté liquide d'environ $Nu_{liq} = 18$. Le dispositif côté bain étant unique pour toutes les dimensions de tube, nous allons garder cette valeur constante pour tous les autres essais.

L'erreur entre la température de paroi externe mesurée et modélisée est donnée par la Figure 207. Nous avons aussi mis sur la même figure l'erreur induite si nous faisons l'hypothèse que cette température est identique à la température du bain.

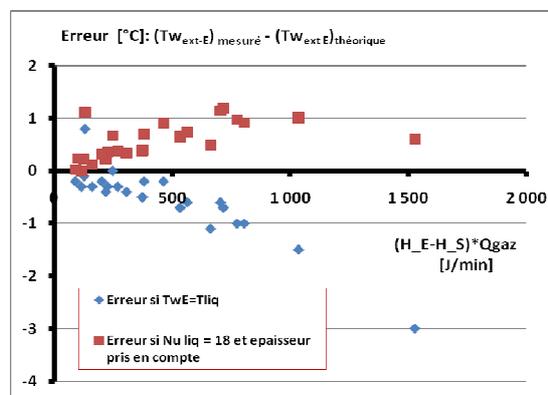


Figure 207 : Erreurs sur la Température de paroi externe en amont du tube si $Nu_{liq}=18$

La figure montre que l'erreur de 3°C constaté à 1500 J/min (flux thermique maximal) descend à 0,5°C si nous prenons en compte la convection du côté du bain.

5.7.2 Evolution psychrométrique

Afin de constater l'évolution du gaz le long de son parcours. Nous avons placé les différentes conditions d'humidité et de température du gaz aux différents endroits du tube sur le diagramme psychrométrique.

Les résultats ont montré que (Figure 208):

- L'humidité et la température du gaz descendent progressivement le long du tuyau jusqu'à atteindre leurs valeurs en sortie d'échantillon.
- L'humidité absolue du gaz et la température descendent simultanément jusqu'à ce que le gaz partiellement surchauffé atteigne la saturation (segment EM).
- Quand la saturation est atteinte, le gaz continue à descendre en température et en humidité absolue en suivant la ligne de saturation.
- Le parcours suivi par les propriétés psychrométriques du gaz est presque indépendant du débit. Par contre, la condition finale de température et d'humidité est plus faible si le débit est faible.

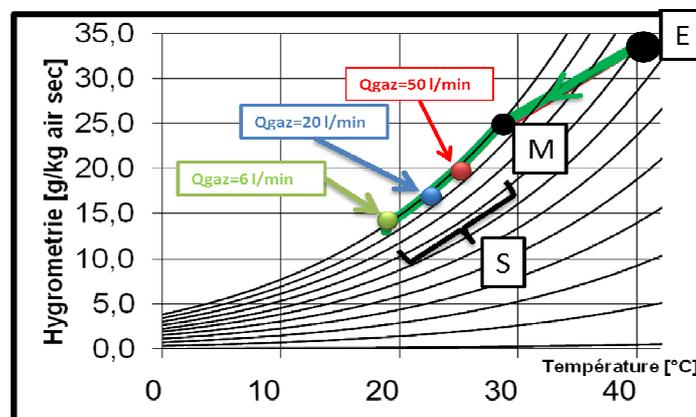


Figure 208 : Evolution du gaz le long du parcours dans le diagramme psychrométrique

5.7.3 Evolution de la température du gaz

Le diagramme psychrométrique précédent permet seulement de constater comment évolue le gaz sans apporter plus d'information sur l'aspect spatial de cette évolution. Pour compléter l'étude, nous avons tracé en fonction du coordonné axial de la portion de tube étudiée, les différentes propriétés du gaz. Les résultats peuvent être résumés par les figures suivantes :

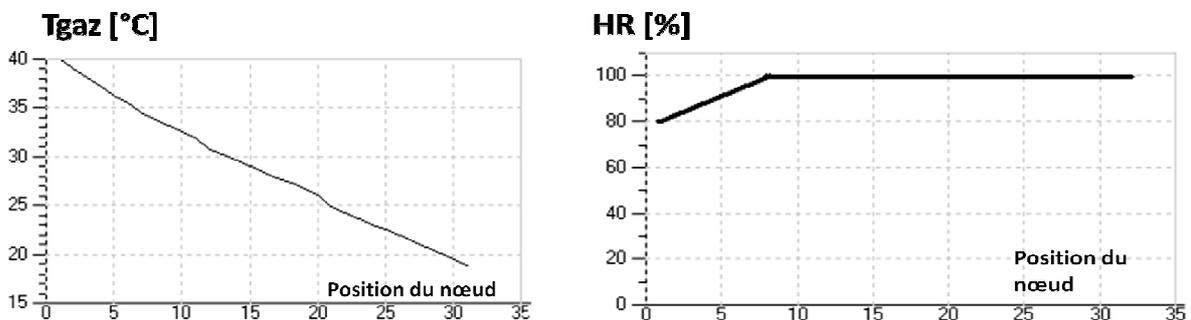


Figure 209 : Evolution de la température et de l'humidité du gaz le long du parcours

L'axe des abscisses représente la place du morceau de tube à étudier par rapport à l'extrémité où est entré le gaz (Pour rappel, les tubes sont subdivisé en 32 morceau de 15 mm de longueur chacun).

L'axe des ordonnées représente la température du gaz à la position donnée ou l'humidité relative du gaz à l'endroit considéré.

Comme il est montré sur la figure, il est apparaît que:

- Dans une certaine partie en amont du tube, l'humidité relative augmente progressivement jusqu'à la saturation. Quand le point de saturation est atteint, l'humidité relative est bloqué à 100% et y reste jusqu'à la sortie du tube tandis que la température continue à diminuer.
- La température évolue de manière homogène tout au long du tube. Aucune modification notable de la vitesse de descente en température n'est constatée au point de saturation (Figure 209-B).

5.7.3.1 Evolution de la température de la paroi interne

Les modèles montrent que les flux thermiques locaux, donc les températures de paroi interne aussi, diminuent progressivement de l'entrée vers la sortie du tube. Ce qui peut entraîner, pour certaines conditions, l'existence d'une zone en amont du tube où les températures de paroi sont encore positives ainsi qu'une zone en aval où elles peuvent descendre en dessous 0°C (Figure 210). Cela pourrait expliquer les résultats expérimentaux montrant l'existence d'un **phénomène mixte** de condensation et de formation de glace à l'intérieur d'un seul tube.

Avant le point de saturation, le flux thermique se limite à la convection et à la condensation créée par le gradient d'humidité et de température entre le gaz et la paroi. Le flux thermique échangé reste donc relativement faible et la paroi est relativement froide. Quand le point de saturation est atteint, on observe une augmentation brusque de la chaleur échangée accompagnée de la montée en température de la paroi interne.

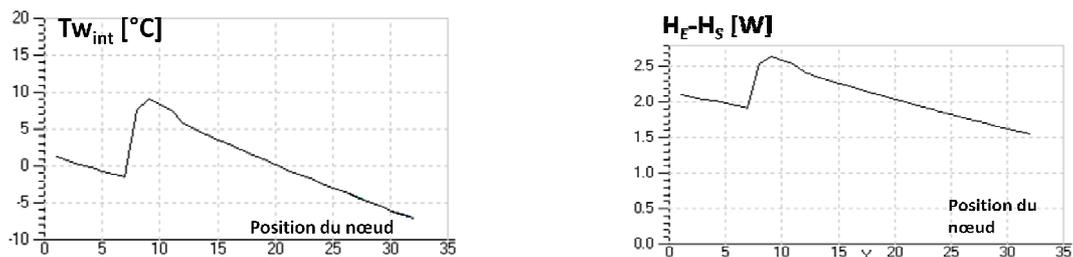
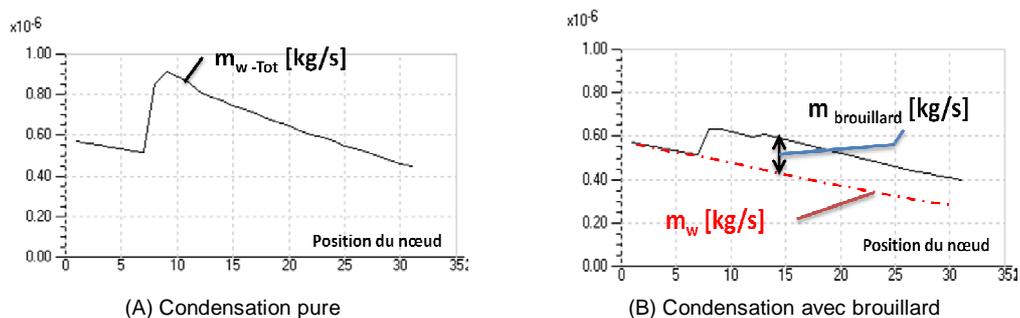


Figure 210 : Evolution des flux échangés et de la température de paroi interne le long du tube

5.7.3.2 Evolution du débit de condensation

Nous avons vu que pour des températures de paroi faibles et des humidités relatives élevées, le débit de condensation total est composé par le débit de condensation causé par le gradient d'humidité ($Y_\infty - Y_w$) et le débit de condensation causé par la stabilisation d'un éventuel gaz sursaturé qui se forme.

Les figures suivantes illustrent la distribution spatiale de ces différents débits de condensation pour le **phénomène de condensation pure** ainsi que le **phénomène de condensation avec brouillard**.



(A) Condensation pure (B) Condensation avec brouillard
Figure 211 : Evolution spatiale des débits de condensation

Comme il est montré sur les figures, le débit de condensation total diminue au fur et à mesure que le gaz avance dans le tube. Après un certain parcours, quand la saturation est atteinte, le débit de condensation total augmente brusquement à cause des phénomènes de stabilisation du gaz sursaturé. L'augmentation du débit de condensation total causé par la **formation de brouillard** est un peu plus faible que celui causé par la **condensation pure**.

5.8 Validations expérimentales

5.8.1 Processus de validation

Les différents essais effectués sur banc ont été testés sur les modèles. L'humidité relative en sortie étant systématiquement égale à 100%, il suffit de comparer les températures du gaz à la sortie des tubes pour vérifier l'adéquation entre les modèles et les résultats expérimentaux.

Les paramètres α , β , γ caractéristiques du nombre de Nu ont été déduites des corrélations obtenues à travers les essais avec le gaz sec. Les valeurs numériques sont détaillées dans le Tableau 24.

Plusieurs approches de l'utilisation de Nu ont été testées :

- Dans un premier temps, les Nu corrélés en régime sec sont pris tels qu'ils et réutilisés dans tous les segments du tubes sans tenir compte de l'évolution de la température et de l'humidité du gaz le long du parcours.
- Ensuite, les mêmes corrélations ont été utilisés mais sont systématiquement mis à jour au fur et à mesure que le gaz se refroidisse (Re et Pr sont modifiés). Seuls les impacts de la diminution de la température sur les propriétés du gaz, sur Pr , Re et sur Nu ont été pris en compte. Nous faisons l'hypothèse que la présence de vapeur ne modifie pas Nu.
- Dans un troisième temps, nous avons utilisé les mêmes corrélations mais contrairement aux cas précédents, l'évolution de l'humidité et de la température ont été pris en compte.

Comme résultat, seul les modèles travaillant avec un Nu constant, évalué à la température du gaz à l'entrée (humidité relative constante = 0%) ont été concluants. Ainsi, il s'avère que l'utilisation d'un Nu corrélé avec des essais sec exige, lors de la simulation, une utilisation directe et une répartition uniforme du Nusselt en question. En particulier, les propriétés de transports utilisés doivent être évaluées dans les conditions sèches mais non par rapport aux gaz humides. Les mêmes constatations ont été signalées par Richards et al. [118].

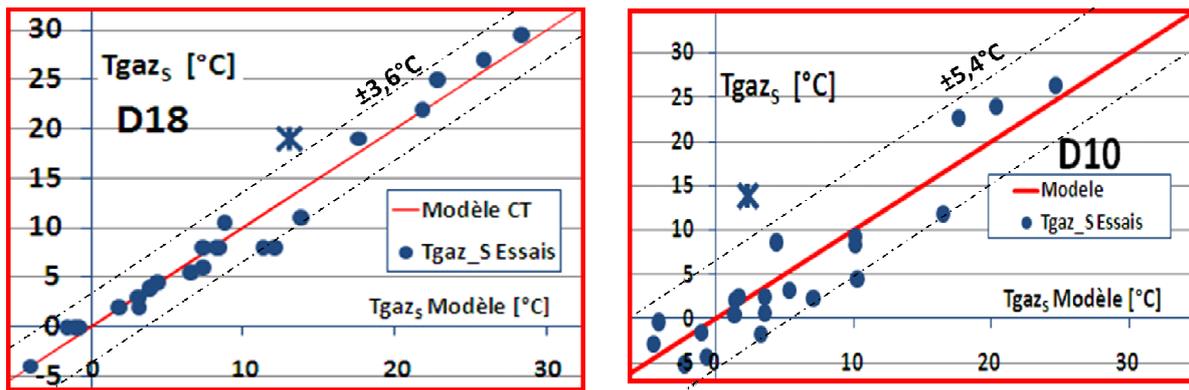
Rappelons que dans certaines études [46], il a été néanmoins possible d'aboutir à des modèles analytiques tout à fait fonctionnels en prenant en compte l'évolution de l'humidité. Ce qui laisse penser que malgré les disparités que nous avons constatés, il est possible d'améliorer la précision si les corrélations de départ elles mêmes ont été développées vis-à-vis du gaz humide mais non du gaz sec.

Enfin, notons que, malgré les bons résultats que nous avons obtenus avec un Nu constant le long du tuyau, la considération de l'impact du refroidissement progressif du gaz n'est pas pour autant totalement aberrant. Au contraire, cela aiderait dans le futur à améliorer la précision à condition que la corrélation de Nu de départ soit développée sur un tube plus court.

5.8.2 Résultat des validations

5.8.2.1 Tube de faible diamètre (D10) et de diamètre moyen (D18)

Les deux phénomènes testés sont la **condensation pure** et la **condensation avec brouillard**. Les résultats montrent que seul le premier type de condensation a pu être validé. Les courbes de comparaisons relatives à ce phénomène sont les suivantes :



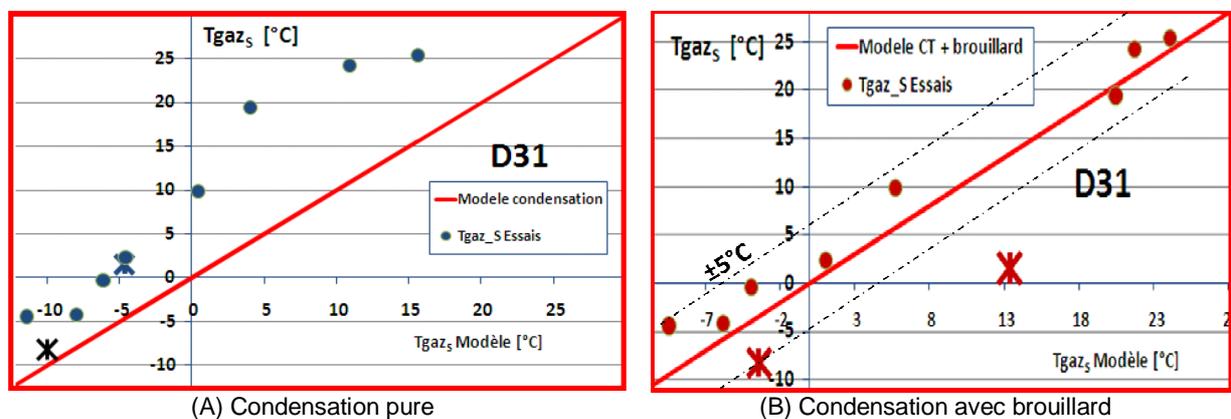
(A) Tube diamètre D18 (B) Tube diamètre D10
 Figure 212 : Comparaison des modèles de condensation pure avec les essais D10 et D18 (Gaz proche saturation)

Les figures montrent que les températures en sortie (donc le reste des autres paramètres) ont pu être prédites avec une bonne précision pour le tube D18. L'erreur maximale est de $\pm 3,6^{\circ}\text{C}$ ($\pm 4,7\%$ par rapport à la plage de température possible). L'erreur est un peu plus élevée pour le tube D10 ($\pm 5,4^{\circ}\text{C}$) mais reste toutefois dans le domaine acceptable.

Dans les deux cas de figure, notons l'existence d'un point (marqué en *) qui est systématiquement éloigné de la droite de corrélation. Ils correspondent aux essais fait à $T_{liq} = -30^{\circ}\text{C}$ et $Q_{gaz}=20 \text{ L/min}$. La déviation constatée peut être expliquée physiquement par la valeur des paramètres d'entrée qui sont plutôt favorable à la **formation de brouillard** qu'à la **stabilisation par condensation isotherme** : D'abord la température de paroi est relativement faible pour assurer la sursaturation du gaz humide, ensuite les conditions de débit est favorable à la création d'une couche limite capable d'isoler le gaz sursaturé de la paroi (Re pas trop élevé), et enfin le débit reste assez élevé de sorte que le gaz n'aura pas le temps de céder à la paroi la chaleur qu'il a reçu lors de la condensation homogène (temps de séjour faible). L'erreur diminue considérablement si le modèle avec brouillard est été utilisé pour les deux points en question.

5.8.2.2 Tube de diamètre élevé D31

Pour le tube de D31, le phénomène de **condensation pure** n'a pas pu être validé à travers les essais. Le modèle sous estime systématiquement la température de sortie du gaz. Le modèle avec **formation de brouillard** est plus adapté. C'est qui est tout à fait évident dans la mesure où dans cette condition, la vitesse de gaz est relativement faible de sorte que des films laminaires peuvent s'établir entre le gaz et la paroi empêchant ainsi le bon contact entre le gaz sursaturé et la paroi froide. Notons toutefois l'existence de deux points en (*) qui n'ont pas pu être validés par le modèle en question, mais qui ont été validé par le modèle de **condensation pure**. Les points en question ont été obtenus à débit de gaz faible.



(A) Condensation pure (B) Condensation avec brouillard
 Figure 213 : Comparaison modèle de condensation et modèle de condensation pour D31 (Gaz proche saturation)

5.8.2.3 Explication possible de la formation de brouillard si le diamètre est élevé

Hie Chan Kang [131] montrait que dans le domaine laminaire, pour des faibles différences de température entre le gaz saturé et la température de paroi, il est possible de modéliser la condensation sans introduire le concept de brouillard. Par contre, si les deux températures sont très différentes le phénomène de brouillard devrait être pris en compte.

Idéalement la formation de brouillard peut être décrite par le modèle de la figure suivante :

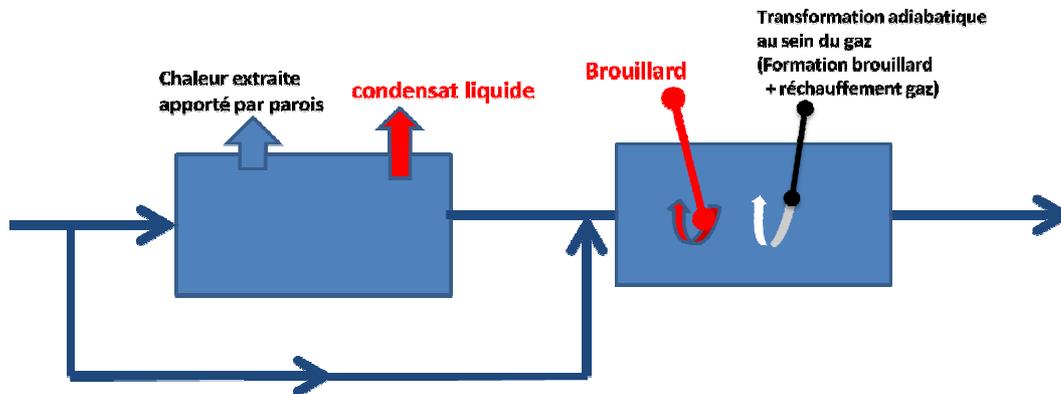


Figure 214 : Explication qualitative de la formation de brouillard

Le gaz humide est divisé en deux parties. Une partie du gaz est en contact avec la paroi, une fraction de la vapeur que contient cette partie condense sur la paroi et est refroidie jusqu'à la température de paroi T_w . La partie restante reste dans la veine et garde son humidité Y_E sa température initial T_{gaz_E} . Les deux gaz se rencontrent ensuite pour donner un gaz à une température T ($T_{gaz_E} > T > T_w$) ainsi que des particules en suspensions (phénomène similaire à la formation des brouillards d'advection).

Ainsi la repartitions de l'eau qui condense sous forme liquide et sous forme brouillard est dictée par la répartition du débit de gaz qui reste dans la veine et celui qui entre en contact avec la paroi. En régime laminaire, le gaz dans la veine y reste et n'est pas en contact avec la paroi, on peut donc dire que le débit de gaz qui reste intact est important, ce qui explique la formation de brouillard en régime laminaire (D élevé). Par contre, à D faible (vitesse de gaz élevée), le régime d'écoulement entre en turbulence et la totalité du gaz entrera en contact avec la paroi. Ainsi la condensation se fera essentiellement à cet endroit.

A travers des essais de condensation en convection naturelle d'une mélange d'air et de vapeur sur une paroi cryogénique, Dusan [132] a constaté que le brouillard se présente sous forme de particules de glace ou de liquide dispersées de manière chaotique à l'intérieur d'une couche de gaz qui se trouve au voisinage de la paroi froide.

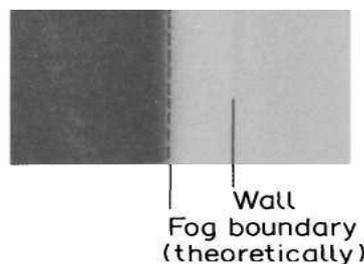


Figure 215 : Couche de brouillard selon [132]

Pour un système purement diffusif (fluide stagnant), Rosner [133] a montré que cinétiquement la formation de brouillard pour une température de gaz donnée est conditionnée par un certain minimum

de température de paroi et d'humidité relative (courbe C2 sur la Figure 216). Plus l'humidité est faible, plus la température de paroi requise est faible. Au dessus de la frontière limite C2 de la figure suivante, les phénomènes de nucléation homogène sont trop lents pour entrer en concurrence avec la condensation sur les parois. Il n'y aura pas dans ce cas la formation de brouillard.

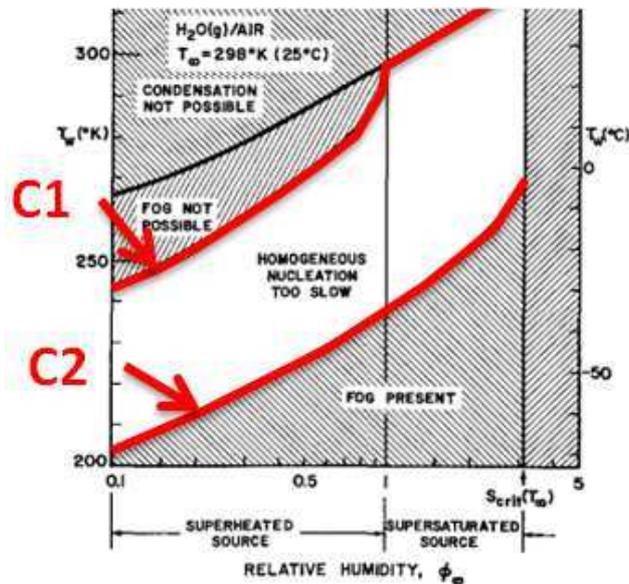


Figure 216 : Condition de formation de brouillard pour un air humide à 25°C selon Rosner [133]

La figure montre que pour un gaz saturé à 25°C la formation de brouillard est attendu à température de paroi aux environ de -35°C. La température critique en question peut augmenter davantage pour le cas des gaz saturés à 40°C tel que ceux étudiés dans lors de nos essais.

Notons aussi qu'en présence de particules de nucléi en suspension dans le gaz (particules hydrophiles, particules d'eau en suspension causé par la pulvérisation des films de condensat, particules d'huile en présence de tensioactif, etc.), la limite cinétique peut être vaincue et la température d'apparition de brouillard augmente davantage. Dans tous les cas, cette température ne peut dépasser une certaine limite au delà de laquelle la formation de brouillard n'est plus possible thermodynamiquement quelque soit la quantité de nucléi (courbe C1 sur la Figure 216).

5.9 Application du modèle

5.9.1 Prédiction des phénomènes

5.9.1.1 Approche utilisée

Nous avons vu que les phénomènes en jeu peuvent être prédits en se servant de la température moyenne de paroi interne et du débit total de condensation. D'autre part, nous savons aussi que théoriquement, la cristallisation de l'eau et la formation de givre sont conditionnées par la possibilité d'avoir une température de paroi inférieure à 0°C. Ce qui laisse croire qu'il est possible d'établir un meilleur critère de prédiction des phénomène en se servant de la distribution de la température de paroi à la place de sa valeur moyenne.

Pour vérifier cela, nous avons utilisé le modèle AMESIM pour déterminer le profil de la température de paroi lors de chaque essai et nous avons établi des cartographies des phénomènes observés lors des essais en fonction de ces profils de température de paroi interne ainsi que des débits de condensation. Les paramètres caractéristiques des profils de températures testés sont (voir Figure 217) :

- La température maximale de la paroi qui est généralement la température de la paroi à l'endroit où le gaz atteint la saturation (à quelque centimètre de l'entrée selon l'humidité relative réel du gaz introduit) : $T_{w_{int-Max}}$
- La température minimale de la paroi qui est la température à l'extrémité du tube près de la sortie du gaz : $T_{w_{int-Min}}$
- La température de paroi à l'entrée du tube $T_{w_{int-E}}$.
- La longueur de la portion de tube ayant une température supérieur à 0°C . Autrement dit, c'est la coordonnée axiale du tube à laquelle la température de paroi est égale à 0°C : $X_{T_{w-int}=0}$. Pour des raisons pratiques, il est exprimé en termes de position du nœud par rapport à l'entrée du tube.

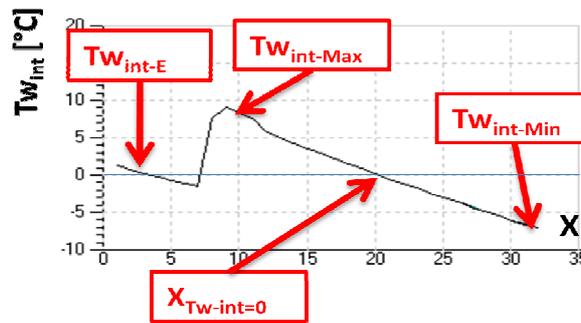


Figure 217 : Paramètres caractéristiques du profil de température de paroi interne

5.9.1.2 Résultats obtenus

5.9.1.2.1 Cartographie des phénomènes en fonction de la température de paroi maximale et du débit de condensation

La combinaison du débit de condensation avec la température de paroi maximale a permis de départager clairement les différents types de phénomène observé. Les résultats sont les suivants:

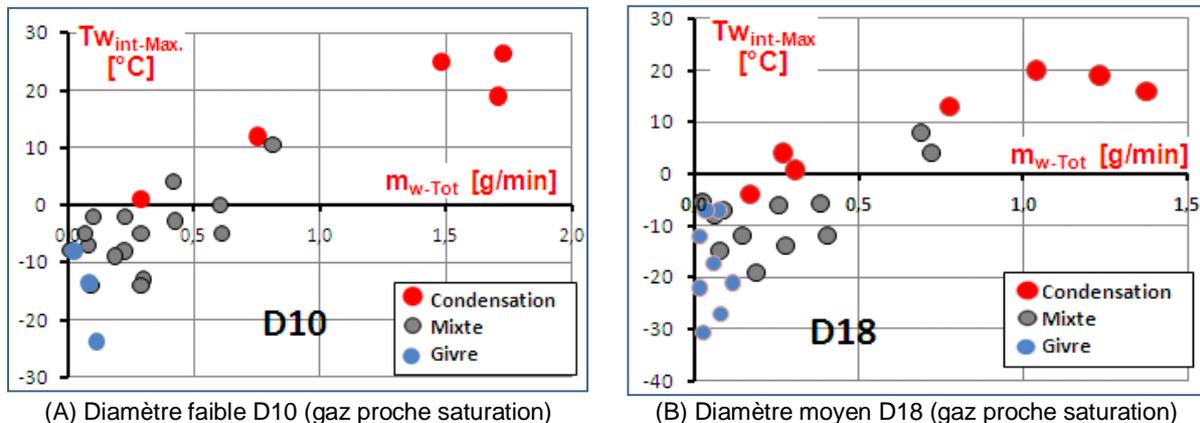


Figure 218 : Phénomènes observés en fonction de la température de paroi maximale calculées et du débit de condensation (D10 et D18)

La figure montre que pour les deux tubes :

- Les phénomènes de condensation n'apparaissent qu'à partir d'une certaine température de paroi $T_{w_{int-Max}}$. Elle est de 0°C pour D10 et de -5°C pour D18.
- Le phénomène de givrage apparaît dès que la température de paroi $T_{w_{int-Max}}$ est inférieure à -8°C et à condition que le débit de condensation ne dépasse le $0,12\text{ g/min}$. Si le débit de condensation est plus élevé, le givre est remplacé par un **phénomène mixte** (impact de l'inondation, etc.)

5.9.1.2.2 Cartographie des phénomènes en fonction de la température de paroi minimale et maximale

Les cartographies précédentes sont certes précis mais ne donne aucune visibilité vis-à-vis des tubes plus court (utilisation du débit de condensation total qui est propre au tube testé). Pour palier à cela, nous avons établi la cartographie des phénomènes en fonction de la température de paroi maximale (près de l'entrée) et la température de paroi minimale (près de la sortie). Les résultats sont les suivants :

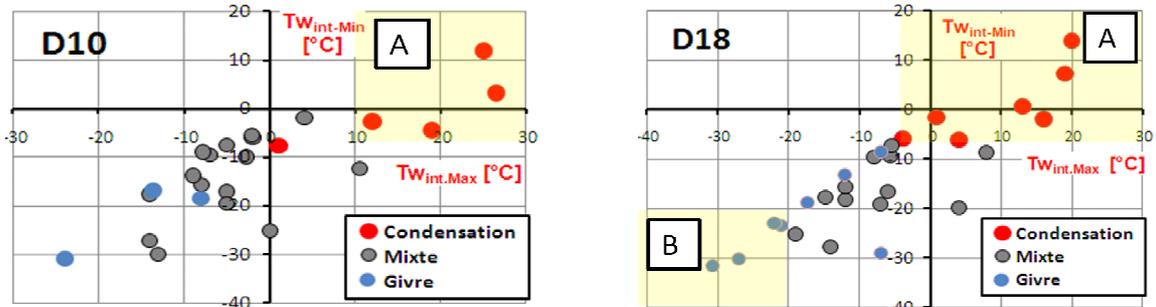


Figure 219 : Phénomène observés en fonction de la température de paroi maximale et minimale calculées (D10 et D18)

Les deux figures montrent l'existence de deux zones dont les phénomènes attendus sont tout à fait identifiable quelque soit la longueur du tube et les conditions opératoires.

- La zone A représente la **zone de condensation**. Tant que les deux températures aux deux extrémités du tube restent à l'intérieur de cette zone, la cristallisation de l'eau est évitée.
- La zone B représente la **zone givrante**

A l'intermédiaire de ces deux zones, les phénomènes peuvent être du givrage ou du **phénomène mixte**.

5.9.2 Prédiction des risques de bouchon

De la même manière que la prédiction des phénomènes décrite précédemment, nous avons aussi utilisé les paramètres caractéristiques des profils de températures paroi interne pour déterminer le risque de bouchon.

5.9.2.1 Cartographie des pressions en fonction de la température de paroi minimale et du débit total de condensation

La cartographie des pressions en fin d'essais en fonction de la température de paroi minimale et du débit de condensation a permis d'obtenir les résultats suivants :

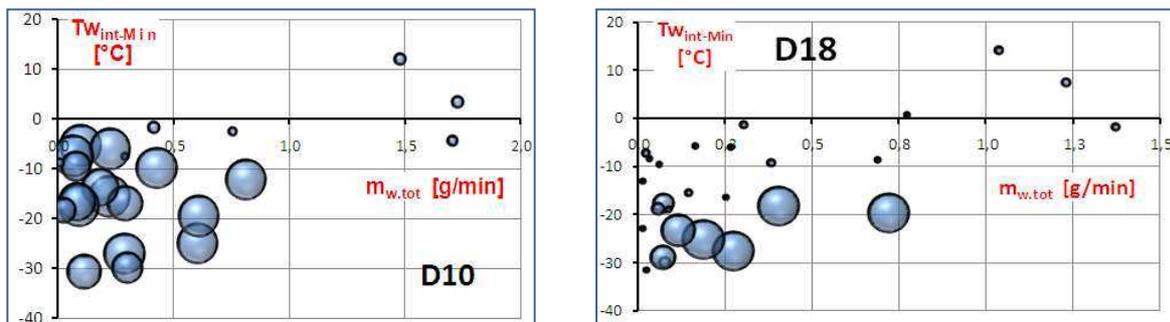


Figure 220 : Pression en fin d'essai en fonction de la température de paroi minimale calculée et du débit de condensation (D10 et D18)

La figure montre que :

- Pour D10, seul la température de paroi a une influence sur la possibilité de bouchon. Le bouchon est possible dès que la température de paroi minimale (près de la sortie) est inférieure à -1°C.
- Pour D18, on retrouve la même tendance que celui qu'on a obtenu vis-à-vis de la température moyenne de paroi (voir Figure 197). Par contre le critère de bouchon vis-à-vis de la température minimale de paroi descend à -15°C mais non -6°C comme au auparavant.

5.9.2.2 Relation entre la position de bouchon et le profil de température avec D10

Afin de constater l'impact de la distribution de la température de paroi sur la position des bouchons avec D10, nous avons confronté les positions des bouchons qui ont été identifiées lors des essais (paragraphe §4.5.3.1) avec le profil de température de paroi interne calculé par le modèle. Les résultats sont détaillés dans la Figure 221. L'axe des abscisses représente la coordonné $X^*_{Tw-int=0^\circ C}$ (adimensionnée par la longueur totale) du tube où la température de paroi descend en dessous de 0°C. L'axe des ordonné $X^*_{Bouchon}$ représente la coordonnée (adimensionnée) du tube où commence le bouchon.

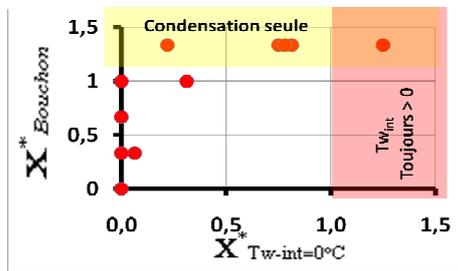


Figure 221 : Lieu d'origine des bouchons de glace en fonction de la distribution de la température de paroi interne

La Figure 221 montre que la formation de bouchon n'était plus possible (caractérisé par $X^*_{Bouchon} > 1$) dès que plus de 25% de la paroi à une température positive (caractérisé par $X^*_{Tw-int=0^\circ C} > 0,25$). Si la totalité de la paroi du tube est à une température négative ($X^*_{Tw-int=0^\circ C}$ est égale à 0), le bouchon peut se trouver à n'importe quelle portion du tube mais pas forcément à l'entrée. Ce qui confirme le fait que, même si la température locale de paroi est négative, les condensats peuvent parcourir une certaine longueur avant de se cristalliser. Les critères de bouchon établis avec D10 est donc propre à la longueur testé, la température minimale requise peut être beaucoup plus faible pour un tube plus court.

5.9.2.3 Cartographie des pressions en fonction de la température de paroi minimale et maximale

Si nous traçons la cartographie des profils de pressions en fonction de la température de paroi maximale et de la température de paroi minimale, on obtient les figures suivantes :

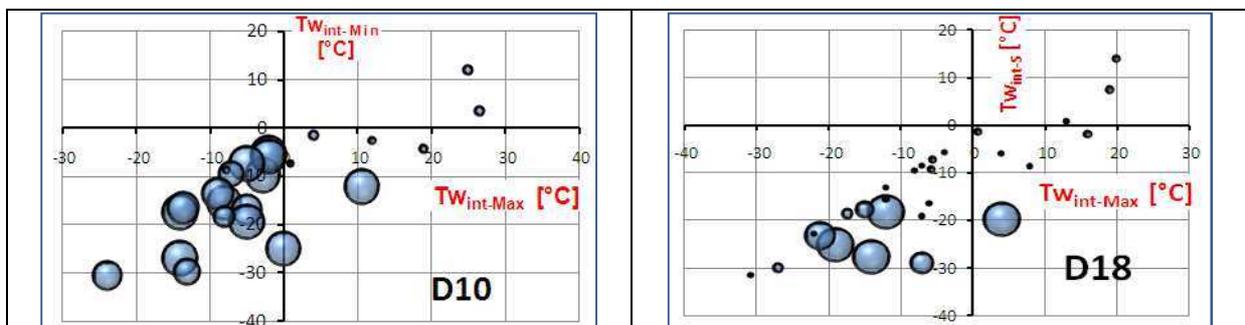


Figure 222 : Pression en fin d'essai en fonction de la température de paroi minimale et maximale calculées (D10 et D18)

La figure confirme que :

- Pour D10, le bouchon est envisageable dès que la température de paroi minimale descend en dessous de -1°C . Par contre, il n'est pas nécessaire que la température de paroi maximale soit négative aussi.
En d'autres termes, on peut donc dire qu'une configuration conduisant à une température de paroi $T_{w_{int-Max}}$ positive peut conduire au bouchon ou non selon la $T_{w_{int-Min}}$ qui est fonction de la longueur du tube. Par contre, une condition opératoire conduisant à $T_{w_{int-Max}}$ négative est systématiquement bouchante quelque soit la longueur du tube.
- Pour D18, la tendance n'a pas pu être mise en évidence. C'est qui est tout à fait explicable puisqu'à cette diamètre, le débit de condensation joue aussi un rôle mais non seulement la distribution de la température de paroi.

5.9.3 Prédiction de la mobilité de l'eau en diamètre moyen D18 (D=18 mm)

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence qu'en diamètre moyen, les différents phénomènes observés peuvent être quantifiés en utilisant la notion de la **mobilité de l'eau**. Si nous établissons la cartographie des différentes mobilités de l'eau en fonction du profil de la température de paroi calculé par le modèle, on obtient la Figure 223. L'axe des abscisses représente la température de paroi maximale (à l'entrée ou près de l'entrée), l'axe des ordonnées représente la température de paroi minimale (T° paroi à la sortie), la taille de sphère représente la mobilité de l'eau.

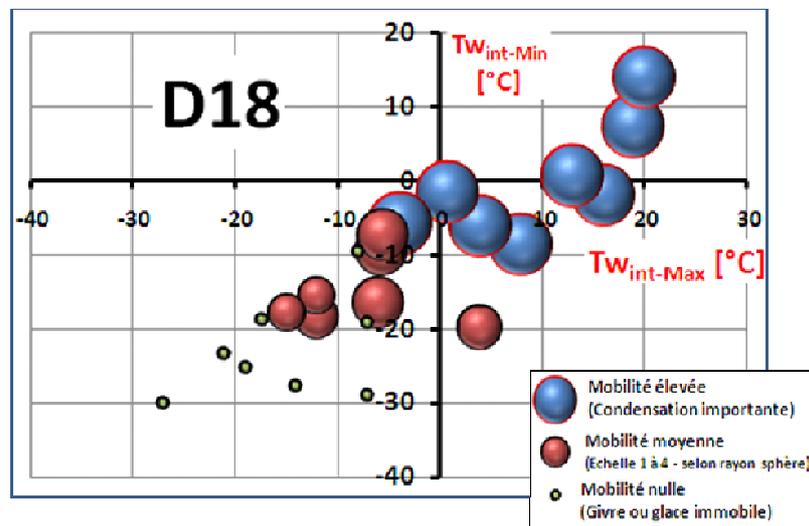


Figure 223 : Cartographie de la mobilité de l'eau avec D18 en fonction du profil de température de paroi calculé

La figure montre que la **mobilité de l'eau** peut être liée au profil de la température de paroi. La cartographie en question peut être grossièrement divisée en 3 zones :

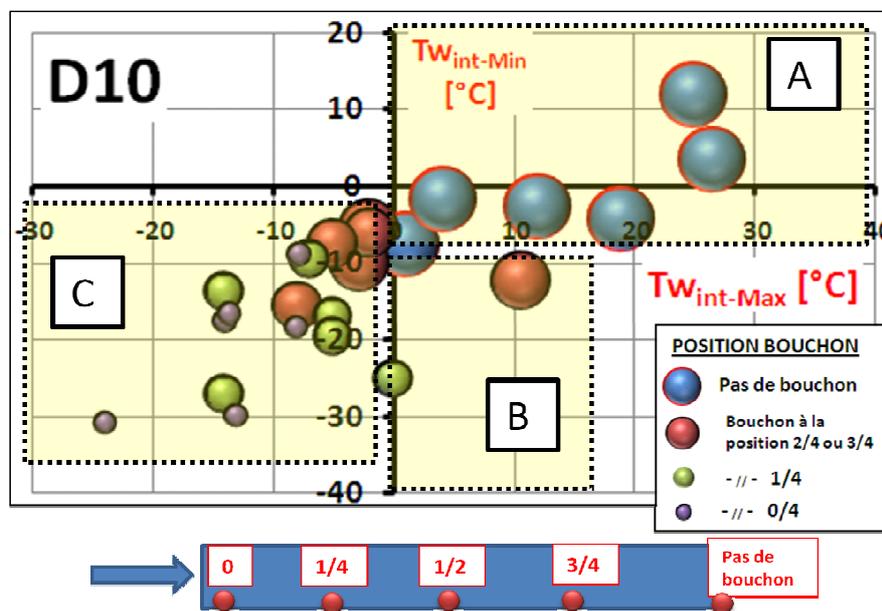
- Si les températures à l'entrée et à la sortie du tube sont élevées, le phénomène est dominé par la condensation et la **mobilité de l'eau** est maximale. En configuration horizontale, cette zone est **non bouchant**. Par contre, compte tenu de la mobilité élevée de l'eau, il est clair que l'orientation des tubes, l'existence des points de rétention d'eau et la géométrie joueront un rôle important si les conditions opératoires aboutissent dans la zone en question.
Du point de vue pratique, la zone en question peut être protégée du bouchon si on favorise le parcours libre de l'eau : configuration horizontale ou verticale descendant, tube lisse et rectiligne, faible quantité d'huile.
- Si la température de paroi à la sortie est faible, la mobilité sont à leur valeur moyenne (condensation liquide avec **solidification progressive**, **bloc de condensat solidifié** en aval du tube, **trainé de condensat solidifié**, etc. – détails disponible dans le paragraphe §4.5.1.3). Dans ce cas de figure, l'impact des différents paramètres (orientation, géométrie, etc.) affectant le libre parcours des condensats liquides peuvent avoir ou non de l'influence. Cette influence varie avec l'intensité réelle de la **mobilité de l'eau**.
- Pour les faibles valeurs de température de paroi à l'entrée et à la sortie, la **mobilité de l'eau** est nulle. Ainsi le risque de bouchon sera indépendant des géométries et des orientations des

tubes. Seules les conditions opératoires de température, d'humidité et de débit pourraient modifier les résultats.

5.9.4 Prédiction de la position du bouchon en diamètre faible (D10)

Pour les diamètres faibles (D10), nous avons montré que le bouchon commence à certain endroit avant de se propager dans le reste du tube qui est initialement intact. Nous avons vu aussi que la position de ces bouchons peut être corrélée avec les différentes conditions opératoires.

Dans ce paragraphe, nous allons montrer que les différents paramètres (température de rosée, débit, température de paroi, température de gaz) qui dictent la position du bouchon peuvent être réduits en deux paramètres qui sont la température maximale de paroi interne et la température minimale de paroi interne. En se servant des profils de température de paroi interne calculés par le modèle pour les différents points testés sur le banc, nous avons établi la cartographie de la position des bouchons selon la figure suivante. Les axes représentent les températures minimale et maximale à la paroi interne et le rayon des sphères représente la position du bouchon par rapport à l'entrée du tube.



Notation des positions des bouchons

Figure 224 : Cartographie des positions des bouchons avec D10 en fonction du profil de température de paroi calculé

La figure montre que la position du bouchon se trouve de plus en plus en aval quand les deux températures augmentent. On distingue 3 zones différentes :

- Quand les deux températures sont élevées, l'eau reste à l'état liquide et le bouchon n'apparaît pas (Position fictive du bouchon à la position 4/4 c'est-à-dire au-delà de la sortie du tube) : Zone A
- Quand la température de paroi interne à l'entrée est élevée mais la température de paroi interne à la sortie est faible, le bouchon apparaît mais se trouve proche de la sortie (position 3/4) : Zone B.
- Quand les deux températures sont faibles, le bouchon se trouve en milieu du tube (position 1/2) ou près de la sortie (position 3/4) : Zone C
- Si les deux températures sont très faibles, le bouchon se trouve près de l'entrée (position 1/4) voire à l'entrée du tube (position 0) : Zone C.

Ces différents résultats permettent de prédire la longueur de la portion de tube épargnée par le bouchon. Ainsi, il est possible d'éviter le bouchon en jouant sur la longueur du tube de manière à ce que la température minimale de la paroi $T_{w_{int-Min}}$ (température de paroi près de la sortie du gaz) se trouve dans la zone A

5.9.5 Prédiction de l'épaisseur limite de glace et des givres (en D élevé)

Dans le paragraphe §4.5.7.3, nous avons vu que pour les tube de diamètre élevé, la hauteur des couches de glace et des couches de givre est limitée à une certaine hauteur dans laquelle la température de la paroi du couche peut être maintenue inférieure à 0°C. Pour vérifier cela, nous avons modifié le modèle décrit précédemment en y ajoutant une couche de conduction supplémentaire entre la paroi interne du tube et le gaz. Le modèle utilisé se présente comme suit :



Figure 225 : Modélisation de 1D en présence de couche de givre ou de glace

La conductivité de la couche de conduction supplémentaire a été modifiée selon le cas. Pour les givres, la conductivité varie avec beaucoup de paramètres. Il a été impossible, dans le cadre de cette étude de déterminer sa valeur exacte. On est donc parti de la conductivité maximale des givres rencontrés dans la bibliographie [134] [135]. Sa valeur est de $k_f = 0,25 \text{ W/mK}$. Pour la glace, la conductivité est beaucoup plus importante, elle est aux environs de $k_{ice} = 2,3 \text{ W/m K}$ [2].

Considérons le cas le cas de l'essai sur D31 correspondant aux conditions opératoires suivantes :

T_{gaz_E}	Q_{gaz}	T_{liq}	RH_E	Phénomène en jeu
40°C	50 L/min	-30 °C	100%	Condensation avec formation de brouillard

Tableau 25 : Essai de référence en pour la compréhension de l'impact thermique des couches de givre et de glace (Maximum de flux thermique échangé)

5.9.5.1 Température de la surface du givre ou de la glace

En se servant du modèle de la Figure 225, on peut tracer la température à la surface pour différents hauteur de givre ou de glace sur la paroi. Le résultat obtenu est illustré par la figure suivante :

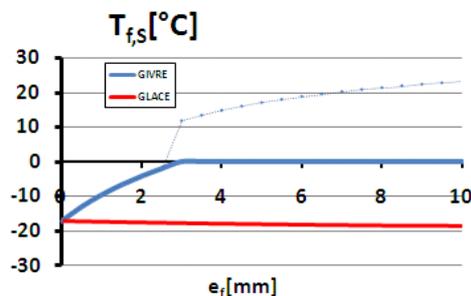


Figure 226 : Température de la paroi du givre et de la glace en fonction de l'épaisseur

La figure montre que pour un givre, la température à la surface peut dépasser de 0°C dès que la hauteur va au-delà de 3mm (courbe en pointillé). (Dans la réalité, cette température se limite à 0°C tant qu'il y a encore de la glace dans le tube). Le phénomène de givre est alors substitué par la

condensation de sorte que le givre déjà en place devient de plus en plus dense. A termes, il peut se transformer en bloc de glace compacte (perméation de l'eau).

Si la couche au dessus de la paroi est constitué par de la glace, l'impact de la résistance thermique à l'intérieur du couche est négligeable, la température de la surface de la glace est alors presque identique à la température de la paroi interne du tube quelque soit la hauteur de la couche.

5.9.5.2 Hauteur maximale du givre en fonction de la température

La hauteur maximale $e_{f - Max}$ pour que la température de la paroi du givre soit inférieure à 0°C constitue la hauteur maximale possible du givre sans qu'il soit mouillé par du condensat. Cette hauteur varie en fonction des conditions opératoires. Si nous fixons la température de paroi, le débit du gaz et l'humidité relative selon le Tableau 25, on peut tracer la variation de cette hauteur maximale pour différentes températures de gaz. On obtient le résultat suivant :

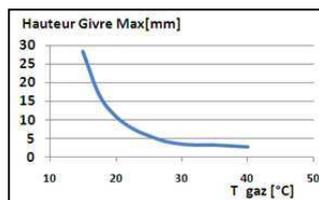


Figure 227 : Hauteur maximale de givre en fonction de la température du gaz saturé

Ce qui montre que la hauteur maximale possible augmente très vite quand la température du gaz diminue. Pour les conditions de température de paroi et de débit testées ici, cette hauteur limite dépasse le rayon du tube (D31) dès que la température du gaz descend en dessous de 17°C. Autrement dit, la notion de hauteur limite ne s'applique pas aux conditions en questions puisque cette hauteur ne sera jamais atteinte avant que le tube soit complètement bouché par le givre.

5.9.5.3 Profil de la hauteur maximale du givre à l'intérieur du tube D31

L'existence de la hauteur limite peut aussi être appliquée à n'importe quelle portion du tube. Comme la température du gaz diminue le long de son parcours, il est évident que la hauteur limite du givre devient de plus en plus importante au fur et à mesure que la coordonnée axiale de la portion de tube augmente. Si nous portons la distribution de la température de gaz à l'intérieur du tube donnée par le modèle AMESIM sur la Figure 227, on peut déterminer l'épaisseur maximale de givre que pourrait contenir chaque portion constitutive du tube testée. Pour l'essai avec D31 défini par les consignes du Tableau 25, on obtient le profil d'épaisseurs suivant :

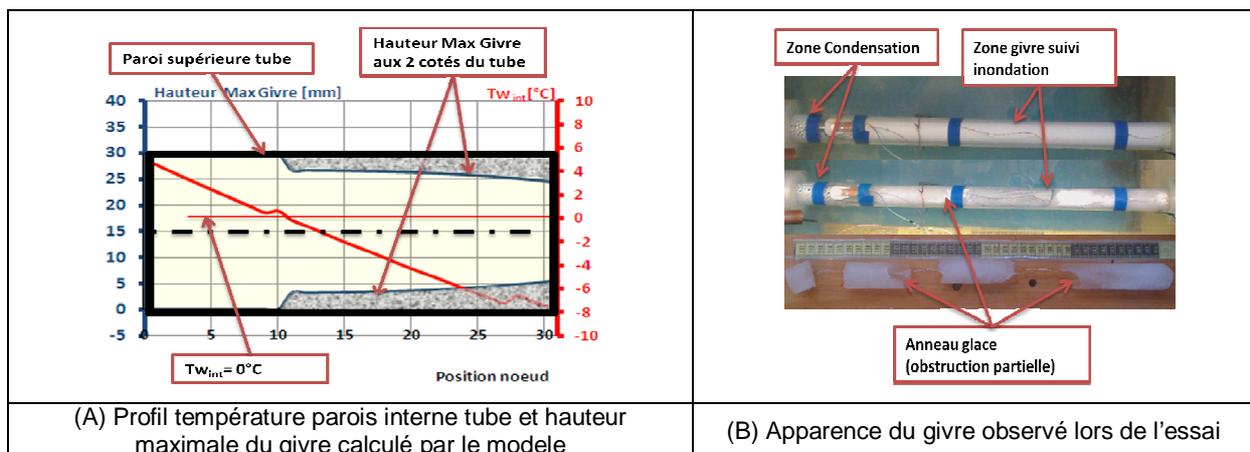


Figure 228 : Explication physique des passages libre à l'intérieur des givre observé lors des essais

La Figure 228-A montre que la hauteur maximale du givre possible est plus faible que le rayon du tube. Lors des essais (Figure 228-B), cela se manifeste par l'apparition de la condensation au dessus

du givre (ainsi que l'inondation de celui-ci) après quelques heures d'essais. La courbe a aussi permis d'expliquer l'obtention d'une importante passage non bouché à l'intérieur de l'anneau de givre compact malgré la quantité importante d'eau liquide disponible pour s'y solidifier. La majeure partie de ce dernier étant évacuée sous forme liquide à la sortie du tube.

En considérant l'évolution du profil de température de la paroi. La Figure 228-A montre que la température de paroi du tube reste positive jusqu'au dixième nœud (environ premier tiers de la longueur du tube). C'est qui explique l'obtention d'une zone condensante à cet endroit au début de l'essai.

Rappelons toutefois que la hauteur maximale autorisée peut évoluer à long termes (au-delà des 3 heures d'essai) compte tenu du compactage progressif du givre par les phénomènes d'inondation et de perméation. A terme, les givres peuvent être aussi compacts que la glace et la hauteur limite devient plus élevée que le diamètre du tube lui-même (donc risque bouchon total).

Notons aussi que la hauteur limite peut diminuer au fur et à mesure que le bouchon se forme. En effet, l'augmentation de la vitesse des gaz à cause de la diminution du passage ainsi que la création des vortex due aux bouchons peuvent faire augmenter le coefficient de transfert du côté du gaz. On observe donc la montée en température de la paroi du givre. Ce qui pourrait entraîner l'existence d'une nouvelle hauteur limite plus faible.

5.10 Analyse de sensibilité vis-à-vis des phénomènes

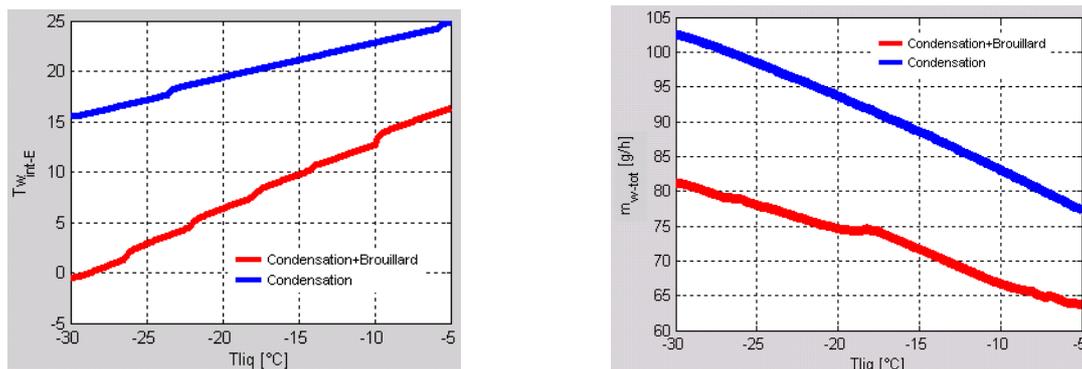
5.10.1 Impact de la formation du brouillard

Pour comprendre l'impact des phénomènes de brouillard sur le transfert thermique, considérons le cas du tube D18 basé sur les conditions suivantes :

Q _{gaz}	T _{gazE}	HR _E	T _{liq}	Nu _{liq}
50 L/min	40 °C	100 %	-30°C	Infini

Tableau 26 : Essai de référence pour la compréhension de l'impact thermique des brouillards

Si nous gardons constants tous les paramètres et ne modifions que la température de paroi, l'application du modèle de **condensation pure** et du modèle de **condensation avec formation de brouillard** aboutit aux figures suivantes :



(A) Impact sur la température de paroi à l'entrée du tube (température de paroi maximale)

(B) Impact sur le débit de condensation total

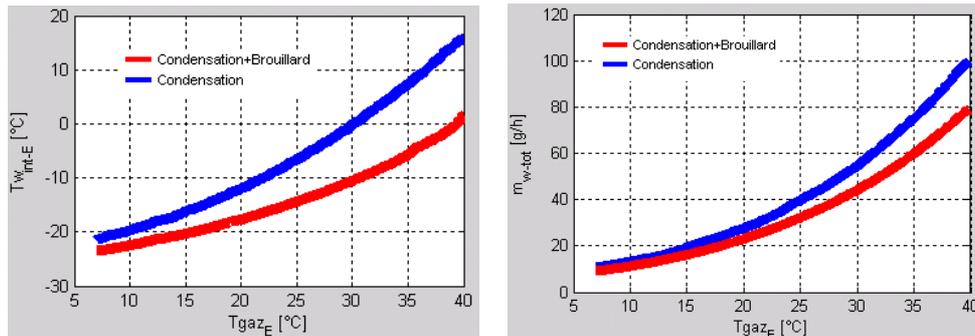
Figure 229 : Impact thermique du brouillard en fonction de la température du bain

La Figure 229-A montre que le phénomène de brouillard entraîne une diminution de la température de paroi interne du tube. Dans l'étude en cours, nous avons pris comme point de comparaison la température de paroi à l'entrée du tube où le transfert thermique est à son apogée.

L'impact du brouillard sur la température de paroi est plus important à température de bain faible qu'à température de bain élevée. La diminution de température de paroi est d'environ 15°C à température de bain de -30°C alors qu'elle est de 10°C à température de bain de -5°C.

Comme il est montré sur la Figure 229-B, la formation de brouillard fait diminuer la quantité totale de l'eau qui condense (brouillard + condensat liquide). La différence pourrait être encore plus élevée si on suppose que la totalité du brouillard est entraîné par le gaz et ne participe pas à la formation des bouchons.

Maintenant, si nous maintenons constants tous les paramètres et modifions la température du gaz saturé (donc l'humidité et le point de rosée aussi), on obtient les résultats des figures suivantes :



(A) Impact sur la température de paroi à l'entrée du tube

(B) Impact sur le débit de condensation total

Figure 230 : Impact thermique du brouillard en fonction de la température du gaz saturé

Comme on le voit sur les figures, l'impact du brouillard sur la température de paroi et le débit de condensation total est beaucoup plus important à températures de gaz et de rosée élevées. A faibles températures de gaz et de rosée, les résultats obtenus sont presque identiques.

5.10.2 Impact de la cristallisation

Dans tous modèles que nous avons utilisés jusqu'à maintenant, nous avons fait l'hypothèse que seule la chaleur latente de condensation joue un rôle dans le transfert thermique de changement de phase. Ce qui est tout à fait acceptable compte tenu de la valeur numérique des chaleurs latentes L_v et L_s (Tableau 21).

Afin d'évaluer les impacts que pourrait apporter la présence simultanée de la cristallisation de l'eau et de la condensation sur les transferts thermiques, nous avons remplacé la valeur numérique de la chaleur latente utilisée dans les modèles précédents par la chaleur latente d'ablation de l'eau (condensation + solidification). En se servant des paramètres d'entrée du Tableau 26 (conditions donnant le maximum de flux thermique), l'impact de la solidification vis-à-vis du profil de température de paroi interne est illustré par la figure suivante :

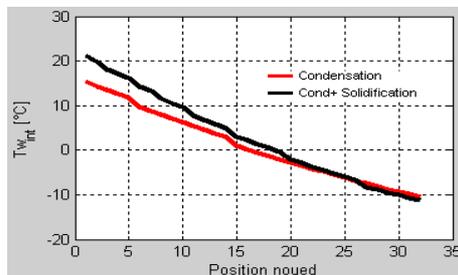


Figure 231 : Impact de la solidification de l'eau sur le profil de la température de paroi interne

La figure montre que la solidification fait reculer de quelques millimètres (2 nœuds → 2x13 mm) l'endroit où la température de paroi descend en dessous de 0°C ($X_{T_{w\text{-int}}=0^\circ\text{C}}^*$). Les deux profils de

températures diffèrent d'environ 5°C à l'entrée du tube et sont presque identiques à la sortie. Comme la cristallisation ne peut commencer qu'au-delà de $T_{w-int} = 0^{\circ}\text{C}$, on peut donc dire que la différence entre les deux profils de température de paroi interne ne s'applique qu'à partir de $X^*_{T_{w-int}=0^{\circ}\text{C}}$. La différence maximale réelle entre les deux profils de température descend alors à 2°C.

En termes de débit de condensation (ou débit d'ablimation), aucune différence nette n'a été constatée pour les deux cas de figure. En condensation, le débit total de condensation est de 102 g/h et en condensation avec solidification elle est de 106 g/h.

5.11 Analyse de sensibilité des paramètres d'entrée

5.11.1 Etape 1 : Modélisation autour de la matrice de test principale

Les principaux paramètres d'entrée sont la température du gaz qui est identique à la température de rosée (si le gaz est saturé), la température du bain, le débit de gaz, le nombre de Nusselt et l'épaisseur de la paroi.

Vu l'interaction entre l'influence de la température de rosée (= T_{gaz}) et l'influence du débit sur la quantité d'eau et l'énergie introduites dans le système, nous construisons notre matrice de test de sensibilité autour de la combinaison de ces deux paramètres. Nous garderons constants les paramètres restants. La matrice de test principale est la suivante :

Paramètres	T_{dE}	Q_{gaz}	Nu	e	T_{liq}
Niv -1	15 °C	7 L/min	6	1 mm	-30°C
Niv +1	40 °C	40 L/min			

Tableau 27 : Matrice de test principale pour l'étude des sensibilités des paramètres

La température de rosée testée a été minorée à 15°C compte tenu du fait qu'à point de rosée faible, l'échange est essentiellement de type sensible et l'étude qui en découle ne présente pas beaucoup d'intérêt.

Rappelons que le nombre Nu lui-même est en général fonction du débit. Toutefois, pour notre cas nous considérerons les deux paramètres de manière indépendante. Autrement dit, nous allons considérer l'influence du débit en termes de quantités de gaz et de vapeur apportées mais nous ne prendrons pas en compte son impact vis-à-vis du coefficient de transfert.

L'application du modèle aux divers essais du Tableau 27 permet d'obtenir les points A, B, C et D de la Figure 232. Ces derniers serviront par la suite comme base de comparaison pour l'analyse de sensibilité de tous les paramètres en jeu. Comme toutes les études précédentes, nous avons utilisé le débit de condensation et les températures maximale et minimale de la paroi interne comme paramètres de sortie à étudier.

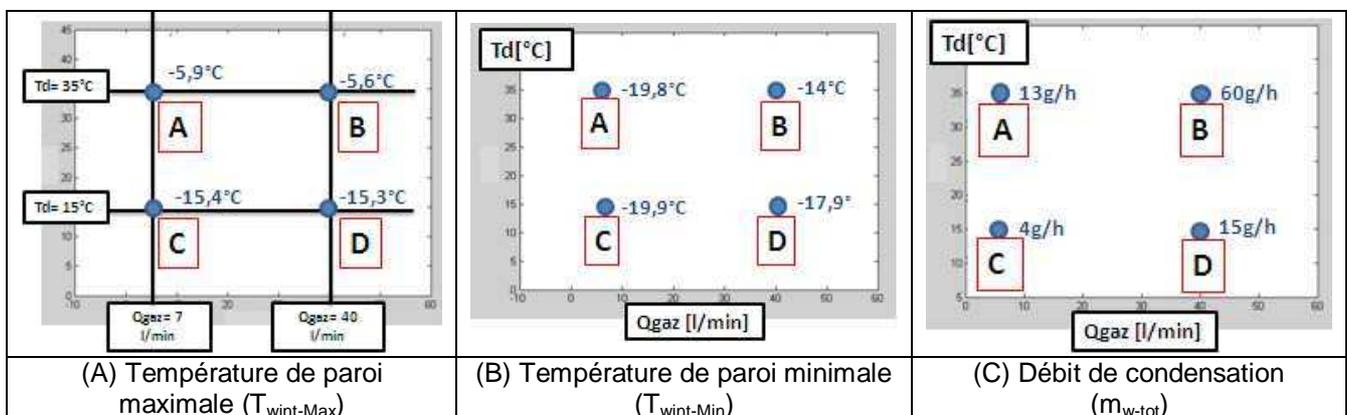


Figure 232 : Résultat obtenu par le modèle en fonction du débit et de la température de rosée du gaz

A travers ces figures, on constate que :

- La température de paroi maximale (à l'entrée du tube) augmente avec le point de rosée du gaz. Elle est indépendante du débit (à condition que Nu reste constant).
- La température de paroi minimale varie à la fois avec le débit et la température de rosée du gaz. C'est qui est tout à fait normal puisque les deux paramètres agissent sur l'énergie transportée par le gaz ainsi que l'énergie perdue par celui-ci le long du tuyau.
- Le débit de condensation total varie avec la température de rosée et le débit. C'est qui s'explique par le fait que ces deux paramètres agissent sur la quantité total d'eau introduite dans le tube.

5.11.2 Etape 2 : Choix des « steps » des paramètres à tester et choix du résultat de comparaison

Les résultats du modèle correspondant à la matrice d'étude principale étant acquis (Figure 232), nous allons maintenant modifier un à un, autour des points principaux du Tableau 27, les différents paramètres en jeu pour comprendre leurs sensibilités respectives. Les steps utilisés pour chaque paramètre sont disponibles dans le tableau suivant :

Paramètres	$T_{w_{ext}}$	$T_{dE}=T_{gazE}$	Nu	Qgaz	e
Step Δ	+ 5 °C	+ 5°C	+ 6	+ 5 L/min	+ 1 mm

Tableau 28 : Step apporté à chaque paramètre pour l'analyse de la sensibilité

Soit :

- p_0 la valeur de référence du paramètre p à étudier (Tableau 27)
- Δp le step correspondant à chaque paramètre p (Tableau 28)
- $f_A(p_0)$, $f_B(p_0)$, $f_C(p_0)$, $f_D(p_0)$ les réponses du modèle au point A, B, C et D de la matrice principale (Figure 232).

La réponse f est le débit de condensation, la température de paroi maximale ou la température de paroi minimale.

La sensibilité au point A du paramètre p pour un step Δp peut être représenté par l'augmentation de la réponse f dû au passage du paramètre en question de sa valeur de référence p_0 au point A vers une valeur $(p_0 + \Delta p)$.

$$[(sensibilité)_p]_A = [f(p_0 + \Delta p)]_A - [f(p_0)]_A \quad (5-16)$$

5.11.3 Sensibilité des paramètres vis-à-vis du débit de condensation

Si nous traçons la sensibilité des différents paramètres autour des points A, B, C, D de la Figure 232, on obtient la Figure 233 ci-dessous. L'orientation de chaque segment de droite articulé autour des points A, B, C, D représente les différents paramètres p . La longueur des différents segments représente la sensibilité chaque paramètre p , en termes de débit total de condensation. Les valeurs numériques affichées au différent point A, B, C, D rappelle les réponses du modèle correspondant à chaque point.

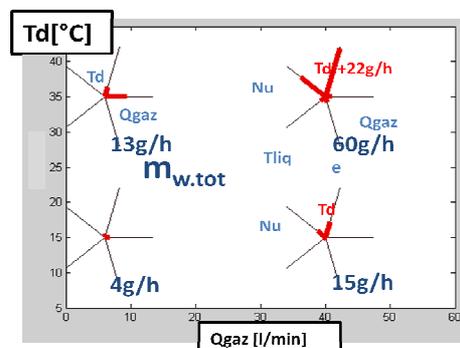


Figure 233 : Analyse de sensibilité des paramètres vis-à-vis du débit de condensation total

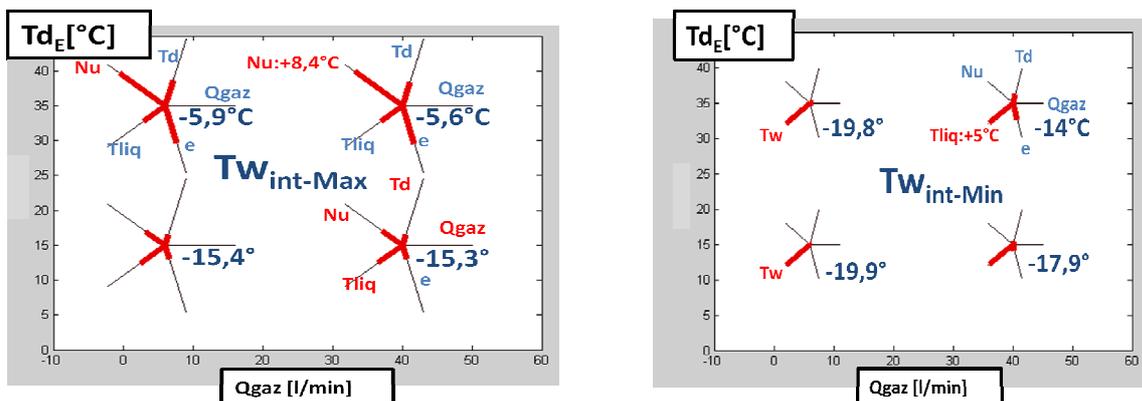
La figure montre qu'à débit élevé, le nombre de Nusselt et la température de rosée ont le maximum d'impact sur le débit de condensation. Les impacts du débit (avec Nu constant), de l'épaisseur du tube et de la température du bain sont négligeables. Dans ces conditions, il s'avère que Nu et Td constituent un levier important pour résoudre les phénomènes de gel (et d'émulsion) de blow-by. En agissant sur les paramètres en question, il est possible de diminuer la quantité qui condense et par la suite augmenter la durée avant que le tube se bouche. A terme cela permettrait d'empêcher le bouchon du tube si la condition opératoire bascule plus tard vers des températures de paroi plus chaudes avant l'obstruction totale (cycle de fonctionnement du véhicule).

A débit faible, l'impact du débit devient important. Pour les moteurs, cet impact mérite une attention particulière dans la mesure où le débit de condensation peut augmenter avec l'âge des véhicules et qu'il varie sensiblement avec les conditions de fonctionnement des véhicules.

Enfin, on constate que l'impact des différents paramètres est maximum quand les conditions de débit et de température de rosée sont élevées.

5.11.4 Sensibilité des paramètres vis-à-vis des températures de paroi minimale et maximale

Si nous procédons de la même manière que précédemment en prenant comme **paramètre de réponse** la température de paroi maximale (à l'entrée du tube) et la température de paroi minimale (à la sortie du tube), nous obtenons les figures suivantes :



(A) Température de paroi maximale (à l'entrée)

(B) Température de paroi minimale

Figure 234 : Analyse de sensibilité des paramètres vis-à-vis du profil de température de paroi interne

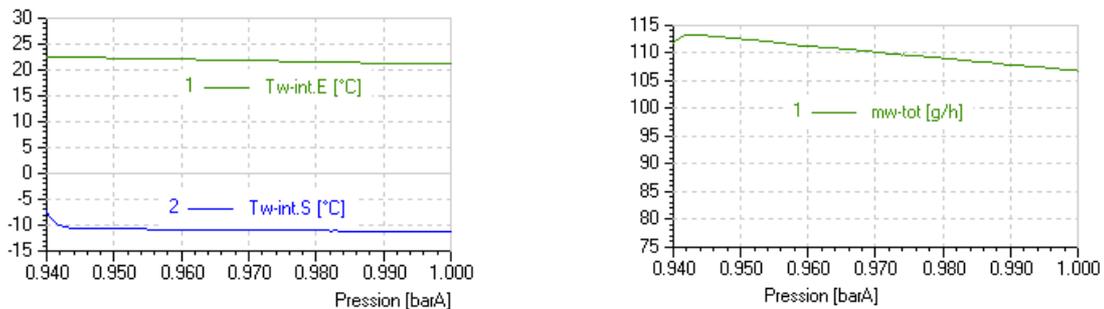
La figure A montre que :

- A température de rosée élevée, le nombre Nu et l'épaisseur ont un impact important sur la température de paroi maximale (à l'entrée). Ils constituent donc un levier pour résoudre les phénomènes de bouchon dans la mesure où la température de paroi à la sortie ne s'éloigne pas trop de celle à l'entrée (cas des tubes courts).
- L'influence de la température du bain et de la température de rosée est légèrement plus faible par rapport aux deux paramètres précédents dans les conditions de step qui ont été choisies.
- A température de rosée faible, l'impact maximal est attribué au Nu et à la température du bain. Bien que faible, l'impact du débit de gaz est aussi constaté.

La figure B montre que pour la longueur de tube testé, dans presque tous les cas, seule la température du bain a un effet sur la température de paroi interne à la sortie. Un léger impact de l'épaisseur et de la température de rosée est toutefois constaté à débit et à température de rosée élevés. Ainsi, pour les moteurs, pour les tubes longs, on peut dire que seule l'utilisation des réchauffeurs peut résoudre les phénomènes de bouchon. Néanmoins, si les gaz sont suffisamment chauds et humides et si le débit est élevé, l'augmentation des épaisseurs (isolation) au-delà des 2 mm testé peut être envisagée.

5.11.5 Impact de la pression

Pour un gaz saturé à une température donnée, la modification de la pression entraîne la modification de la quantité de vapeur pouvant être présente dans le gaz (Humidité absolue - Equation (2-10)). Pour comprendre cette influence nous avons utilisé les paramètres du Tableau 27 dans le modèle qui a été construit et nous avons modifié la pression de travail. La pression dans le circuit de blow-by étant en générale en légère dépression par rapport à la pression atmosphérique, la plage testée varie de 950 mbar à 1 bar.



(A) Température de paroi à l'entrée (Max) et à la sortie (Min)

(B) Débit total de condensation [g/h]

Figure 235 : Impact de la dépression sur le débit de condensation et le profil de température de paroi interne

Comme il est montré par cette figure, les 50 mbar de dépressions n'a aucun effet sur le profil de la température de paroi. En outre, l'augmentation de la quantité de condensable causé par la diminution de la pression de 1 bar à 960 mbar n'a qu'un faible impact sur le débit de condensation (environ 6g/h soit 5% par rapport au condensat total).

5.12 Les facteurs affectant Nu

Nous avons vu que le nombre Nu constitue l'un des plus importants paramètres influençant les températures parois et le débit de condensation. Dans le cas le plus simple, ce paramètre varie avec le débit du gaz, la propriété du gaz et la dimension des conduites selon des corrélations de type :

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (5-17)$$

Les détails des diverses corrélations sont expliqués dans le paragraphe §2.4.4.4.

En outre, Nu peut aussi être influencé par la pulsation du gaz, la géométrie des conduites mise en jeu ainsi que la nature des circuits qui se trouve avant l'entrée du tube.

5.12.1 Impact de la pulsation du débit de gaz

Théoriquement, la pulsation du débit agit sur le coefficient de transfert. Si nous considérons la corrélation de l'équation (2-43) reprise ci-dessous :

$$Nu = \left[23 + \frac{5.6(Re \omega^* . 10^{-5} - 2)}{1 + 0.17(Re \omega^* . 10^{-5} - 2)} \right] . Pr^{0.3} \quad (5-18)$$

On peut estimer la variation de Nu en fonction de la fréquence de pulsation selon la figure suivante:

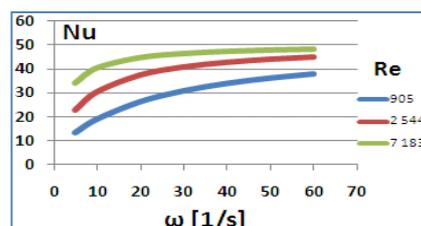


Figure 236 : Impact de la fréquence de pulsation sur Nu sensible selon le modèle de Hommena [30]

Ce qui montre que la présence de pulsation a un impact très important sur le Nu dans toutes les conditions de Re. L'augmentation de Nu peut aller jusqu'à $\Delta Nu = 25$. Ainsi, en se basant sur l'analyse de sensibilité de Nu précédente, il est clair que cette augmentation agit fortement sur la distribution locale de la température de paroi et du débit de condensation. Compte tenu de cela, l'impact de la pulsation mérite une attention particulière pour le cas des moteurs. Dans le cadre de cette étude, nous nous arrêtons sur cette corrélation de la bibliographie.

5.12.2 Impact des annelures

Comme dans le cas de la pulsation du débit, la présence des annelures influent aussi sur le nombre de Nu. Si nous traçons l'équation de Nu correspondant aux résultats des essais secs disponibles dans le Tableau 22, nous obtenons la figure de comparaison suivante :

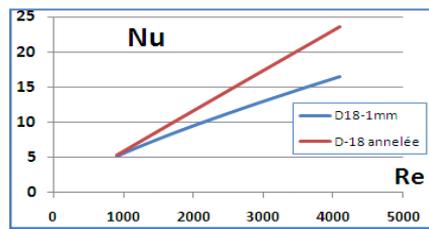


Figure 237 : Impact des annelures sur Nu (Modèle expérimental)

Ainsi on voit bien qu'à Re élevé, la présence des annelures fait augmenter Nu jusqu'à 7 unités. Compte tenu de l'impact de Nu démontré précédemment (paragraphe §5.11.4), on peut déduire que la présence des annelures fera augmenter la quantité qui condense. Vis-à-vis des steps des paramètres définis dans le Tableau 28 et en se servant de l'analyse de sensibilité de Nu précédente, on constate que l'impact des annelures emporte sur l'influence de la température de liquide, de la température de paroi et du débit de gaz.

Par contre, en terme de température de paroi interne, il est difficile de conclure l'influence puisque l'augmentation des surfaces de contact avec le froid au niveau des annelures peut compenser le réchauffement des parois par l'augmentation de Nu.

5.12.3 L'impact des coudes et des circuits se trouvant en amont de l'entrée du tube

En agissant sur la longueur d'établissement thermique et hydrodynamique, les circuits se trouvant en amont de l'entrée du tube et les coudes peuvent influencer le nombre de Nusselt à l'intérieur du tube. Pour estimer l'impact de ces diverses configurations, calculons les différentes valeurs de Nu données par l'équation (2-40) pour les différents types de circuit.

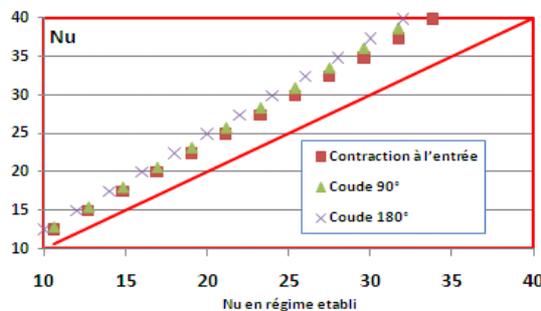


Figure 238 : Impact des circuits amont sur Nu selon la corrélation de [26]

Ceci montre qu'entre les différents types de circuit, aucune différence significative de Nu n'a été constatée. Par contre une différence nette de Nu allant jusqu'à d'environ 7 unités est constatée entre un circuit avec un régime établi et un circuit avec un régime non établi derrière une restriction ou en

présence d'un coude. Aussi on peut conclure qu'en modifiant Nu , les circuits en amont de l'entrée du tube et les coudes peuvent aussi avoir un impact considérable les transferts thermiques et massique à l'intérieure du tube.

5.13 Conclusion partielle

Pour être exploitable pour les véhicules, les résultats expérimentaux ont été complétés par des travaux de modélisation. La confrontation des modèles avec les résultats expérimentaux ont permis d'obtenir des outils de prédiction des phénomènes de gel à l'intérieur des tuyaux de blow-by.

A travers ce chapitre, nous avons vu que les phénomènes de transfert de chaleur et de matière qui se déroulent pendant la phase initiale de l'essai peuvent être prédits en se servant de l'analogie de Lewis et en introduisant le concept de **formation de brouillard** (cas des tubes à diamètre élevé) ou de **stabilisation isothermique des gaz sursaturés** qui se forment (cas des tubes à faibles à diamètres). Les **phénomènes d'aspiration**, les impacts des films ou des gouttes de condensat ont pu être négligés sans induire beaucoup d'erreurs.

Il a été montré que les modèles peuvent être directement alimentés par les coefficients de transfert par convection en régime sec. Pour avoir le maximum de précision, les coefficients en question doivent être utilisés tels quels en omettant d'apporter les modifications supplémentaires liées aux modifications des propriétés du gaz le long de son parcours (déshydratation et refroidissement progressifs). Il est donc évident que les modèles ainsi construits peuvent être utilisés dans les cas des véhicules dès que les conditions des gaz à l'entrée des tubes et les coefficients de transfert par convection à l'intérieur des tubes sont connus. Ces derniers sont largement disponibles dans la bibliographie aussi bien pour le cas des régimes stationnaires que pour les régimes pulsés.

La défaillance des modèles travaillant avec des nombres de Nusselt locaux (recalculés en fonction de la température et de l'humidité locale) s'explique par le fait que les corrélations de Nu utilisées ont été établies en termes de valeurs moyennes et vis-à-vis de la condition de température en entrée. Dans le futur, il est possible d'améliorer cette approche en établissant les corrélations de Nu de départ vis-à-vis des conditions locales (essai avec des tubes courts et en présence de gaz humide).

Le profil de la distribution de la température de paroi interne montre que la température est maximale près de l'entrée du tube, à l'endroit où le gaz atteint sa saturation et elle est minimale à la sortie du tube échantillon. Il en est de même pour l'énergie échangée et le débit de condensation local.

En fournissant la distribution spatiale des températures de paroi interne, les modèles ont permis d'améliorer les critères utilisés pour l'identification des zones de bouchon et l'identification des phénomènes prédominants.

En diamètre moyen (D18), en permettant de prédire la mobilité de l'eau pour chaque condition opératoire, les modèles donnent un aperçu sur l'importance de la géométrie et de l'orientation des tubes. En diamètre faible (D10), le modèle permet de localiser le lieu possible de formation de bouchon et d'en déduire par la suite la longueur minimale pour que le bouchon puisse se former. En diamètre élevé (D31), le modèle a permis de mettre en évidence l'existence d'une certaine hauteur limite de bouchon en particulier pour les **conditions opératoires givrantes**.

Enfin, l'analyse de la sensibilité montre que le nombre de Nu , le point de rosée et l'épaisseur du tube ont le maximum d'impact sur les débits de condensation et sur la température de paroi maximale à l'intérieur du tube. En ce qui concerne la température de paroi minimale, les résultats attendus varient selon la longueur du tube :

- Pour les tubes courts la température de paroi minimale et maximale sont proches. On retrouve donc les influences de Nu , du point de rosée et de l'épaisseur.
- Pour les tube longs, si l'énergie apportée par le gaz est assez élevée (débit élevé et point de rosée élevé), l'épaisseur du tube peut jouer un rôle non négligeable. Pour le reste, seule la température du bain elle-même peut agir sur la température de paroi minimale.

Rappelons que l'utilisation des modèles se limite à la prédiction des phénomènes et des risques de bouchon. Elle ne permet pas de simuler l'évolution temporelle des bouchons et sont valides seulement en absence ou en quantité négligeable de particules d'huile.

Glossaire

Notations	Noms	Unités
A	Surface de contact	[m ²]
Cp	Capacité calorifique à pression constante	[K/kg.K]
D	Diamètre interne du tube	[m]
D _{vap}	Diffusivité massique	[m ² /s]
e	Epaisseur du tube	[m]
gm	Coefficient de transfert massique sans phénomène d'aspiration	[m/s]
h	Coefficient de transfert par convection du côté du gaz	[W/(m ² .K)]
H	Enthalpie spécifique	[J/kg]
h _{liq}	Coefficient de transfert par convection du côté du liquide	W/(m ² .K)]
hm	Coefficient de transfert de masse	[m/s]
HR _E	Humidité relative du gaz à l'entrée du tube	[%]
k	Conductivité thermique de la paroi	W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Le	Nombre de Lewis	
Lv, Lf, Ls	Chaleur latente de vaporisation, de fusion et de sublimation	KJ/Kg
m _{air.sec}	Débit massique de l'air sec	[kg/s]
m _w	Débit de condensation (du à la convection)	[g/min]
mW _{tot}	Débit total de condensation (brouillard+ condensat liquide)	[g/min]
Nu	Nombre de Nusselt	
P _{Max}	Pression maximale mesurée (généralement à la fin de l'essai)	[mbarG]
Pr	Nombre de Prandtl	
Qgaz	Débit volumique du gaz à l'entrée du tube	[L/min]
Re	Nombre de Reynolds	
Td _E	Température de rosée du gaz à l'entrée du tube	[°C]
TgazE	Température du gaz à l'entrée du tube	[°C]
TgazS	Température du gaz à la sortie du tube	[°C]
Tliq	Température du bain cryogénique	[°C]
TW _{ext}	Température de paroi externe (près de l'entrée du tube)	[°C]
TW _{int}	Température de paroi interne à la position donnée	[°C]
x	Coordonnée axiale du point considéré	[m]
X*	Coordonnée axiale adimensionnée du tube	
Y _E	Humidité absolue du gaz à l'entrée du tube	[g/kg d'air sec]
α _{mist}	Fraction de gaz « sursaturé » transformée en « brouillard »	[%]
α _{vap}	Diffusivité thermique	[m ² /s]
θm	Coefficient de correction du coefficient de transfert massique vis-à-vis du phénomène d'aspiration	
θt	Coefficient de correction du coefficient de transfert thermique vis-à-vis du phénomène d'aspiration	
ρ	Densité	[kg/m ³]
ω	Fréquence de pulsation	[1/s]
Φ	Flux thermique local	[W]

Subscript

∞	Dans la veine de gaz
E	A l'entrée du tube
ext	Parois externe
int	Parois interne
max	Maximale
min	Minimale
Mist	Avec phénomène de brouillard
noMist	Sans phénomène de brouillard
S	A la sortie du tube
sens	Sensible
tot	Totale
vap	vapeur
w	au voisinage de la paroi

Chapitre 6 :
RESULTATS DES ESSAIS
D'EMULSIONS

CHAP. 6: RESULTATS DES ESSAIS D'EMULSIONS

6.1 Introduction

Les essais préliminaires ainsi que l'analyse bibliographique ont montré que la présence d'huile peut affecter les phénomènes observés, entraîner la formation de bouchon ainsi que perturber le transfert thermique. Ainsi, en formant notamment des émulsions, les huiles peuvent ralentir la vitesse de déplacement de l'eau liquide ou au contraire l'empêcher de se figer par cristallisation.

Aussi, pour comprendre l'étendue de ces impacts, il est impératif de reconduire les essais précédents en présence de particules d'huile. Dans ce chapitre, nous allons détailler les résultats obtenus à travers ces expériences. Comme dans le cas des essais en absence d'huile, nous allons d'abord expliquer la matrice d'essais choisie pour les expérimentations et détailler les protocoles expérimentaux. Ensuite, nous décrivons les différents phénomènes observés. Dans un troisième temps, nous constaterons les impacts de la présence d'huile et d'émulsion sur la pression et le risque de formation de bouchon. Enfin, nous considérerons l'impact thermique des particules d'huile.

6.2 La matrice d'essais

6.2.1 La nature de l'huile

Compte tenu des recommandations que nous avons établies dans le chapitre dédié aux choix des paramètres, nous avons utilisé le Quartz 9000 comme huile d'essais. Pour rappel, il a pour avantage de former l'émulsion la plus stable, permettant ainsi d'observer le cas le plus extrême de l'impact de l'huile sur les phénomènes observés.

6.2.2 La quantité d'huile et la granulométrie de l'huile

La granulométrie des particules d'huile peut être choisie en modifiant la température de l'huile au niveau de l'atomiseur. Lors des essais, nous avons constaté qu'aucune des conditions de température d'atomisation inférieure à 120°C (correspondant au minimum de granulométrie) n'a pu conduire à une quantité d'huile quantifiable dans les échantillons d'essais. Cela s'explique par le fait qu'à granulométrie élevée (faible température d'atomisation), la majorité des gouttes est piégée à l'intérieur des circuits du banc et n'atteignent pas l'échantillon test. Aussi pour la suite de l'étude, nous avons fixé la température d'atomisation à sa valeur maximale de 120°C. Ce qui veut dire que les granulométries sont à leurs valeurs minimales, soit un diamètre moyen d'environ 200 nm si on fait référence à la spécification du constructeur de l'atomiseur. Notons que la valeur exacte varie avec la viscosité de l'huile utilisée et nécessite une analyse granulométrique du gaz.

En ce qui concerne la quantité d'huile, il a été envisagé de travailler avec des points à iso-concentration en huile mais avec des débits de gaz différents ou des points à iso-débit en huile mais avec des concentrations en huile différentes (c'est-à-dire des débits de gaz différents). Toutefois, comme il a été impossible d'effectuer des caractérisations quantitatives des particules injectées, nous avons fait le choix de fixer le débit d'huile introduit à sa valeur maximale et de modifier la concentration en huile en agissant sur le débit total du gaz. En se référant aux données fournies par le constructeur de l'atomiseur, le débit en huile total est estimé à 2,25 g/h. Les concentrations en huile correspondantes sont données par le tableau suivant :

Débit total en huile	Débit total de gaz	Concentration en huile
2,25 g/h	20 L/min	1,88 mg/l
	50 L/min	0,75 mg/l

Tableau 29 : Débit total et concentration en huile en se référant aux données fournies par le constructeur de l'atomiseur

Notons que la quantité exacte d'huile introduite peut être légèrement différente de ces valeurs de référence compte tenu de l'encrassement d'une certaine quantité de particules le long du parcours du gaz avant d'atteindre l'échantillon ainsi que l'impact de la nature de l'huile sur la quantité de particules générés par l'atomiseur. Des analyses quantitatives plus poussées sont nécessaires pour obtenir ces valeurs.

6.2.3 Les autres conditions opératoires

Les études ont été réalisées avec les tubes D10-1mm et D18-2mm qui correspondent respectivement à un diamètre faible et moyen. Pour le tube D31-1mm, de diamètre plus élevé, le débit d'huile de 2,25 g/h est totalement négligeable par rapport au débit de condensat (de 48 g/h) requis pour que la montée en pression puisse exister avec ce type de diamètre (Figure 197).

En ce qui concerne l'humidité, nous nous limiterons aux gaz saturés. Comme dans le cas du gaz humide sans huile, nous travaillerons avec les trois niveaux de température de rosée : 7, 20 et 40°C.

Pour le débit, deux des trois niveaux de débit testés précédemment ont pu être mis en œuvre (20 et 50 L/min). Le débit de gaz minimal (6 L/min) a été écarté compte tenu de la nécessité de connaître la quantité exacte de particules générées par l'atomiseur (pour pouvoir déterminer la quantité de gaz à évacuer avant l'entrée de l'échantillon).

De plus, nous avons fixé la température du bain à -30°C.

6.3 Le protocole expérimental

Le principe des essais se présente comme suit (Figure 239):

- L'air humide est préparé dans le circuit principal (1) et (2). Les conditions de débit, d'humidité et de température dans chaque compartiment sont choisies en fonction de l'humidité et de la température voulues à la sortie de ce circuit. La méthode conduisant au choix de ces paramètres est détaillée dans le paragraphe §4.4.1
- Le brouillard d'huile concentré est préparé dans l'atomiseur (7). Le débit de brouillard est maintenu constant (11 L/min). La quantité d'huile introduite est donc indépendante de toutes les autres conditions opératoires.
- Le brouillard concentré et l'air humide sont mélangés puis injectés dans l'échantillon en passant par l'hygromètre et le capteur de pression et de température (3). Le débit, la température et l'humidité du gaz humide préparé dans le circuit principal (1 et 2) sont choisis de manière à ce que le mélange entrant dans l'échantillon réponde aux consignes fixées (point de rosée et humidité relative).
- Le débit total de gaz est mesuré à la sortie du tube.

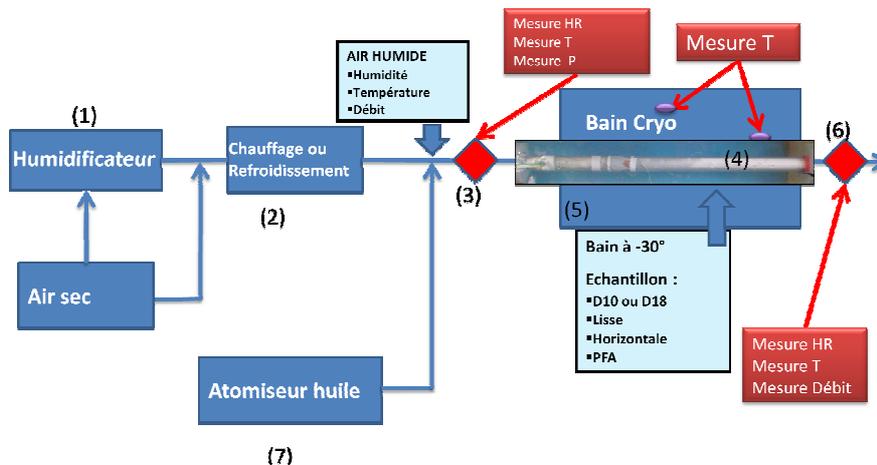


Figure 239 : Principe des essais en présence d'huile

Des photos sont prises avec un intervalle régulier tout au long de l'essai (1 image/min).

A la fin de l'essai, l'échantillon est maintenu à -30°C pendant 10 minutes afin de stabiliser les matières qui y sont piégées. Ensuite, les échantillons sont examinés puis pesés. Les quantités d'eau et d'huile sont déterminées en séchant l'échantillon à 110°C pendant 24h (évaporation de l'eau). Notons qu'afin de pouvoir travailler à cette température, nous avons utilisé du PFA à la place du PVC. Ce qui ne devrait pas poser de problème compte tenu de la mouillabilité élevée de l'huile vis-à-vis des matériaux testés. Ce qui fait que dans tous les cas, les matériaux sont couverts d'un film d'huile tout en sachant que même une monocouche de corps gras suffit pour modifier la propriété de mouillabilité d'une paroi solide [20].

6.4 Les phénomènes observés

Comme nous l'avons vu dans le chapitre dédié aux choix des paramètres, la présence d'huile peut modifier les phénomènes observés à l'intérieur des tubes. Nous avons aussi expliqué qu'en présence d'huile, en dehors de la formation de givre, de la solidification ou de la condensation, l'eau peut former une émulsion. Laquelle peut par la suite se solidifier, se déplacer ou s'accumuler pour conduire à d'autres phénomènes plus complexes.

Les essais en présence d'huile étant faits uniquement à -30°C pour les deux diamètres testés (D10 et D18), nos résultats expérimentaux se limitent à trois types de phénomènes identifiés :

- Pour les **conditions opératoires condensantes** (point de rosée, température de gaz et débit élevés), on observe la formation d'un mélange homogène d'émulsion et de glace ainsi qu'une émulsion mousseuse récupérée à la sortie du tube. Notons le phénomène en question **EM-C**.
- Dans les conditions modérées de point de rosée ou de débit, on observe la formation de glace et d'une émulsion séparées en deux couches distinctes. (noté ici **EM-M**)
- Pour un point de rosée faible, on obtient du givre incrusté de particules d'huile (noté ici **EM-G**).

La distribution des phénomènes peut être décrite par la figure suivante :

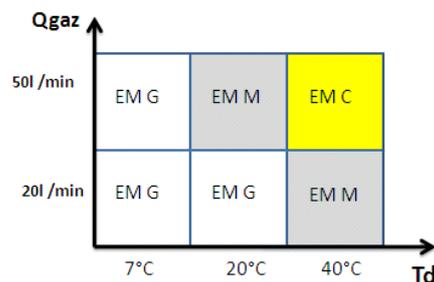
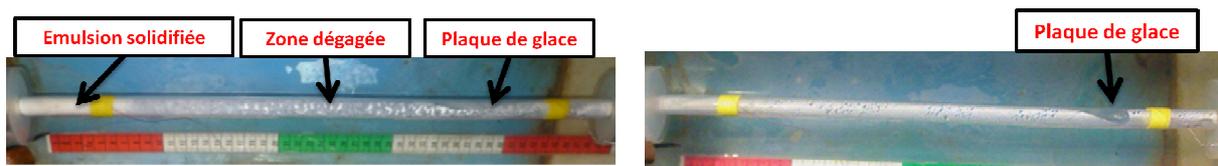


Figure 240 : Phénomène d'émulsion observé pour D18 et D10 à -30°C

Dans le paragraphe suivant, nous allons considérer un à un ces différents phénomènes.

6.4.1 Les phénomènes obtenus pour les conditions opératoires condensantes (EM-C)

Les phénomènes décrits ici sont observés si le changement d'état de l'eau est dominé par la condensation. En absence d'huile, ces phénomènes aboutissent normalement à la formation de condensat liquide à l'intérieur du tube ou au phénomène de **formation de bloc de glace** par solidification de condensat (Figure 241-B).



(A) En présence d'huile
(B) En absence d'huile (rappel)
Figure 241 : Phénomènes observés pour les conditions opératoires condensantes

Le scénario se déroule comme suit :

- Des amas (non sphériques) de condensat, de quelques mm de largeur, se forment à l'intérieure des tubes et sont repartis de manière discontinue sur la paroi. Des émulsions blanches sont visibles aux leurs contours : Figure 242-A
- Avec le temps, une grande partie de l'huile est piégée en amont du tube et se mélange avec le condensat pour donner une émulsion blanche riche en eau. La partie avale est dominée par la condensation et reste dégagée (pas d'accumulation) le long de l'essai.
Comme dans les cas des essais sans huiles, des plaques de condensat solidifié (glaces) sont identifiés en aval du tube. (Figure 242-B)
- Une partie de l'émulsion qui se forme en amont est entraînée par le gaz et finit par sortir du tuyau à l'état non cristallisé. En même temps, des condensats liquides continuent à se former à l'intérieur du tube et sortent du tuyau sous forme liquide.
L'émulsion récupéré à la sortie semble être très stable et ne peut être cassée ni diluée par l'eau liquide qui l'accompagne. (Figure 242-B)
- L'émulsion et l'eau retenues dans la partie amont du tube s'accumulent avec le temps et finissent par boucher partiellement le tube. (Figure 242-C). L'analyse des mélanges récupérés dans les tubes à la fin des essais (condensats résiduels, émulsions) montre que la quantité totale d'huile retenue dans les tubes sous forme d'émulsion et/ou sous forme libre ne dépasse pas les 1,6g. En termes de pourcentage, pour les essais avec D18, elle est au maximum de 6,3% de la masse totale du mélange récupéré. Ce pourcentage augmente jusqu'à 14,6% de la masse total du mélange pour les essais avec D10.

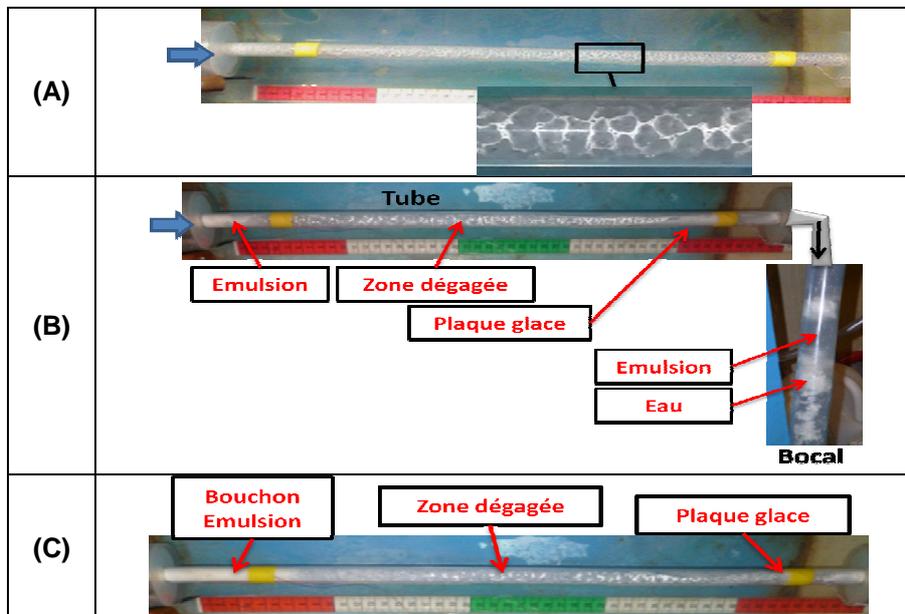


Figure 242 : Evolution temporelle de la formation d'émulsion pour les conditions condensantes

Les émulsions obtenues en fin d'essais sont présentées sur les figures suivantes.



(A) Émulsion solide récupérée à l'intérieure du tube (B) Émulsion mousseuse récupérée à la sortie du tube

Figure 243 : Émulsion récupéré dans le tube et à la sortie du tube

Bref, pour les **conditions opératoires condensantes**, l'effet de la présence d'huile est contraire à celui attendu. Ainsi, au lieu d'empêcher la cristallisation de l'eau du fait de la formation d'émulsion, on observe une rétention locale de celle-ci. Ce qui favorise sa cristallisation après un certain temps de contact.

Comme le montre la Figure 243-A, l'émulsion récupérée à l'intérieure des tubes est très riche en eau et se présente sous forme de bloc blanche solide huileux (Figure 243-A). La quantité d'huile totale varie de 1,1g à 1,6 g. Sur les trois essais conduisant à ce résultat, aucune tendance significative n'a été constatée vis-à-vis des diamètres de tube testés.

L'émulsion récupérée dans le bocal de décantation est, lui aussi, pauvre en huile. Elle est immiscible avec l'eau et a un aspect mousseux (Figure 243-B). L'analyse de cette émulsion donne une fraction en huile d'environ 11 %. Malgré la quantité d'émulsion récupérée à la sortie du tube, la quantité totale d'huile dans le mélange reste négligeable par rapport à la quantité totale d'eau récupérée (eau à l'état libre + eau dans l'émulsion) : Tableau 30

D	m _{huile} [g]	m _{eau} [g]
D10	0,1	49
D18	3,2	349
	1,3	450

Tableau 30 : Masse d'eau et masse d'huile récupérées ($T_d=40^\circ\text{C}$, $Q_{\text{gaz}}=50 \text{ L/min}$, $T_{\text{liq}} = -30^\circ\text{C}$)

6.4.2 Les phénomènes observés dans les conditions de point de rosée ou de débit modérés

Dans les conditions de débit ou de point de rosée modérés, le tube entier se couvre très vite d'un mélange blanchâtre d'huile et d'eau. L'observation à la fin des essais permet de constater qu'il s'agit surtout d'un mélange de glace et de givre contenant une petite quantité d'huile. Le mélange n'est pas entièrement rigide mais se présente sous forme d'amas de glace granuleux. Dans la partie amont du tube, l'anneau de glace comporte en son centre une mince couche d'émulsion blanche visqueuse (Figure 244). En effet, obstruant le passage, la glace ou l'émulsion qui se forme en amont du tube piège de plus en plus de particules avec le temps. Ce qui entraîne par la suite une distribution croissante de la quantité d'huile piégée dans la glace au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la paroi du tube.

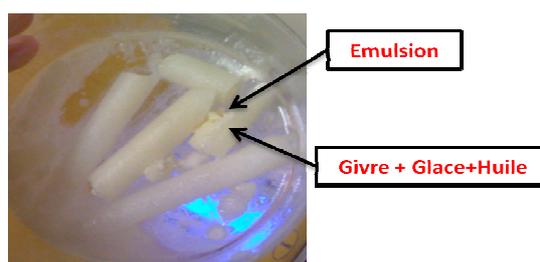


Figure 244 : Émulsion récupéré dans le tube dans les conditions de débit et de température modérés

Pour un débit de gaz élevé et un point de rosée moyen, le mélange de glace, d'huile et d'émulsion couvre presque la totalité du tube. La couche d'émulsion est plus épaisse en amont du tube et disparaît très vite au fur et à mesure qu'on se déplace vers l'aval (Figure 245-A).

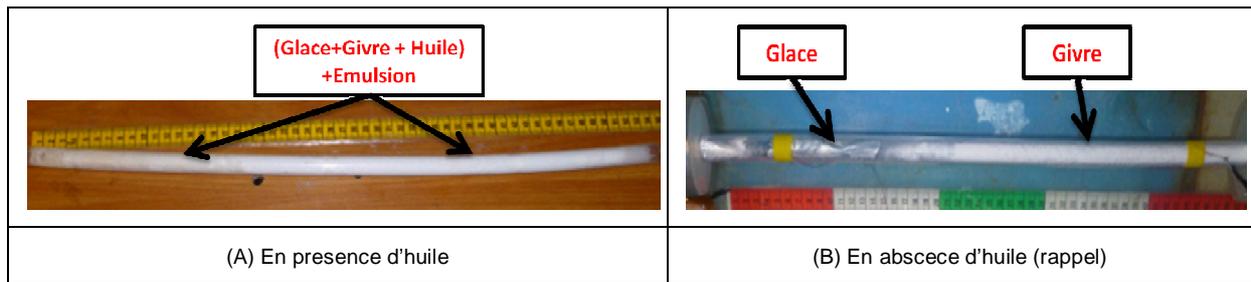


Figure 245 : Phénomène observé en condition de température de rosée moyen et de débit de gaz élevé

Inversement, pour un débit de gaz moyen et un point de rosée élevé, le mélange de glace, d'huile et d'émulsion est observé essentiellement en amont du tube, le reste du tube est recouvert essentiellement par le givre (Figure 246-A).

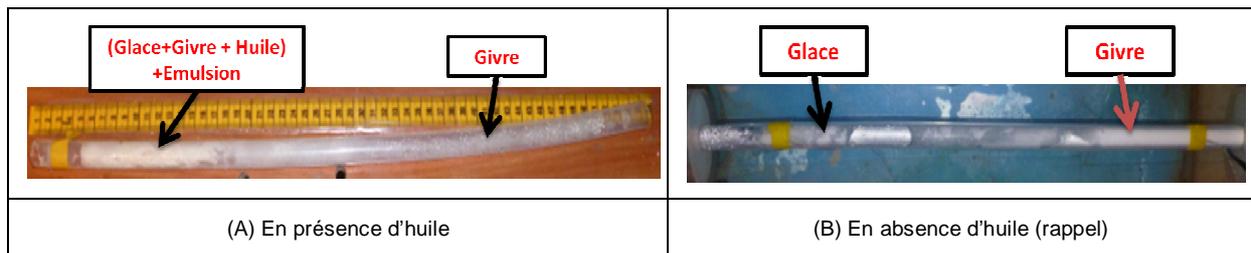


Figure 246 : Phénomène observé en condition de température de rosée élevé et de débit de gaz moyen

L'analyse par dessiccation de l'émulsion récupérée dans les tubes indique une quantité d'huile allant de 0,6 à 2,1 g. Elle est maximale pour le tube D18 et plus faible pour le tube D10. Dans tous les cas, l'huile représente au maximum 6,5 % de la masse totale du mélange récupéré dans le tube.

Rappelons qu'avec les essais sans huile, les mêmes conditions de point de rosée et de débit conduisent généralement à la formation de condensat liquide dans la partie amont du tube ainsi que du givre dans la partie aval (Figure 245-B et Figure 246-B).

6.4.3 Les phénomènes observés pour les conditions givrantes

Pour les **conditions opératoires givrantes**, c'est-à-dire à température de rosée faible ou à débit de gaz faible, on observe, exclusivement du givre poreux. La présence d'huile ne semble pas affecter la formation du givre excepté une légère coloration jaune-brun sur une partie du givre situé en amont du tube.



Figure 247 : Exemple de givre incrusté de particule d'huile (vue de face)

A la fin des essais, si le givre est laissé à l'air libre, il fond assez rapidement, et laisse apparaître les particules d'huile qui y étaient piégées. La teinte est marron comme on peut le constater sur les figures suivantes.

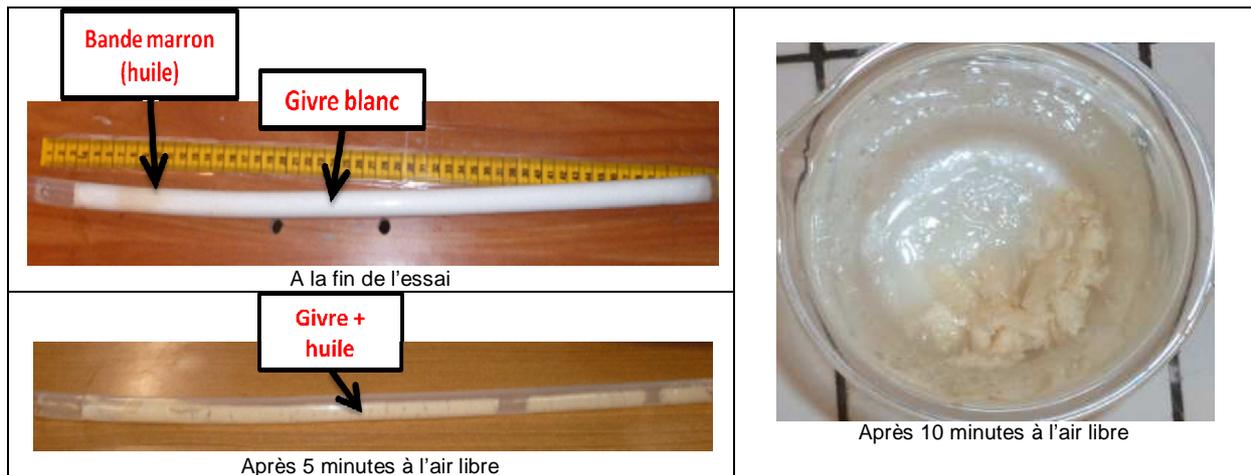


Figure 248 : Givre en présence d'huile

La quantité d'huile piégée par le givre varie de 2,1 à 4,4 g, ce qui représente 8 à 37,5% de la masse du mélange récupéré dans le tube.

6.4.4 Le taux de dépôt des huiles pour les différents cas de figure

La quantité d'huile est supposée avoir une influence sur la stabilité et la température de cristallisation du mélange ou de l'émulsion obtenue. Pour vérifier ceci, nous avons recensé les taux de dépôt en huile correspondant à chaque condition opératoire testée que nous avons confronté avec les phénomènes observés. Le tableau suivant résume les valeurs de la quantité d'huile piégée dans le tube en fonction des conditions opératoires. La quantité déposée est maximum pour **les conditions givrantes** et minimum pour **les conditions opératoires condensantes**. Cela peut s'expliquer par les temps d'expérience. En effet, dans le cas de formation du givre, les essais durent plus longtemps (le givre ne bouche qu'après un temps beaucoup plus long). Néanmoins, si on regarde la vitesse de dépôt (masse d'huile rapportée aux durées des essais), il est clair qu'indépendamment de la durée d'exposition, le givre retient plus les particules que les autres dépôts.

D	Qgaz	Td1	Td1			D	Qgaz	Td1	Td1			Condition condensante		
			7		20				7		20		40	Condition modérée (→Phénomène Mixte)
			+	-	+				-	+	-		+	
18	20	+			2,30	1,10	18	20	+			1,01	0,84	
	50	+	4,40	2,10	1,60		18	50	+	2,05	1,66	0,52		
10	20	+	3,00	2,20	0,60		10	20	+	1,80	2,75	0,75		
	50	+	2,10	0,80	1,20		10	50	+	3,15	1,60	1,31		

(A) Masse d'huile récupérée [g]

(B) vitesse de dépôt d'huile en [g/h]

Tableau 31 : Quantité d'huile piégée

En absence d'eau, les tests de dépôt de particules sur les parois propres d'un tube D18 ont conduit à une quantité d'huile déposée allant de 0,1 g/h (débit de gaz 10 L/min) à 0,27 g/h (débit de gaz 50 L/min). Les vitesses de dépôt en question sont relativement faibles par rapport à la vitesse de dépôt en présence d'air humide.

L'impact de la quantité d'huile piégée sur le phénomène observé n'a pas pu être mis en évidence. Toutefois, dans le paragraphe suivant, nous allons voir que la présence d'huile peut retarder la formation de bouchons en inhibant la cristallisation de l'eau.

6.5 Impact de l'émulsion sur le profil de pression

Considérons maintenant l'impact d'huile et d'émulsion sur le profil de la montée en pression à l'intérieur des tubes. Pour cela nous allons utiliser les trois paramètres caractéristiques des profils de pression pour comparer les essais sans huile et ceux en présence d'huile.

6.5.1 Impact sur la pression finale

Afin de comprendre l'impact de l'huile et de la formation d'émulsion sur la pression finale, traçons la pression finale obtenue avec les essais en présence d'huile en fonction de la pression finale obtenue pour les essais sans huile effectués dans les mêmes conditions opératoires (figure suivante) :

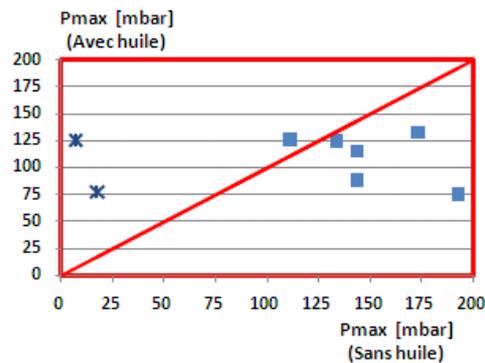


Figure 249 : Comparaison de la pression finale en présence d'huile en fonction de celle obtenue en absence d'huile (tous les autres paramètres étant identiques par ailleurs)

La figure montre que tous les essais aboutissant à une montée en pression en absence huile restent **partiellement** ou **totalemtent bouchant** en présence d'huile. Toutefois, dans la majorité des cas, la pression finale dans les essais en présence d'huile est légèrement plus faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que la présence d'huile empêche la solidification de l'eau retardant ainsi le bouchon total du tube et ce, malgré l'accumulation des condensats et des émulsions à l'intérieur.

Remarquons toutefois que pour les **conditions opératoires condensantes**, l'impact est inversé (Points représentés par des étoiles) : A la place des condensats liquides qui sont normalement **non bouchants** en régime sans huile, on obtient plutôt des émulsions capables de s'accumuler à l'intérieur des tubes et de conduire à termes à la montée en pression.

6.5.2 Impact sur la « durée avant début de montée en pression »

En procédant de la même manière, mais en prenant comme paramètre de comparaison la **durée avant la montée en pression**, on obtient la figure suivante. L'axe des abscisses représente la **durée avant la montée en pression** pour les essais sans huile, et l'axe des ordonnées représente le même paramètre pour les essais en présence d'huile dans les mêmes conditions opératoires.

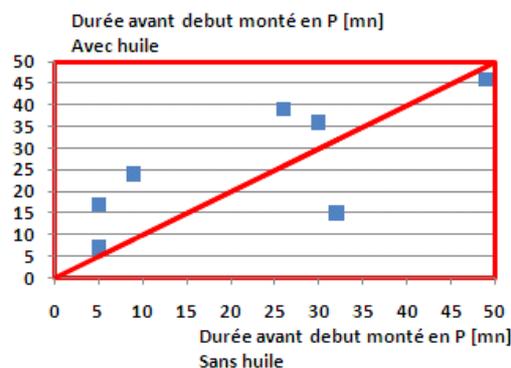


Figure 250 : Comparaison de la durée avant le début de montée en pression ($K_v=1$) pour les essais sans huile et les essais en présence d'huile

La figure montre que la quasi totalité des essais en présence d'huile conduit à une montée en pression plus tardive qu'en absence d'huile. Ce qui confirme de nouveau l'aptitude des huiles à retarder la cristallisation de l'eau suite à la formation d'une émulsion.

6.5.3 Impact sur le nombre de pics de pression

Les essais en présence d'huile sont caractérisés par l'observation de plusieurs montées en pression alternées par de nombreux dégagements partiels du passage. Au niveau des profils, cela se manifeste par l'existence de plusieurs pics de pression à l'intérieur d'un même profil. La figure de comparaison avec les essais sans huile est les suivantes :

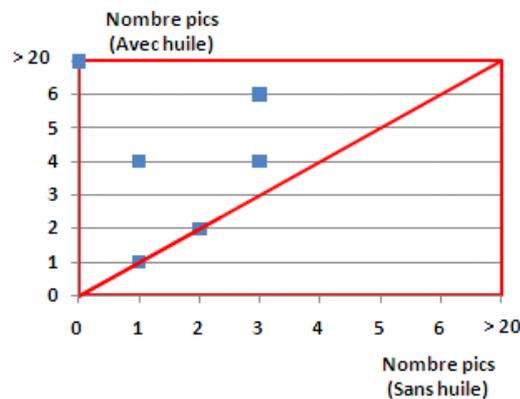


Figure 251 : Comparaison du nombre de pics de pression des essais sans huile et des essais en présence d'huile

La multiplication des pics s'explique par la capacité des émulsions liquides, à cause de leur viscosité, de boucher temporairement le passage. Toutefois, contrairement à la glace qui est solide, ils sont capables de se déplacer et de se dégager quand la pression à l'intérieur du tube augmente à cause du bouchon.

Dans certains cas, en particulier pour les **conditions condensantes**, les bouchons sont systématiquement dégagés de manière cyclique et la pression finale ne dépasse pas la dizaine de millibar (Figure 252-A). Dans d'autres cas, la pression moyenne continue à augmenter malgré les fluctuations et à termes l'émulsion ou la glace fini par boucher totalement les tubes (Figure 252-B).

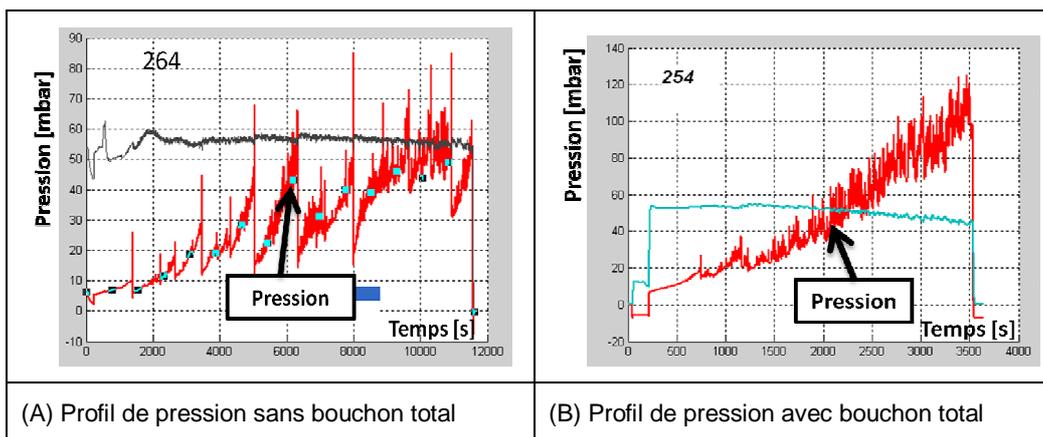


Figure 252 : Profil de pression à pic multiple en présence d'huile

6.6 Impact thermique de l'huile

La présence de particules d'huile sont susceptibles de modifier les phénomènes de transfert de chaleur de par sa propre capacité calorifique ou en agissant sur la possibilité d'une condensation homogène (les particules d'huile agissant en tant que des noyaux de condensation ou CCN), Toutefois, aucun de ces effets n'a été constaté pour les configurations et conditions opératoires

testées. Comme le montre la comparaison de la Figure 253, l'énergie thermique totale échangée est presque identique pour les essais avec huile et les essais sans huile.

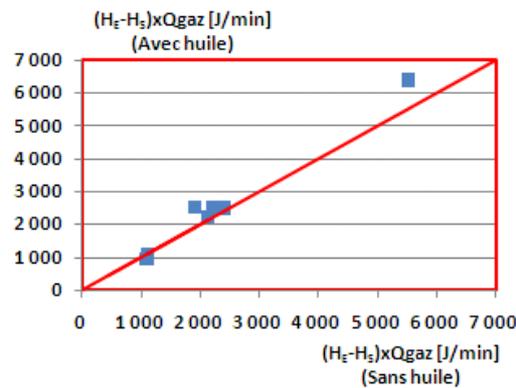


Figure 253 : Comparaison de l'énergie échangée en présence et en absence de particule

Le faible impact thermique de l'huile s'explique par la faible quantité de particules d'huile mise en jeu (taux de dépôt maximal de 3,15 g/h selon les mesures) comparée au débit de gaz. En outre, compte tenu de la taille des tubes testés (D18), les phénomènes de brouillard sont défavorisés et la présence des particules comme noyaux de condensation n'aura aucun impact. Des essais supplémentaires avec des tubes plus grands (diamètre supérieur à 18 mm) sont nécessaires pour mettre en évidence ce phénomène.

6.7 Conclusion partielle

Les essais en présence d'huile ont mis en évidence le rôle de l'émulsion sur le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by. A travers les expériences, on a pu constater que les particules d'huile jouent un rôle important seulement si l'eau peut se trouver à l'état liquide dans le circuit.

Pour les **conditions condensantes**, la présence de particules d'huile favorise la formation de bouchon en piégeant l'eau liquide sous forme d'émulsion à l'intérieur de l'échantillon. Le **bouchon total** du tube n'est pas toutefois systématique, la montée en pression peut stagner à une certaine valeur dans la mesure où la grande partie des émulsions qui se forme est évacuée à l'extérieur du tube. Les émulsions qui se forment sont très riches en eau. Elles peuvent cristalliser mais ne sont pas forcément miscibles à l'eau en toute proportion.

Dans les conditions opératoires favorables aux **phénomènes mixtes**, la présence d'huile entraîne généralement une faible diminution de la pression finale ainsi qu'un léger retard de l'apparition des bouchons sans pour autant conduire au dégagement total du passage.

Pour les **conditions givrantes**, l'huile est piégée sous forme de particules à l'intérieur du givre sans qu'il y ait une modification notable de l'apparence de celui-ci.

La formation de l'émulsion concerne essentiellement la partie amont des échantillons. Dans la partie aval, les particules d'huile se raréfient et les phénomènes observés sont quasi identiques avec ceux constatés en absence de particules.

Bien que la présence d'huile n'ait aucune influence apparente sur les phénomènes de givrage, le taux de dépôt des particules est maximal quand le phénomène de givrage prédomine. Le taux de dépôt est minimal en présence de condensation et négligeable si la paroi est sèche.

Vis-à-vis du profil de pression, la présence d'huile s'accompagne généralement d'une augmentation du nombre de pics de pression. Ce qui montre qu'à travers leur viscosité, les émulsions sont capables de boucher les circuits. Néanmoins, le bouchon peut être seulement temporaire puisqu'il peut se dégager quand la pression à l'intérieur des tubes augmente.

Enfin aucun effet thermique des particules d'huile n'a été constaté. Aussi, en tenant compte de cela, on peut en déduire que même en présence d'huile, les critères de bouchon définis dans le chapitre précédent restent inchangés, une attention particulière est toutefois nécessaire pour les domaines de condensation compte tenu du fait que les émulsions qui s'accumulent peuvent se solidifier en cas d'arrêt du gaz et sont susceptibles d'entraîner une montée en pression importante.

Tous nos essais ont été effectués pour une température de bain de -30°C . Pour mieux appréhender l'impact des particules d'huile sur les phénomènes de formation de gel et d'émulsions, il est nécessaire pour le futur de les compléter avec des essais à des températures de bain plus élevées. De même, des expériences avec des concentrations en huile plus faibles sont également recommandées.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les problèmes liés à la formation d'émulsions et de gels dans les circuits de blow-by des véhicules destinés aux pays froids constituent un enjeu important au niveau du groupe PSA. Faute de connaissances et de données techniques suffisantes des phénomènes ainsi que des paramètres mis en jeu, les approches actuelles sont surtout curatives. Elles reposent sur des essais systématiques des véhicules sur banc climatique ainsi que sur l'utilisation de modèles purement empiriques propres à chaque type de véhicule.

Compte tenu du coût des essais sur véhicules ainsi que des inconvénients causés par leur arrivée tardive dans le cycle de développement des véhicules, il est important que le groupe dispose des outils de prédiction des risques de bouchon du circuit de blow-by par les gels et les émulsions. Contrairement aux modèles thermiques actuels, ces outils de prédiction devraient être compatibles avec n'importe quel type de circuit de blow-by et doivent être utilisables même pendant la phase de conception des circuits.

Notre objectif principal dans ce travail de recherche était, avant tout, de comprendre les phénomènes mis en jeu dans la formation de gels et d'émulsions de blow-by, pour pouvoir construire des lois empiriques et théoriques permettant de comprendre l'influence des divers paramètres identifiés comme étant importants. Dans ce sens, nous avons orienté la recherche de manière à construire les modèles prédictifs adéquats.

L'état de l'art nous a permis de constater que malgré la diversité des résultats observés, le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by se résume au changement d'état de l'eau, contenue dans un gaz incondensable, de l'état vapeur à l'état liquide ou solide, dans un environnement froid et en présence de film ou de particules d'huile. Les phénomènes mis en jeu sont : la formation de givre, la condensation de la vapeur, la formation d'émulsion par le mélange intime du condensat avec l'huile, la cristallisation de l'eau ou de l'émulsion, la fusion de la glace ou de l'émulsion cristallisée et l'accrétion de particules d'eau ou de glace. Dans le cadre de cette thèse, nous avons concentré l'étude sur les phénomènes élémentaires les plus importants qui sont la formation de givre, la condensation, la solidification et la formation d'émulsion.

Les analyses bibliographiques ont montré que les principaux phénomènes élémentaires constitutifs de la formation de gels et d'émulsions de blow-by sont régis par des lois physiques totalement différentes les unes des autres et que l'importance des différents paramètres sur chaque phénomène élémentaire n'est pas toujours identique. Le domaine de l'émulsion relève de l'étude de la thermodynamique des systèmes multiphasiques (stabilité, température de cristallisation, distribution des phases) alors que la condensation et le givre sont surtout des phénomènes de transfert thermique. Une certaine différence est aussi constatée entre la condensation et le phénomène de givrage. La formation du givre a comme particularité de mettre en œuvre les phénomènes de transfert thermique en milieux poreux en plus des transferts thermiques par convection et par ablation (ou condensation) qui s'établissent entre le gaz et la paroi.

Un banc a été construit pour épauler cette étude. Le principe du banc consiste à envoyer un gaz modèle composé de particules d'huile et d'air humide dans un échantillon refroidi par un bain cryogénique. Les pressions, les débits, les températures et les humidités aux différents endroits du banc sont mesurés et contrôlés à travers des capteurs et des régulateurs.

Les paramètres importants

En tenant compte de la littérature ainsi que des résultats des essais préliminaires sur des dispositifs simples de laboratoire, nous avons choisi les paramètres suivants comme variables d'étude : le point de rosée du gaz, la température de la paroi, le débit de gaz, le diamètre des tuyaux et la géométrie des tuyaux. Les autres paramètres ont été maintenus constants et fixés à leurs valeurs optimales. Il

s'agit de l'orientation des tubes, l'angle au coude, la granulométrie, la nature et la quantité des huiles. Les paramètres en question sont aussi jugés importants, néanmoins l'étude de leurs impacts s'avère intéressante à condition que l'état physique de l'eau à l'intérieur des échantillons soit préalablement connu (givre figé ou condensat liquide mobile capable de se mélanger avec l'huile ?). A ces paramètres s'ajoutent la longueur du tube, la fréquence et l'amplitude de pulsation des débits. Les influences de ces derniers ont été considérées de manière théorique à partir des modèles que nous avons construits.

A travers les modèles théoriques établis dans le cadre de la thèse, nous avons constaté que le nombre de Nu, le point de rosée (autrement dit l'humidité absolue) et l'épaisseur du tube ont le maximum d'impact sur les débits de condensation et sur la température de paroi maximale à l'intérieur du tube. Ces paramètres agissent aussi sur la température de paroi minimale si le tube est suffisamment court. Pour les tubes longs, la température de paroi minimale ne varie qu'avec la température du bain elle-même. Une exception est toutefois constatée si l'énergie apportée par le gaz est élevée (débit, température et humidité du gaz élevés). Dans ce cas, l'épaisseur du tube peut jouer un rôle non négligeable sur la température en question.

Les phénomènes mis en jeu dans la formation des gels et des émulsions de blow-by

A travers les essais, nous avons constaté qu'en absence de particules d'huile, les phénomènes observés peuvent être classés en trois groupes. Qualitativement, on peut affirmer que dans les conditions de température de paroi, de débit ou de point de rosée faible, le givre prédomine. Dans les conditions de température, de débit ou de rosée élevée, on observe exclusivement la condensation. Dans les conditions intermédiaires, le givre, la condensation et la cristallisation de l'eau peuvent apparaître simultanément ou les uns après les autres (**phénomène mixte**).

Quantitativement, le domaine de prédominance des divers phénomènes a pu être cartographié grossièrement en se servant de la température moyenne de paroi. En faisant appel aux profils de température de paroi interne (température de paroi interne maximale, température de paroi interne minimale et longueur de tube maintenu en dessous de 0°C) qui sont donnés par les modèles thermiques que nous avons construits, il est possible d'avoir une prédiction plus détaillée des phénomènes en question. Aussi, pour un faible diamètre de tuyau (de l'ordre de 10 mm), l'approche a permis de définir l'état de l'eau pour chacune des conditions opératoires, et également de prédire les lieux de cristallisation de l'eau. Pour un diamètre moyen (D18), bien que la position exacte des lieux de cristallisation de l'eau n'a pas pu être prédite, l'approche a permis (en plus de la prédiction de l'état de l'eau) la détermination de la **mobilité de l'eau** à l'intérieur des tuyaux pour les diverses conditions opératoires.

En présence de particules d'huile, il s'avère que les condensats liquides sont remplacés par des émulsions blanches. Comme les condensats liquides, les émulsions peuvent se déplacer librement à l'intérieur des tubes, par contre, contrairement aux condensats, elles sont plus visqueuses et peuvent s'accumuler pour entraîner une montée en pression considérable. Pour les conditions de température ou de débit suffisamment faibles, les émulsions finissent par cristalliser à l'intérieur des tubes et les bouchent entièrement.

Bien que les essais se limitent aux tubes horizontaux avec des configurations rectilignes, la connaissance des phénomènes mis en jeu permet de prédire les phénomènes attendus et les risques de bouchon pour les configurations verticales ainsi que les géométries complexes (coudes, etc.). Ainsi, il est clair que les résultats obtenus avec les conditions aboutissant au phénomène de givrage ou au phénomène mixte avec une faible mobilité en eau resteront inchangés quelles que soient l'orientation des tubes et la géométrie. Par contre, pour les conditions opératoires aboutissant à la condensation ou à des phénomènes mixtes avec une mobilité importante de l'eau liquide, tout paramètre agissant sur la mobilité de l'eau (changement d'orientation, coudes, obstacle à l'intérieur du tube, couche d'huile, etc.) aura un impact sur les phénomènes et les risques de bouchon. Dans ces conditions, il est possible d'empêcher la formation de bouchon en favorisant le déplacement de l'eau

liquide par le maintien des tubes en configuration horizontale ou en configuration verticale descendante et en évitant toute forme d'irrégularité sur la surface (annelure, coude, etc.).

Transfert thermique (corrélations et modèles théoriques)

Il a été montré que les transferts de chaleur et de matière pendant la phase initiale de l'essai peuvent être corrélés expérimentalement. Deux corrélations ont été proposées. La première corrélation lie le nombre de Nusselt total (Nu_{tot}) avec les conditions opératoires. Elle permet de constater l'impact des différents paramètres sur le transfert thermique total. En particulier, elle a permis de mettre en évidence l'interaction entre l'impact du débit et l'impact de l'humidité en termes de transfert thermique. En outre, la corrélation indique que la sensibilité vis-à-vis du débit décroît quand le débit augmente. La deuxième corrélation lie l'énergie totale échangée avec le gradient d'enthalpie entre le gaz à l'entrée du tube et le gaz au voisinage de la paroi. Elle a permis de constater deux types d'échange thermique qui s'effectuent simultanément à l'intérieur de l'échantillon. L'un est lié à la convection du côté du gaz et est impacté par le nombre de Reynolds alors que l'autre est indépendant de la convection. Il s'agit de la **stabilisation du gaz sursaturé** qui se forme dans le système.

A part les corrélations expérimentales qui sont propres aux conditions de refroidissement et à la longueur des tubes testés, nous avons pu modéliser le transfert thermique mis en jeu en se servant de l'analogie de Lewis et en introduisant le concept de **formation de brouillard** ou de **stabilisation isothermique des gaz sursaturés** qui se forment. Les modèles peuvent être alimentés directement par des nombres de Nusselt expérimentaux calculés avec les essais en conditions sèches ou, le cas échéant, à partir des corrélations de la bibliographie.

Le profil de pression et les critères de bouchon

Le profil de montée en pression induit par les bouchons varie avec les phénomènes mis en jeu. La montée en pression est brusque pour les phénomènes mixtes de glace, de condensation et de givrage. Pour les phénomènes de givrage, la montée en pression se fait de manière progressive et peut aller au-delà des trois heures d'essai. Aucune montée en pression n'est constatée pour les condensations. Enfin, en présence d'émulsion, la montée en pression s'accompagne généralement de plusieurs détentes temporaires jusqu'au bouchon total ou jusqu'à une certaine pression limite de quelques dizaines de millibars (<135 mbars). Plus généralement, cette multiplication du nombre de pics de pression est observée pour tous les essais réalisés dans des **conditions condensantes**⁵ mais qui ont tout de même conduit à la cristallisation de l'eau à cause d'autres paramètres comme la présence d'huile, la configuration annelée du tube, une épaisseur du tube plus faible.

L'analyse des essais montre que le bouchon total des tubes est évité si au moins une des trois conditions suivantes est satisfaite :

- 1) La température à l'intérieur des tubes est suffisamment élevée pour que l'eau ou l'émulsion ne puisse pas se figer. Les conditions opératoires correspondantes sont appelées **conditions condensantes** (la valeur du critère n'est pas forcément à 0°C).
- 2) La quantité d'eau qui se dépose n'est pas suffisamment élevée pour que le tube puisse se boucher dans les trois heures d'essai.
- 3) La glace a pu se former mais elle est limitée à une certaine hauteur à cause de son environnement qui tend à la faire fondre : inondation par de l'eau chaude provenant de l'amont du tube, convection du côté du gaz chaud. Ce cas de figure est rencontré essentiellement pour les tubes de grand diamètre.

Les zones de formation de bouchon peuvent être cartographiées en utilisant les deux critères suivants : le débit total de condensation et la température moyenne de paroi interne du tube. Les valeurs critiques correspondantes à chaque critère ont été déterminées expérimentalement pour les

⁵ Point de rosée maximale, débit maximal

différents diamètres de tube testés. Pour aboutir aux bouchons, les conditions requises sont de plus en plus sévères (température moyenne de paroi plus faible, débit de condensation plus élevé) quand le diamètre augmente. Enfin, pour un tube quelconque à étudier, il est possible d'utiliser les modèles thermiques établis pour retrouver les valeurs numériques des débits de condensation et des températures moyennes de paroi interne en fonction des conditions opératoires.

Comme il a été énoncé précédemment, la position des bouchons pour les diamètres de tube faibles a pu être cartographiée en fonction du profil de température de paroi interne. De ce fait, il nous est possible de déterminer, en utilisant les modèles élaborés, le risque de bouchon même pour les tubes les plus courts et la longueur minimale du tube nécessaire pour aboutir à un bouchon.

Limites et perspectives

Nos travaux de recherche se sont focalisés sur les configurations horizontales et linéaires. Ce qui nous a permis d'établir une cartographie complète des phénomènes et des risques de bouchon pour les différentes conditions de température de rosée (caractéristique de l'humidité absolue et de la température du gaz saturé), de température de paroi externe, de débit de gaz et de diamètre de tuyau.

Pour compléter les études, il serait important de reprendre les mêmes essais pour les tubes verticaux, inclinés ou coudés, notamment pour les conditions opératoires aboutissant aux phénomènes de condensation ou aux phénomènes mixtes avec une **mobilité en eau** élevée. Les études analytiques correspondantes permettront la mise en évidence de l'impact thermique du phénomène d'inondation avec les configurations en question et l'établissement de la relation entre la morphologie des bouchons et le régime d'écoulement diphasique correspondant.

Les différents phénomènes observés étant cartographiés, l'impact de la quantité d'huile introduite ainsi que de la granulométrie des particules d'huile peuvent être étudiés dans le futur. Comme pour l'impact des configurations des tubes, une telle étude a de l'intérêt dans les **conditions condensantes** et dans les conditions favorables aux phénomènes mixtes avec une **mobilité en eau** élevée. Les études devraient aboutir dans ce cas à de nouvelles cartographies permettant de séparer les zones de condensation, des zones d'émulsion ainsi que les zones de glaces, des zones d'émulsion visqueuse ou des zones d'émulsion liquide.

Pour le cas des moteurs à essence, l'impact des carburants devrait être étudié en utilisant un banc d'essai approprié. En particulier, il serait intéressant de voir de plus près les phénomènes suivants : la compétition entre la condensation de la vapeur d'eau et la condensation de la vapeur de carburant [136], le « réchauffement » de la paroi due à la condensation de la vapeur d'essence, l'augmentation de la température de cristallisation des émulsions ou de l'eau due à la présence d'essence liquide (non cristallisable) et la dilution des émulsions par de l'essence (stabilisation ou déstabilisation de l'émulsion, modification de la viscosité).

Enfin, bien que nous ayons pu étudier théoriquement l'impact de la pulsation du débit sur les coefficients de transfert par convection, il est prudent de les valider expérimentalement compte tenu de la sensibilité élevée du système vis-à-vis de Nu . Ceci est d'autant plus vrai que les corrélations disponibles ont été établies dans des conditions de température élevée ainsi qu'avec des amplitudes de pulsation pouvant être très différentes du cas des gaz de blow-by (gaz d'échappement, etc.) [137].

DEFINITION DES TERMES

Accrétion	Accumulation de particules de glace ou de liquide surfondu en suspension sur une paroi solide.
Bouchant	Ce terme est utilisé pour décrire tout phénomène conduisant à une montée en pression au-delà des critères de référence cités dans le Tableau 18.
Bouchon partiel	Givre, glace ou mélange des deux entraînant une montée en pression au-delà des critères définis sur le Tableau 18 mais inférieure à 135 mbars (c'est-à-dire $k_v < 1$).
Bouchon total	Givre, glace ou mélange des deux entraînant une montée en pression au-delà de 135 mbars
Condensat	Cf. paragraphe §2.4
Condition agressive	Condition de température, de débit et d'humidité défavorable au maintien de la glace à l'état solide (température, débit et humidité élevés)
Condition condensante (ou zone condensante)	Condition de température, de débit et d'humidité favorables à la condensation.
Condition givrante (ou zone givrante)	Condition de température, de débit et d'humidité favorables à la formation de givre.
Débit élevé	$Q_{\text{gaz}} > 50 \text{ L /min}$
Débit moyen	$Q_{\text{gaz}} \sim 20 \text{ L /min}$
Faible débit	$Q_{\text{gaz}} < 6 \text{ L /min}$
Givre	cf. Annexe
Humidité élevé	$T_d > 40^\circ\text{C}$
Humidité moyenne	$T_d \sim 20^\circ\text{C}$
Humidité Faible	$T_d < 7^\circ\text{C}$,
Non bouchant	Ce terme est utilisé pour décrire tout phénomène qui n'a pas conduit à une montée en pression dans le tube ou qui a conduit à une montée en pression mais qui n'a pas atteint la pression de référence définie par le Tableau 18. (c'est-à-dire $k_v > 1$)
Richesse	$\frac{\left(\frac{\text{quantité de combustible}}{\text{quantité de comburant}}\right)_{\text{mélange étudié}}}{\left(\frac{\text{quantité de combustible}}{\text{quantité de comburant}}\right)_{\text{mélange stoechiométrique}}}$
Zone amont (resp. zone aval)	Ce terme est utilisé pour définir la partie de l'échantillon du côté de l'entrée du gaz humide (resp. du côté de la sortie du gaz humide).
Zone mixte	Zone dans laquelle on observe à la fois (ou successivement) la formation de condensat liquide, la formation de givre et éventuellement la solidification des condensats.

REFERENCES

- [1] M. RANDIMBISOA, "FORMATION DE GELS ET D'ÉMULSIONS DANS LE CIRCUIT DE BLOW-BY DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE (Version complète)." Document interne PSA.
- [2] N. H. FLETCHER, *The Chemical Physics of Ice*. 2009.
- [3] J. G. COLLIER and J. R. THOME, *Convective boiling and condensation*. Clarendon Press, 1996.
- [4] ASHRAE, "Psychrometrics," in *ASHRAE Fundamentals Handbook*, Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2009.
- [5] B. CRETINON, "Paramètres hygrométriques," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [6] M. DUMINIL, "Air humide," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [7] J.-P. CANSELIER and M. POUX, "Procédés d'émulsification: Mécanismes de formation des émulsions," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [8] P. BROCHETTE, "Émulsification □: Élaboration et étude des émulsions," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [9] I. CUÉLLAR, J. BULLÓN, A. M. FORGARINI, A. CÁRDENAS, and M. I. BRICEÑO, "More efficient preparation of parenteral emulsions or how to improve a pharmaceutical recipe by formulation engineering," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 8-9, pp. 2127-2134, April.
- [10] J.-L. SALAGER, R. ANTÓN, J. M. ANDÉREZ, and J.-M. AUBRY, "Formulation des microémulsions par la méthode du HLD," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [11] L. CHOPLIN, "Méthode d'élaboration d'émulsion rhéologiquement complexes," presented at the Assemblée Générale Fédération J. Villemaux, Nancy, 2006.
- [12] J.-L. SALAGER, R. ANTON, and J.-M. AUBRY, "Formulation des émulsions par la méthode du HLD," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [13] F. THIVILLIERS, "Gels d'émulsions à base d'huiles cristallisables □: mécanismes de formation et propriétés rhéologiques.," Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1.
- [14] M. BONNET, "Liberation controlée du magnesium par des emulsions doubles □: impact des parametres de formulation.," Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 2008.
- [15] D. CLAUSSE and C. DALMAZZONE, "Utilisation de la DSC pour la caractérisation des émulsions," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [16] J. M. JASON, "Condensation des effluents gazeux dans les échangeurs en présence d'incondensable," Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2003.
- [17] INCROPERA, DEWITT, LAVINE, BERGMAN, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed.
- [18] H. VENZAC, "Étude des processus de nucléation dans l'atmosphère," Thèse de Doctorat, Université en Physique de l'Atmosphère, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2008.
- [19] Z. LIU, X. ZHANG, H. WANG, S. MENG, and CHENG Shuiyuan, "Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection

- conditions,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, p. 789–794, 2007.
- [20] D. BEYSENS, “Dew nucleation and growth,” *Comptes Rendus Physique*, vol. 7, no. 9-10, pp. 1082-1100, 2006.
- [21] C. GRAHAM and P. GRIFFITH, “Drop size distributions and heat transfer in dropwise condensation,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 16, no. 2, pp. 337-346, 1973.
- [22] K. K. VARANASI, T. DENG, J. D. SMITH, M. HSU, and N. BHATE, “Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces,” *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 23, p. 234102, 2010.
- [23] A. BEJAN and A. D. KRAUS, *Heat transfer hand book*. 2003.
- [24] L. M. K. BOELTER and DITTUS, “Heat transfer in automobile radiators of the tubular type,” vol. 2, no. 13, pp. 443-461.
- [25] A. P. A. COLBURN, “A method of correlating forced convection heat-transfer data and a comparison with fluid friction,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 7, no. 12, pp. 1359-1384, 1964.
- [26] J. G. KNUDSEN, H. C. HOTTEL, A. F. SAROFIM, P. C. WANKAT, and K. S. KNAEBEL, “Heat and mass transfer,” in *Chemical Engineer’s Handbook*, McGraw-Hill.
- [27] J. E. DEC, J. O. KELLER, and V. S. ARPACI, “Heat transfer enhancement in the oscillating turbulent flow of a pulse combustor tail pipe,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 9, pp. 2311-2325, 1992.
- [28] I. CELIK and Y. Z. WANG, “Heat release and frictional effects on wave propagation in the tail pipe of pulsed combustors,” in *Pressure Vessels and Piping Conference*, Pittsburgh, 1988.
- [29] D. O. BARNETT and R. I. VACHON, “An analysis of convective heat transfer for pulsating flow in a tube,” in *Fourth International Heat Transfer Conference*, Paris, 1970.
- [30] S. E. HOMMEMA, K. A. TEMPLE, J. D. JONES, and V. W. GOLDSCHMIDT, “Heat transfer in condensing, pulsating flows,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 1, pp. 57-65.
- [31] A. A. AL-HADDAD and N. AL-BINALLY, “Prediction of heat transfer coefficient in pulsating flow,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 10, no. 2, pp. 131-133, Jun. 1989.
- [32] V. S. ARPACI, J. E. DEC, and J. O. KELLER, “Heat Transfer in Pulse Combustor Tailpipes,” *Combustion Science and Technology*, vol. 94, no. 1, pp. 131-146, 1993.
- [33] BIRD R Byron, “Transport phenomena,” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 55, no. 1, p. R1-R4, Jan. 2002.
- [34] H. J. H. BROUWERS, “Film models for transport phenomena with fog formation with application to plastic heat exchangers and condensers,” Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, 1990.
- [35] L. JIA, X. F. PENG, Y. YAN, J. D. SUN, and X. P. LI, “Effect of water vapour condensation on the convection heat transfer of wet flue gas in a vertical tube,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 22, pp. 4257-4265, 2001.
- [36] H. J. H. BROUWERS, “Film models for transport phenomena with fog formation the

- classical film model,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 1, pp. 1-11, 1992.
- [37] Y. LIANG, D. CHE, and Y. KANG, “Effect of vapor condensation on forced convection heat transfer of moistened gas,” *Heat Mass Transfer*, vol. 43, p. 677–686, 2007.
- [38] H. J. H. BROUWERS, “An improved tangency condition for fog formation in cooler condensers,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, no. 9, pp. 2387-2394, 1991.
- [39] A. P. COLBURN and O. A. HOUGEN, “Design of Cooler Condensers for Mixtures of Vapors with Noncondensing Gases,” *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 26, no. 11, pp. 1178-1182, Nov. 1934.
- [40] H. J. H. BROUWERS, “Comments on Effect of humid air flow rate on the filmwise condensation inside a vertical cooled pipe: numerical and experimental study,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 2139-2140, 1995.
- [41] S. K. PARK, M. H. KIM, and K. J. YOO, “_Effects of a wavy interface on steam air condensation on a vertical surface,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 23, no. 6, pp. 1031-104, 1997.
- [42] ACKERMANN, “Heat transfer and molecular mass transfer in the same field at high temperatures and large partial pressure differences,” *VDI ForschHft*, vol. 8, p. 1–10, 1937.
- [43] L. E. HERRANZ, J. L. MUNOZ-COBO, and M. J. PALOMO, “Modeling condensation heat transfer on a horizontal finned tube in the presence of noncondensable gases,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 201, p. 273–288.
- [44] J. C. DE LA ROSA and J. L. MUNOZ-COBO, “Analysis of the suction effect on the mass transfer when using the heat and mass transfer analogy,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 239, p. 2042–2055, 2009.
- [45] W. M. KAYS, M. E. CRAWFORD, and B. WEIGAND, *Convective heat and mass transfer*. McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [46] K. JEONG, H. BILIRGEN, and E. LEVY, “Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, p. 2361–2368.
- [47] B. M. SURYAVANSHI and L. R. DONGRE, *Transport Phenomena*. Nirali Prakashan, 2006.
- [48] M. OSAKABE, S. HORIKI, and Y. HANAOKI, “Prediction and Performance of Compact Heat Exchanger with Small Diameter Tubes for Latent Heat Recovery,” *Journal of Environment and Engineering*, vol. 4, no. 1, 2009.
- [49] A. M. ZHU, S. C. WANG, J. X. SUN, L. X. XIE, and Z. WANG, “Effects of high fractional noncondensable gas on condensation in the dewvaporation desalination process,” *Desalination*, vol. 214, p. 128–137.
- [50] L. JIA, X. F. PENG, J. D. SUN, and T. B. CHEN, “An Experimental Study on Vapor Condensation of Wet Flue Gas in a Plastic Heat Exchanger,” *Heat Transfer-Asian Research*, vol. 30, no. 7, 2001.
- [51] L. JIA and J. D. SUN, “Heat Transfer Research on Vapor Gas Mixture with Condensation in a Vertical Tube,” *Heat Transfer-Asian Research*, vol. 31, no. 7, 2002.
- [52] C.-C. WANG, Y.-T. LIN, and C.-J. LEE, “An airside correlation for plain fin-and-

- tube heat exchangers in wet conditions,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 10, pp. 1869-1872, 2000.
- [53] C.-C. WANG, Y.-chung HSIEH Yi-chung, and LIN Yur-Tsai, “Performance of Plate Finned Tube Heat Exchangers Under Dehumidifying Conditions,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 119, no. 1, p. 109, 1997.
- [54] G. J. KIM and A. M. JACOBI, “Condensate Accumulation Effects on the Air-Side Thermal Performance of Slit-Fin Surfaces,” Jan-2000.
- [55] Y.-G. PARK and A. M. JACOBI, “The Air-Side Thermal-Hydraulic Performance of Flat-Tube Heat Exchangers With Louvered, Wavy, and Plain Fins Under Dry and Wet Conditions,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 131, no. 6, p. 061801, 2009.
- [56] C.-C. WANG, Y.-T. LIN, and C.-J. LEE, “Heat and momentum transfer for compact louvered fin-and-tube heat exchangers in wet conditions,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 18, pp. 3443-3452, Sep. 2000.
- [57] C.-C. WANG, Y.-J. DU, and YU-JUEI, “Airside performance of herringbone fin-and-tube heat exchangers in wet conditions - Wang - 2009 - The Canadian Journal of Chemical Engineering - Wiley Online Library,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 77, no. 6, p. 1225–1230, 1999.
- [58] D. CHE, Y. DA, and Z. ZHUANG, “Heat and mass transfer characteristics of simulated high moisture flue gases,” *Heat and Mass Transfer*, 2004.
- [59] A. JACOBI and V. GOLDSCHMIDT, “Low Reynolds number heat and mass transfer measurements of an overall counterflow, baffled, finned-tube, condensing heat exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, no. 4, pp. 755-765, 1990.
- [60] D. R. MIRTH and S. RAMADHYANI, “Correlations for predicting the air-side Nusselt numbers and friction factors in chilled-water cooling coils,” *Experimental Heat Transfer*, vol. 7, no. 2, pp. 143-162, 1994.
- [61] T. D. CHEN, CONKLIN J. C., and BAXTER V. D., “Dehumidification Prediction of Condensate Flow rate for Pate Fin Tube Heat Exchangers Using the Latent j Factor,” in *Dehumidification_Prediction of Condensate Flow rate for Pate Fin Tube Heat Exchangers Using the Latent j Factor*, San Diego, California, 1999.
- [62] V. I. TEREKHOV, V. V. TEREKHOV, and K. A. SHAROV, “Heat and mass transfer in condensation of water vapor from moist air,” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 71, no. 5, 1998.
- [63] M. GROFF, “An algebraically-explicit correlation for forced-convection condensation of steam-air and steam-hydrogen on horizontal plates,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 29, no. 8, pp. 1047-1056, 2002.
- [64] X. SHI, B. AGNEW, J. GAO, and D. CHE, “An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, p. 606–615.
- [65] J.-M. DELHAYE, “Transferts de chaleur ébullition ou condensation des corps purs,” *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [66] C. PELE, B. BAUDOIN, and J. P. BARRAND, “Effect of humid air flow rate on the filmwise condensation inside a vertical cooled pipe numerical and experimental study,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 13, pp. 1829-1837, 1994.

- [67] V. D. STEVANOVIC, Z. V. STOSIC, and U. STOLL, "Condensation induced non-condensables accumulation in a non vented vertical pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, p. 83–103, 2005.
- [68] W. NUSSELT, "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes," *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, vol. 60, p. 541–575, 1916.
- [69] J. L. MUNOZ-COBO, L. HERRANZ, J. SANCHO, I. TKACHENKO, and G. VERDU, "Turbulent vapor condensation with noncondensable gases in vertical tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 15, pp. 3249-3260, 1996.
- [70] K. J. BELL and A. C. MUELLER, "Two phase flow pattern," in *Engineering databook III*, Wolvering Tube Inc, 2010.
- [71] T. KAGEYAMA and V. E. SCHROCK, "Diffusion layer modeling for condensation in vertical tubes with noncondensable gases," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 141, pp. 289-302, 1993.
- [72] S. K. PARK, M. H. K I M, and K. J. YOO, "Condensation of pure steam and steam-air mixture with surface waves of condensate film on a vertical wall," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 22, no. 5, pp. 893-908, 1996.
- [73] S. OH and S. T. REVANKAR, "Analysis of the complete condensation in a vertical tube passive condenser," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, p. 716–727, 2005.
- [74] K. J. BELL and A. C. MUELLER, "Condensation inside a tube," in *Engineering databook III*, Wolvering Tube Inc, 2010.
- [75] J. C. CHATO, "Laminar condensation inside horizontale and inclined tubes," MIT, 1960.
- [76] ROSSON and MYERS, "Point values of condensing film coefficients inside a horizontal pipe," *Chemical Engineering Progress*, vol. 61, no. 59, 1965.
- [77] M. ISHII and M. A. GROLMES, "Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow," *AIChE Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 308-318, 1975.
- [78] C. YAMALI and H. MERTE Jr, "A theory of dropwise condensation at large subcooling including the effect of the sweeping," *Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 3, pp. 191-202, 2002.
- [79] J. W. ROSE, "Further aspects of dropwise condensation theory," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 19, pp. 1363-1370, 1976.
- [80] M. ABU-ORABI, "Modeling of heat transfer in dropwise condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, no. 1, pp. 81-87, 1998.
- [81] L. GLICKSMAN and A. W. HUNT, "Numerical simulation of dropwise condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 2251-2269, 1972.
- [82] T. TSURUTA and H. TANAKA, "A theoretical study on the constriction resistance in dropwise condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, no. 11, pp. 2779-2786, 1991.
- [83] T. TSURUTA, H. TANAKA, and S. TOGASHI, "Experimental verification of constriction resistance theory in dropwise condensation heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 2787-2796, 1990.

- [84] R. J. HANNEMANN and B. B. MIKIC, "An analysis of the effect of surface thermal conductivity on the rate of heat transfer in dropwise condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 19, pp. 1299-1307, 1976.
- [85] S. N. AKSAN and J. W. ROSE, "Dropwise condensation - The effect of thermal properties of the condenser material," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 16, no. 461-467, 1973.
- [86] M. MEI, B. YU, J. CAI, and L. LUO, "A fractal analysis of dropwise condensation heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, p. 4823–4828, 2009.
- [87] J. W. ROSE and L. R. GLICKSMAN, "Dropwise condensation - The distribution of drop sizes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 16, pp. 411-425, 1973.
- [88] Y.-T. WU, C.-X. YANG, and X.-G. YUAN, "Drop distributions and numerical simulation of dropwise condensation heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 23, pp. 4455-4464, Dec. 2001.
- [89] A. W. NEUMANN, A. H. ABDELMESSIH, and A. HAMEED, "The role of contact angles and contact angle hysteresis in dropwise condensation heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 21, pp. 947-953, 1978.
- [90] G. KOCH, K. KRAFT, and A. LEIPERTZ, "Parameter study on the performance of dropwise condensation," *Revue Générale de Thermique*, vol. 37, no. 7, pp. 539-548.
- [91] D. G. WILKINS, L. A. BROMLEY, and S. M. READ, "Dropwise and Filmwise Condensation of Water Vapor on Gold," *AIChE Journal*, vol. 19, no. 1, 1973.
- [92] X.-H. MA, X.-D. ZHOU, Z. L. LAN, Y.-M. LI, and Y. ZHANG, "Condensation heat transfer enhancement in the presence of non-condensable gas using the interfacial effect of dropwise condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, p. 1728–1737, 2008.
- [93] I. K. HUHTINIEMI and M. L. CORRADINI, "Condensation in the presence of noncondensable gases," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 141, pp. 429-446, 1993.
- [94] B. D. STOREY and A. M. JACOBI, "The effect of streamwise vortices on the frost growth rate in developing laminar channel flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, p. 3787–3802, 1999.
- [95] K. AOKI, K. KATAYAMA, and Y. HAYASHI, "A study on frost formation," *JSME*, vol. 26, no. 211, 1983.
- [96] C.-H. CHENG and K.-H. WU, "Observations of Early-Stage Frost Formation on a Cold Plate in Atmospheric Air Flow," *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, no. 1, pp. 95-102, Feb. 2003.
- [97] CERTAM and LECA/ENSCP, *Etude de faisabilité pour l'obtention d'un gel de blow-by dans des conditions proches du fonctionnement d'un moteur*. Document interne PSA.
- [98] J.C. GUIBET, "Les carburants et la combustion," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [99] A. ALEXANDRE and L. TOMASELLI, "Modélisation thermique des moteurs," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [100] M. LECOMPTE, "Etude expérimentale des sprays d'huile dans un moteur à combustion interne: Influence de l'écoulement de blow-by et participation à la consommation d'huile," Thèse de doctorat, 2007.

- [101] M. RANDIMBISOA, *Compte rendu des essais préliminaires 1*. Document interne PSA, 2010.
- [102] M. RANDIMBISOA, *Compte rendu des essais préliminaires 2*. Document interne PSA, 2010.
- [103] C. DUEZ, “Mouillage statique et dynamique,” Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon I.
- [104] K. LEE, N. IVANOVA, V. STAROV, N. HILAL, and V. DUTSCHK, “Kinetics of wetting and spreading by aqueous surfactant solutions,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 144, no. 1-2, pp. 54-65, 2008.
- [105] C. W. EXTRAND, “Water Contact Angles and Hysteresis of Polyamide Surfaces,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 248, no. 1, pp. 136-142, Apr. 2002.
- [106] M. GMACH-TURMINE, “Contribution à l’approche thermodynamique de la mouillabilité. caractérisation de l’état de surface de solides,” Thèse de Doctorat, UPMC, 1991.
- [107] B. NA and R. L. WEBB, “A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 20, pp. 3797-3808, Sep. 2003.
- [108] PSA, *Norme PSA B71 2290*. 2009.
- [109] Total, *Avancement étude amalgame de blow-by Total 16 mai 2007*. PSA.
- [110] Total, *Réunion Avancement PSA - TOTAL 12 dec 2007*. PSA, 2007.
- [111] Total, *Point d’avancement PSA TOTAL 04 avril 2007*. PSA, 2007.
- [112] E. YILMAZ, J. B. HEYWOOD, V. W. WONG, and T. TIAN, “Summary of the Oil Consumption Project in the Production SI Engine,” presented at the Consortium on Lubrication in Internal Combustion Engines, 2003.
- [113] M. TURMINE and EDMOND Eliane, *Réunion du 23 Juillet 2004- UMR7575/PSA*. PSA.
- [114] M. TURMINE and EDMOND Eliane, *Réunion du 29 octobre 2004- UMR7575/PSA*. PSA.
- [115] KAIYANG QU, S. KOMRI, and Y. JIANG, “Local variation of frost layer thickness and morphology,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, p. 116–123, 2006.
- [116] C. J. TRAMMEL, D. C. Little, and E.M. Killgore, “A study of the frost formed on a flat plate held at sub-freezing temperatures,” *ASHRAE J*, vol. 10, p. 42–47, 1968.
- [117] J. EL HAJAL, J. R. THOME, and A. CAVALLINI, “Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 18, pp. 3349-3363, Aug. 2003.
- [118] D. R. RICHARDS and L. W. FLORSCHUETZ, “Forced Convection Heat Transfer to Air-Water Vapor Mixtures.” Arizona State Univ., Tempe. Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, 1984.
- [119] A. VEPSÄLÄINEN, “Fundamentals Of Heat Transfer Convection.” Lappeenranta University Of Technology.
- [120] M Conde Engineering, “Moist air property.” M Conde Engineering, 2007.

- [121] B. E. POLING, J. M. PRAUSNITZ, and J. P. O'CONNELL, *The Properties of Gases and Liquids*, 5th ed. McGraw-Hill Professional, 2000.
- [122] P. PERROT, "Propriétés thermodynamiques de l'eau," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [123] ASHRAE, *ASHRAE Fundamentals Handbook*. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2001.
- [124] L. XIA, M. Y. CHAN, and X. G. XU, "A modified logarithmic mean enthalpy difference method for evaluating the total heat transfer rate of a wet cooling coil under both unit and non unit Lewis Factors," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, p. 2159–2164, 2009.
- [125] K. J. BELL and A. C. MUELLER, "Heat transfer to air cooled heat exchanger," in *Engineering databook III*, Wolvering Tube Inc, 2010.
- [126] AMESIM, *lib_two_phase_flow*. IMAGINE.
- [127] L. XIA, M. Y. CHAN, and S. M. DENG, "Analytical solutions for evaluating the thermal performances of wet air cooling coils under both unit and non-unit Lewis Factors," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, p. 2079–2086, 2010.
- [128] G. DESRAYAUD and G. LAURIAT, "Heat and mass transfer analogy for condensation of humid air in a vertical channel," *Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 1, pp. 67-76, 1999.
- [129] E. M. SPARROW and LIN S. H., "Condensation heat transfer in the presence of a noncondensable gas," *Journal of Heat Transfer*, vol. 86, no. 3, pp. 430-6, 1964.
- [130] "Psychrometric Processes." <http://www.hku.hk/bse/MEBS6006/DencoCH2.pdf>.
- [131] H. C. KANG and M. H. KIM, "Characteristics of film condensation of supersaturated steam air mixture on a flat plate," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 25, p. 1601–1618, 1999.
- [132] P. DUSAN and D. P. SEKULIC, "Irreversible condensation conditions near the cryosurface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 28, no. 6, pp. 1214-1985.
- [133] D. E. ROSNER and M. EPSTEIN, "Fog formation conditions near cool surfaces," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 28, no. 1, pp. 60-65, 1968.
- [134] D.-K. YANG and K.-S. LEE, "Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 27, pp. 89-96, 2004.
- [135] D.-K. YANG and K.-S. LEE, "Modeling of frosting behavior on a cold plate," *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, p. 396–402, 2005.
- [136] A. BONTEMPS, "Condensation de mélanges de vapeurs: Transfert de chaleur et de masse," *Techniques de l'Ingénieur*. .
- [137] I. I. Pop and D. B. Ingham, *z_Convective heat transfer: mathematical and computational modelling of viscous fluids and porous media*. Elsevier, 2001.
- [138] A. Z. SAHIN, "An experimental study on the initiation and growth of frost formation on a horizontal plate," *Experimental Heat Transfer*, vol. 7, pp. 101-119, 1994.
- [139] H. B. ANDREAS LÜER, "Frost deposition in a parallel plate channel under laminar flow conditions," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 39, p. 85–95, 2000.
- [140] X. X. KAIYANG QU and Z. DUAN, "Experimental study on behavior of initial frost

- crystal formation under lower water vapor pressures,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, p. 819–826.
- [141] X.-M. GUO, Y.-G. CHEN, W.-H. WANG, and C.-Z. CHEN, “Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, p. 2267–2278, 2008.
- [142] Y. X. TAO, R. W. BESANT, and MAO Y, “Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period,” *ASHRAE Trans Symp*, pp. 746 - 753, 1993.
- [143] C. J. L. HERMES, R. O. PIUCCO, J. R. BARBOSA, and C. MELO, “A study of frost growth and densification on flat surfaces,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 33, p. 371–379, 2009.
- [144] K. A. R. ISMAIL and C. S. SALINAS, “Modeling of frost formation over parallel cold plates,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 22, p. 425–441, 1999.
- [145] K. G. LIBBRECHT, “Morphogenesis on Ice: The Physics of Snow Crystals,” *Engineering and Science*, vol. 1, 2001.
- [146] Y. X. TAO, R. W. BESANT, and K. S. REZKALLAH, “A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 2, pp. 353-363, 1993.
- [147] K.-S. LEE, W.-S. KIM, and T. H. LEE, “A one dimensional model for frost formation on a cold flat surface,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 2, pp. 353-363, 1993.
- [148] K.-S. LEE, S. JHEE, and D.-K. YANG, “Prediction of the frost formation on a cold flat surface,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, p. Dong-Keun Yang, 2003.
- [149] D.-K. YANG, K.-S. LEE, and D.-J. CHA, “Frost formation on a cold surface under turbulent flow,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, p. 164–169, 2006.
- [150] J.-S. KIM, K.-S. LEE, and S.-J. YOON, “Frost behavior on a fin considering the heat conduction of heat exchanger fins,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, p. 2581–2588, 2009.
- [151] B. NA and R. L. WEBB, “Mass transfer on and within a frost layer,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, p. 899–911, 2004.
- [152] P. L. T. BRIAN, R. C. REID, and Y. T. SHAH, “Frost Deposition on Cold Surfaces,” *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 9, no. 3, pp. 375-380, 1970.
- [153] B. NA and R. L. WEBB, “New model for frost growth rate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, p. 925–936, 2004.
- [154] D.-K. YANG, K.-S. LEE, and S. SONG, “Modeling for predicting frosting behavior of a fin_tube heat exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, p. 1472–1479, 2006.
- [155] D. SEKER, H. KARATAS, and N. EGRICAN, “Frost formation on fin and tube heat exchangers - Part I: Modeling of frost formation on fin and tube,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, p. 367–374, 2004.
- [156] D. SEKER, H. KARATAS, and N. EGRICAN, “Frost formation on fin and tube heat exchangers-Part II: Experimental investigation of frost formation on fin and tube heat exchangers,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, p. 375–377, 2004.

- [157] R. YUN, Y. KIM, and M.-ki MIN, "Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate," *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, p. 362–371, 2002.
- [158] Y. MAO, R. W. BESANT, and H. CHEN, "Frost characteristics and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions (Printed)," *ASHRAE Trans*, vol. 4295, p. 231–251, 1999.
- [159] S. A. SHERIF, S. P. RAJU, M. M. PADKI, and A. B. CHAN, "Semi empirical transient method for modelling frost formation on a flat plate," *International Journal of Refrigeration*, vol. 16, no. 5, 1993.
- [160] Y. MAO, R. W. BESANT, and K. S. REZKALLAH, "Measurement and correlations of frost properties with air flow over a flat plate (Printed perhaps)," *ASHRAE Trans*, vol. 91, p. 267–81., 1992.
- [161] K. LENIC, A. TRP, and B. FRANKOVIC, "Transient two dimensional model of frost formation on a fin and tube heat exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, p. 22–32, 2009.
- [162] R. LE GALL and J. M. GRILLOT, "Modelling of frost growth and densification," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, no. 13, pp. 3177-3187, 1997.
- [163] H. AURACHER, "On the measurement of thermal conductivity in moist porous materials," *International Journal of Refrigeration*, vol. 1, no. 1, 1978.
- [164] G. H. NEALE and W. K. NADER, "Prediction of Transport Processes within Porous Media_Diffusive Flow Processes within an Homogeneous Swarm of Spherical Particles," *AIChE Journal*, vol. 19, no. 1, 1973.
- [165] H. CHEN, L. THOMAS, and R. W. BESANT, "Fan supplied heat exchanger fin performance under frosting conditions," *International Journal of Refrigeration*, vol. 26, pp. 140-149, 2003.
- [166] K. A. R. ISMAIL, C. SALINAS, and M. M. GONGALVES, "Frost growth around a cylinder in a wet air stream," *International Journal of Refrigeration*, vol. 20, no. 2, pp. 106-119, 1997.
- [167] C. T. Sanders, "The influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers," Technische Hogeschool, 1974.
- [168] J. D. YONKO, "An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate," *ASHRAE Trans*, vol. 73, no. 2043, 1967.
- [169] B. T. MARINYUK, "Heat and mass transfer under frosting conditions," *International Journal of Refrigeration*, vol. 3, no. 6, 1980.
- [170] Y. HAYASHI, AOKI, S. ADACHI, and K. HORI, "Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types," *Journal of Heat Transfer*, vol. 99, no. 2, p. 239, 1977.
- [171] S. JHEE, K.-S. LEE, and W.-S. KIM, "Effect of surface treatments on the frosting defrosting behavior of a fin tube heat exchanger," *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, p. 1047–1053, 2002.
- [172] H. LEE, J. SHIN, S. HA, B. CHOI, and J. LEE, "Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, p. 4881–4893, 2004.

- [173] E. U. OKOROAFOR and M. NEWBOROUGH, "Minimising frost growth on cold surfaces exposed to humid air by means of crosslinked hydrophilic polymeric coatings," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, p. 737–758, 2000.
- [174] A. Z. SAHIN, "Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, p. 539–553, 2000.
- [175] S. M. SAMI and T. DUONG, "Mass and heat transfer during frost growth," *ASHRAE Trans*, vol. 95, no. 1, p. 158–165, 1989.
- [176] Y. B. LEE and S. T. RO, "Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 26, p. 939–945, 2002.
- [177] C. J. TRAMMEL, J. CATENBURY, and E. M. KILLGORE, "Heat transfer from humid air to a horizontal flat plate held at sub-freezing temperatures," *ASHRAE Trans*, vol. 73, no. 1, p. IV.3.1–IV.3.6., 1967.
- [178] D. L. O NEAL and D. R. TREE, "Measurements of frost growth and density in parallel plate geometry," *ASHRAE Trans*, vol. 90, no. 2, 1984.
- [179] K. HUTTER, Y. WANG, and H. BEER, Eds., *The characteristics of frost growth on parallel plates*, vol. 533. Springer Berlin Heidelberg, 1999.
- [180] N. SEKI, S. FUKUSAKO, K. MATSUO, and S. UEMURA, "Incipient phenomena of frost formation," *Bulletin of the JSME*, vol. 27, no. 233, pp. 2476-2482, 1984.
- [181] J. L. HOKE, J. G. GEORGIADIS, and A. M. JACOBI, "The Interaction Between the Substrate and Frost Layer Through Condensate Distribution." Nov-2000.
- [182] J. SHIN, A. V. TIKHONOV, and C. KIM, "Experimental Study on Frost Structure on Surfaces With Different Hydrophilicity: Density and Thermal Conductivity," *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, no. 1, pp. 84-94, Feb. 2003.
- [183] B. W. JONES and J. D. PARKER, "Frost Formation With Varying Environmental Parameters," *Journal of Heat Transfer*, vol. 97, no. 2, pp. 255-259, May. 1975.
- [184] S. M. SAMI and T. DUONG, "Numerical prediction of frost formation on cooled heat exchangers," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 81-94, 1998.
- [185] Y. B. LEE and S. T. RO, "Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 29, p. 685–696, 2005.
- [186] S. P. RAJU and S. A. SHERIF, "Frost formation and heat transfer on circular cylinders in cross-flow," *International Journal of Refrigeration*, vol. 16, no. 6, pp. 390-402, 1993.
- [187] H. C. PARISH, "A numerical analysis of frost formation under forced convection," Thesis, 1970.
- [188] B. FORNBERG, "A Numerical Study of Steady Viscous Flow Past a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 98, no. 4, pp. 819-855, 1980.
- [189] G. BIGURIA AND L. A. WENZEL, "Measurement and Correlation of Water Frost Thermal Conductivity and Density," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 9, no. 1, pp. 129-138, Feb. 1970.
- [190] BERNARD F., "Propriété et caractéristiques des lubrifiants," Support de cours IFP,

2005.

- [191] J. AYEL, “Lubrifiant constitution,” *Techniques de l’Ingénieur*. .
- [192] J. AYEL, “Lubrifiants pour moteurs thermiques_Normes générales,” *Techniques de l’Ingénieur*. .
- [193] J. AYEL, “Lubrifiant: Additifs à action physique ou physiologique,” *Techniques de l’Ingénieur*. .
- [194] J.-J.MILAN, “TRIBOLOGIE,”
<http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s>. .
- [195] J. AYEL, “Lubrifiants: Additifs à action chimique,” *Techniques de l’Ingénieur*. .
- [196] F. BERNARD, “Définition et rôle des huiles moteurs,” Support de cours IFP, 2005.
- [197] M. BESSAC, *Composition Huile Moteur*. PSA.
- [198] J. AYEL, “Lubrifiants pour moteurs thermiques: Spécifications des constructeurs,” *Techniques de l’Ingénieur*. .

ANNEXE. 1: LA FORMATION DE GIVRE

La formation de givre résulte du passage direct de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide de l'état gazeux vers l'état solide. Le changement d'état mis en jeu est essentiellement l'ablimation, phénomène exothermique. La formation de givre est observée lorsque l'air humide entre en contact avec une paroi portée à basse température. Elle conduit à la formation d'un dépôt de glace poreux tapissant les parois.

Si on considère le diagramme d'état de la Figure 9, on peut constater que ce phénomène nécessite à la fois une température de paroi négative et un gaz ayant un point de rosée inférieure à 0°C. Cette dernière condition est vérifiée si l'air humide a une faible hygrométrie ou si l'air humide a une hygrométrie élevée mais la condition opératoire est favorable au maintien de la température au voisinage de la surface inférieure à 0°C. C'est le cas, par exemple, si on a un fort gradient thermique dans la couche limite thermique à cause d'une faible turbulence.

Morphologiquement, le givre est constitué par de réseaux de glaces poreuses, de couleur blanche, typique de ceux rencontrés dans les installations cryogéniques ou de congélations (figure suivante).



Fig A. 1 : Exemple de givre dans un circuit de blow-by

A1.1 Description du mécanisme

Comme on peut le voir sur la Fig A. 2, la formation de givre peut être décomposée en trois ou quatre phases successives :

Dans un premier temps, on observe la formation d'embryons de cristallisation sur certains points de la paroi froide appelée sites de nucléation. C'est la **phase de nucléation**.

Ensuite, les cristaux de glace ainsi formés après la nucléation se développent pour donner des germes plus gros. Puis les cristaux initialement isolés s'interconnectent entre eux pour former des réseaux tridimensionnels. C'est la **phase de développement cristalline**.

Dans un troisième temps, on observe la **phase de développement du givre** dans laquelle la ramification des cristaux continue et donne une couche de glace poreuse et uniforme.

Enfin, si le givre ainsi formé devient trop épais pour assurer le transport d'énergie par conduction, sa surface se réchauffe et le phénomène d'ablimation est remplacé par celui de condensation. On observe donc l'apparition d'un film d'eau à la surface qui par la suite entrera dans le givre poreux par perméation. C'est la **phase de développement cyclique**.

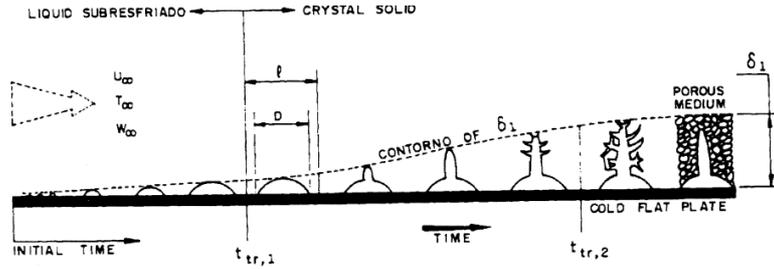


Fig A. 2 : Mécanisme de développement des givres

A1.2 La phase de nucléation [138]

La phase de nucléation est de courte durée. C'est le précurseur de tout le phénomène de givrage. Elle correspond au développement des premiers germes cristallins qui, par la suite, vont se développer pour former la couche de givre.

Théoriquement, la nucléation peut être de type homogène (formation de particule de glace dans l'atmosphère par exemple) ou hétérogène mais en ce qui nous concerne, on ne considérera que le cas de la nucléation hétérogène. En effet, le phénomène de givrage met surtout en œuvre une paroi froide en présence de gaz humide, ainsi le début du givre commencera exclusivement au niveau des parois.

Notons ΔY le degré de sursaturation, c'est-à-dire la différence entre l'humidité réelle de l'air humide et l'humidité à la saturation si l'air avait une température identique à la température de paroi.

$$\Delta Y = (Y)_{\infty} - (Y_{sat})_{T=T_w} \quad (6-1)$$

La nucléation présente une barrière énergétique. Elle apparaît si le degré de supersaturation ΔY de l'air humide est assez élevé pour initier la condensation de la vapeur sous forme de gouttelettes.

Théoriquement, la valeur de ΔY requis dépend essentiellement de la température et de la nature des parois. On montre que la barrière énergétique à franchir est d'autant plus importante que la mouillabilité de la surface est faible. La relation entre ΔG et les pressions partielles p_{∞} et p_w , sont expliqués dans le paragraphe §2.4.2.

En prenant en compte l'angle de contact, Zhongliang [19] a réécrit l'équation (2-22) comme suit :

$$\Delta G_{crit,w} = \left[-\frac{4\pi r_{crit}^3 kT_w}{3\Omega_s} \ln\left(\frac{p_w}{p_{\infty}}\right) + 4\pi r_{c,w}^2 \sigma_{vs} \right] f(\theta) \quad (6-2)$$

Avec

$$f(\theta) = (2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)/4 \quad (6-3)$$

Autrement dit, le niveau de supersaturation ΔY requis est d'autant plus élevé que la surface est hydrophobe. Ainsi, la température de nucléation est plus faible pour une surface hydrophobe que pour une surface hydrophile [19]. Comme le montre la Fig A. 3, on constate que le degré de surfusion requis peut aller jusqu'à -30°C pour une surface hydrophobe.

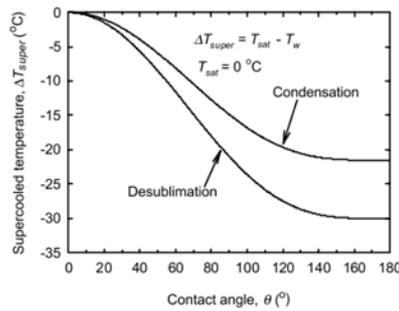


Fig A. 3 : Température de nucléation en fonction de l’angle de contact selon Byeongchul [107]

On constate aussi que l’aspect des nucléis est aussi fortement influencé par la nature des surfaces mises en jeu : Pour un angle de contact élevé, les nucléis sont presque sphériques alors qu’ils sont plutôt plats si l’angle de contact est faible.



Fig A. 4 : Forme des nucléis selon l’angle de contact

Dans la pratique, les germes de nucléation sont initialement des liquides surfondus [115] [139]. Ensuite, ils se solidifient en particules solides quand ils atteignent une certaine taille. Si la condition de refroidissement le permet, les germes liquides peuvent aussi coalescer entre eux pour former des gouttes plus grosses avant de se solidifier.

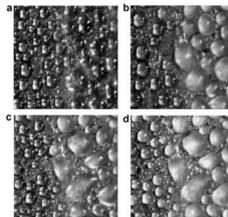


Fig A. 5 : Evolutions des nucléis [19]

Compte tenu de l’existence de la barrière énergétique, la température de nucléation est généralement inférieure à la température de condensation prévue par la table psychrométrique. Du point de vue psychrométrique, le phénomène mis en jeu peut être décrit selon les figures suivantes:

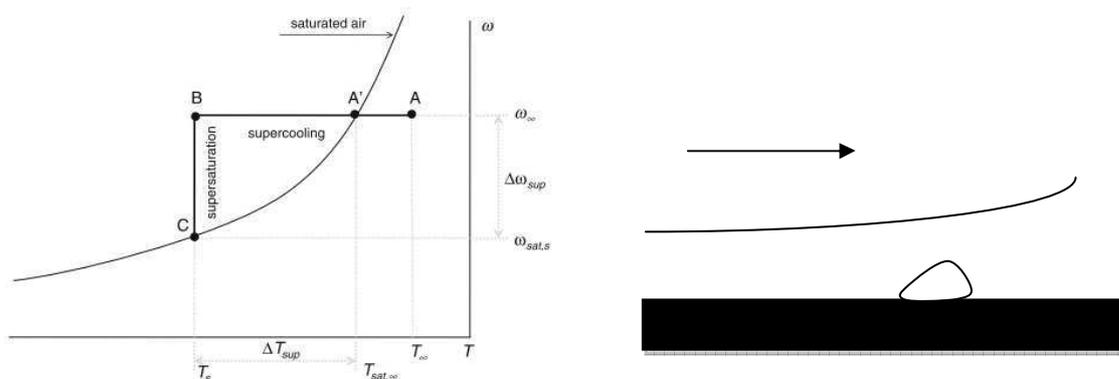


Fig A. 6 : Psychrométrie dans le mécanisme de la cristallisation

La couche limite au voisinage de la paroi est donc le siège des trois phénomènes suivants :

- La température du gaz initialement surchauffé A (non saturé) décroît jusqu'à la température de saturation (point A').
- La température de l'air saturé décroît sans changement d'état. L'air devient alors sursaturé : branche A'B.
- La sursaturation est atteinte au point B. On observe le changement d'état de l'eau c'est-à-dire la condensation accompagnée de la libération d'énergie sous forme de chaleur latente: branche BC.

A1.3 La phase de développement cristalline

Cette phase est caractérisée par le développement monodimensionnel (perpendiculaire aux surfaces) des germes issus de la nucléation jusqu'à l'obtention d'une fine couche de givre ($< 0,1$ mm) ressemblant à la forêt [140]. Les cristaux sont répartis de manière hétérogène sur les parois et les particules sont assez éloignées les unes des autres. Le nombre de germes par unité de surface dépend essentiellement de la condition expérimentale et augmente avec le temps [138] [140].

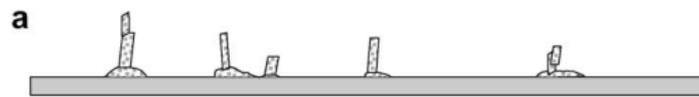


Figure 254 : Phase de développement cristalline

A1.3.1 Morphologie

Aux travers des observations expérimentales, Ayashi et Al. [95] ont montré qu'au stade développement cristalline, la morphologie du givre formé peut être classée selon la condition expérimentale de formation.

En particulier, Hyunuk Lee [103] et Lüer [100] ont montré que la morphologie des givres varie selon le gradient d'humidité entre l'air et la surface. Elle varie entre des givres en forme de plumes et des givres en forme de plaquettes. D'autres part Kaiyang Qu et al.[140] ont constaté que pour une très faible humidité de l'air, le givre adopte un aspect dendritique « sec » alors que la présence de traces d'eau à l'état liquide sur la surface du givre est envisageable pour des humidités plus élevées. Néanmoins, les auteurs ont rappelé que la température de surface est le paramètre ayant le plus fort impact sur la morphologie de ces cristaux.

A1.3.2 Cinétique

Le développement des cristaux est assuré par la diffusion de la vapeur d'eau à partir de l'air humide vers les cristaux déjà en place. Il est véhiculé par le gradient d'humidité entre la masse d'air et la surface des cristaux. La vitesse de développement des cristaux est donc dictée par le gradient d'humidité qui est caractérisé par la sursaturation au voisinage de la surface cristalline.

Xian-Min Guo et al [141], ainsi que d'autres auteurs [140][138], ont pu constater que les colonnes de glace croissent essentiellement en longueur avec une assez faible augmentation du diamètre et que les vitesses de développement évoluent peu d'un type de germe à un autre.

A1.3.3 Aspect macroscopique [142][143][144]

Du point de vue macroscopique, on peut décrire la phase du développement cristallin comme une nucléation successive des cristaux sur le support et sur les germes déjà présents (figure ci-dessous).

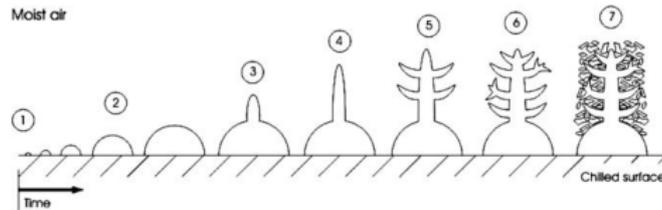


Fig A. 7 : Phase développée cristalline des givres

Au début, la nucléation commence préférentiellement à certains endroits appelés site de nucléation. Grâce à leurs propriétés locales notamment en termes d'énergie de surface (présence d'impuretés, irrégularités géométriques, etc.), ces sites ont comme particularité de permettre d'abaisser considérablement la barrière énergétique de nucléation.

Quand les germes ainsi formés deviennent assez gros, la température à leur surface devient de plus en plus élevée et l'énergie nécessaire à l'accroissement de la taille de ces germes devient plus élevée que celle nécessaire à la nucléation sur les sites encore non occupés. Les germes s'arrêtent alors de grossir et la nucléation continue de nouveaux sur les sites inoccupés appelés sites secondaires.

Les germes sur les nouveaux sites grossissent à leur tour jusqu'à ce qu'ils deviennent eux aussi trop gros. A ce stade, l'énergie nécessaire à la progression des nouveaux germes devient trop importante et la nucléation sur les sites secondaires cesse.

Ensuite, comme l'énergie relative aux grossissements des germes présents sur les sites de nucléation est plus faible que celle relative aux sites secondaires, on observe un développement des premiers germes et ainsi de suite jusqu'au développement du givre poreux.

A1.3.4 Aspect microscopique

L'aspect des cristaux dépend à la fois des paramètres opératoires tels que l'humidité et la température mais aussi la nature de la surface concernée :

D'une part, à travers des observations expérimentales Zhongliang Liu et al. [19] ont montré que pour les surfaces hydrophobes, le réseau adopte une structure microscopique plus dendritique que les cristaux qui se sont développés sur une surface hydrophile. Les auteurs ont toutefois précisé que cette influence ne dépasse pas la phase cristalline. Elle n'a donc qu'un faible impact sur la couche de givre qui se formera à la surface à moyens et à longs termes.

D'autre part, selon des études effectuées par Nakaya et al. [145], Fletcher et al [2] il a été montré que l'aspect microscopique des cristaux peut varier d'une structure à l'autre selon le degré de sursaturation et la température du support. Cela s'explique par le fait que certaines facettes du cristal (Fig A. 8) vont être plus favorables à la nucléation que d'autres selon les conditions de formation.

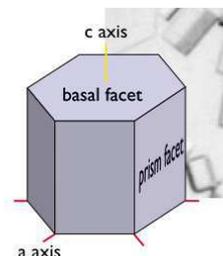


Fig A. 8 : Motif prisme d'un cristal de glace

Le diagramme suivant montre qu'à faibles sursaturation et température, les facettes prismatiques du germe hexagonal de la figure précédente est plus favorable à l'arrivée de nouveaux cristaux que les

autres facettes. On obtient donc plutôt des cristaux plats que des cristaux de type tige. Ce qui n'est pas le cas pour des niveaux de sursaturation plus élevés.

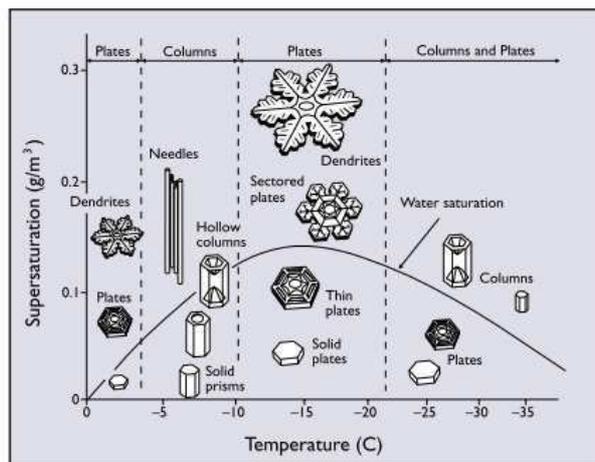


Fig A. 9 : Morphologie des cristaux de givre selon [145] et [115]

A1.3.5 Aspect physique

La complexité du développement cristallin et son faible impact sur le phénomène de formation du givre ont conduit de nombreux auteurs à ne pas en tenir compte dans l'étude de la physique des givres. Ainsi, dans de nombreux travaux de modélisation, cette phase est considérée de manière empirique en l'introduisant sous forme de paramètres initiaux des modèles.

En se basant sur l'analogie transfert de masse / transfert de chaleur, Ismail et al.[144] et Tao et al. [146] ont effectué une approche descriptive assez simple du phénomène. Ils ont considéré les cristaux comme un germe cylindrique de rayon r_0 et de hauteur h_0 qui, sous l'influence du gradient d'hygrométrie, augmente à la fois en hauteur et en diamètre.

Le transfert de masse est dans ce cas dicté par la distribution des températures dans le germe, l'hygrométrie de l'air ainsi qu'un hypothétique facteur de turbulence liant l'humidité dans la masse d'air et l'humidité réellement exposée aux parois latérales des cristaux. Cette approche s'applique de manière satisfaisante à la modélisation du développement des givres mais nécessite une bonne maîtrise des paramètres initiaux tels que r_0 et les facteurs de turbulence.

Dans tous les cas, les auteurs ont considéré que ce phénomène est essentiellement régi par la diffusion entre la surface des germes cristallins et la phase infinie. Le phénomène de diffusion entre les colonnes de glace est donc généralement négligeable. Ce qui n'est toutefois pas le cas pour une température de paroi très faible. Néanmoins, cette approximation a pu être par la suite validée expérimentalement par Ahmet Z [138].

A1.4 La phase de couche poreuse

A1.4.1 Description

Comme il a été évoqué précédemment, le développement cristallin ne dure qu'un court instant par rapport à la totalité du phénomène de formation de givre. En effet, après un certain temps, le développement des cristaux ne se fait plus de manière monodimensionnelle mais continue dans toutes les directions (développement tridimensionnel). Les cristaux de glace se ramifient et entrent en contact entre eux pour former une structure poreuse, uniforme et ayant une surface plus ou moins plate. C'est la phase de **développement de couches poreuses** [138] [115].



Fig A. 10 : Givre poreux

Cette phase est accompagnée à la fois par une densification et d'un épaissement avec le temps de la structure hautement poreuse issue des ramifications cristallines.

D'une part, l'épaississement provient du dépôt de glace sur la surface du givre dû au gradient d'humidité entre le givre et l'air : la couche de givre augmente donc en hauteur.

D'autre part, grâce au gradient de température dans la couche de givre elle-même, la vapeur d'eau diffuse à travers les pores avant de se cristalliser à l'intérieur. Par conséquent, on observe la redistribution dans les pores sous forme de cristaux d'une partie de la vapeur provenant de l'air humide. Ce phénomène, associé à la cristallisation tridimensionnelle sus mentionnée, conduit à l'augmentation de densité de la matrice.

A1.4.2 Les phénomènes de transfert mis en jeu

La formation de givre est régie par de nombreux phénomènes de transfert.

A1.4.2.1 Transfert de matière

Du point de vue transport de matière, on observe en premier lieu le transfert de masse entre l'air humide et la partie supérieure du givre dû à la convection et la diffusion.

Ensuite, une partie de la vapeur d'eau provenant de l'air humide se dépose sous forme solide (condensation ou ablimation) sur la partie supérieure du givre alors qu'une autre partie diffuse à travers la couche poreuse.

Puis, la vapeur qui diffuse à l'intérieur du givre subit aussi un ablimation au cours de son trajet. Ce qui entraîne la densification du givre avec le temps. Si la température aux parois de givre est aux environs de 0°C , on observera aussi le déplacement de l'eau sous forme liquide par perméation.

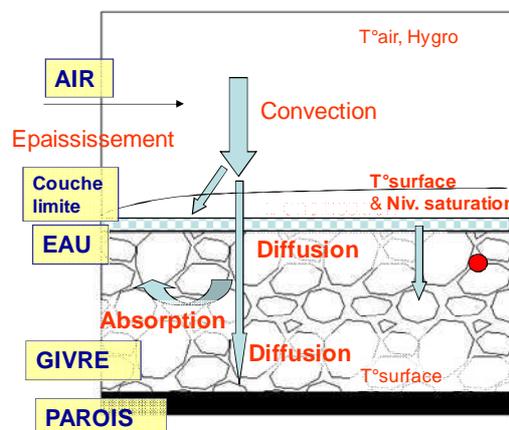


Fig A. 11 : Phénomènes élémentaires dans la formation du givre

Dans la plupart des études effectuées, la formation du givre a été abordée en 1D. En outre, sauf pour quelques cas exceptionnels, on considère que la diffusion, le transport de chaleur par conduction et l'ablation s'effectuent uniquement dans le sens perpendiculaire aux parois [147] [148].

A1.4.2.2 Transport d'énergie

Du côté de l'air, on a essentiellement le transport de chaleur par convection sous forme de chaleur sensible et de l'absorption de l'énergie sous forme de chaleur latente.

Du côté givre, on distingue la conduction thermique à travers le givre qui sépare l'air chaud et le support froid. On a aussi, le transfert de chaleur dû au déplacement de la vapeur d'eau sous forme de diffusion ou le déplacement de condensat sous forme de perméation.

A1.4.3 Analyse des équations et des paramètres mis en jeu

Considérons un à un les phénomènes élémentaires décrit précédemment ainsi que les paramètres qui sont en jeu.

A1.4.3.1 Transfert de masses du côté air

Le transfert de masse du côté air peut être abordé analytiquement en considérant la présence d'une couche limite de convection au-dessus du givre. On peut donc appliquer les lois de la conservation (quantité de mouvement, l'énergie et concentration) [149] [150] [151] ainsi que de la continuité. La résolution d'un tel système permet de caractériser la convection au-dessus du givre et par la même occasion d'établir les champs de vitesses, champs d'hygrométrie et de température dans le milieu.

L'approche analytique n'est toutefois pas toujours la solution la mieux adaptée pour l'étude du phénomène de givrage, une alternative à cela consiste à passer par les équations issues des corrélations et qui mettent en œuvre la similitude entre le transfert de masse et le transfert de chaleur.

Pour cela, on suppose que le gaz au voisinage direct de la surface est saturé et qu'il a la même température que la surface [152]. Rappelons toutefois que Byeongchul Na [107] a montré que cette approximation peut engendrer une erreur importante (pouvant aller jusqu'à 45%) quand la surface de givre tend vers sa valeur maximale qui est de 0°C. Ce qui suppose que l'air est surement sursaturé au voisinage du givre [153] [151].

Avec ces hypothèses, on peut considérer que le transport de la vapeur d'eau est régi par la différence d'humidité entre l'air et le voisinage de l'interface selon :

$$\dot{m}_{fs} = h_m (W_{vap,\infty} - W_{vap,fs}) \quad (6-4)$$

Comme dans le cas de la condensation, le coefficient de transfert de masse est déduit du coefficient de transfert de chaleur en utilisant le nombre de Lewis.

$$h_m = \frac{h}{Cp_m Le^{2/3}} \quad (6-5)$$

Certains auteurs [143] ont pu caractériser le nombre de Lewis de manière analytique ou empirique en fonction des paramètres microscopique tels que la diffusivité thermique, la tortuosité et la porosité. Par contre, dans la plupart des cas, le nombre de Lewis est considéré égal à 1 compte tenu de la faible quantité de vapeur dans un air humide. Néanmoins Kwan-Soo [148] a constaté que l'approximation $Le=1$ peut engendrer une certaine erreur dans les modèles. L'auteur a donc proposé plusieurs corrélations du nombre de Lewis et dont certaines sont fonction des conditions opératoires telles que celles trouvées dans la référence [147].

En pratique, la similitude transfert d'énergie / transfert de masse aboutit à des relations empiriques liant les coefficients de transfert avec les paramètres du flux gazeux tel que le nombre Reynolds et le nombre de Prandtl [154] ainsi que d'autres paramètres comme la porosité et la conductivité [155][156], le coefficient de friction et le nombre de Staton qui est caractéristique de la rugosité [157].

Enfin, de nombreux auteurs ont établi des relations empiriques caractéristiques de transfert de masse liant directement le nombre de Sherwood ou le coefficient de transfert de masse avec les paramètres caractéristiques du flux gazeux [146], sans passer par le coefficient de transfert de chaleur.

A1.4.3.2 Transfert de chaleur côté air

Comme le transfert de masse, le transfert de chaleur côté air s'évalue de manière empirique ou analytique tel que celui proposé par Dong-Keun Yang [149].

Du point de vue analytique, on retrouve les différentes équations de conservations de masse et de l'énergie. Du point empirique, plusieurs relations ont été proposées pour déterminer le coefficient de transfert (ou le nombre de Nusselts) en fonction d'autres nombres sans dimensions caractéristiques du flux gazeux (Mao et al [158] [159], S. A. Sherif et al [160], Y.-X.TAO et al [146]). Dans tous les cas, les équations sont différentes d'un régime à l'autre et varient avec la géométrie concernée.

A1.4.3.3 Bilan matière sur les parois de givre

La masse totale de vapeur provenant de l'air est la somme de la vapeur participant à l'épaississement et la vapeur participant à la densification [148][147][143] :

$$\dot{m}_{fs} = \rho_f \frac{dx_f}{dt} + x_f \frac{d\rho_f}{dt} = \dot{m}_x + \dot{m}_\rho \quad (6-6)$$

A l'intérieur du givre, le débit total de vapeur peut être lié au phénomène de diffusion local proche de la surface selon [149]:

$$\dot{m}_{fs} = \rho D_{eff} \left. \frac{\partial W_{vap}}{\partial x} \right|_{x=x_f} \quad (6-7)$$

Dans laquelle la diffusion effective D_{eff} pourrait être corrélée expérimentalement ou calculée à partir des grandeurs microscopiques telles que la tortuosité, le coefficient de diffusion et la porosité à la surface [153] [151].

A1.4.3.4 Bilan énergétique interface givre/gaz

Globalement, la conservation de l'énergie sur les parois du givre implique que la chaleur totale transférée au givre est identique la chaleur totale fournie par l'air :

- Du côté air, l'énergie mise en jeu est la somme de la chaleur spécifique due aux convections côté air et la chaleur latente relative au changement de phase de la vapeur [150] :

$$Q = h_h (T_\infty - T_{f,s}) + h_m (W_{vap,\infty} - W_{vap,fs}) L_s \quad (6-8)$$

- Du côté givre, la quantité de chaleur Q correspond au transfert de chaleur par conduction et à la chaleur correspondant à l'ablation de la vapeur d'eau dans tout le volume. Elle est donnée par [155] :

$$Q = A \cdot k_f \left(\frac{dT}{dx} \right)_f + \dot{m}_\rho \cdot L_s \quad (6-9)$$

Localement, la chaleur transférée côté air est en équilibre avec la chaleur transférée côté givre, on peut donc écrire [149] [135]:

$$k_{f,eff} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{fs} = k_a \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{fs} + L_s \rho D \frac{\partial W_{vap}}{\partial x} \Big|_{fs} \quad (6-10)$$

A1.4.3.5 Bilan matière côté givre

Considérons le modèle de la figure suivante dans laquelle un élément de givre est considéré comme une structure composée de glace et de vide:

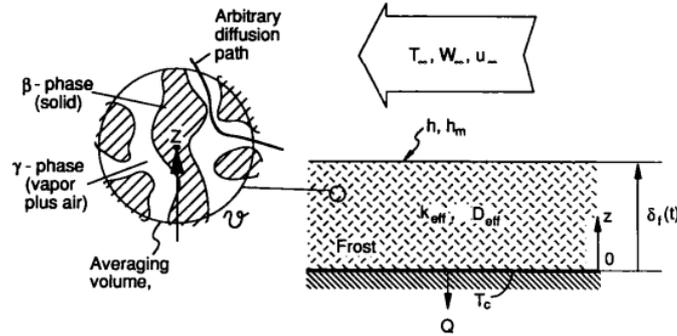


Fig A. 12 : Modèle givre poreux

La diffusion dans le givre est régie par les lois de Fick [161]:

$$\dot{m}_a = \rho_{vap} D_{eff} \frac{dW_{vap}}{dx} \quad (6-11)$$

En considérant les lois de conservation locale, cette relation peut être écrite comme suit [143] [147] :

$$\frac{\partial(\epsilon_\gamma \rho_{vap})}{\partial t} - \dot{m} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial \rho_{vap}}{\partial x} \right) \quad (6-12)$$

En faisant intervenir le coefficient d'ablation local, on obtient [149][147][150]:

$$D \frac{d^2 \rho_{vap}}{dx^2} = \alpha_f \rho_{vap} \quad (6-13)$$

Dans laquelle α_f représente le coefficient d'absorption ou le coefficient d'ablation et D représente le coefficient de diffusion effective.

A1.4.3.6 Le coefficient de diffusion effective

Le coefficient de diffusion intervient dans le calcul de la diffusion selon les relations (6-12) et (6-13). Il peut être calculé de manière empirique en fonction de la distribution locale de la température [143]. D'autres auteurs [155] [156] proposent des relations qui font intervenir les grandeurs plus directement comme les conditions de températures, l'humidité et la densité.

Des formulations plus complexes du coefficient de diffusion ont aussi été développées. Des auteurs tels que Byeongchul Na et al. [151] [153], Kristian Lenic et al. [161] ont introduit des relations prenant en compte à la fois la diffusivité à la température T et les grandeurs caractéristiques des milieux poreux telles la porosité et la tortuosité.

Néanmoins, d'autres ont utilisé des grandeurs plus simples telles que le facteur de diffusion et la porosité [144] [146] ou aussi le facteur de résistance aux diffusions [139] [162] pour caractériser le coefficient de diffusion. Notons toutefois que le facteur de résistance aux diffusions lui-même peut être déterminé analytiquement en fonction de la porosité et certains paramètres correctifs [163].

A1.4.3.7 La tortuosité et la porosité

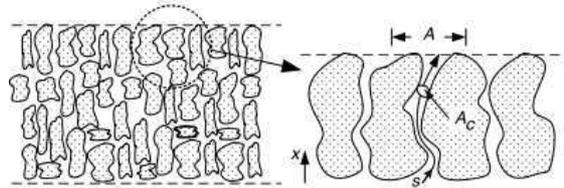


Fig A. 13 : Représentations schématisées du coefficient de diffusion en milieux poreux

La tortuosité caractérise la longueur réelle de diffusion (Fig A. 13) dans le givre. Comme il a été mentionné plus haut, la tortuosité et la porosité sont principalement utilisées dans les approches théoriques de calcul des coefficients de diffusion.

En ce qui concerne la tortuosité, plusieurs relations empiriques ont été proposées pour sa détermination. Néanmoins, Kristian Lenic et al. [161] ont pu mettre en œuvre des relations liant la tortuosité et la porosité en se servant d'une analyse entropique.

D'autre part, en simulant le givre comme un entassement de billes, Brian et al. [152] ont proposé des valeurs de tortuosité comprises dans un intervalle restreint. D'autres auteurs encore ont pu lier la tortuosité et la porosité en simulant le givre poreux comme des tubes capillaires (Auracher [162]), comme des matières poreuses (Zehnder [151] et Christian J.L. [143]) ou comme des entassements isotropiques de matière sphérique (Neal et al [164]). Le Gall et al. [162] ont pu introduire directement des facteurs correctifs liés aux conditions opératoires dans la détermination de la tortuosité.

Enfin, pour la porosité, une approche analytique du calcul a été proposée par Le Gall et al. [162]. Le principe consiste à résoudre les équations différentielles (bilan matière et bilan d'énergie) relatives à l'ablation et aux diffusions locales de l'eau du modèle représenté sur la figure suivante :

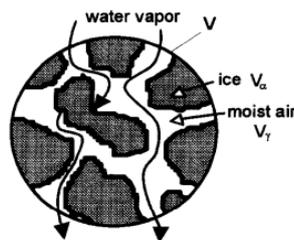


Fig A. 14 : Modèle matière poreuse selon Le Gall [162]

A1.4.3.8 Le bilan d'énergie côté givre

Le bilan d'énergie dans le givre tient compte à la fois de la chaleur par conduction et du changement d'état de l'eau par ablation.

La conduction est régie par les lois de Fourier:

$$Q_{cond} = k_f \frac{dT}{dx} \quad (6-14)$$

Alors que l'ablation est liée au changement de la densité selon :

$$Q_{sub} = \dot{m}_\rho L_s \quad (6-15)$$

Pour un élément de volume de givre, le bilan s'exprime selon :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + L_s \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = \rho_f C_{p_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (6-16)$$

Ou aussi, si on le réécrit vis-à-vis du taux de changement de phase dans le givre \dot{m} [165] :

$$\rho_f C_{p_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \dot{m} L_s = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \quad (6-17)$$

En négligeant le changement de température locale, on peut aussi faire intervenir le coefficient d'ablation α_f [150]:

$$k_f \frac{d^2 T}{dx^2} = -\alpha_f L_s \rho_w \quad (6-18)$$

A1.4.3.9 Equation de la continuité côté givre

Pour prendre en compte l'aspect poreux du givre, les équations de bilans sont complétées par l'équation de continuité. En considérant le schéma de la Fig A. 14 . La continuité s'exprime selon la relation suivante [144] [165][166] :

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{\rho_\beta} = 0 \quad (6-19)$$

A1.4.3.10 Les autres paramètres

La diffusivité thermique :

En se servant des résultats de Lee et al.[147], Hermes et al.[105] ont pu corrélérer la diffusivité thermique de l'air humide en fonction de la température locale.

La capacité calorifique

Byeongchul Na [153] a proposé des relations empiriques liant la capacité calorifique et la densité tout en faisant intervenir un hypothétique facteur lié à la morphologie du givre. Pour cela l'auteur a proposé plusieurs expressions du facteur en question pour différents domaines des conditions expérimentales.

Kristian Lenic et al. [161] ont fait intervenir des relations de la capacité calorifique déduite du modèle de matière poreuse de la Fig A. 13 . La capacité calorifique s'exprime alors en fonction de la porosité et de la capacité calorifique de l'air humide et de la glace.

La conductivité effective:

Plusieurs relations empiriques des conductivités des givres ont été proposées. Elle sont dans la plupart des cas fonction de la densité [143][167] [144][148] [147] [168] ou la densité et des conditions opératoire (températures, humidité, vitesses) [169] [134].

En considérant l'aspect poreux du givre, Y TAO et al. [146] ont pu aussi montrer analytiquement que la conductivité peut être exprimée comme une fonction polynomiale de la densité.

Comme dans le cas de la capacité calorifique, Byeongchul Na [153] a aussi proposé des équations de la conductivité dans lesquelles intervient la morphologie du givre.

La densité

La densité est introduite implicitement dans les équations caractéristiques du givre. Dans le modèle poreux de la Fig A. 12, elle s'exprime en fonction de la porosité par la relation suivante :

$$\rho_f = \varepsilon_f \rho_a + (1 - \varepsilon_f) \rho_{glace} \quad (6-20)$$

Toutefois, quelques auteurs ont pu établir des relations empiriques qui lient directement la densité aux conditions expérimentales [154], et en particulier la température de surface [170].

Enfin, la densité locale et la quantité totale de vapeur participant à la densification peuvent être liées par la relation :

$$\dot{m}_\rho = \int_{x=0}^{x=x_f} \alpha_f \rho_{vap} dx \quad (6-21)$$

A1.5 Influences des conditions opératoires sur le givre

De nombreuses études, aussi bien expérimentales que théoriques ont mis en évidence l'importance des conditions opératoires sur le phénomène de formation du givre : ce sont surtout la température des parois [143], la température de l'air, la vitesse (ou le nombre de Reynolds) et l'humidité [138]. En outre, diverses expériences ont montré que d'autres paramètres tels que l'hydrophilie et la rugosité peuvent aussi intervenir [171] [172] [173].

L'influence des paramètres en question est principalement constatée au niveau de l'épaisseur, de la vitesse de croissance du givre, de la densité ainsi que de la morphologie du givre. Cette dernière étant liée à la propriété (densité, conductivité, etc.) même du givre qui se forme [138].

A1.5.1 Influence sur la morphologie et compacité du givre

Comme dans le cas de la phase de développement cristallin, la morphologie des couches de givre peut être différente d'une condition opératoire à l'autre :

Des essais effectués en régime de convection forcée ont permis de distinguer deux types de morphologie dont un dendritique et un en aiguille [174].

En travaillant avec des surfaces hydrophobes et hydrophiles, Hyunuk Lee [172] a pu observer trois morphologies de givre différentes : plume, pelouse et plate. Ces morphologies semblent être aussi dépendantes de l'humidité et de la température mais sont toutefois faiblement affectées par la vitesse du gaz. Les givres de type plume étant favorisés par une humidité élevée alors qu'ils sont plates pour des valeurs plus faibles d'humidité.

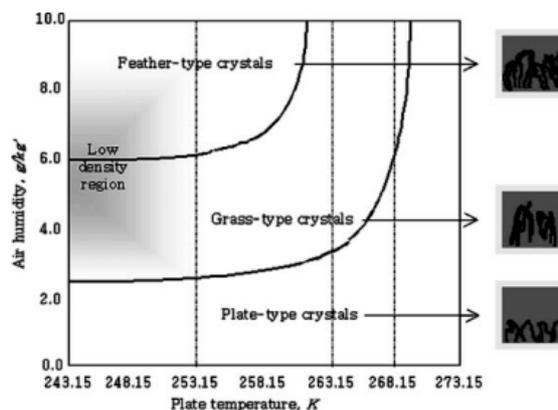


Fig A. 15 : Morphologie des givres selon les conditions opératoires

A1.5.2 Paramètres influençant l'épaisseur

L'épaisseur est affectée positivement par l'augmentation de l'humidité [172] [115] [138] et l'abaissement de la température des parois [138] [175] [161]. Cette tendance est constatée aussi bien en régime turbulent établi [149] qu'en régime en développement [176] ou même en régime laminaire établi [139]. Ce qui est normal compte tenu de l'augmentation du gradient d'hygrométrie qui véhicule les transports de masses. Cette explication est d'autant plus significative si on considère les essais d'Ahmet Z.[138] qui montrent une augmentation importante de la masse totale du givre quand la différence de température entre l'air et les parois augmente.

Il a été aussi constaté, aussi bien en convection naturelle qu'en convection forcée, que la diminution en température de l'air joue en faveur de l'augmentation de l'épaisseur [115] [138]. Cet impact est néanmoins assez limité [116] [177], en particulier si on considère la vitesse totale du dépôt de givre [174]. Cette tendance a été démontrée mathématiquement en régime turbulent [149] et laminaire [139]. C'est aussi le cas observé expérimentalement par Y.B. Lee [176] pour un régime en développement.

Si on se réfère aux travaux de Hyunuk Lee et al. [172] ainsi que plusieurs autres chercheurs (Kaiyang Qu [115], Ahmet Z [138], Yonko et al [168], Andreas Lürer et al. [139], Storey [94], Kristian L et al. [161], l'épaisseur semble être faiblement impactée par la vitesse de l'air ou plus généralement par le nombre de Reynolds. Néanmoins, les travaux de O' Neal [178] ont permis de distinguer un effet positif de l'augmentation du nombre de Reynolds dans la gamme de $Re < 15900$. Selon l'auteur, aucune dépendance n'est constatée au-delà de ces valeurs. En outre, en passant par des modèles mathématiques, Don Keung [149] a pu confirmer que la vitesse n'a aucun effet sur l'épaisseur en régime turbulent, ce qui n'est pas le cas en régime laminaire. Dans tous les cas, l'auteur a constaté que la formation de givre est plus favorisée en régime turbulent qu'en laminaire. Notons toutefois que ces résultats ne peuvent être généralisés puisque des observations contradictoires ont été signalées par d'autres auteurs [115] [179].

B.D. Storey [94] ont montré que la création des vortex locaux par l'utilisation d'inserts peut augmenter légèrement l'épaisseur des givres (7%), l'auteur a néanmoins précisé que cette impact est relativement faible comparé à la sensibilité relatif aux nombre de Nusselts en générale.

A1.5.3 Paramètres influençant la densité

Des études ont montré expérimentalement [138] et analytiquement [174][139] que la température de paroi est le principal facteur influençant la densité. Le givre est de plus en plus dense pour une température de paroi plus élevée. Les auteurs ont toutefois signalés que l'augmentation de la température de l'air et l'augmentation de l'humidité entraînent aussi la formation d'un givre plus dense. Ce qui est cohérent avec de nombreux modèles de la littérature dont celui de Don Keung [149].

D'autre part, en effectuant des essais de givrage sur des matériaux de différentes énergies de surface, Seki et al.[180], Hoke et al. [181] Hyunuk Lee et al [172] ont constaté que les givres formés sont plus denses sur les surfaces hydrophobes. Notons toutefois que des observations contradictoires ont été observées par Shin et al [182].

Bien que la vitesse ou le nombre de Reynolds aient peu d'impact sur l'épaisseur, son influence sur la masse totale est bien tangible à travers l'augmentation de la densité [172] [138] [139] [157]. Cela s'explique par un transfert de masse plus intense entre l'air humide et le givre. En outre, il a été montré que même dès la **phase de développement cristalline**, le nombre de colonnes de glace par unité de surface est beaucoup plus important pour des vitesses élevées. Ce qui se traduira par une apparition précoce de la **phase couche poreuse** quand les vitesses sont élevées [138].

A1.5.4 Aspects temporel et spatial

Les études expérimentales et numériques mettent en évidence l'aspect temporel et auto-limitatif du phénomène de formation des givres. Autrement dit, l'épaisseur des givres augmente en continu mais par contre sa vitesse de développement régresse puis se stabilise avec le temps [115] [138]. Cela s'explique par le fait que l'épaississement de la couche réduit la conduction thermique à travers le givre. Ce qui entraîne son réchauffement ainsi que le réchauffement de sa paroi supérieure. Il en découle une diminution des gradients de concentration et de température et par la suite une chute des transferts de masse.

Il est prudent de noter que la morphologie du givre est susceptible d'évoluer avec le temps. Dans le cadre d'un test à faible hygrométrie, *Guo et al.*[141] ont montré par exemple la formation d'une couche poreuse avec des motifs de types colonnes de glace au début, puis l'apparition d'une fine couche de givre et enfin la formation d'une couche de givre d'aspect granulaire.

Tous les essais expérimentaux ont montré que la répartition des givres n'est pas uniforme dans le cas de la convection forcée. La vitesse de dépôt de givre est plus importante en amont et diminue progressivement avec la longueur. En outre, le passage d'une **phase de développement cristalline** à la **phase couche poreuse** est observé en amont du flux plutôt qu'en aval [138].

En utilisant des modèles analytiques corrélés côté air, Kwan-soo Lee [147] a montré que l'épaisseur du givre diminue de l'entrée vers la sortie du gaz pour une faible vitesse d'air. Pour des vitesses assez élevées ($V > 2 \text{ m.s}^{-1}$, $Re > 17000$), l'épaisseur est presque constante.

A travers des études qui portaient sur la formation de givre à l'intérieur d'une couche de turbulence, Rin Yun et al. [157] ont montré une très faible variation de l'épaisseur du givre le long du parcours. Selon les auteurs, la variation en question provient de l'augmentation d'épaisseur de la couche limite.

A1.6 Etats de l'art sur la formation de givre

Le phénomène de givrage est largement étudié aussi bien expérimentalement qu'analytiquement. La majeure partie des travaux effectués se concentre essentiellement sur la **phase de développement de la couche poreuse** compte tenu de son importance comparée aux autres étapes.

A1.6.1 Etat de l'art théorique

Le phénomène de givrage est assez complexe pour les raisons suivant :

- La multiplicité des paramètres en jeu: température de l'air, température de la paroi, humidité, vitesses de l'air, nature de la paroi.
- La multiplicité des phénomènes mis en jeu : conduction, convection, diffusion, changement d'état.
- La variation spatiale et temporelle des propriétés : coefficient de conduction, densité, capacité calorifique, coefficient de diffusion, coefficient de convection, etc.
- La variation spatiale et temporelle des frontières : hauteur de la surface du givre
- La variation spatiale et temporelle des conditions aux la frontières air/givre: température et humidité au voisinage de la surface du givre.
- L'existence d'un phénomène cyclique de gel et de condensation.

Ainsi, pour simplifier le problème, de nombreuses approches ont été adoptés en mettant en avant quelques paramètres, quelques phénomènes ou un domaine spatial bien particulier selon le résultat voulu, le domaine à couvrir et l'application choisie.

Pour cela, on peut classer les travaux en trois grandes catégories.

- Dans la première catégorie : les auteurs (Deniz Seke et al. [155], Jones et al. [183], Sami et Duong [184][175], Lee et al.[185] [147] [185]) se sont focalisés sur l'**aspect diffusion et d'ablation à l'intérieur du givre** (conservation des masses et de l'énergie, équations de la diffusion, etc.). Pour compléter le modèle, ces auteurs ont mis en œuvre l'analogie transfert de

chaleur / transfert de masse pour résoudre les phénomènes de transport côté air humide. Ceci leur a permis d'étudier l'évolution des paramètres caractéristiques du givre, en particulier l'épaisseur et la densité, avec le temps.

Cette première approche fait appel à de nombreuses corrélations expérimentales pour caractériser les phénomènes de transfert côté air humide. Toutefois, certains auteurs tels que Dong-Ken [149] ont pu construire des modèles mathématiques assez complets en intégrant des modèles de turbulence (type $k-\xi$) dans la convection de l'air.

Dans le domaine laminaire, Dong-Ken et al.[135] [149] ainsi que Lee et al [148] ont construit des modèles mathématiques du givre en couplant les physiques de la diffusion et ablation intra-givre avec les équations de conservations relatives à la convection côté air. Ils ont montré que l'utilisation des corrélations du côté convection pénalise la précision et que les modèles établis sur cette base s'éloignent plus ou moins de la réalité selon les conditions de travail et les corrélations utilisées.

- Dans la deuxième catégorie, Raju [159][186] , Parish et al.[187] , ont mis l'accent sur **l'aspect couche limite au-dessus du givre en particulier pour le domaine laminaire**. Les modèles ont été ensuite complétés par des relations empiriques liant certaines grandeurs caractéristiques du givre (en particulier la densité) aux paramètres primaires tels que la distribution de température à l'intérieure du givre.

Toujours en régime laminaire, cette notion de couche limite côté air a été aussi exploitée par Byeongchul Na et al. [151]. Elle a aidé à prédire les profils d'humidité, de température et de vitesses au dessus du givre. Elle a permis par la même occasion de démontrer que, contrairement aux hypothèses courantes, l'air humide est sursaturé au voisinage du givre.

Rin Yun et al[157] ont fait appel au concept de longueur de mélange de Prandtl pour tenir compte de l'existence d'une couche limite turbulente et de l'impact de la rugosité à la surface de givre pour développer un modèle semi-empirique de formation du givre en régime turbulent.

Ismail et al [166] ont déterminé la distribution des températures, des hygrométries et des coefficients de transfert (Nu) dans le cas d'une géométrie complexe (externe cylindre) en se servant des équations d'écoulement et de rotation développées par Fornberg [188].

- Dans la troisième catégorie, le phénomène a été modélisée sur la base de **bilans d'énergie et de masses en considérant que le givre est un élément poreux dans lequel la vapeur d'eau se diffuse et subit l'ablation**.

Ces modèles ont pour intérêt d'être plus flexibles en permettant de contrôler des coefficients relatifs aux systèmes poreux. Ils nécessitent néanmoins de corrélés ces coefficients qui sont théoriquement assez difficiles à maîtriser.

Dans le domaine laminaire, certains auteurs ont toutefois pu construire, des modèles analytiques assez complets du givre poreux en établissant d'abord les coefficients de transferts locaux côtés air via des résolutions mathématiques de l'écoulement (champ de température et d'hygrométrie) [144] ou en passant par des modèles type transitoire basés sur les lois de conservations (énergie, moment, masse, espèces) [139] [161]. Ces équations sont ensuite complétées par l'étude de la diffusion et du changement d'état dans le givre poreux. Elles ont permis d'obtenir les distributions spatiales complètes du givre et de ses caractéristiques (épaisseurs, porosité, etc.).

La plupart de ces modèles supposent que les premières couches de givres sont déjà existantes. Ils font donc intervenir des conditions initiales (densité initial, épaisseur initial) corrélées directement par des essais expérimentaux ou données par des relations empiriques en fonction des conditions opératoires [143]. Notons toutefois que certains auteurs [166] [144] [146] ont pu intégrer dans leur calcul la phase précédant la couche poreuse en considérant le développement cristallin comme un grossissement d'une colonne microscopique de glace dans un environnement givrant. Ceci leur a permis de déterminer les conditions initiales de la phase poreuse en particulier les distributions de températures et de porosités initiales.

A1.6.2 Etat de l'art expérimental

Du point de vue expérimental, de nombreux essais ont été effectués afin de comprendre l'évolution de la densité et de l'épaisseur des givres en fonction des conditions opératoires. Les essais ont été essentiellement entrepris sur des plaques planes. Vu le domaine le plus concernés par les givres (climatisation, météorologique, échangeur de chaleur, etc.), la plupart des auteurs ont travaillé dans des gammes de turbulence assez faibles [138] voire en convection naturelle.

Dans le régime intermédiaire, Y.B. Lee et al. [176] ont pu établir expérimentalement des modèles purement empiriques du développement du givre en faisant appel à des nombres sans dimension tels que le nombre Reynolds, la diffusivité, le nombre de Fourier ainsi que des nombres sans dimensions caractéristiques des conditions opératoires.

Sherif et al. [159] ont élaboré des modèles semi-empiriques de la formation de givre. Le modèle repose sur le bilan massique et énergétique au niveau de l'interface givre/air. Les coefficients de transfert par convection, la densité ainsi que les autres caractéristiques du givre (conductivité etc.) sont déterminées à travers des équations empiriques.

En procédant par analyse dimensionnelle des phénomènes élémentaires dans le processus de formation de givre, B.D. Storey a pu établir [94] des relations adimensionnelles liant le développement de givre et les conditions opératoires (Bi , Fo , Le). En l'associant avec des travaux de corrélations expérimentales, le modèle permet de prendre en compte la présence des vortex locaux issus des géométries complexes.

Gabriel et al.[189] ont travaillé sur la conductivité, la densité et la morphologie des givres dans une condition de convection forcée sur plaque plane. A travers ces mesures, les auteurs ont pu établir des corrélations expérimentales liant les deux propriétés aux conditions opératoires.

ANNEXE. 2: LES LUBRIFIANTS ET LES PARTICULES DE LUBRIFIANT

Comme il a été montré dans les chapitres précédents, la formation des émulsions nécessite la présence d'huile et d'élément tension actif. Afin de déterminer le rôle de ses deux éléments dans l'émulsion de blow-by, il est important de savoir en quoi sont composés chimiquement les lubrifiants et de comprendre comment évoluent-ils à l'intérieur des moteurs.

A2.1 Rappel : le circuit de lubrification [190].

Les lubrifiants jouent un rôle important pour le bon fonctionnement des moteurs à combustion interne. Il permet :

- Le graissage des diverses pièces mobiles : amélioration du rendement et protection contre l'usure.
- Le maintien de la propreté dans le moteur
- La dissipation de la chaleur
- La protection contre la corrosion

Les lubrifiants circulent en circuit fermé à travers les divers organes des moteurs (refroidissement du piston, lubrification des vilebrequins et de l'arbre à cames, etc.) avant de rejoindre le bas carter. Il est maintenu en circulation grâce à une pompe volumétrique et est maintenu propre via des filtres à particules.

La figure suivant représente un schéma typique du circuit de lubrification.

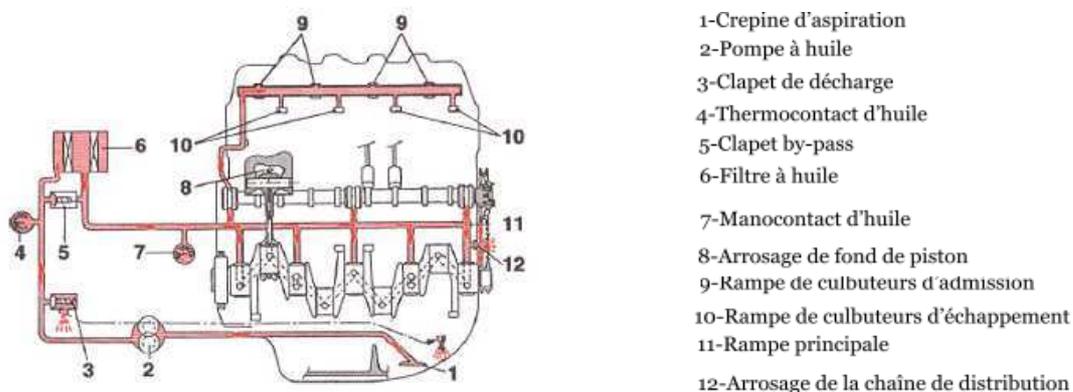


Fig A. 16 : Circuit de lubrification

A2.2 Origine des particules d'huiles [100]

Le gaz de blow-by contient une quantité important de particule de lubrifiant. Ces différents particules sont créée au sein du circuit de lubrification lui-même à travers de nombreux processus. On distingue :

- La pulvérisation des lubrifiants à cause des divers sollicitations mécanique à l'intérieure des moteurs (mouvement des pistons, des vilebrequins, de l'arbre à cames etc.)
- La pulvérisation des lubrifiants à cause de leur pressurisation à l'intérieur des circuits de lubrification (pompe à huile).

- La pulvérisation délibérée du lubrifiant avec des dispositifs spécialisés afin de leur conférer une bonne aptitude de graissage. C'est par exemple le cas du graissage par barbotage ou du graissage par projection :



Figure I-1 Graissage par barbotage

Fig a: Graissage par barbotage

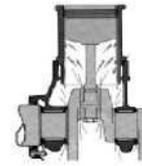


Figure I-3 Graissage par projection

Fig b: Graissage par projection

Fig A. 17 : Pulvérisation des lubrifiants pour le graissage

- L'atomisation par arrachement des lubrifiants au niveau des pistons et des segmentations. Un phénomène qui résulte de la circulation à grande vitesse du gaz de blow-by en présence de film de lubrifiants dans les petits orifices des segmentations.

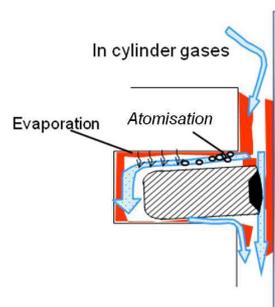
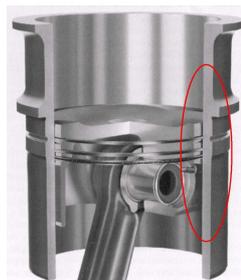


Fig A. 18 : Atomisation de l'huile au niveau des segmentations

Ainsi, non seulement le gaz de blow-by est en permanence en contact avec des gouttelettes d'huile mais aussi il en produit le long de son parcours à l'intérieur du bloc moteur. Le gaz de blow-by se charge donc en huile et une partie non négligeable de cette huile atomisée s'amène avec lui durant son parcours aussi bien à l'intérieur du carter que dans les circuits de blow-by externes.

A2.3 Composition des lubrifiants

Généralement, les lubrifiants sont constitués en grande parties par un fluide de base. Afin d'obtenir les propriétés requis pour leurs d'utilisations (voire paragraphe suivant), les huiles de bases sont mélangés à des additifs spécifiques dont la teneur total peut aller de jusqu'à 25% du lubrifiant.

A2.3.1 Huile de base [191]

Le fluide de base peut être d'origine minérale ou synthétique voire végétale :

- Les bases minérales sont composé essentiellement par des hydrocarbures parafiniques, des naphènes ou des aromatiques. Ils sont obtenus par hydrosolubilisation, hydrocraquage et hydro isomérisation des coupes de pétroles.

Comme tout dérivé de pétrole, les bases minérales peuvent donc être considérées comme des mélanges complexes d'hydrocarbures.

- Les bases de synthèse sont des hydrocarbures obtenus par synthèse chimique. Ils peuvent être des hydrocarbures simples tel que les Polyalphaoléfines (PAO), des Polyoléfines internes hydrogénées (PIO), des polybutène, les polyisobutène (PIB), ou aussi des hydrocarbures aromatique alkylé tel que le Dyalkil benzen (DAB) et les Alkylnaphtalènes.

En outre, on distingue aussi la base synthétique oxygénée tels que les esters de synthèse dont les diesters, les esters de néopolyols et les esters complexes.

Les bases de synthèse peuvent être aussi des polyglycols. On a essentiellement les Monoalkylèneglycol, les polyalkylèneglycols (PAG) ainsi que les Monoéthers de polyalkylèneglycols.

Le tableau suivant regroupe les grandes familles d'huiles de base ainsi que leur origine [192]:

Groupe	Type de huile de base	% HC saturé	Origine
I	Hydrocarbure	< 90 %	Huile de base minérale
II	Hydrocarbure	> 90 %	Huile de base hydro craqué
III	Hydrocarbure	> 90 %	Huile de base hydro craqué Et hydro isomérisé
IV	PAO	-	Synthèse
V	Ester, PIB, DAB, PAG, Alkylnaphtalènes	-	Synthèse

Fig A. 19 : Grande famille d'huile de base

A2.3.2 Additifs

Selon l'objet d'utilisation, le nombre d'additifs présent dans un lubrifiant peut être très important et leurs formulations sont souvent très complexes. Bien qu'il est impossible dans le cadre de cette études de définir composition exacts des additifs des lubrifiants automobile, on peut classer les additifs dans plusieurs catégories selon leurs rôles respectives et selon leur nature chimique.

Dans notre étude, nous allons partager les différentes familles d'additifs en deux grands groupes selon leur propriété tensioactive.

A2.3.2.1 Additifs utilisé pour leurs propriétés tensioactives [193][194] [195]

Les additifs tensioactifs ont des intérêts particuliers dans le cadre de cette étude. En effet, à cause de leur propriété tensioactive, ces éléments sont susceptible d'agir sur l'interface entre la phase aqueuse et la phase huiles des émulsions de blow-by et joue un rôle important dans leur stabilité et leur propriété physique.

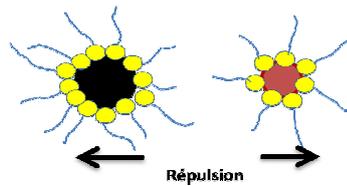
Plusieurs types d'additifs tensioactifs sont présent à l'intérieure des lubrifiants. On a :

- Les additifs détergents,

Les additifs détergents agissent sur les interfaces solide/lubrifiant. Ces tensioactifs permettent d'entretenir la propreté du lubrifiant en maintenant en suspension le résidu solide y présent. Ce sont des organométallique dont des alkylarylsulfonates de calcium (ou de magnésium), des alkyl phénates de calcium (ou de magnésium) ou des Alkyl salicylates

- Les additifs dispersants,

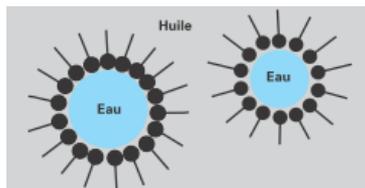
Le rôle des additifs dispersants consiste à retarder la formation de boues causées par l'accumulation des résidus solides en empêchant le rapprochement des particules grâce à l'adsorption de tensioactifs sur leurs surfaces.



Les tensioactifs utilisés sont surtout des azotés (Alkényl succinimides), des esters (succinate) ou des esters mixtes (Ester amide ou Oxazoline-amide). On peut aussi avoir des amines aromatiques telles que la base de Manich

- Les additifs émulsifiant,

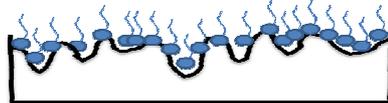
Les additifs émulsifiant sont des composés tensioactifs permettant d'améliorer la solubilité de l'eau résiduels dans le lubrifiant : formation de microémulsion.



Les émulsifiants peuvent être anionique (sel d'acide gras, sels d'acides gras sulfonés, sulfonaphténates de sodium, phosphate ou phosphate alcalin), cationique (sels d'amine, oxydes d'amine ou sels d'ammonium quaternaire), neutre (alcool gras ethoxylé, acides gras ethoxylé, amines gras ethoxylé, ou phénol ethoxylé) ou amphotère (alkyl aminoacide gras).

- Les additifs d'onctuosité, de frottement et d'adhésivité

Ces additifs servent à améliorer l'adhérence des films d'huile sur les pièces à lubrifier et de réduire le coefficient de frottement. Ce sont des composés polaire, qui en s'adsorbant sur les surface permettent de créer un film stable à faible résistance aux cisaillements. [196].



Ce sont des tensioactifs polaires tels que les esters gras naturels ou synthétiques, les amines grasses, les glycides, les alcools gras ou les acides gras.

- Les additifs antirouille

Les additifs antirouille sont des molécules tensioactives capables de s'adsorber sur les surfaces métalliques de manière à les rendre hydrophobe (formation de couches de passivation). Ce sont surtout des détergent organo métallique tel que les dinonylnaphtalène sulfonate de baryum.

- Les additives anti-usures

Ce sont des molécules capables se s'accrocher aux surfaces des pièces pour former des films épais servant à répartir les contraintes mécanique. Ce sont essentiellement des didithiophosphates métallique ainsi que des molécules anti-frottement tels que les dérivés liposoluble du molybdène ou les détergents superbasiqes (riche en carbonate).

- Les additifs antiacides

Ce sont des détergents organométalliques riche en CaCO_3 colloïdal. Leurs rôles consistent à neutraliser les acides issus de l'oxydation dans les lubrifiants grâce à leurs surbasicités en CaCO_3 .

A2.3.2.2 Autres additifs [193][194] [195]

- Les additifs de viscosité

Les additifs de viscosité (9% pour SAE 10W40) sont des molécules à masse moléculaire élevée, dont le rôle consiste à limiter la perte de viscosité de l'huile à haute température. Ce sont surtout des polyesters (poly méthacrylates, polyacrylates), des polymères hydrocarbonés (polyisobutadiène, polybutadiène, polybutène), des copolymères avec au moins un noyau cyclique (copolymère diène/styrène, copolymère diène/styrène/diène) ou des polymères mixtes d'ester (copolymère polyméthacrylate/oléfine, copolymère polyméthacrylate/styrène).

Notons que ces additifs peuvent être des molécules neutres (cas méthacrylates) mais peuvent aussi avoir des propriétés tensioactives pour renforcer la propriété dispersant des huiles.

- Les additifs abaisseurs de point de congélation

Ces additifs (0.3% pour SAE 10W40) servent à inhiber le grossissement des cristaux de l'huile paraffine quand la température diminue. Ce sont surtout des polyméthacrylates ou des copolymères acrylates/méthacrylate (C12 à C25) :

On peut aussi avoir des polymères aromatiques (polystyrènes alkylés), des polymères dérivés du naphthalène, des polymères phénoliques, des polymères d'esters aromatiques ou aussi des copolymères contenant la combinaison des divers motifs cités ci-dessus.

- Les additifs antioxydants :

Ce sont des molécules capables de désactiver les radicaux libres qui sont des intermédiaires réactionnels responsables de l'amorçage des réactions d'oxydation. Les antioxydants sont essentiellement des composés phénoliques ou des amines aromatiques.

Les antioxydants peuvent aussi contenir des molécules capables de détruire les peroxydes et donc de ralentir la propagation des réactions d'oxydation : ce sont des additifs soufrés, phosphorés ou thiophosphorés tels que les dithiophosphates de zinc.

On peut aussi avoir des antioxydants qui sont à la fois des inhibiteurs de corrosion et désactivateurs de métaux et qui permettent d'inhiber l'action catalytique des métaux vis-à-vis de l'oxydation. On distingue les dérivés du thiadiazole, les dérivés de l'imidazole, les amines complexes et acides organiques ou minéraux.

- Les additifs anti-encrassements

Ce sont surtout des composés organophosphorés (des triarylyphosphates, des amines et des phosphates d'amines) et qui sont capables de transformer les dépôts durs dans la chambre de combustion en dépôt friable peu adhérent.

- Les additifs extrêmes pressions

Ce sont des composés organo-soufrés (sulfures d'alkyles ou d'aryles, terpène soufrés, corps gras soufrés, thiones) ou des composés organochlorés (paraffine chlorés, aromatique chlorés, corps gras chlorés, esters de corps gras chlorés).

Sous forte température et frottement sévère, ces éléments ont la particularité de pouvoir libérer du soufre ou du chlore à l'état natifs. Ce qui permet la formation de film de cisaillement tel que les sulfures métalliques et de chlorure métallique au-dessus des pièces.

- Les additifs anti-mousses,

Ces additifs servent à éviter la formation des mousses causées par la présence de tensioactifs dans les lubrifiants. Ce sont généralement des polymères à base de silicone.

A2.3.3 Répartition des divers éléments du lubrifiant

La figure suivante illustre la composition typique des lubrifiants [197].

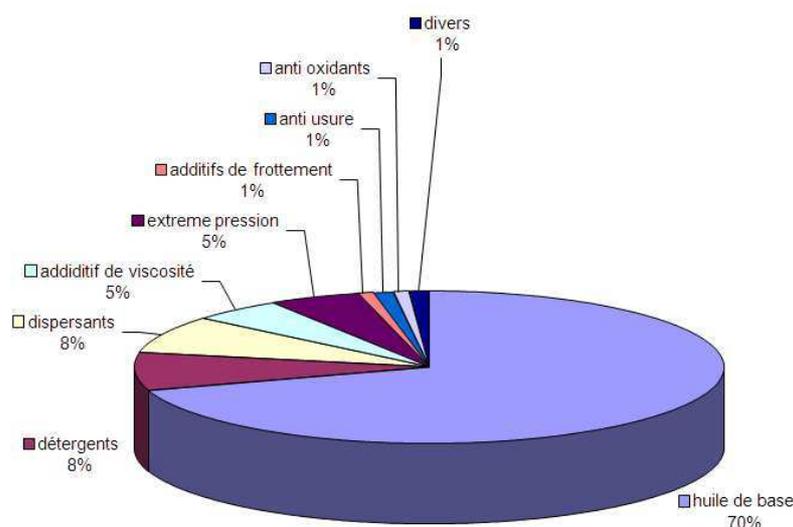


Fig A. 20 : Composition typique des lubrifiants

Ce qui montre que l'huile de base constitue l'élément le plus important dans les lubrifiant, ensuite on a les éléments tensioactifs tel que les détergents et les dispersants.

A2.4 Spécification des lubrifiants

Les classifications des lubrifiants sont établies suivant des normes et des critères bien établis. Les critères de classifications ainsi que les tests associés varient selon l'organisme concerné. En ce qui concerne les lubrifiants utilisés à PSA, l'approbation des huiles s'appuie essentiellement sur les spécifications API et ACEA [198].

La spécification ACEA repose sur des critères de qualité et de performance bien définie. La norme prend en compte dans la gamme les viscosités, les stabilités (au cisaillement, à l'oxydation), les domaines d'utilisations (type carburant, type de moteur, conditions de fonctionnement) ainsi que la composition de la base (synthétique ou minérale) du lubrifiants. La norme propose 5 niveaux de lubrifiants pour le moteur essence (A), 5 niveaux pour les moteurs Diesel légers (B) et 4 niveaux de lubrifiant pour les poids lourds (E).[192]

Les spécifications API classent les lubrifiants selon leurs performances respectives. Chaque performance est validée par des critères d'évaluations et des procédures standardisées. Sur moteurs, les tests prennent en compte de nombreux résultats tel que l'élévation de la température, l'intervalle de vidange ainsi que la réduction de consommation de carburant.

Enfin, on distingue aussi les classifications selon viscosité appelé grade SAE. On distingue deux type de grades de viscosité : les grades hiver noté W, et les grades été.

Les grades SAE hiver sont classés selon la viscosité du lubrifiant à basse température. Il caractérise la viscosité au démarrage à froid et la pompabilité à froid du lubrifiant. On les notes 0W, 5W, 10W, 20W et 25W selon la gamme de viscosité.

D'autres part, les grades SAE été permettent de caractériser la viscosité du lubrifiant à chaud. Elle aide à caractériser la viscosité cinématique et la viscosité dynamique du lubrifiant à température élevé.

Notons que la gamme de viscosité constitue un critère important pour le choix des lubrifiants. Si la viscosité des huiles descend en dessous de sa valeur optimale à sa température d'utilisation, il ne pourra plus satisfaire ses rôles de lubrifiants. Par contre, si la viscosité monte au-delà de la consigne à sa température d'utilisation, il perd sa fluidité et ne pourra plus assurer son rôle protecteur.

Glossaire

ΔW	Degré de supersaturation ($W_{vap} - W_{vap,Sat}$)	-
A	Surface de transfert	m ²
C _p	Capacité calorifique de l'air humide	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
D	Coefficient de diffusion	m ² /s
h	Coefficient de transfert par convection (thermique)	W/(m ² K)
h _m	Coefficient de transfert massique	m/s
k	Conductivité thermique	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Le	Nombre de Lewis défini par la relation	-
L _h	Chaleur latente de désublimation	J/kg
L _s	Enthalpie de sublimation	J/kg
m ^o	flux massique de vapeur	kg.m ⁻² .s ⁻¹
m ^o	Taux de changement de phase dans le givre	kg/m ³ /s
m ^o _a	Flux total de vapeur provenant de l'air atteignant la surface du givre	kg/m ² /s
m ^o _x	Flux massique participant à l'épaississement	
m ^o _p	Flux massique participant à la densification	
p	pression partiel de vapeur	Pa
Q	Flux thermique	J/s
r	rayon germe de nucléation	m
T	Température	°C
Tr	temps critiques relatifs à la différente phase de givre	s
W	fraction massique	-
x	Coordonné sur un axe perpendiculaire aux parois	m
Y	Humidité absolu	kg/kg
α _f	coefficient d'absorbtion à l'intérieur du givre	s ⁻¹
ΔG	Energie de germination	J/mol
ΔT _{super}	Température de sur-refroidissement ($T_{sat} - T_w$)	°C
ε	Porosité givre	-
ε _β	Fraction volumique de la glace dans le givre poreux	-
θ	angle de contact	rad
ρ	densité	kg/m ³
ρ	densité	kg/m ³
ρ _β	densité glace	kg/m ³
Φ, σ _Φ , et S _Φ	paramètre de l'équation	

Script

∞	Dans la veine de gaz
air	côté air
crit	Critique
eff	Effective
f	côté givre
fs	parois givre
i	élément i
m	massique
vap	vapeur
w	Au voisinage de la paroi
w	eau ou givre
x	épaississement givre
ρ	densification givre

Résumé

Le phénomène de gels et d'émulsions de blow-by a été étudié à travers des essais sur banc et des travaux de modélisation. Physiquement, ces phénomènes se ramènent au changement d'état de la vapeur d'eau présent dans un gaz incondensable et en présence de particules ou de film d'huile.

Pour les conditions chaudes, la condensation prédomine. Ce phénomène mérite une attention car les condensats sont susceptibles de s'accumuler puis de cristalliser (changement de direction du tube, changement de géométrie...). Les condensats peuvent se mélanger avec l'huile pour donner une émulsion visqueuse capable de boucher partiellement les tubes. Pour les conditions froides, la formation de givre est privilégiée. Il s'agit d'une matrice de glace poreuse qui bouche progressivement la conduite jusqu'à l'obturation totale. En présence d'huile, le givre piège les particules sous forme d'incrustation sans entraîner une modification des phénomènes observés. Pour les conditions intermédiaires, les condensats, le givre et la glace coexistent à l'intérieur des tubes. Ce phénomène entraîne une brusque montée en pression. En présence d'huile, le condensat liquide qui se trouve le plus souvent en amont du tube est remplacé par de l'émulsion et cristallise après un certain temps de contact.

La mobilité de l'eau et la position des bouchons ont été utilisées pour décrire les différents phénomènes observés. Ces deux paramètres peuvent être corrélés avec les conditions opératoires ainsi que d'autres paramètres liés aux phénomènes de transfert thermique. Ce sont le débit de condensation et le profil de température de paroi interne des tubes.

Des corrélations des coefficients de transferts et des enthalpies échangées ont permis de constater l'influence des différents paramètres et les phénomènes de transfert thermique mis en jeu. Les phénomènes de transfert à l'intérieur des tubes peuvent être modélisés en se servant de l'analogie entre le transfert de masse et le transfert de chaleur et en introduisant le concept de **formation de brouillard** ou de **stabilisation isothermique du gaz sursaturé** qui se forme.

Le risque de bouchon et les phénomènes prépondérants peuvent être prédits à partir des résultats de modélisation thermique en utilisant le débit de condensation et les températures de paroi maximale et minimale comme critère.

Mots clés : Condensation, givre, émulsion, convection, transfert de chaleur, transfert de matière, blow-by, air humide, banc d'essais.

Abstract

Experiments and models were used to understand the ice and emulsion formation within blow-by pipe. These phenomena consist of phase change of water vapor from moist gas in oil polluted media (particles and oil film).

Condensation occurs if gas temperature, humidity, wall temperature and gas flow rate are high enough. Though condensate doesn't lead to pipe obstruction, one has to take into account its ability to build up and to freeze if any tube related parameters change (direction, shape,...). In the presence of oils, condensation is coupled with emulsion formation. The latter may plug the pipe due to its viscosity and its ability to retain water until freezing. At a cooler environment, water liquid, frost and ice appear simultaneously. They make pressure rise promptly. When oil particles are present, condensate that are located near the entrance of gases tend to become an emulsion. It may solidify as time increases. In cold environment, frosting prevails. Frost causes pressure to rise slowly. It is not affected by oil presence as particles acts as inert foreign material within the frost layer.

Water mobility and plug location are used to describe all phenomena that occur during experiments. These parameters can be correlated with operating conditions (inlet gas dew point, inlet gas flow rate, pipe cooling temperature, pipe size) and with heat and mass transfer related parameters namely the condensate flow rate and the wall temperature distribution.

Nusselt number correlations were used to emphasize the contribution of each parameter to heat transfer. In order to understand the heat transfer phenomenon, enthalpy correlation was carried out. Heat and mass transfer models were built by combining the heat and mass transfer analogy with **fogging** and **isothermal condensation of supersaturated air** related theories.

The risk of blow-by pipe plugging and the prevailing phenomena can be predicted according to the wall temperatures distribution and the condensate flow rate. These two parameters are easily available by using models that were built during this study.

Keywords: Condensation, frost, emulsion, convection, heat transfer, mass transfer, blow-by, moist air, bench test.