



HAL
open science

Essai de construction d'un référent pour l'apprentissage de la thermodynamique chimique

Oumar Sylla

► **To cite this version:**

Oumar Sylla. Essai de construction d'un référent pour l'apprentissage de la thermodynamique chimique. Education. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2005. Français. NNT : . tel-00133932

HAL Id: tel-00133932

<https://theses.hal.science/tel-00133932>

Submitted on 28 Feb 2007

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'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

Présentée par

Monsieur Oumar SYLLA

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

**SCIENCES DE L'EDUCATION
Didactique des sciences physiques**

Mémoire de thèse :

**« ESSAI DE CONSTRUCTION D'UN RÉFÉRENT
POUR L'APPRENTISSAGE DE LA THERMODYNAMIQUE CHIMIQUE »**

Thèse présentée et soutenue à Cachan le 16 septembre 2005 devant le jury composé de :

ALAIN DUMON	Professeur des Universités	Rapporteur
ODILE GALLAIS	Maître de conférences D^r d'Etat	Rapporteur
CLAUDINE LARCHER	Professeur des Universités	Examineur
ANNE-MARIE HUYNEN	Professeur des Universités	Directeur de thèse

**Unité Mixte de Recherche Science Technologie Éducation Formation
ENS CACHAN - INRP
61, avenue du Président Wilson - 94235 CACHAN CEDEX, France**

*A Hadiara mon épouse
et à tous mes parents.*

REMERCIEMENTS

Si la rédaction de notre thèse fut un travail de très longue haleine, il fut cependant sans contexte très enrichissant par les obstacles que nous avons surmontés et les échanges avec de nombreux collègues didacticiens.

Nous tenons à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cette thèse et nos remerciements s'adressent particulièrement à :

Claudine Larcher, son soutien moral et intellectuel m'a aidé à persévérer dans les moments critiques que j'ai rencontré dans la rédaction de ce mémoire. Sa contribution a été très remarquable.

Anne- Marie Huynen, directrice de thèse pour ses compétences professionnelles et pour ses conseils de qualité.

Jean-Louis Martinand qui m'a accueilli depuis le DEA et guidé dans mes recherches. Ses remarques version après version, révision après révision, ont contribué à rendre lisible mon travail.

Alain Crindal pour sa lecture attentive et critique du manuscrit.

Yves Cartonnet pour de nombreuses discussions fructueuses.

Joël Lebeaume et tous les personnels du laboratoire STEF pour l'accueil et l'assistance logistique.

Alain Dumon et Odile Gallais qui ont accepté d'être rapporteur de ce travail de thèse.

Cécile Van Der Borgh et tout le personnel du laboratoire de pédagogie de sciences de l'université catholique de Louvain la Neuve pour leur accueil.

Ehadj Amadou Tidjane Diallo Directeur général et toute la direction de l'ISSEG pour l'aide financière qui a soutenu ce projet.

Les enseignants de l'université de Conakry et de l'ISSEG qui ont accepté d'être interviewé et pour leur participation à la séquence d'enseignement.

Les experts de CBG à l'usine de Kamsar : Naby Condé ingénieur de production, Moustapha Sylla chef du département génie industriel, Therno Sadou Barry ingénieur des mines et Sitan Keita .

Nous tenons également à remercier :

Philippe Varrin, Nathalie Evrard, Alpha Oumar Diallo, Annie Leblond et tous les collègues du séminaire doctorant de Cachan pour leurs nombreuses interactions.

Hadiara mon épouse pour ses sacrifices et son dévouement durant les longues périodes d'absence

RESUME

Notre travail se propose d'utiliser une visite d'usine de séchage de la bauxite pour que les étudiants de DEUG guinéens élaborent un référent empirique pour le début de l'apprentissage de la thermodynamique chimique.

En nous appuyant sur le schéma de modélisation de Jean Louis Martinand (1995) nous avons cherché quelles descriptions pouvaient être construites par les étudiants au cours d'une telle visite et quels liens pouvaient être identifiés avec les savoirs théoriques prévus par les programmes.

Le travail comporte une partie d'analyse du fonctionnement de l'usine en vue de construire des élaborations modélisantes accessibles aux étudiants. Cette analyse a été faite sur la base du discours produit par un technicien chargé de la maintenance et des documents techniques mis à notre disposition.

En parallèle à l'analyse de ces données, des essais ont été menés avec trois groupes d'étudiants : visite puis travail de groupe. Les fiches qu'ils avaient à renseigner dans ces deux étapes ont été analysées ; elles apportent des informations sur ce qu'ils repèrent, sur les questions qu'ils se posent, sur celles sur lesquelles ils progressent, sur les liens qu'ils essaient d'établir avec leurs connaissances théoriques.

L'articulation de ces deux volets permet d'élaborer des activités qui pourront être proposées aux étudiants, sous la tutelle de l'enseignant, en complément d'activités expérimentales ou d'exercices formels, de façon à contribuer à une meilleure appropriation des bases de la thermodynamique traditionnellement considérée comme trop formelle.

C'est un travail centré sur le référent empirique dans ses différents aspects : objets, phénomènes, phénoménographie, phénoménotechnique, phénoménologie.

Mots clés :

Thermodynamique chimique, modélisation, référent empirique.

SUMMARY

Our work intends to use the visit of a bauxite drying factory so that the Guinean students in DEUG work out an empiric referent for the starting of the learning of chemical thermodynamics.

Leaning on the modelization diagram by Jean Louis Martinand (1995) we looked for which descriptions could be built up by the students during such a visit and which links could be identified with the theoretical knowings planned by the programs.

The work includes some of the analysis of the working of the factory to build up modelizing elaborations accessible to the students. This analysis was built up from the speech delivered by a technician in charge of the maintenance and the technical documents put at our disposal .

In parallel with the analysis of these data some tests have been lead with three groups of students: a visit then a work in groups. The cards they had to fill in in these two steps have been analysed; they give information about what they identify, about the questions they ask themselves, about the ones in which they advance, about the links they try to set up with their theoretical knowings.

The articulation of those two points allows to work out activities which will eventually be suggested to the students, under the control of the teacher, in complement with experimental activities or formal exercises aiming to allow a better appropriation of the basis of thermodynamics traditionally considered as too formal.

This is a work based on the empiric referent in its different shapes: objects, phenomenons, phenomenography, phenomenotechnics, phenomenology.

Key words :

Chemical thermodynamics, modelization, empiric referent.

INTRODUCTION	9
Chapitre I : Les difficultés des étudiants en thermodynamique	11
I - Difficultés repérées par les recherches antérieures	11
II - Constats en République de Guinée	13
II -1- Enquête auprès des enseignants guinéens	13
II -2- Enquête auprès des étudiants guinéens	17
Chapitre II : Référent empirique	20
I- Relations entre champ théorique et champ empirique	20
I-1 Aspects épistémologiques	20
I- 2 Aspects didactiques	21
I- 3 Des essais pour lier connaissances scolaires et pratique de référence	23
II- Le registre du référent empirique	24
III- Un projet d'élaboration d'un référent empirique	27
III-1- Les hypothèses et les principes	27
III-2- La démarche envisagée	28
Chapitre III : Thermodynamique en DEUG et référents	30
I - La thermodynamique enseignée	30
I-1 Les programmes guinéens de thermodynamique chimique	30
I- 2 Concepts abordables en référence à l'usine de Kamsar	31
I – 3 - le phénomène de combustion dans l'enseignement guinéen	34
➤ Dispositif calorimétrique manipulé en TP	35
➤ Modélisation des réactions de combustion à l'université	36
II- Description des phénomènes thermiques à l'usine de Kamsar	36
II - 1 - Le discours de l'expert	37
II – 2 - Les données des documents techniques	39
II –3 Les différentes descriptions du référent empirique	44
➤ Observables externes de l'usine de séchage de bauxite	44
➤ Phénoménologie- phénoménotechnique	44
➤ Élaborations modélisantes	47
Figure III-6 Les entrées et les sorties de l'eau	48
Schéma III-7 Entrées des chaleurs	49
Schéma III-8 Sorties des chaleurs	50
III - Comparaisons des modélisations	51
Chapitre IV : Séquence d'enseignement en relation avec l'usine de Kamsar	53
I- Déroulement de la séquence	53
II- Analyse des productions des étudiants dans l'étape 1	54
« visite de l'usine »	54
II-1- Les questions que les étudiants formulent lors de cette visite	58
II - 2- Les liens avec le programme	60
III - Analyse des productions des élèves dans l'étape 2	62

III -1- Echanges entre groupes	62
III – 2- Analyse des reformulations, par groupe d'étudiants	67
III-3 Analyse des productions des élèves en réponse aux propositions de problèmes	73
IV - Analyse critique de la séquence d'enseignement.....	77
Chapitre V : Conclusions et perspectives	78
I- Des questions que l'enseignant peut poser à différents moments, reprendre éventuellement à d'autres moments	79
I-1- Des questions sur les observables.....	79
I-2- Des questions précises pour s'appropriier des termes	79
I-3- Des questions pour attirer l'attention et susciter un questionnement	80
II - Des modélisations successives globales ou locales	80
III – Application de théories, contextualisation	82
IV – Les attendus et les limites	83
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84
ANNEXES	Erreur ! Signet non défini.
Liste des schémas et des tableaux	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE 1 : LES ENQUETES	Erreur ! Signet non défini.
A - Enquête auprès des enseignants	Erreur ! Signet non défini.
A - 1- Fiche questionnaire enseignant	Erreur ! Signet non défini.
A - 2 - Les réponses des enseignants.....	Erreur ! Signet non défini.
A - 3 - Analyse des réponses des enseignants.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2 : Analyse des réponses sur l'adaptation des programmes de thermodynamique chimique à la filière d'enseignement	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3 : Analyse des réponses sur les objectifs des enseignements	Erreur ! Signet non défini.
non défini.	
Tableau 4 : Analyse des avis sur un partenariat entre industrie locale en Guinée et l'université pour l'enseignement de la thermodynamique au premier cycle universitaire	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5 : Catégorisation des réponses des enseignants ...	Erreur ! Signet non défini.
B - Enquête auprès des étudiants.....	Erreur ! Signet non défini.
B - 1 - Enoncés	Erreur ! Signet non défini.
B - 2 - Réponses des étudiants.....	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE 2 : Les programmes de thermodynamique.....	Erreur ! Signet non défini.
A - Programmes de thermodynamique chimique au premier cycle (République de Guinée).....	Erreur ! Signet non défini.
B - Trame de cours et objectifs au premier cycle (DEUG).....	Erreur ! Signet non défini.
quelle que soit la filière.....	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE 3 : Recueil de données dans l'usine de Kamsar	Erreur ! Signet non défini.
A - Entretien avec un expert technicien.....	Erreur ! Signet non défini.

Schéma 1 produit par l'expert	Erreur ! Signet non défini.
B – Les schémas et les photos de l'usine de séchage de KAMSAR	Erreur ! Signet non défini.
Schéma 7 Schéma d'ensemble du dispositif (document d'usine)	Erreur ! Signet non défini.
C - Les données des notices techniques.....	Erreur ! Signet non défini.
C - 1- Les paramètres.....	Erreur ! Signet non défini.
C - 2 - Bilans massique et énergétique	Erreur ! Signet non défini.
C - 3 - Données thermodynamiques utilisées à l'université....	Erreur ! Signet non défini.
ANNEXE 4 : PRODUCTIONS DES ETUDIANTS	Erreur ! Signet non défini.
A – Les productions des étudiants dans l'étape 1	Erreur ! Signet non défini.
GROUPE 1	Erreur ! Signet non défini.
GROUPE 2.....	Erreur ! Signet non défini.
GROUPE 3.....	Erreur ! Signet non défini.
B – Productions des étudiants dans l'étape 2.....	Erreur ! Signet non défini.
Reformulations du groupe 1	Erreur ! Signet non défini.
Reformulations du groupe 2.....	Erreur ! Signet non défini.
Reformulations du groupe 3.....	Erreur ! Signet non défini.
C - PROBLEMES CONTEXTUALISES	Erreur ! Signet non défini.
C - 1 Les énoncés.....	Erreur ! Signet non défini.
C - 2 - Les propositions des étudiants.....	Erreur ! Signet non défini.
Propositions du groupe 1 pour le problème 1.....	Erreur ! Signet non défini.
Propositions du groupe 1 pour le problème 2.....	Erreur ! Signet non défini.
Propositions du groupe 2 pour le problème 1.....	Erreur ! Signet non défini.
Propositions du groupe 2 pour le problème 2.....	Erreur ! Signet non défini.
Propositions du groupe 3 pour le problème 1.....	Erreur ! Signet non défini.

INTRODUCTION

A l'origine de cette recherche sur l'apprentissage de la thermodynamique chimique en début d'université se trouve le constat récurrent de la difficulté ressentie par les élèves et les enseignants : la thermodynamique chimique est considérée comme très formelle et abstraite.

Nous avons élaboré et testé un enseignement qui permette aux étudiants de rattacher ce formalisme à des observables, en utilisant une visite d'usine. Ce faisant, nous avons analysé le fonctionnement de l'usine en proposant différentes modélisations.

Le cadre théorique qui nous a permis de développer questionnement et analyses est celui de J.-L. Martinand (1995), qui distingue référent empirique, élaboration modélisante et matrice cognitive.

Dans un premier chapitre, nous précisons les difficultés largement constatées dans l'apprentissage de la thermodynamique et dont la bibliographie rend compte ; nous compléterons par deux enquêtes dans le contexte guinéen qui est le nôtre, une auprès d'enseignants et une auprès d'étudiants.

Dans le chapitre II, nous situons le cadre théorique retenu. La perspective ici n'est pas de recourir à l'expérimental mais de fournir un référent empirique pour articuler le registre théorique des concepts et du formalisme, le registre des modèles et le registre du référent empirique.

Nous présenterons en conclusion de ce chapitre l'ensemble de la démarche suivie, les recueils de données et l'analyse envisagée.

Le chapitre III propose une analyse comparative entre les contenus proposés en thermodynamique en DEUG et un ensemble de descriptions d'une usine de séchage de la bauxite. Les données concernant l'usine sont issues d'une part d'un entretien avec un expert industriel chargé de coordonner les opérations de séchage de la bauxite dans l'usine, qui a bien voulu nous prêter son concours, d'autre part de notices techniques recueillies sur ce lieu.

Sur cette base nous essayons d'utiliser le cadre théorique choisi, en distinguant différentes descriptions dans le registre empirique et différentes « élaborations modélisantes ».

Ces productions pourront ultérieurement éclairer des choix à faire pour utiliser la visite de cette usine comme support dans un enseignement de thermodynamique en DEUG.

Le chapitre IV porte sur la séquence d'enseignement élaborée. Y sont présentées les analyses des productions des étudiants pendant et après la visite de l'usine ainsi que la résolution de problèmes de thermodynamique qui leur sont ensuite soumis.

La dernière partie est prospective. Sur la base du travail effectué, compte tenu des analyses et des essais, de nouvelles propositions de tâches sont élaborées.

Chapitre I : Les difficultés des étudiants en thermodynamique

Dans ce chapitre nous rendrons compte d'une recherche bibliographique sur les difficultés des élèves lors de l'apprentissage de la thermodynamique ; nous rendrons compte par ailleurs d'enquêtes que nous avons menées en Guinée pour préciser notre contexte d'intervention.

I - Difficultés repérées par les recherches antérieures

Dans la reconstruction didactique des objectifs et contenus d'enseignement, la connaissance des difficultés et des modes de raisonnement des étudiants apparaît comme un élément indispensable (Kattmann et al., 1995).

Mais on dispose de peu d'analyses sur les difficultés rencontrées par les étudiants dans le domaine de la thermodynamique chimique.

Des études disponibles concernent les difficultés de séparation des concepts de chaleur et de température chez les adolescents (Kesidou & Duit, 1993) ou chez de jeunes élèves (Tiberghien, 1985). Même si le niveau scolaire auquel nous nous intéressons est d'ordre supérieur, les difficultés décrites persistent.

En ce qui concerne le concept d'entropie, qui est introduit plus tardivement, Gréa & Viard (1994) indiquent que les élèves ne retiennent de l'entropie que ce qui se rattache aux variables spatiales. Il n'existe pas de dispositif que l'on puisse utiliser pour mesurer directement l'entropie d'un corps ; la variation d'entropie ne peut se calculer qu'à partir des chaleurs spécifiques et de mesures de variations de température. Elle apparaît ainsi souvent mystérieuse et difficile à comprendre pour les étudiants (Sexl et Pflug, 1978).

L'évolution des transformations chimiques observées au niveau macroscopique étant difficile à décrire, les étudiants se réfèrent le plus souvent à l'équation bilan comme processus élémentaire. Le raisonnement des étudiants se fait sur l'écriture de la réaction chimique et non sur le phénomène chimique observé (Davous, 1999) ; «... *certaines expressions et certains symbolismes consacrés par l'usage sont considérés comme susceptibles d'induire de mauvaises représentations* » (Larcher, 1994).

Le concept d'équilibre chimique est très difficile à construire par les étudiants (Goffard, 1993). Il apparaît que très peu d'étudiants de CAPES maîtrisent le concept d'équilibre chimique et sont capables de développer un raisonnement prenant en compte des déplacements successifs d'états d'équilibre d'un système chimique (Ganaras, 1998). La thèse

de K. Ganaras envisage ce concept comme un concept intégrateur permettant de remplacer diverses phénoménologies par une phénoménologie unifiée ; elle fait apparaître la variété des registres dans lesquels les étudiants rendent compte de phénomènes qui pourraient être décrits en termes d'équilibre chimique.

Barlet & Mastrot (2000) constatent que les étudiants ne relient pas entre elles les différentes notions enseignées en thermochimie, en particulier le premier principe et les fonctions d'état, la loi de Hess et le calcul des chaleurs de réaction. Selon ces auteurs, les concepts intégrateurs à partir desquels on énonce les lois et les principes de la thermodynamique sont mal compris par les étudiants et disparaissent de leur raisonnement. Par ailleurs, ils indiquent que dans les ouvrages universitaires, la conservation de l'énergie liée au premier principe de la thermodynamique, qui devrait être un concept central, n'intervient que dans l'introduction à la thermodynamique chimique et disparaît plus ou moins au profit d'une mathématisation excessive et d'algorithmes de calcul.

Lemeignan et Weil Barais (1990) montrent que l'enseignement secondaire de l'énergie repose essentiellement sur l'apprentissage et la manipulation des formules d'expression du travail et des énergies cinétiques ou potentielles « il semble [l'enseignement] se réduire à l'exposé de relations mathématiques définitives de grandeurs physiques, sans que soit justifiée la nécessité de procéder à de telles élaborations conceptuelles ».

En ce qui concerne les modes de raisonnement, Rozier & Viennot (1991) montrent que là où plusieurs éléments doivent intervenir dans le raisonnement, les étudiants ont tendance à se centrer sur un objet unique et à raisonner sur une variable à la fois.

Pour Wrigh (1974) « le raisonnement de la thermodynamique repose sur des idées de physique et de mathématique plutôt que de la chimie » ; son enseignement suppose ainsi, une connaissance préalable des mathématiques du niveau certificat de mathématique générale et de physique :

- Les équations différentielles souvent utilisées peuvent avoir des significations physiques difficilement accessibles pour les étudiants. Le plus souvent, ils n'arrivent pas à décoder ces équations.
- Les diagrammes thermodynamiques qui sont des représentations de l'état thermodynamique du système défini par son équation d'état, sont des outils de l'ordre d'un langage codé. La difficulté de l'étudiant est de le décoder.

Mais les étudiants sont-ils capables de produire un discours sur ces courbes ou sur les diagrammes ?

Toutes ces difficultés énumérées sont à mettre en relation avec le degré d'abstraction dans la construction des concepts formels en thermodynamique.

Les concepts formels ne sont pas réductibles à une approche empiriste, leur construction résulte d'un effort de réflexion de la pensée sur elle-même qui s'impose des règles de cohérence (Weil Barais, 1994). L'abstraction ne porte pas sur les phénomènes, mais sur des idées émises à propos de ces phénomènes.

II - Constats en République de Guinée

Pour faire un constat objectif sur les difficultés des étudiants dans l'enseignement de la thermodynamique en république de Guinée, nous avons effectué une enquête auprès d'enseignants et d'étudiants guinéens.

Le nombre d'enseignants et d'étudiants interrogés ne permet pas une généralisation sur l'ensemble de la Guinée, mais permet d'obtenir des informations plus contextualisées et d'objectiver le constat qui sous tend ce travail de recherche.

II -1- Enquête auprès des enseignants guinéens

Nous avons interrogé 28 enseignants qui donnent des cours de thermodynamique chimique au premier cycle universitaire de l'université de Conakry. Ces enseignants ont des expériences d'enseignement diversifiées : facultés des sciences, de génie chimique, de médecine pharmacie, biologie (bio médicale), génie civil, technologie organique. Nous avons aussi interrogé quelques enseignants du secondaire qui donnent des cours de thermochimie.

Nous avons choisi de poser des questions fermées avec justification de réponse (voir annexe A - 1). Nous avons cherché à savoir :

- ce que pensent ces enseignants à propos de l'enseignement de la thermodynamique chimique au premier cycle universitaire ;
- ce qu'ils pensent des programmes et de leur adaptation par rapport la formation attendue, les difficultés qu'ils ont pour atteindre des objectifs d'enseignement ;
- ce qu'ils pensent du partenariat entre université et industrie pour l'enseignement de la thermodynamique au premier cycle universitaire.

La réticence de plusieurs enseignants à se soumettre à une interrogation qui leur apparaissait comme un test a été relevée. En période de cours, les enseignants présents à l'université ne

pouvaient pas se libérer. Nous avons alors profité d'une réunion des professeurs pour faire notre enquête. Nous aurions voulu que chaque professeur rédige sa réponse suivant la fiche mise à sa disposition, mais beaucoup ont préféré nous dicter les réponses avec des phrases très courtes. Le fait de poser des questions à des professeurs regroupés n'a pas permis d'obtenir des réponses diversifiées, les uns entendant les réponses des autres. Certains n'ont fait que confirmer ce qui a été déjà dit ou répété les mêmes réponses que d'autres.

En annexe 1 (A -2) sont regroupées les réponses, souvent très succinctes, de chaque enseignant repéré selon ses caractéristiques et quatre tableaux récapitulatifs (annexe A-3 tableaux 1, 2, 3, 4) permettant de comparer ces réponses.

L'analyse des réponses en fonction des filières (tableau 1, annexe 1) montre que la perception des difficultés ne dépend pas des filières ou ne sont pas particulières à une option donnée. Le problème de l'enseignement de la thermodynamique au premier cycle universitaire se pose dans toutes les facultés. La majorité des enseignants considère que le cours de thermodynamique est difficile (15 sur 28, indépendamment de la faculté dans laquelle ils exercent dont onze enseignants de cours théoriques et quatre enseignants de cours pratiques). En ce qui concerne l'adaptation des programmes, neuf enseignants sur onze, qui donnent des cours théoriques à la faculté des sciences, considèrent que les programmes sont adaptés ainsi que deux enseignants des TP¹.

Nous remarquons que certains enseignants de la faculté des sciences considèrent que le niveau des étudiants est la principale cause de difficulté. Notons qu'en République de Guinée, les étudiants nouvellement inscrits au premier cycle universitaire n'ont pas les mêmes niveaux dans toutes les options : Généralement après le bac, ce sont les meilleurs étudiants qui sont orientés vers les facultés de technologie (génie chimique, génie chimique technologie alimentaire etc.) et dans les facultés de médecine et pharmacie.

Par ailleurs, la majorité des enseignants interrogés semblent formuler leur réponse en fonction de l'enseignement dont ils ont la charge et ne pas tenir compte de l'apport des autres enseignants. Ainsi des enseignants de cours théoriques mettent l'accent sur des objectifs théoriques que l'étudiant doit être capable d'acquérir tandis que certains enseignants de TP ne tiennent pas compte des objectifs théoriques et leurs justifications se situent au niveau de la

¹ TP : travaux pratiques

réalisation des expériences de laboratoire et du manque d'expériences pratiques de laboratoire.

Les réponses des professeurs dans les options de technologie et de génie chimique se réfèrent aux TP et les justifications font part du manque d'expérimentation dans les laboratoires ; les options de technologie et de génie chimique font beaucoup plus de TP que les autres options.

De fait, la question a pu être comprise de façon différente : programmes adaptés ou non aux finalités de la filière, adaptés ou non aux conditions d'enseignement, adaptés ou non aux étudiants, ou encore un avis qui n'est pas précisé. Chaque interprétation peut donner lieu à un avis positif ou négatif. Ainsi, le tableau I- 1 propose des regroupements croisés sur ce point de l'enquête.

Le tableau I-1 : Réponses des enseignants sur l'adéquation des programmes

Programmes	Aux enjeux de formation	Aux conditions d'enseignement	Aux étudiants	indifférencié
Adaptés	P1, P2, P3, P4 P6, P8, P11, P15, P16,	P4 P7,	P11, P27	
Non adaptés	P10, P12, P19	P2, P5, P8, P9, P13, P15, P16, P20, P22, P 28	P7, P10	P14, P17

Les objectifs que les enseignants souhaiteraient atteindre peuvent être classés en six catégories selon le tableau I-2 .

Tableau I-2 : objectifs déclarés par les enseignants

	Savoir théorique Maîtrise de la chimie Connaissances de la chimie	Esprit d'analyse, esprit de recherche Esprit scientifique	Savoir-faire Compétences pratiques	Conception Réalisation de projet	Expérimentation	Application de la théorie Représentation chimique
Facile à atteindre	P7	P10	P15		P25	
Difficile à atteindre	P1 P5 P13 P17 P19	P1, P6, P9, P18	P2 P3, P4, P8 P14	P9, P16, P23	P24 P27 P28	P12
Non précisé		P21 P22		P11		P20

La plupart des objectifs évoqués sont considérés comme difficiles à atteindre. Les mêmes types d'objectifs sont parfois jugés différemment (difficiles ou faciles) et doivent correspondre à des exigences différentes.

Si on analyse (voir tableau 5, annexe 1) de façon plus précise les « justifications » de réponses des enseignants, nous pouvons distinguer des types de compléments aux réponses aux questions fermées : une catégorie « mathématiques » qui rassemble les propos où les difficultés identifiées par les enseignants sont liées aux mathématiques, une catégorie « labo » où les difficultés énoncées concernent l'absence de laboratoires, de produits, d'équipement ou le nombre d'étudiants, difficultés qui ne permettent pas de faire acquérir des compétences pratiques ou savoir-faire, ni de « compléter » la formation ; enfin une catégorie « liaison théorie/pratique » où les enseignants expriment explicitement le besoin qu'il y aurait à lier cours théorique et manipulation pratique pour une meilleure appropriation par les étudiants.

A la question portant sur le partenariat avec les industriels (tableau 5, annexe 1), six enseignants ne se prononcent pas, cinq sont défavorables et dix sept sont favorables.

Ceux qui se disent défavorables considèrent « c'est un peu tôt pour les étudiants de première année... » (P6), que « les étudiants n'ont pas le niveau » (P1) ; ils craignent que cette

possibilité vienne remplacer les TP alors que « nous ne faisons pas la même chose » (P5, P7, P8).

Tout en se déclarant favorable, P9 et P10, P13 expriment une réticence sur l'insertion des industriels dans la définition de la formation « pas pour apprendre le fonctionnement des machines », nos étudiants ne sont pas des spécialistes », en distinguant formation générale et formation professionnelle et ils craignent « .. qu'ils exigent de faire des programmes en fonction de ce qu'ils font ». D'autres notent également la différence entre l'usine et ce qui est enseigné « ça ne correspond pas toujours à ce que nous enseignons » (P12)

Pour P11, il s'agit de se « familiariser avec un milieu de travail » et pour P21 de « créer des habitudes chez les enseignants » car « les entreprises sont les employeurs ».

II -2- Enquête auprès des étudiants guinéens

Nous avons mené notre enquête auprès de 36 étudiants repartis dans deux classes de première année d'université en fin d'année scolaire, qui ont suivi les cours de thermodynamique chimique dans le programme de chimie générale ou chimie physique.

La question posée (voir annexe 1-B) aux étudiants est de savoir ce qu'il pensent des cours de thermodynamique chimique et de justifier leur réponse.

Six étudiants sur trente cinq interrogés considèrent que la thermodynamique chimique c'est facile (dont 4 avec justification de réponse et 2 étudiants sans justification de réponse) ; 26 étudiants considèrent que la thermodynamique chimique c'est difficile (dont 15 avec justification de réponse et 10 sans justification de réponse). Trois sur 35 ne se prononcent pas. Certains étudiants qui considèrent que le cours est difficile, sans donner de justification sur leur fiche, nous ont dit verbalement que c'est « à cause de leur enseignant qui n'explique pas bien », mais ils craignent de le formuler par écrit. Nous considérons ces cas comme des cas de réponse sans justification (E20, E21, E22, E24, E26, E27, E28, E29).

L'ensemble des justifications obtenues des dix huit élèves, notés E_i , sont données en annexe 1-B- 2:

Les élèves évoquent :

➤ des phénomènes et leur interprétation

- E1 : *Parce que les phénomènes sont difficiles, mais aussi leur fonctionnement pose de sérieux problèmes*

- E3 : *Parce qu'il y a beaucoup de phénomènes physiques et chimiques à expliquer*
- E6 : *Un peu facile puisqu'il faut comprendre les phénomènes pour pouvoir les analyser et les étudier*
- E10 : *Parce qu'il faut connaître beaucoup de phénomènes problèmes pour les interpréter*
- E17 : *Difficile parce que les phénomènes physiques sont trop complexes à interpréter*

- des problèmes de représentation
 - E4 : *Parce qu'il étudie les corps en interaction et qu'on ne peut séparer que par la pensée de leur milieu ambiant. C'est un cours pratiquement de l'imaginaire*
 - E7 : *Dans la mesure où les phénomènes thermodynamiques sont parfois idéal et demandent assez de réflexion*
 - E13 : *C'est difficile parce qu'il y a un peu d'imaginaire ; en prenant par exemple les gaz parfaits ou bien le deuxième principe de thermodynamique*

- des problèmes d'absence d'expérimentation
 - E2 : *Parce que purement expérimentale, et les expériences ne se font pas*
 - E5 : *parce qu'on ne fait pas des expériences pratiques liées aux cours théoriques*
 - E9 : *Le cours de thermodynamique chimique est difficile parce que donné de façon trop théorique au cas échéant c'est facile*
 - E11 : *Parce que je ne fais pas de pratique et que je ne constate pas les faits au laboratoire si tous ces problèmes sont arrangés, c'est facile*
 - E12 : *Le cours est facile si nous avons tous les moyens attribuer à cette matière à savoir les expériences et les outils*

- le caractère concret ou pratique
 - E14 : *Parce que c'est concret*
 - E15 : *Facile parce qu'à travers la thermodynamique on donne des notions de base liées à la pratique, mais sont aussi très mesquines*
 - E16 : *Facile parce qu'elle nous permet de lier les faits à la réalité, c'est à dire de la chimie on se trouve dans l'industrie, car on ne peut parler de l'industrie sans la chimie*

- des problèmes « mathématiques » ou de « relations » ou de « paramètres »

- E8 : *Le cours est difficile parce que lié à des faits mathématiques et des expériences*
- E18 : *Difficile parce qu'il y a trop de relations et aussi les liens de ces relations qui me paraît difficile et trop de paramètres*

Les élèves dont les codes sont soulignés ont répondu que la thermodynamique était facile. Ils sont trois à y voir un caractère concret et pratique. E12 considère que ce serait facile si les problèmes d'absence d'expérimentation étaient résolus. Un seul (E6) évoque les interprétations de phénomène avec un avis « facile », mais il dit « un peu facile » et sa justification peut être prise comme : *ce serait plus facile s'il n'y avait pas ces interprétations.*

En conclusion

Si les enquêtes menées n'apportent que des informations ponctuelles qui traduisent peut être le malaise concernant cet enseignement de la thermodynamique, elles confortent le constat informel basé sur une longue expérience d'enseignement de ce domaine en Guinée et sont compatibles avec les données issues de la bibliographie.

Notre projet n'est pas de «compléter la formation » par des acquisitions pratiques ou techniques, voire « professionnelles », ni de remplacer les TP par des visites d'usine. Les TP doivent permettre de faire manipuler les étudiants, de leur faire acquérir des compétences pratiques, mais en thermodynamique, ces TP sont construits en quelque sorte à l'intérieur d'un cadre modélisé et sont sans enjeu ; de notre point de vue, ils ne permettent pas aux élèves de se questionner sur les phénomènes, les lois et les concepts de la thermodynamique.

La visite d'usine renvoie à un réel pour lequel on peut construire différentes descriptions, en disposant de données issues de perceptions et de mesures. Le processus qui se déroule dans l'usine de Kamsar est complexe et notre hypothèse est qu'il peut permettre d'initier un questionnement des élèves par comparaison entre leurs connaissances en cours d'acquisition et ce qu'ils repèrent les uns ou les autres dans l'usine.

Chapitre II : Référent empirique

Les relations entre théorie, concepts, formalisme, modèles, expérimentation, référent ne sont pas propres à la thermodynamique chimique, elles ont fait l'objet de nombreuses études épistémologiques et didactiques.

Nous présentons ci dessous ce qui nous a permis de construire un cadre théorique pour notre projet.

I- Relations entre champ théorique et champ empirique

I-1 Aspects épistémologiques

Les relations entre champ théorique et champ empirique sont souvent envisagés en tant que rôles respectifs de la théorie et de l'expérience dans l'élaboration du savoir savant ; ce sont des préoccupations très importantes pour les chimistes. Les modalités suivant lesquelles s'articulent théorie – expérience sont très variées. Tous les cas de figure sont possibles comme le montrent Hacking (1983) et Harré (1981) sur des exemples historiques en physique. Pour Abragam (1986) « théorie et expérience sont indissolublement liées »

Le rapport entre théorie et expérimental ou entre le concret et le formel passe par la prise en compte des modèles, du rôle que nous voulons leur faire jouer, de la manière dont ils peuvent être appropriés dit Martinand (1995). Mais « *Il n'est pas évident de passer d'une pratique à une autre, même si on peut penser que les concepts vont rester vrais, sinon adéquats, dans l'un et l'autre cas. Plus profondément, il faut rapporter aux pratiques de référence les problèmes de l'« abstrait » et du « concret » : le concret n'est que le familier dans une pratique de référence, et reste souvent de l'abstrait pour une autre* ». (Martinand, 1995)

Pour une pratique donnée, Martinand (1996) souligne l'importance à accorder aux référents empiriques construits dans l'action et leur relation avec le savoir : même si les concepts restent les mêmes pour différentes pratiques, leur traduction dans le cadre d'une expérience, d'une pratique, risque de les rendre illisibles pour une autre pratique.

Par ailleurs l'étude des savoirs que les chercheurs mobilisent lors des investigations empiriques montre que la construction d'un registre empirique ne se limite pas à une simple accumulation de données : « *les faits n'existent qu'à travers un ensemble de connaissances*

pratiques mises en jeu dans les investigations empiriques et qui se construisent avec eux, mais ils n'ont de sens que par leur relation explicite avec le monde des modèles et les savoirs conceptuels correspondant. » (Orange, 2003)

Pour transformer l'expérience en connaissance dans un domaine donné, se déroule un processus de construction d'un corps de savoirs de référence à partir d'un ensemble de savoirs en acte manifestés dans les pratiques. *«Ce processus consiste à identifier des catégories d'objets et de traitements communs à des pratiques efficaces, qui sont quant à elles spécifiques de situations contextualisés et personnalisés. Il fait passer de situations vécues « hic et nunc » à des concepts et des méthodes qui permettent de les représenter et d'en imaginer des possibles. Ce processus fait ainsi passer du réel à la fiction* » (Rogaslski, 1994).

Fourez et al (1997) considèrent que *« Un modèle est un schéma, une image ou un discours organisé qui représente (tient la place de) la complexité des situations abordées ».*

Larcher (1996) précise que *« c'est une construction hypothétique en réponse à un questionnement ».*

I- 2 Aspects didactiques

A la fin des années 60, une importante réforme de l'enseignement des sciences physiques est mise en place à partir des travaux de la commission Lagarrigue constituée en 1969 sous l'impulsion des sociétés savantes, de l'inspection générale, des professeurs des classes préparatoires et de l'union des physiciens. *« Les éléments essentiels des positions affirmées par la commission pour l'enseignement des sciences physiques peuvent s'articuler en cinq points. Tout d'abord l'insistance est mise sur le recours à l'expérimental, caractéristique des sciences. Puis il y a l'importance accordée à l'acquisition des connaissances scientifiques et techniques de base (ordre de grandeur, schémas d'explication qualitative, modélisation, information sur le monde technique et les connaissances fondamentales en physique y compris les plus récentes). Il faut y ajouter l'entraînement à la manipulation, à l'observation ainsi que l'entraînement aux modes de raisonnement des sciences en tentant de 'présenter aux élèves 'l'interaction dialectique' entre théorie et expériences ', en commençant 'une familiarisation avec les principes' » (N. Hulin, 1991)*

La commission Lagarrigue met en évidence d'une part l'absence d'évolution des programmes et d'autre part *« un décalage croissant entre la physique enseignée et la physique pratiquée*

quotidiennement et telle quelle se manifeste en permanence via ses applications technologues » (M. Hulin, 1992).

Selon J. L. Martinand (1989) *«l'enseignement doit prendre en compte le référent empirique sous trois aspects: Comme domaine de familiarisation pour la manipulation et l'observation, comme référent (ce dont parlent les concepts, modèles ou théories), comme champs de validité des constructions conceptuelles, qui doivent être explorés systématiquement pour en éprouver la pertinence ou étendre les applications».*

Pour mieux cerner les démarches de construction d'un référent empirique et leur articulation dans une perspective de développement, Coquidé (2003) distingue trois modes d'activités expérimentales qu'elle qualifie comme :

- expérienciation dont les finalités sont de familiarisation pratique à des objets, à des phénomènes et des instruments scientifiques et techniques, doit permettre aux élèves d'explorer et d'agir à travers des situations variées et diversifiées ;
- expérimentation qui vise la compréhension des pratiques effectives de la science, avec des articulations indispensables entre moment empiriques et moment expérimentaux dans l'investigation. Il s'agit de confronter les élèves à un réel peu ménagé, de les aider à problématiser ou à émettre un projet ;
- expérience validation : les expériences sont envisagées dans un cadre d'apprentissage conceptuel systématique.

Laugier et Dumon (2003) en cherchant à étudier si des activités expérimentales pouvaient être proposées à des élèves de seconde tout en respectant les contraintes d'une séquence de classe traditionnelle, ont mis en évidence que dans un problème censé ne mettre en jeu que le registre empirique, les élèves rencontrent des difficultés par suite de leur manque de « savoirs pratiques » et de leur non maîtrise de « savoirs conceptuels ».

Dans les recherches de l'INRP-LIREST (Enseignement et apprentissage de la modélisation, 1992 - Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences, 1994) c'est la démarche de modélisation qui est questionnée et non plus l'usage des modèles comme outil de traitement théorique.

Les tâches à développer pour engager les élèves dans une démarche de modélisation (Larcher et al, 1990), la mise en cohérence du référent empirique et du paradigme explicatif par le biais de la modélisation (Orange, 1996), les démarches de modélisation médiatrices de nouvelles

conceptualisations (Laugier, 1998 ; Lemeignan et Weil-Barais, 1993) ont fait l'objet de travaux.

Le schéma de la modélisation proposé par JL Martinand (1995) présenté ci-après page 20, permet de repérer les liens entre registre empirique, modèle et théorie en particulier dans une perspective dynamique de construction de connaissances.

I- 3 Des essais pour lier connaissances scolaires et pratique de référence

Dans la suite des travaux mettant en évidence l'importance de la référence à des pratiques plutôt qu'à des savoirs pour construire des contenus scolaires en sciences physiques, Evrard (2001) s'est intéressée aux usages industriels de l'électrolyse dans des contextes très diversifiés dans une perspective de comparaison avec le schéma prototype de l'électrolyse qui en classe. La récupération d'un dépôt sur une électrode parcourue par un petit wagonnet ou la microélectrolyse utilisée en archéologie, où l'objet à rénover est lui même électrode, constituent des applications très variées pour l'électrolyse. Ce travail se situait dans la perspective d'un retour du registre des modèles vers le registre du référent empirique et non pas dans la perspective de construction de concepts à partir d'un référent empirique. « l'évocation d'un objet (du modèle) se fait au travers d'un lexique qui est assez diversifié, les termes utilisés pour désigner un même objet varient d'un champ à un autre ».

Diallo (2000) cherche à utiliser les pratiques communément observables dans le contexte guinéen pour pallier à l'absence de matériel et de matériaux dans les classes de chimie de collège. Il s'assure qu'une collaboration est possible entre école et praticiens (artisans, techniciens). Son travail conduit à « *L'analyse des pratiques sociales des professionnels et des discours qu'ils produisent sur leurs pratiques permet d'identifier ce qui dans un contexte scolaire peut être utilisable tel quel, ce qui est à travailler en classe pour une évolution de formulation ou de structuration..* ». Il teste des activités qui s'appuient sur des visites de ces praticiens par des élèves de collège.

Jouin (2000) définit des catégories d'objets en sciences physiques : objets techniques appartenant à plusieurs champs professionnels, objets de laboratoire et les objets de la vie courante. Pour cet auteur, « *si les différents regards sur les objets ont des logiques propres, ils*

ne sont pas contradictoires et il est possible d'envisager l'approche des sciences physiques comme une composante de l'étude technologique de ces objets techniques ».

II- Le registre du référent empirique

Le schéma de modélisation de Martinand (1995) (figure II-1) fait apparaître trois registres :

- Le registre de référent empirique, celui des objets, des phénomènes et de leur connaissance phénoménographique. Le référent empirique est constitué d'une phénoménographie (description première d'un phénomène impliquant déjà une construction conceptuelle antérieure) d'une phénoménotechnique (règles de montage, conditions de sécurité et savoir-faire instrumentaux) et d'une phénoménologie (description seconde de phénomènes en termes de concepts, modèles, théories partagées par une communauté de scientifiques), cette dernière description est mobilisée en classe quand interviennent les concepts et les modèles construits au cours de l'apprentissage.
- L'élaboration interprétative permet de passer au registre des modèles construits sur des référents selon des exigences qui n'ont pas de solution dans le référent empirique.
- La matrice cognitive comprend à la fois « les paradigmes épistémiques (conception de ce que peut être la connaissance, les formes, les «bonnes pratiques» théoriques ou empiriques) et les ressources théoriques (langages, schéma, théories) et informatiques ».

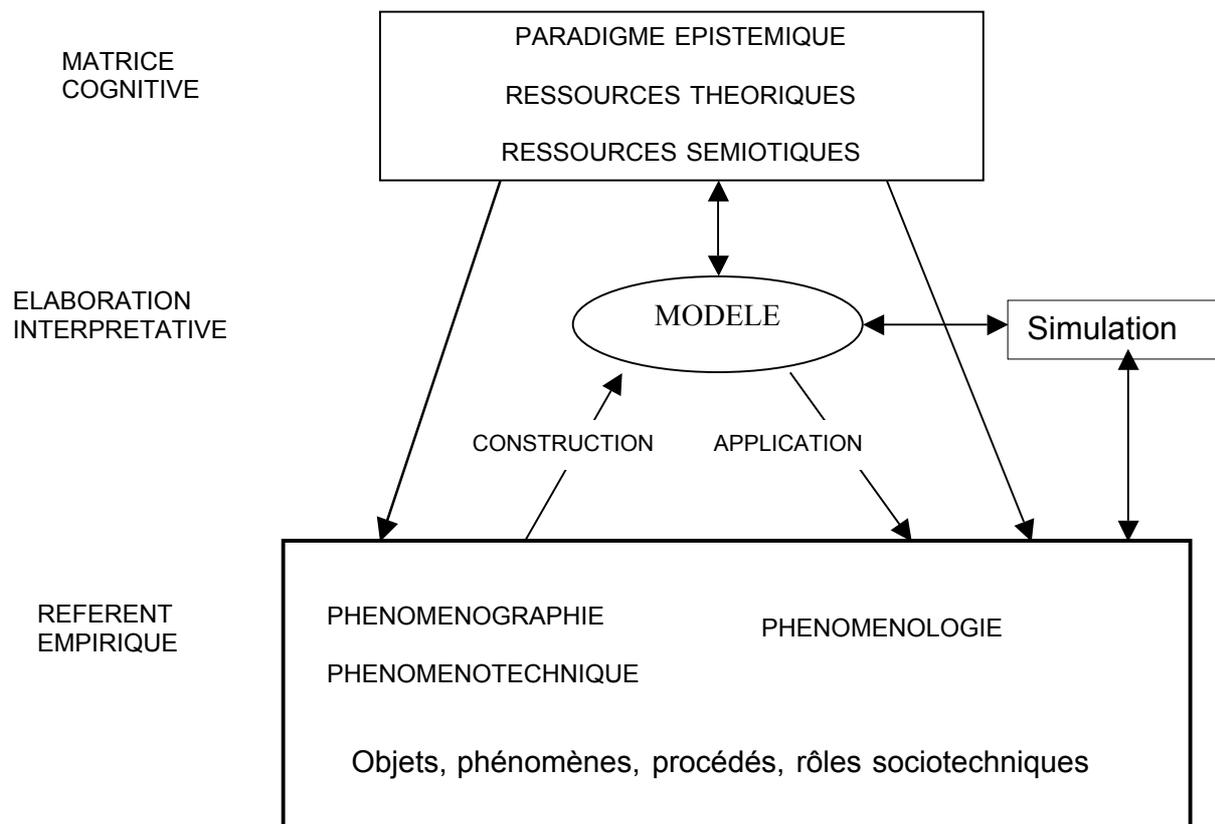


Fig II-1 schéma de la modélisation à trois registres de Martinand (1995)

Ce schéma donne de l'épaisseur au registre empirique. Il permet aussi de situer des questions qui ne mettent pas en avant l'expérimentation, ou des questions qui ne mobilisent pas des théories telles que :

- Quels objets, quels phénomènes regrouper ensemble en champ de familiarisation empirique pour les élèves ?
- Quelles notions ou représentations pour décrire les phénomènes ?
- Quelles règles pour réussir les manipulations, quelles notions ?
- Quelles manipulations ?
- Quelles lois empiriques ?

Le modèle y apparaît comme un intermédiaire entre registre empirique et théorie, mobilisé dans un processus « ascendant » vers la théorisation ou dans un processus descendant d'application.

Cette « élaboration modélisante » est reliée aux ressources théoriques et sémiotiques qui permettent de l'élaborer.

Ce schéma permet de situer la simulation dans les liens qu'elle entretient entre registre empirique et modèle.

La matrice cognitive est en lien avec le modèle et avec le référent empirique.

Le schéma évacue une description en termes de « monde réel » existant en soi.

Il minimise l'importance de l'« explication » comme enjeu majeur de la construction scientifique pour faire place à une fonction de représentation explicite et partagée du modèle.

Les objets et les phénomènes peuvent être « décrits » de différentes façons.

Le modèle n'est pas le dessin, schéma ou maquette ; le dessin, schéma ou maquette n'est que support visuel de l'élaboration modélisante ; ils ne fonctionnent comme outil de pensée que par ce qu'on leur fait dire et ce que l'on rajoute verbalement et qui ne peut pas être représenté.

« Faute de distinguer le registre des phénomènes, le registre des représentations symboliques et le registre des modèles avec suffisamment de rigueur, nous entraînons souvent les élèves dans de mauvaises représentations des phénomènes et nous les entretenons dans la confusion. » (Larcher, 1994).

Il indique aussi les relations dynamiques que ce registre empirique peut entretenir avec d'autres registres de connaissances.

La modélisation au sens du changement de « registre » sur le schéma de Martinand, est dans ce cadre un processus qui participe de deux mouvements inter registres et conduit à deux types d'activités scolaires : *« celles qui, explicitement, se placent dans un processus d'élaboration de modèles et celles qui, partant d'un modèle, visent la recherche de situations expérimentales pour le mettre à l'épreuve. »* (Beaufils, 1998).

Il fait apparaître l'évolution de la connaissance qu'on en a en tant qu'individu apprenant au fur et à mesure de l'élargissement du champ d'investigation, de l'avancement de la conceptualisation, de l'accroissement des ressources cognitives : la phénoménographie initiale s'enrichit d'une nouvelle phénoménologie qui s'articule à la phénoménotechnique et un retour vers le registre empirique permet un nouveau départ vers une autre modélisation.

III- Un projet d'élaboration d'un référent empirique

III-1- Les hypothèses et les principes

Les études précédentes montrent que dans un enseignement très formel de la thermodynamique, les étudiants sont confrontés à deux types de difficulté : les difficultés mathématiques et les difficultés à donner un sens physique aux grandeurs utilisées.

Les difficultés mathématiques prennent souvent le dessus et masquent celles qui relèvent de l'absence de sens physique, mais nous ne traitons pas ici des difficultés d'ordre mathématique.

Enseigner les sciences physiques « *ce n'est pas seulement transmettre un langage, c'est faire savoir de quoi il parle ; c'est le relier au référent qui lui donne sens* » (Larcher, 1998).

Notre recherche sur la construction d'un référent empirique pour l'apprentissage de la thermodynamique chimique au premier cycle universitaire se centre sur des phénomènes physiques et chimiques observés dans une usine de séchage de la bauxite en République de Guinée, en relation au programme suivi à l'université. Bien évidemment le contexte de l'usine n'est pas à même de « recouvrir » l'ensemble des notions du programme d'enseignement.

Cependant, à partir des constats sur les difficultés des étudiants et en tenant compte de notre cadre théorique, nous émettons les hypothèses suivantes :

- La construction du sens physique d'un concept ou d'un modèle en thermodynamique, se fait à travers la mise en œuvre de différents registres et de leurs relations (voir schéma de Martinand, 1995) .

Nous considérons que la construction d'un référent empirique, même limité, peut aider les étudiants à comprendre la thermodynamique comme un ensemble d'outils conceptuels (concepts, lois) permettant de traiter des situations réelles et que cette construction d'un référent empirique peut se faire sur la base d'un ensemble d'activités portant sur les mises en relation entre registres (voir schéma de Martinand 1995).

- Pour aider les étudiants à surmonter ces difficultés, un moyen est de leur proposer des activités de modélisation.

III-2- La démarche envisagée

La démarche que nous envisageons pour la mise en activité des étudiants met en jeu une visite d'usine (usine de séchage de la bauxite à Kamsar en Guinée) un travail de groupe pour tisser des liens entre les connaissances théoriques et processus de séchage de la bauxite à l'usine, un ensemble de problèmes contextualisés qui se réfèrent à l'usine.

Dans notre projet de séquence d'enseignement utilisant une visite d'usine, les articulations figurées en fig II-2 -issues du schéma de Martinand - constituent un enjeu important pour notre recherche :

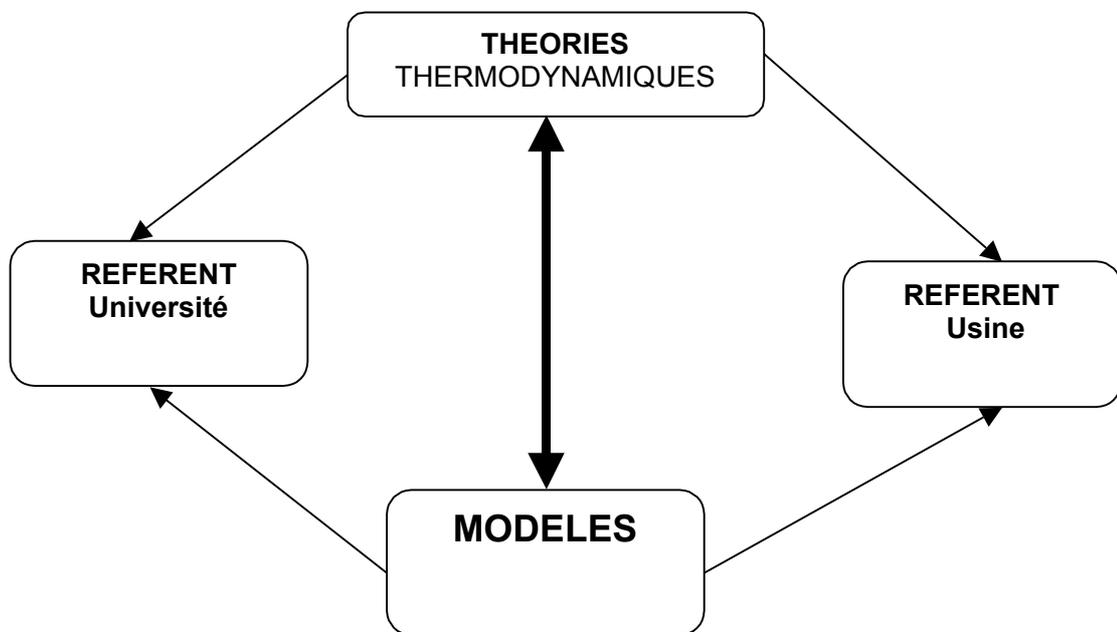


Fig II-2 : Articulations en jeu

Il s'agit en effet d'utiliser une visite d'usine pour disposer d'un référent empirique pour l'apprentissage des théories thermodynamiques, via la construction de modèles pour décrire les objets et les phénomènes ; mais aussi de faire construire des liens avec d'autres référents— et en particulier ceux qui sont plus ou moins implicites dans l'enseignement de la thermodynamique habituellement à l'université ou que constituent les situations habituelles de TP.

On est donc bien dans un ensemble complexe de relations entre référents empiriques, modèles et théories, chaque élément jouant plusieurs rôles distincts en fonction des moments d'investigation.

Ces référents potentiels (ceux issus de l'usine et ceux habituellement utilisés à l'université) ne relèvent pas des mêmes modélisations quand bien même ils relèvent des mêmes théories. La description du phénomène de combustion à l'université est différente de sa description à l'usine. Les programmes d'enseignement à l'université ne traitent que des transformations finies, alors que les usines fonctionnent en continu et que leur modélisation fait intervenir des flux de quantité de matière.

Une analyse plus précise des dispositifs et phénomènes observables, sinon manipulables, à l'université et à l'usine et qui servent, ou pourraient servir de référent, s'impose donc.

Les questions suivantes devront être abordées :

- Comment utiliser un contexte technique sans rentrer dans les problèmes techniques pour y chercher un référent empirique pour les principes et les concepts de la thermodynamique ?
- Dans quelle mesure la confrontation du référent empirique de l'université avec celui de l'industrie peut apporter des transformations de savoirs chez l'étudiant ?
- Quels sont les obstacles à l'apprentissage que les étudiants franchissent lorsqu'ils sont confrontés à la réalité dans l'usine ?
- Quelles sont les modélisations faites sur les référents empiriques de l'université (matériel, manipulation, opérations physico-chimiques) et sur le référent empirique de l'usine ?
- Comment lier calculs théoriques et mesures expérimentales ?
- Comment lier phénomènes idéalisés et phénomènes réels ?

Chapitre III : Thermodynamique en DEUG et référents

Il s'agit dans ce chapitre de tester la validité du projet d'utilisation d'une visite de l'usine de Bauxite pour aider les étudiants de DEUG à s'approprier les concepts et les modèles de la thermodynamique. La conception de ce projet s'appuie sur le schéma de Martinand (1995) qui valorise le registre empirique.

Dans un premier temps, nous présentons les programmes guinéens de DEUG et les concepts fondamentaux qui pourraient être en jeu dans ce projet.

Dans un deuxième temps, nous présenterons différentes descriptions des phénomènes thermiques qui ont lieu dans l'usine de Kamsar pour dessécher la bauxite.

La dernière partie présente une comparaison des descripteurs utilisés dans l'enseignement habituel d'une part et dans l'usine d'autre part.

I - La thermodynamique enseignée

I-1 Les programmes guinéens de thermodynamique chimique

En République de Guinée, au premier cycle universitaire, la thermodynamique chimique est enseignée dans le programme de chimie physique ou chimie générale au niveau du premier cycle universitaire (DEUG), à la faculté des sciences pour la formation des enseignants et des chercheurs dans les différentes options de chimie (chimie organique, physique-chimie, etc.), à l'institut polytechnique, les étudiants devront passer au centre préparatoire commun (CPC) pour une formation générale, scientifique et technique pour un accès aisé aux formations d'ingénieur.

On enseigne aussi la thermodynamique chimique dans d'autres options comme la médecine, la pharmacie dans les options de technologie et d'agronomie.

Les programmes (CPC², 1998) sont sensiblement les mêmes sur la majorité des chapitres enseignés dans toutes les options, ce qui fait de la thermodynamique chimique, une discipline générale d'enseignement. Son enseignement n'est donc pas professionnel à ce niveau, il ne vise pas un emploi donné, ni un poste de travail ou une structure professionnelle définie à l'avance.

² CPC : Centre de Préparation Commune à l'Université de Conakry

Comme toute discipline d'enseignement général, le programme d'enseignement se présente sous-forme d'une liste d'outils théoriques (voir programme, en annexe 2 A).

Sont principalement étudiés : les bilans thermiques des transformations, y compris les effets thermiques des transformations physiques et chimiques, les équilibres de phase pour les corps et mélanges isolés, l'équilibre chimique.

Les bilans thermiques se font sur la base du premier principe de la thermodynamique, les équilibres de phase et les équilibres chimiques sur la base du deuxième principe de la thermodynamique.

Contrairement aux programmes du secondaire qui présentent des indications sur des objectifs précis par chapitre à étudier, au premier cycle universitaire (enseignement supérieur) il n'existe pas d'indications détaillées sur les objectifs d'enseignement. Selon les filières, les enseignants s'organisent en fonction du temps prévu.

De façon à préciser ce dont l'enseignant dispose pour préparer son enseignement, nous avons utilisé quelques ouvrages français et russes (voir liste des ouvrages dans la bibliographie) . Notons, comme cela est déjà apparu dans les enquêtes auprès des enseignants, que ces programmes ont été élaborés par des enseignants guinéens dont la plupart ont assuré leur formation en Russie. Il ne s'agit pas pour nous d'une comparaison entre programmes de différents pays.

Nous avons également recueillis des fascicules faits par des enseignants guinéens et le contenu de quelques préparations de cours (annexe 2B).

Les programmes de premier cycle universitaire n'insistent pas sur les règles de montage ou sur les schémas et, même dans les ouvrages, les représentations schématiques sont peu nombreuses ; on s'intéresse plutôt aux résultats.

Des renvois systématiques à des exemples, des objets ou à des phénomènes pris dans l'environnement sont des évocations qui ne sont pas présentes réellement en classe et peuvent être inconnues des étudiants.

Les exercices proposés aux étudiants sont des vérifications d'expressions formelles.

Ce qui est fait au laboratoire n'est, dans certains cas, pas relié aux concepts étudiés en classe.

I- 2 Concepts abordables en référence à l'usine de Kamsar

La visite de l'usine de séchage de la bauxite, ne permet bien sûr que d'aborder un nombre limité des concepts présents dans le programme des étudiants.

Les concepts qui pourraient être en jeu dans cette démarche de confrontation entre ce qui est appris en classe et ce qui peut être repéré dans l'usine peuvent être listés. L'analyse du fonctionnement de l'usine développée dans la suite du chapitre permettra de préciser cette première approche.

A priori, les concepts qui peuvent être travaillés dans cette démarche sont :

➤ **système, état**

En thermodynamique, l'objet d'étude est appelé « système » par opposition à son environnement appelé « milieu extérieur » avec lequel le système peut échanger de la matière ou de l'énergie pendant sa transformation.

La délimitation entre le système et le milieu extérieur est arbitraire, et le choix qui est fait peut modifier totalement les données d'un problème (et rendre plus ou moins facile son étude).

Un système peut être :

- ouvert (échange de l'énergie et de la matière avec l'extérieur),
- fermé (échange avec l'extérieur de l'énergie mais pas de la matière),
- isolé (pas d'échange de matière ni d'énergie).

On distingue ensuite différents états du système, en particulier état initial et état final, que l'on décrit par des variables d'état (T , P , n_i ou m_i) et qui est supposé homogène dans tout le système.

➤ **états d'équilibre d'un système**

Différents types d'équilibre entre le système et son environnement sont considérés :

- équilibre thermique : un système est en équilibre thermique lorsque sa température T ne varie pas au cours du temps ;
- équilibre mécanique : un système est en équilibre mécanique lorsque sa pression ne varie plus au cours du temps ;
- équilibre chimique : un système est en équilibre chimique lorsque sa composition ne varie plus au cours du temps dans toute l'étendue du système.

Seuls les états d'équilibre, les changements d'un état d'équilibre à un autre et les évolutions d'un état à un autre sont étudiés.

➤ **température**

La température est une notion intuitive qui prend naissance dans la sensation de chaud et de froid. Les températures de différents corps en interaction ont tendance à s'homogénéiser par transfert de chaleur des corps chauds aux corps froids.

La température est repérée à l'aide d'un thermomètre mis en équilibre thermique avec le corps dont on veut connaître la température.

La température est une grandeur macroscopique ; elle traduit l'état d'agitation des particules à l'échelle microscopique.

Chaleur et température sont deux concepts distincts, il peut y avoir apport de chaleur sans élévation de température, l'énergie servant à briser des liaisons entre molécules ou atomes plutôt qu'à augmenter leur agitation.

➤ **chaleur**

La chaleur est un mode de transfert d'énergie entre un système et son environnement. C'est une grandeur algébrique ; elle est positive si elle est effectivement reçue par le système, négative si elle est cédée par le système au milieu extérieur.

Différents modes de transfert de chaleur sont distingués (conduction, convection, radiation..).

Une quantité de chaleur peut se trouver quantitativement égale à une variation d'énergie interne du système (à V constant) ou à une variation d'enthalpie interne du système (à pression constante).

➤ **aspect énergétique d'une réaction chimique**

Les réactions chimiques absorbent ou dégagent de l'énergie. Le traitement thermodynamique des changements d'état d'un système chimique se fait en imaginant une succession d'états d'équilibre ne faisant pas varier toutes les grandeurs descriptives en même temps (composition du système, température, pression totale).

Les évolutions spontanées des systèmes chimiques sont analysables et prévisibles en utilisant les grandeurs thermodynamiques comme l'entropie, l'énergie libre, l'enthalpie libre, le potentiel chimique, l'affinité.

➤ **notion de bilan**

Les sciences physiques ont énoncé des principes de conservation : conservation de la matière, conservation de l'énergie, qui ont un domaine d'application très large. Les bilans peuvent être établis sur cette base. Ils permettent de calculer des variations de grandeurs physiques.

➤ **phase et équilibre des phases**

Par définition, toute partie homogène d'un système constitue une phase. On entend par partie homogène toutes les parties du système qui possèdent les mêmes propriétés physico-chimiques macroscopiques (densité par exemple).

Un corps pur se trouve à une température donnée et une pression donnée généralement sous deux phases en équilibre.

➤ **le concept de pression de vapeur**

La pression de vapeur est la pression sous laquelle le corps placé seul à une température donnée constante, est en équilibre avec sa vapeur. Autrement dit, c'est la pression sous laquelle le liquide bout (ou encore le solide se sublime), à la température considérée. Si le liquide est initialement placé sous vide, la pression de vapeur est la pression du liquide.

La pression totale d'un système est la somme des pressions partielles des gaz qui le constituent.

I – 3 - le phénomène de combustion dans l'enseignement guinéen

En thermodynamique chimique à l'université, le phénomène de combustion est abordé de façon théorique en cours : traitement du passage d'un état initial (i) à un état final (f) d'un système constitué de combustible et de comburant (en général le dioxygène ou l'air).

Combustion complète (conditions stœchiométriques) et combustion incomplète du fait du manque de comburant sont repérés, ainsi que le caractère généralement exoergique des combustions.

Deux cas de figure sont distingués, la combustion à pression constante (en général P°) ou la combustion à volume constant (dans une enceinte fermée).

Les exercices prévoient de calculer la chaleur de réaction à partir de données tabulées (capacités calorifiques et d'autres enthalpie connues), ou à partir de données de calorimétrie, de déterminer une température de flamme ou la quantité de matière pour obtenir une température donnée.

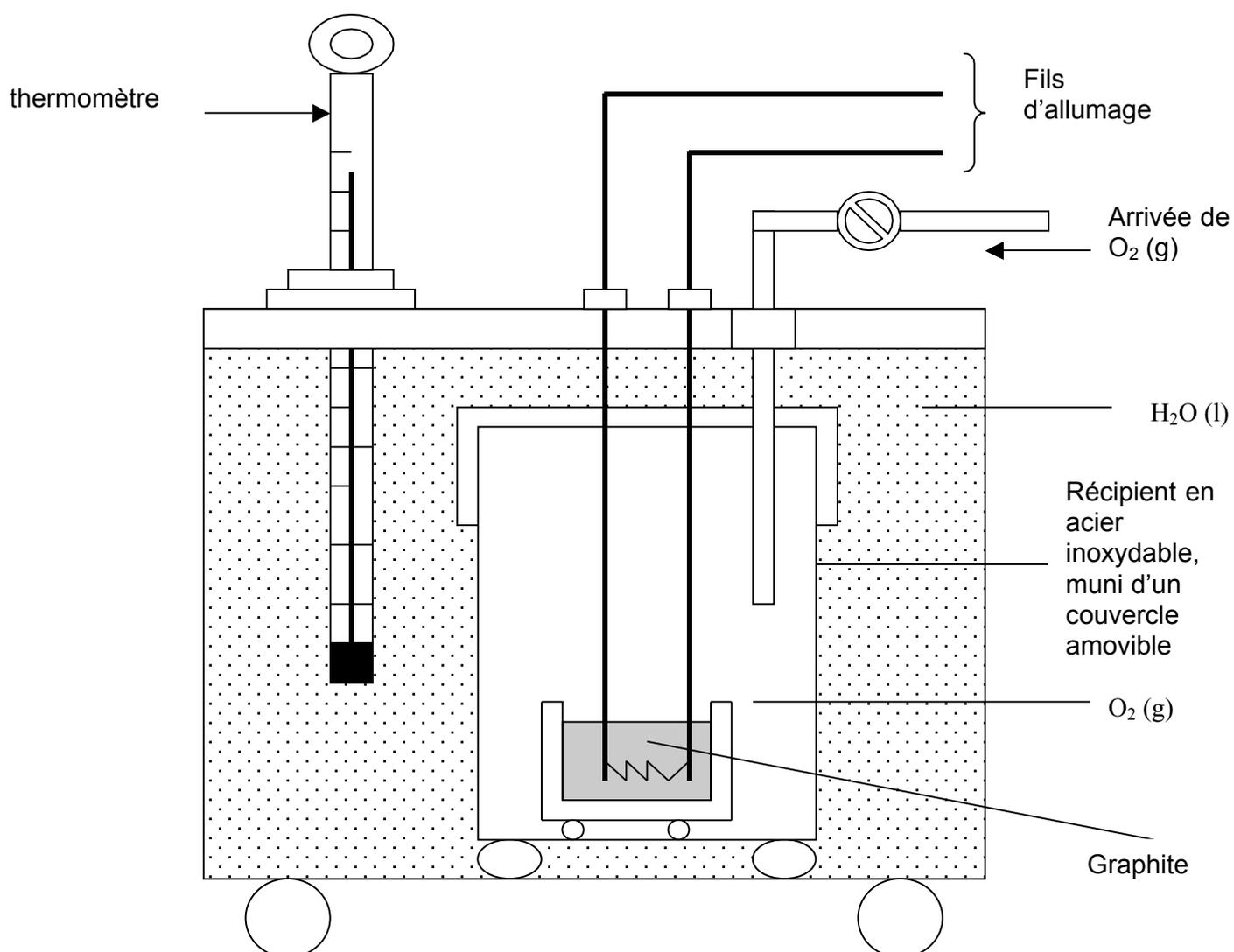
Les difficultés que rencontrent les étudiants viennent d'une mauvaise définition du système et/ou des états initial et final.

Cette partie du cours est souvent illustrée en TP par la manipulation d'une bombe calorimétrique dans laquelle on fait brûler un échantillon de graphite. Cette manipulation permet de construire un référent empirique pour ce type d'exercices.

➤ Dispositif calorimétrique manipulé en TP

Le dispositif (fig III-1) fréquemment utilisé est une « bombe calorimétrique », réacteur clos et indéformable (volume constant en acier à l'intérieur duquel se déroule la réaction). Ce réacteur est immergé dans un récipient adiabatique rempli d'eau. Le dioxygène arrive dans le réacteur par une vanne. La réaction peut être déclenchée par les « fils d'allumage ». Le combustible est en général du graphite. L'élévation de température peut être suivie grâce à un thermomètre. C'est le seul indice perceptif du phénomène.

Figure III-1: schéma d'un calorimètre



➤ **Modélisation des réactions de combustion à l'université**

L'élévation de température observée est interprétée en utilisant la conservation de l'énergie, le transfert de chaleur du réacteur à l'enceinte adiabatique du calorimètre, l'équilibre thermique, la relation entre apport de chaleur et élévation de température en fonction des substances présentes (capacités calorifiques).

Elle permet de déterminer la chaleur de combustion du combustible dont on introduit une quantité donnée avec un excès connu de comburant.

Le calorimètre est considéré comme parfaitement adiabatique et intervient dans la description thermique par une "masse équivalente" que l'on peut déterminer expérimentalement connaissant la quantité et la nature du carburant.

La variation d'énergie interne du système est égale à la chaleur produite par la réaction des quantités de matière introduites ; cette chaleur dégagée sert à chauffer les produits de la réaction, le cas échéant les réactifs restants et le calorimètre de T_i à T_f .

Les capacités calorifiques molaires à volume constant des différentes substances sont parfois considérées comme dépendantes de la température. Ce qui donne lieu à des calculs d'intégrale sur l'intervalle de température considérée (voir données C3 de l'annexe 3).

Les calculs ayant trait aux réactions chimiques sont effectués en terme de moles.

Les gaz sont considérés comme parfaits.

II- Description des phénomènes thermiques à l'usine de Kamsar

L'usine de Kamsar est l'une des rares industries locales proches d'un centre universitaire qui puisse s'ouvrir à la visite des étudiants et proposer l'observation d'un processus contrôlé par des moyens techniques de mesures.

La Guinée exporte le minerai de bauxite entassé et desséché.

La bauxite est un oxyde hydraté, mélange d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et d'oxyde de fer Fe_2O_3 . Le minerai de Guinée est très prisé car il contient 58% à 62% d'alumine ($Al_2O_3, 5H_2O$), oxyde à partir duquel est fabriqué l'aluminium métal utilisé à grand échelle actuellement, notamment dans l'industrie de l'automobile et des boîtes de boissons. Il est aussi une matière première utilisée dans la production des abrasifs.

L'usine de Kamsar assure le traitement pré-métallurgique de la bauxite en vue de faciliter sa manutention et son transport lors de l'exportation.

Ce traitement s'effectue du concassage jusqu'à l'expédition en passant par le séchage ou la calcination.

Le séchage est un processus préliminaire de traitement de la bauxite. Il consiste en la diminution du pourcentage d'humidité contenu dans la bauxite venant de l'atelier de concassage ou des parcs de stockage.

Une visite de l'usine a permis description détaillée enregistrée (annexe 3A) des différents éléments de l'usine et de son fonctionnement par un expert technicien de l'usine chargé de coordonner les opérations de séchage de la bauxite à l'usine. L'entretien s'est déroulé dans le bureau de l'expert technicien avec un magnétophone placé sur la table. A partir du bureau de l'expert technicien nous avons une vue d'ensemble de l'usine, ce qui permet à l'expert technicien de donner des explications en désignant les différentes partie de l'usine.

Certaines parties de l'usine et des appareils de mesure de température et de pression ont été photographiés (annexe 3B) et un enregistrement vidéo a été également effectué pour usage ultérieur en classe.

Nous avons aussi obtenu, à l'usine, des fascicules contenant un ensemble de données et des schémas sur la chaudière (annexe 3C).

II - 1 - Le discours de l'expert

L'expert technicien qui a accepté de faire cette visite guidée de l'usine a ensuite été enregistré dans son bureau d'où il dispose d'une vue panoramique sur l'ensemble de l'usine.

Le discours et les schémas qu'il a produit sont présentés en annexe 3A.

Dans cet entretien, le technicien fournit d'abord un schéma où chaque étape du processus de séchage est figurée par un petit rectangle. Ces rectangles sont reliés par des flèches qui indiquent soit le déroulement du temps, soit le passage dans les lieux distincts à l'intérieur de l'usine. Ne sont mentionnés que les éléments minimum du processus de séchage de la bauxite : Production de chaleur, déplacement des gaz chauds (vers le four), alimentation du four en bauxite, échange thermique dans le four (phénomène central recherché conduisant à la bauxite séchée), transport des produits secondaires, transport de la bauxite séchée.

Invité à parler de la production de chaleur, l'expert indique le résultat attendu ($T = 600^{\circ}\text{C}$ dans le four de séchage) avant d'indiquer le moyen (combustion du mazout).

Puis son discours est organisé à la fois temporellement (« puis », « avant ») et spatialement en désignant des lieux spécifiques (station de pompage, sécheur, surchauffeur, brûleurs).

Des valeurs numériques de température sont indiquées pour chaque étape (100°C dans la station de pompage, 120°C dans le surchauffeur, 880°C dans la chambre de combustion), elles constituent pour lui des repères pour contrôler le bon fonctionnement de l'usine et optimiser son fonctionnement économique (rendement).

Il connaît par cœur la valeur de la chaleur de combustion produite par heure et l'indique de façon très précise.

Il produit (annexe 3- B) un schéma des brûleurs, un schéma de la chambre de combustion, des ventilateurs d'atomisation en indiquant le rôle central du type de brûleurs et de la cheminée.

Il signale la présence d'oxydes de soufre dans les gaz de combustion.

Invité à préciser l'échange thermique dans le four, il indique ses dimensions, puis la température d'entrée et celle de sortie du four ainsi que les vitesses de rotation (2,5 à 3,5 tours par minute). Il produit un schéma du four sécheur qui fait apparaître ce qu'il nomme des « rideaux de bauxite ».

Il indique qu'il utilise des bilans de masse et thermique qui lui permettent d' « éliminer les gaz d'infiltration ».

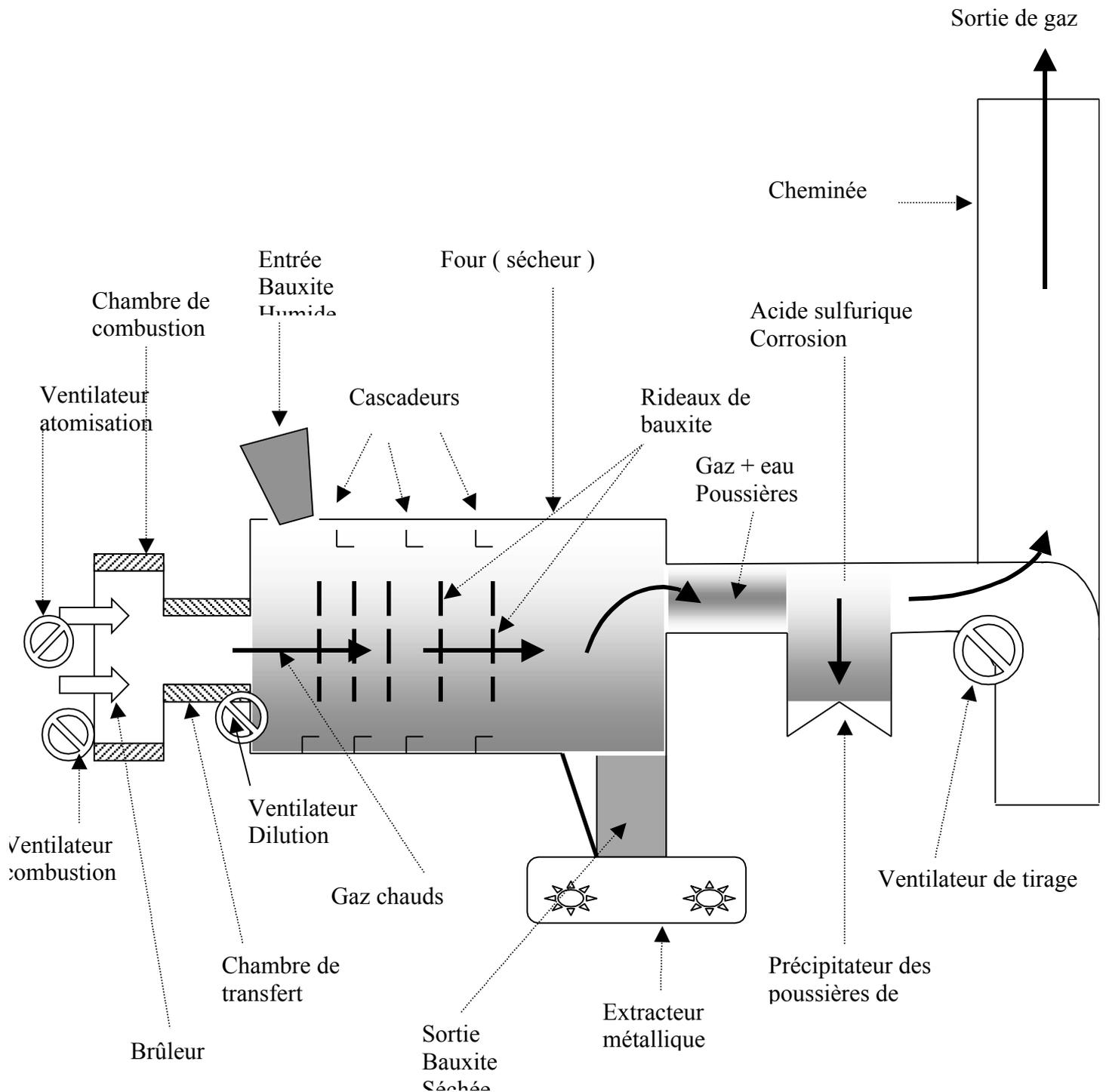
Il classe les paramètres de séchage en quatre catégories : les paramètres invariables (concernant la bauxite et les aspects mécaniques du dispositif ; mais notons qu'il indiquera ultérieurement que la bauxite n'est pas toujours la même selon les saisons), les paramètres variables (paramètres dont il maîtrise la variation), les paramètres résultants (effets de ses réglages) et les paramètres de réglage (information qu'il prélève).

En ce qui concerne les modèles thermodynamiques, il affirme que le premier principe peut s'appliquer aux états initial et final, mais il évoque les problèmes techniques que ces modèles ne traitent pas. Il indique que ces théories ne permettent pas de tout prévoir (même réglages et résultats différents). Les indicateurs, autres que les mesures prévues dans le dispositif, pris en compte par le technicien et qui relèvent de son savoir d'expérience sont la couleur de la bauxite, et la couleur de la fumée. Il connaît aussi le temps « normal » de séchage.

Il a des repères dans les unités spécifiques qui sont ceux de l'affichage des appareils de mesure (BTU, TM/H)

En ce qui concerne la chambre de transfert des gaz de la chaudière vers le four, il la considère comme un élément important de régularisation de la température et de la pression.

Nous proposons un panorama global du dispositif permettant le parcours de la bauxite avec les commentaires de l'expert sur les objets



Le schéma III – 2. Schéma général de l'usine : modélisation des objets

II – 2 - Les données des documents techniques

Le bilan de masse (tableau 11, annexe 3 B) évalue en tant que masse entrante et en tant que masse sortante du four, les masses et les pourcentages ayant trait à la bauxite et sa déshydratation ; d'une part de bauxite sèche, de gaz secs, d'air sec, d'air d'infiltration sec, de poussières sèches, d'autre part l'eau en détaillant tous les éléments qui en comportent (eau de la bauxite, eau formée par la combustion, eau contenue dans l'air d'infiltration). L'unité est la tonne métrique par heure, rappelant qu'il s'agit de système ouvert, en flux de matière. Le **volume de contrôle** correspond au volume occupé par la masse introduite pendant un temps donné.

Il s'agit en particulier de prendre en compte toutes les entrées sorties parasites par rapport au problème central : le séchage de la bauxite, en dépensant le moins de mazout possible.

Ainsi sont repérées toutes les entrées parasites d'eau (dans le mazout, dans l'air) et de poussières, les « masses d'infiltration » d'air, ainsi que la formation d'eau lors de la combustion, qui apporte une eau supplémentaire indésirable. Sont aussi séparées les entrées d'air « volontaires » pour l'atomisation du mazout, sa combustion, la dilution des gaz dans la chambre de transfert.

Tableau : masses entrantes

N°	QUANTITE	TM/H	%
m1	Masse de bauxite sèche	565,5	67,59
m2	Masse d'eau de surface de surface de la bauxite	84,5	10,1
m3	Masse d'eau formée par combustion	3,376227	0,4
m4	Masse d'eau contenue dans le fuel	0,115885	0,01
m5	Masse d'eau dans la quantité totale d'air entrant dans le système (air d'infiltration non compris)	2,14657	0,26
m6	Masse de gaz secs entrant dans le système (air d'infiltration non compris)	159,16562	19,02
m7	Masse d'air d'infiltration entrant dans le système (base sèche)	21,540104	2,57
m8	Masse d'eau contenue dans l'air d'infiltration	0,290792	0,03
TOTAL		836,63828	99,98

Tableau : masses sortantes

N°	Quantité	TM/H	%
m1a	Masse de bauxite sèche sortant directement du sécheur	513,25	61,35
m1b	Masse totale de poussières sèches sortant du système	52,25	6,25
m 2	Masse d'eau résiduelle dans la bauxite sortant du sécheur	38,632	4,62
m2b	Masse d'eau résiduelle des poussières	2,75	0,33
m 2c	Masse d'eau évaporée de la bauxite	43,118	5,15
m 3	Masse d'eau formée par combustion	3,376227	0,4
m 4	Masse d'eau du fuel	0,115885	0,01
m 5	Masse d'eau dans l'air total du système (air d'infiltration non compris)	2,149657	0,26
m 6	Masse de gaz secs sortant du système (air d'infiltration non compris)	159,16562	19,02
m 7	Masse d'air d'infiltration sortante (base sèche)	21,540104	2,57
m8	Masse d'eau dans l'air d'infiltration	0,290792	0,03
	TOTAL	836,63828	99,99

Dans le tableau ci dessus, les masses d'eau en gris sont séparée des autres masses

Le bilan thermique (tableau 12, annexe 3 B) détaille la quantité de chaleur fournie au four. Cette chaleur est apportée par la combustion du fuel à 98%, mais une partie est apportée par le préchauffage. La bauxite elle-même ainsi que l'air et l'eau qui entrent apportent aussi de la chaleur. Le bilan de masse ayant été dressé en distinguant toutes les sources d'entrée d'eau, le bilan thermique sépare de façon modélisante la chaleur apportée par l'eau d'humidité de l'air, et celle apportée par l'air sec. Ce bilan met en regard les quantités de chaleur utilisées pour sécher la bauxite (73%) et celle « perdue », « emportée » par les gaz, les poussières, l'eau, et aussi par la bauxite sèche, ainsi que celle perdue par radiation ou par convection.

Les unités sont en Kcal par heure.

Dans les données techniques (annexe 3 C-2), on retrouve des indications sur le combustible (sa composition, son pouvoir calorifique, son poids spécifique) ainsi que sur les gaz (CO₂, CO, SO₂), avec des unités inhabituelles à l'université (TM/H, Kcal/H, BTU / °F) et des indications de température et de pression. Il apparaît aussi des pressions négatives en « pouces d'eau », qui de fait renvoient à un appareil gradué autour d'une valeur repère « normale ».

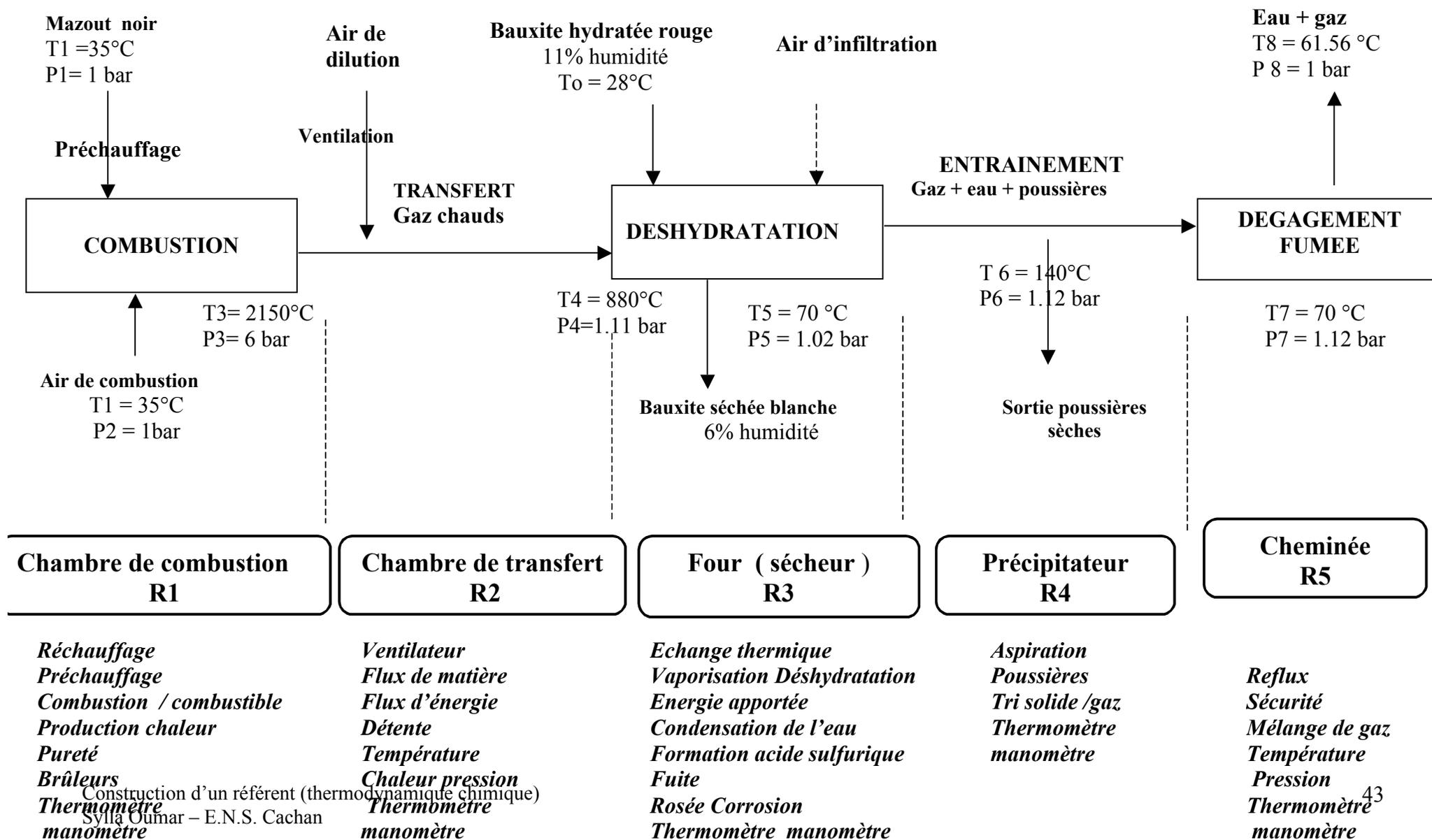
Nous pouvons proposer un schéma thermodynamique d'ensemble de l'usine de Kamsar regroupant l'ensemble des objets et des valeurs mesurées identifiées ; il servira de repère par la suite.

Dans le schéma III-3, chaque élément de dispositif est numéroté (R1 à R5). Pour chaque élément, sont repérés les éléments de connaissances des étudiants relevant du programme, en italique gras ce qui est spécifique de l'usine et non rencontré habituellement, en gras les appareils de mesure repérables par les étudiants. Sont aussi repérés les dispositifs techniques permettant d'optimiser le procédé, en particulier les différentes entrées d'air volontaires. L'air d'infiltration y est indiqué mais n'est pas en fait une entrée en un lieu particulier.

Sont également notées les valeurs de T et de P à différents lieux, valeurs qui servent de repère à l'expert pour la régulation.

A ces descripteurs d'ordre thermodynamique, il faudrait ajouter des descripteurs plus perceptifs pris en compte par l'expert technicien : couleur de la fumée, de la bauxite (voir plus haut), mais aussi ce qui de l'ordre du perceptif et non cité par l'expert qui y est habitué : chaleur rayonnée, odeurs, rouille que les étudiants peuvent remarquer. C'est sur cette base que seront analysées les productions des étudiants.

Schéma III-3 Schéma thermodynamique d'ensemble



II –3 Les différentes descriptions du référent empirique

➤ Observables externes de l'usine de séchage de bauxite

L'usine de Kamsar se caractérise par différents circuits de manutention et comprend des ateliers principaux repérables géographiquement ; la description suivante est en termes d'objets visibles de l'extérieur (voir photos en annexe 3).

- Atelier de concassage : A l'usine de Kamsar, le minerai de bauxite arrive par wagons des mines de Sangarédi et de Bidikoun. Les wagons chargés de bauxite sont reçus et déchargés dans l'atelier de concassage où la grosseur des blocs est réduite à 100 mm ; La bauxite est réceptionnée (voir photo 1) par un système de convoyeur et de goulottes pivotantes pour alimenter les trémies.

En dessous de chaque trémie, un extracteur métallique de vitesse variable extrait une quantité de bauxite (voir photo 5) pour l'entraîner dans les fours (sécheurs).

- Le séchage : l'installation de séchage comporte trois fours-sécheurs rotatifs de grande taille (voir photo 2). Le minerai de bauxite hydratée entre en haut des fours ; il croise le flux de gaz chauds venant de la chambre de combustion via la chambre de transfert. La bauxite séchée sortant du four est évacuée dans les wagons directement conduits au port ou elle est stockée dans des silos isolés (voir photo 10). La poussière est séparée des fumées grâce à un extracteur métallique (voir photo 3). Les gaz restant sont évacués par une cheminée (voir photo 4).

➤ Phénoménologie- phénoménotechnique

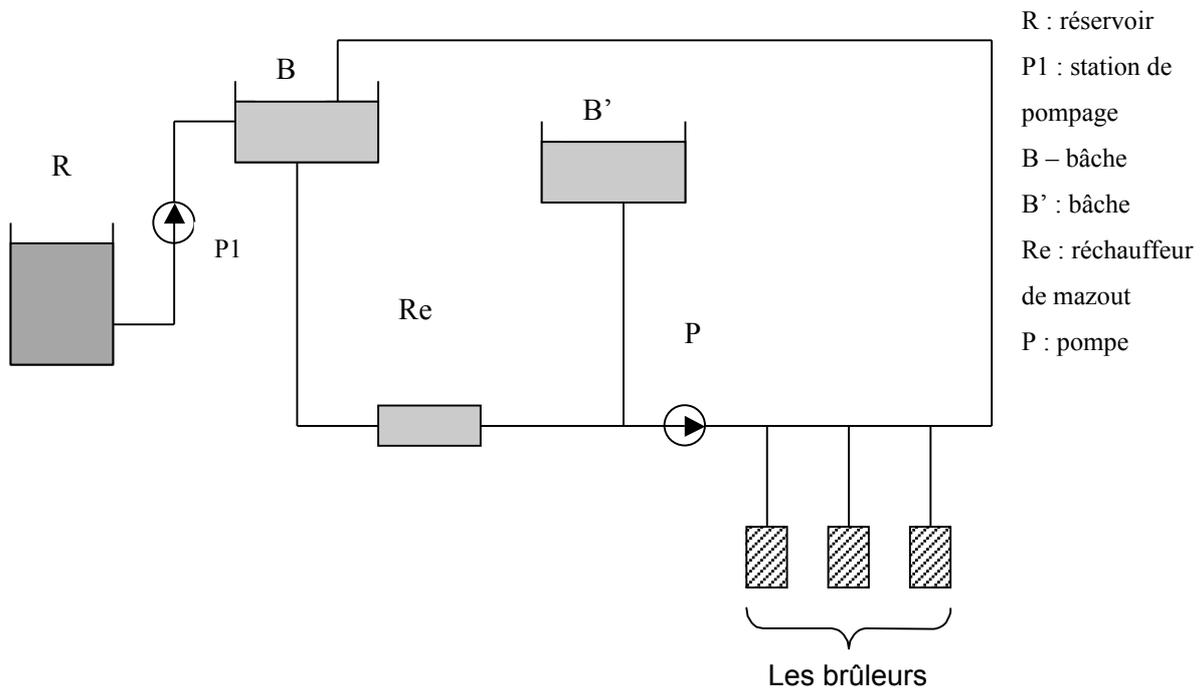
Cette première description peut être prolongée par une description de ce qui se passe en amont et en aval dans les fours-sécheurs mais qu'on ne peut pas observer. Elle peut aussi être enrichie d'aspects techniques.

En amont

phénoménographie	phénoménotechnique
Le combustible est stocké (voir photo 6) dans le réservoir R d'où il est envoyé vers une station de pompage (voir photo 7) où la	

pompe P1 l'envoie dans la bache B (Fig. III-4).	
	Le réservoir et la bache sont suffisamment chauffés pour permettre l'écoulement du combustible.
De la bache de réserve, le combustible descend par gravité dans le réchauffeur Re.	
	Dans les lignes du réchauffeur (voir photo 6), la température est réglée très soigneusement à la valeur qui correspond à la viscosité assurant le fonctionnement correct des brûleurs.
Le combustible rencontre la pompe P qui l'achemine vers les différents brûleurs	A Kamsar, les brûleurs (schéma 3 annexe B) sont de type « à fluides non mélangés », le mazout et l'air ne se mélangent que dans la chambre de combustion. Le choix des brûleurs est important pour optimiser la chaleur de combustion.
	L'installation permet d'éviter à tout prix le refroidissement du combustible dans les tuyauteries, sinon celles-ci se colmatent et il est ensuite difficile de les déboucher.
La quantité de mazout qui brûle est déterminée à la pompe P par son volume qui traverse le système dans un intervalle de temps donné.	A l'entrée de la chambre de combustion, un volume V de fuel est défini, qui permet le contrôle des autres paramètres c'est le volume de contrôle .
La température pratique de combustion , dite aussi température d'équilibre, est celle que l'on obtiendrait dans la flamme si celle-ci était à une température uniforme.	L'expert calcule la température pratique en tenant compte des imbrûlés solides et de l'excès d'air.
	Les gaz chauds peuvent être « dilués » par de l'air extérieur dans la chambre de transfert en cas de surchauffe.

Cette description peut donner lieu au schéma III-4 des objets et du parcours du combustible et comburant en amont du four sécheur où a lieu le phénomène principal.



Dans chaque

four sécheur :

phénoménographie	phénoménotechnique
<p>La bauxite introduite dans le sécheur tombe sur la partie intérieure basse inclinée du sécheur. Elle progresse vers la sortie par gravité du fait de l'inclinaison. La rotation du sécheur « retourne » les morceaux de bauxite de façon à ce que la couche soit en contact avec les gaz chauds (et donc là où s'évapore l'eau). Au fur et à mesure la bauxite est renouvelée pour permettre un maximum d'évaporation. La bauxite est donc alternativement et de façon aléatoire soit en surface, donc en contact avec les gaz chauds, soit « au fond » donc en contact avec la paroi du four sécheur.</p>	<p>A la surface du cylindre rotatif, la température n'excède pas 70° C.</p> <p>Les mesures donnent une moyenne de température de l'air ambiant de 30°C (86°F) mais la bauxite entre dans le sécheur à 28°C (82°F). Cette valeur est considérée comme température de référence au-dessus de laquelle toute masse entrant dans le sécheur apporte de l'énergie et donc forme une source de chaleur.</p>

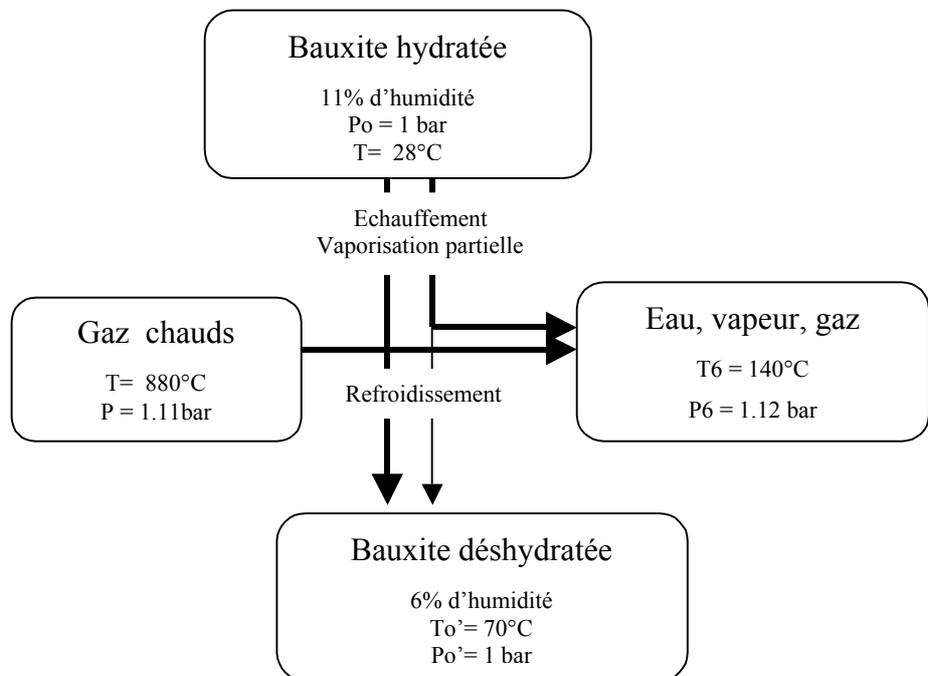
En aval :

phénoménographie	phénoménotechnique
Un précipitateur (voir photo 3) sépare les gaz et la poussière.	La production horaire est de 500 à 800 tonnes par heure.
La bauxite est acheminée vers les hangars de stockage (voir photo 10).	
	Les gaz chauds produits par la combustion du fuel sont aspirés dans le four (sècheur) par un ventilateur de tirage.
Pour la cheminée (schéma 5 annexe B et photo 4) les dimensions, hauteur et diamètre, sont indiqués ainsi que la température des gaz de combustion et la température de l'air atmosphérique.	A chaque étape, le matériel doit assurer le moins de perte possible de chaleur, sauf sans doute au niveau de la cheminée où il s'agit de ne pas évacuer des gaz trop chauds.

➤ Élaborations modélisantes

Le phénomène central est la déshydratation de la bauxite.

La bauxite hydratée est chauffée de façon à ce que l'eau qu'elle contient soit vaporisée. L'apport de chaleur se fait par des gaz très chauds. L'échange thermique a lieu dans les fours-sécheurs. L'eau vaporisée est extraite avec les gaz. Cette description de principe est schématisée dans la figure III-5 ci-contre.



Mais elle peut aussi donner lieu à un schéma plus complet centré sur les entrées sorties d'eau liquide ou vapeur (voir fig III-6 ci dessous).

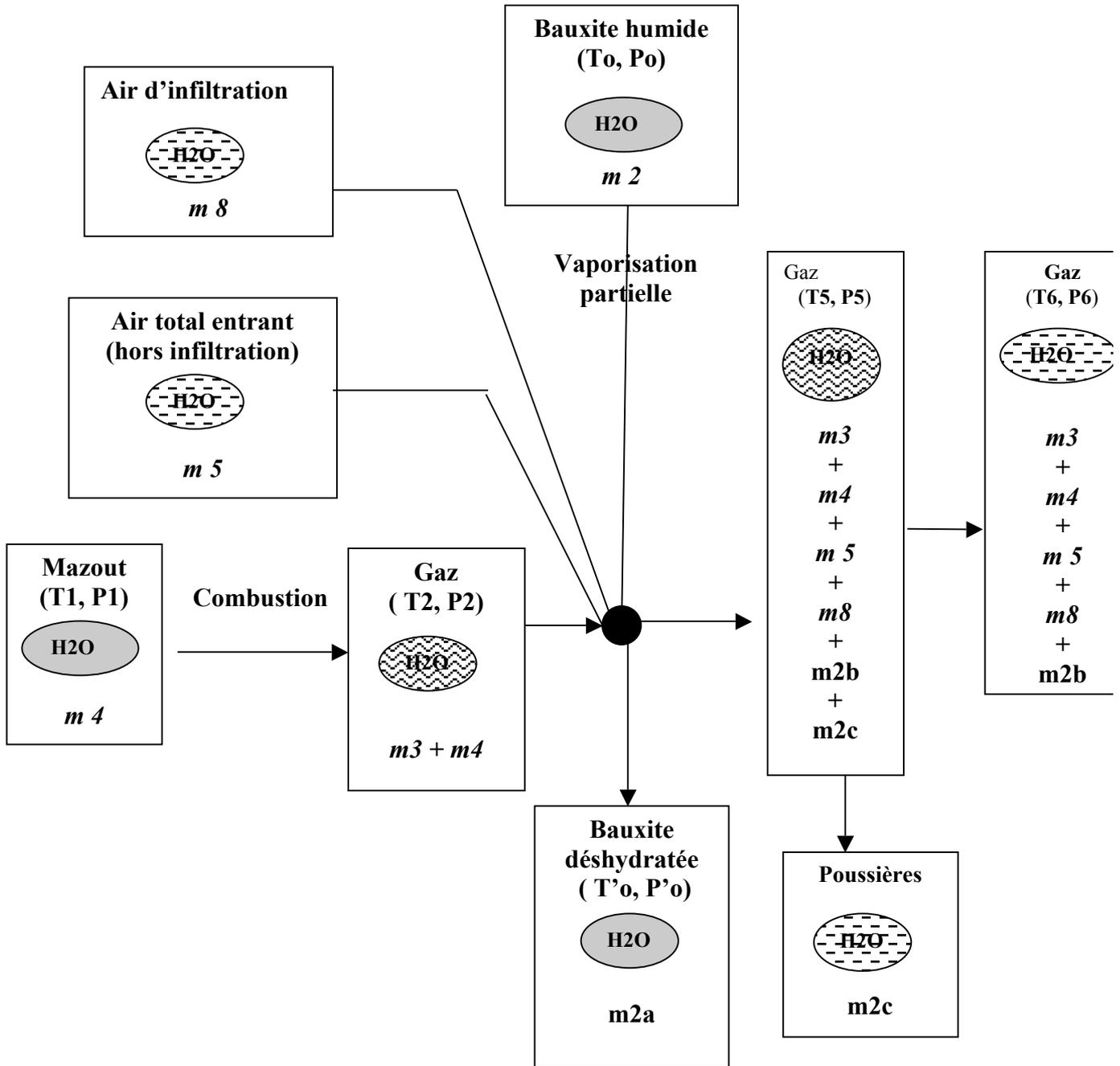


Figure III-6 Les entrées et les sorties de l'eau

n_2 : masse d'eau de la surface de la bauxite

n_3 : masse d'eau formée par combustion

n_4 : masse d'eau contenue dans le fuel

n_8 : masse d'eau contenue dans l'air d'infiltration

n_{2b} : masse d'eau évaporée de la bauxite

n_{2c} : masse d'eau résiduelle des poussières

n_5 : masse d'eau dans la quantité totale d'air entrant dans le système (air d'infiltration non compris)

 Masses d'eau liquide contenue dans une substance solide ou liquide

 Masse d'eau gazeuse mélangée à d'autres gaz dans le four

 Masse d'eau à l'extérieur du four sous forme de gaz

Les entrées d'air sont alors distinguées non plus selon le lieu ou la fonction mais selon le caractère volontaire ou involontaire de leur introduction (air total/ air d'infiltration).

Les données des documents techniques de l'usine permettent de dresser des schémas des entrées sorties de chaleur pour différents éléments du dispositif global.

Schéma III-7 Entrées des chaleurs

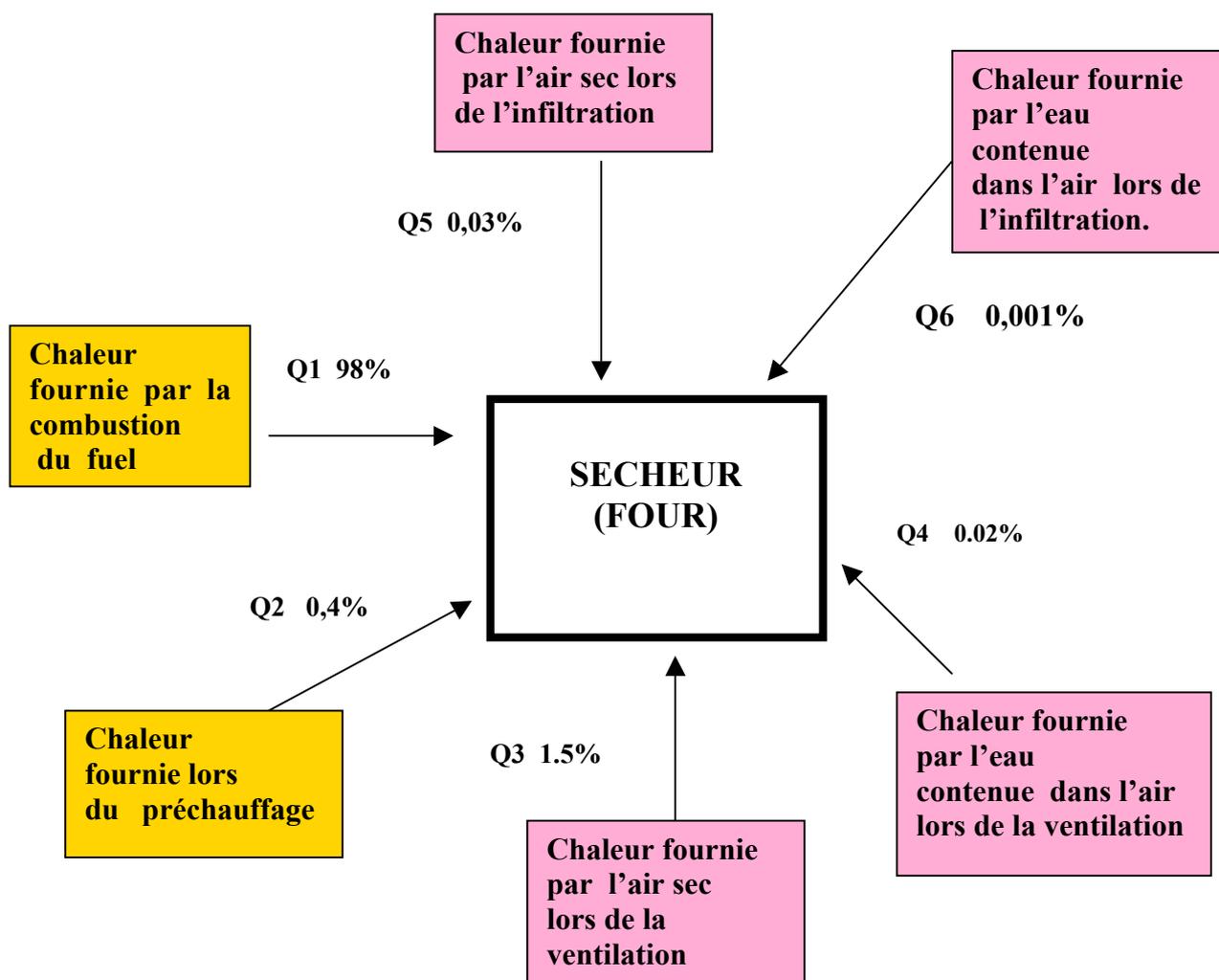
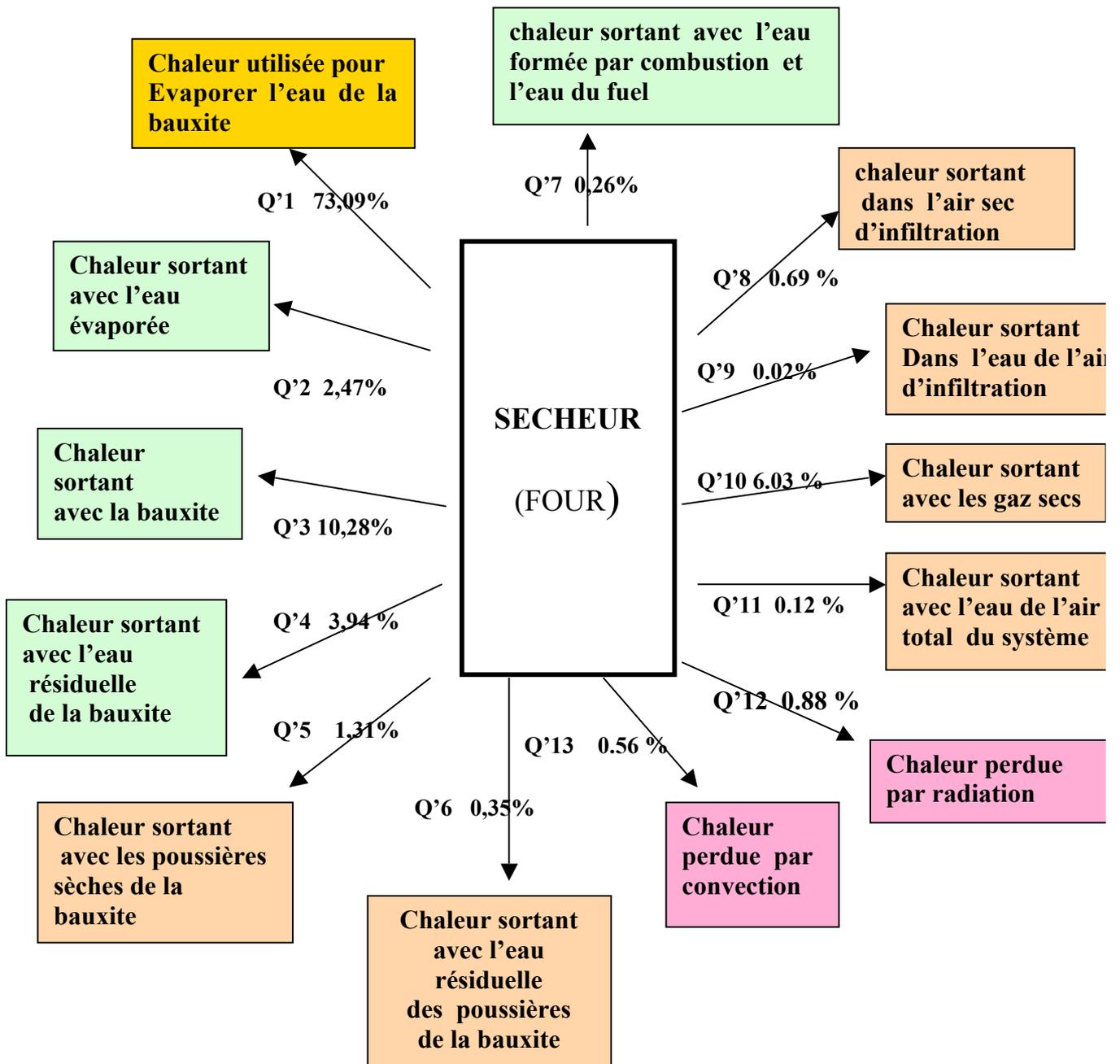


Schéma III-8 Sorties des chaleurs



- Chaleur volontairement fournie au système
- Chaleur calculable en fonction de la masse de substance connue
- Chaleur non maîtrisée par l'expert
- Chaleur calculée par différentiation

Ces élaborations modélisantes sont sous tendues par les ressources cognitives disponibles (notion de système, conservations, changement d'état, condensation, relation entre chaleur énergie enthalpie, capacités calorifiques, température, échange thermique,...).

III - Comparaisons des modélisations

A l'usine, il s'agit de contrôler au mieux un processus avec une finalité précise (le séchage de la bauxite) et des contraintes techniques.

Par rapport à une description de combustion à l'université, il apparaît que la combustion se prépare en chauffant au préalable et séparément le combustible et le comburant, qu'il y a différents types de brûleurs et que de leur choix dépend en grande partie de la quantité de chaleur produite par la combustion.

On est loin d'une valeur numérique tabulée relative à une réaction chimique d'une substance supposée pure.

Le dioxyde de carbone et l'eau ne sont pas les seuls produits de combustion cités : monoxyde de carbone (lié à un défaut d'oxydant) et oxyde sulfurique (lié à la présence du soufre dans le mazout et à une suroxydation) sont aussi présents et des phénomènes de corrosion peuvent se produire.

Les bilans de masse et thermique montrent toute la complexité du problème réel, avec des substances réelles, des fuites, des pertes,... qui doivent être prises en compte dans le fonctionnement de l'usine.

Par ailleurs, si les situations traitées à l'université sont soit à volume constant (par exemple la bombe calorimétrique), soit à pression constante (combustion à l'air libre à la pression atmosphérique), la situation est ici un peu plus difficile. Il s'agit de flux de matière.

La transformation est bien sûr tout à fait irréversible, non seulement parce que l'entropie augmente mais aussi parce que la transformation est « réelle » avec son lot de fuites, de pertes de chaleur sous diverses formes y compris par radiation.

Rien n'est adiabatique ni isotherme ; le bilan thermique indique où se font les échanges de chaleur. Il n'y a pas non plus homogénéité thermique. Les objets et les substances cohabitent (d'après les instruments de mesure, là où ils sont placés) à des températures différentes dans un même élément du dispositif, même si localement ils sont en équilibre thermique. On a ainsi de la bauxite qui sort du four sécheur à 70°C alors que les gaz en sortent à 160°C.

En termes de quantité de matière, on s'intéresse à une quantité de bauxite qui entre humide et ressort sèche (ou plus sèche). En ce qui concerne le mazout, c'est la quantité introduite qui est ici importante économiquement ; le mazout entre liquide à une température contrôlée pour optimiser la viscosité et il est sous pression. En ce qui concerne les gaz, l'air introduit est repéré par sa masse en séparant celui qui est introduit et celui qui s'infiltré.

Les gaz produits par la combustion sont dans une enceinte ouverte vers la chambre de transfert. Mais une quantité de gaz connue se trouve à chaque instant dans la chaudière à une température et une pression connue. La chaleur dégagée par combustion chauffe ce volume de gaz produits (et les parois). On peut considérer le devenir de ce volume de gaz : Transporté dans la chambre de transfert puis dans le four, il voit sa température baisser de 2150° à environ 880° à l'entrée du four puis à 160° à la sortie du four. Il se détend, la pression à la sortie de la chambre de combustion est de 5 ou 6 bars tandis qu'à la sortie de la cheminée on considérera la pression atmosphérique, ou juste un peu plus pour éviter le reflux. Mais en fait ce gaz n'a pas toujours la même composition, ce n'est pas un échantillon de gaz, mais un système ouvert. Il y a de l'eau, de l'air, il en sort de l'eau aussi et de l'acide sulfurique par réaction des oxydes de soufre (produits de combustion du mazout impur) avec l'eau de la combustion ou extraite de la bauxite.

Le bilan énergétique global se fait non pas en tant qu'état initial et état final d'un système mais en tant que entrée/sortie d'un dispositif matériel.

Ce bilan ne comporte que des quantités de chaleur ; l'usine ne produit ni ne consomme de travail même si les gaz subissent une détente ou une compression suivant les lieux dans lesquels ils passent.

Sont repérés les paramètres qui permettent de contrôler le bon déroulement (T, P, couleur de la bauxite et couleur de la fumée), sur lesquels l'expert peut éventuellement jouer pour rectifier une situation anormale et garantir une teneur donnée en eau de la bauxite « déshydratée », d'éviter la surchauffe (problème économique) et la surpression ou dépression qu'elle peut entraîner (problème sécuritaire), de ne pas rejeter des produits nocifs dans l'atmosphère.

Cependant l'expert constate que sur certains paramètres il ne peut agir : le fuel contient toujours du soufre et la production d'acide sulfurique générant de la corrosion est incontournable.

Chapitre IV : Séquence d'enseignement en relation avec l'usine de Kamsar

Corrélativement à l'analyse des données recueillies sur l'usine de Kamsar, nous avons commencé à élaborer des activités pour des étudiants guinéens de premier cycle universitaire, de façon à les tester progressivement.

Cette séquence a mis en œuvre des phases de visite à l'usine et de discussion entre étudiants en classe. Des problèmes ouverts contextualisés leur ont à la fin été proposés.

I- Déroulement de la séquence

La séquence est organisée en trois étapes :

Etape 1 : Visite à l'usine

A l'usine, les étudiants sont accompagnés d'un expert industriel qui leur donne des explications et à qui ils peuvent poser des questions.

Nous leur avons demandé de remplir deux fiches :

Fiche 1

Sur cette fiche, les étudiants répartis, en trois groupes, doivent noter les questions qu'ils se posent au cours de la visite. Nous leur avons demandé d'indiquer le lien entre la question posée et les programmes d'enseignement de la thermodynamique chimique au premier cycle.

Consigne : Observer le processus de séchage de la bauxite et poser des questions en relation avec le contenu des programmes de la thermodynamique chimique.

QUESTIONS	Liens avec les programmes

Fiche 2

Sur cette fiche, les étudiants, dans leur groupe, doivent noter ce qu'ils observent : indices, couleurs, objets ou grandeurs se rapportant à un phénomène chimique. Ils doivent comme précédemment, indiquer les liens qu'ils font avec les contenus du cours de thermodynamique.

Consigne : Repérer, par des indices visuels ou des objets, des phénomènes chimiques et physico-chimiques dans le processus de séchage de la bauxite en relation avec les programmes de thermodynamique chimique.

<i>Phénomènes, paramètres</i>	<i>Description</i>	<i>Liens avec les programmes</i>

Etape 2 : discussion en classe

Les étudiants reviennent en classe après la visite à l'usine.

L'enseignant n'a joué que le rôle d'organisateur de discussion.

Les étudiants ou les groupes s'échangent les fiches qu'ils ont remplies au cours de la visite de l'usine et un débat est instauré autour de chaque question ou élément de description indiqué.

Après cet échange, les étudiants reprennent leurs fiches respectives pour faire d'autres propositions (reformulations).

Dans cette étape, les étudiants ont à leur disposition, les images vidéo et les photographies prises à l'usine. Ils ont la possibilité de consulter les documents universitaires (cahiers de cours ou ouvrages de thermodynamique chimique) et les documents fournis par l'expert technicien (voir données techniques).

Les fiches recueillies dans cette étape 2 sont également rassemblées dans l'annexe 5.

II- Analyse des productions des étudiants dans l'étape 1

« visite de l'usine »

Dans le groupe 1 onze questions ont été posées sur la fiche 1 et 10 éléments de description mentionnés dans la fiche 2.

Pour le groupe 2, 22 questions ont été posées et 10 éléments de description. Pour le groupe 3, 15 questions et 12 éléments de description.

Chaque question est codée (dans la mesure du possible) en référence aux étapes Ri de la figure III-3 du chapitre précédent. Pour le groupe 3, cette caractérisation est souvent difficile car les formulations sont difficiles à interpréter. Le tableau IV-1 repère par zone les questions et descriptions des étudiants.

Tableau IV-1 : Classification des questions formulées par les étudiants

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Zone R1	Q2Q7Q8Q9Q10 D1D2	Q1Q3Q5Q9Q10Q11Q16 Q17Q18Q19Q20Q22 D1D10	Q1Q7Q9Q12Q13Q14Q15 D2 D6D7
Zone R2	Q1 D8	Q13	Q15
Zone R3	Q3Q4Q5Q6Q11 D3D5D6	Q6Q7Q8Q12Q14Q15Q21 D2D5D7D8	Q1Q2Q3Q4Q5Q8Q10Q11 D5D9
Zone R4	D7		D2D4 D10
Zone R5	D7	D9	D2D4

Dans le tableau IV-2, les questions de contenu équivalent formulées par les différents groupes (et qui portent des numéros différents dans les tableaux relatifs à chaque groupe), sont mis en regard d'un type de question noté TQ (colonne 1).

Chaque type de question est codé (colonne 3) selon l'objet, le paramètre, la relation ou le phénomène sur lequel elle porte (colonne 2). On a ici les éléments de phénoménographie repérés par les étudiants.

Deux démarches peuvent être repérées dans la tentative des étudiants de relier ce qu'ils observent à ce qu'ils connaissent en thermodynamique : des questions viennent de l'observation ou des commentaires de l'expert ; elle seront codées R (réfèrent) ; d'autres viennent de leurs connaissances de thermodynamique qu'ils essayent de faire fonctionner dans la situation qui leur est présentée ; elles seront notées T (théorie). Ces distinctions sont reportées en colonne 4.

En dernière colonne, les liens des questions et descriptions avec les programmes sur les fiches 1 et 2 sont codés par :

- V(+)
pour les liens valides et pertinents
- V(-)
pour les liens valides non pertinents
- V(o)
pour les liens non valides

La même analyse est faite pour les éléments de description dans le tableau IV-3.

Tableau IV-2: Types de questions repérées par les étudiants et liens établis avec les programmes

N°	Éléments		R/T	Gpe 1	Liens Prog	Gpe 2	Liens Prog	Gpe 3	Liens Prog
TQ1	Rôle du Ventilateur de tirage	objet	R	Q1		Q2			
TQ2	T de la chambre de combustion / nature du combustible	mesure	R	Q2		Q10		Q7	
						Q16		Q13	V(-)
						Q17		Q14	
TQ3	Présence d'acide sulfurique corrosion	observable	R	Q3	V(-)			Q1	V(-)
								Q11	
TQ4	Variation de T et/ou P dans le four	mesures	R	Q4	V(-)	Q6	V(-)	Q10	
TQ5	Eau bauxite	Phénomène d'hydratation séchage	R	Q5					
				Q6					
				Q11					
TQ6	Rôle des brûleurs	objet	R	Q7	V(-)	Q3	V(-)		
				Q8	V(o)	Q18			
						Q22			
TQ7	préchauffage	paramètre	R	Q9		Q9		Q9	
						Q19	V(+)		
TQ8	Température chambre de combustion	mesure	R	Q10					
TQ9	Couleur de flamme	phénomène	R			Q1	V(o)		
TQ10	« Joint à écaille »	objet	R			Q4			
TQ11	Revêtement du four	objet				Q5			
TQ12	Transformation de la bauxite	phénomène	T			Q7	V(-)		
						Q12			
TQ13	Rôle de l'air et de l'eau	Paramètre	R			Q8			
						Q13			
TQ14	Combustion complète/incomplète Lente ou vive		T			Q11	V(-)	Q6	
TQ15	Passage corps chauds/froids		T			Q14	V(-)		

TQ16	Variation d'entropie d'énergie, d'enthalpie conservation de l'énergie chaleur de formation		T			Q15	V(-)	Q2	V(-)
						Q21	V(-)	Q3	V(-)
								Q4	V(-)
								Q8	V(-)
		Q15	V(-)						
TQ17	Gaz de combustion		T			Q20	V(-)		
TQ18	Système ouvert fermé isolé		T					Q5	V(+)

Tableau IV-3 : Les éléments de description repérés par les étudiants sur la fiche 2

N°	Éléments		R/ T	Gpe1	Liens Prog	Gpe 2	Liens Prog	Gpe 3	Liens Prog
TD1	Couleur et état du mazout	objet	R	D1	V(o)	D1	V(o)	D6	
TD2	Fumée poussière	objet	R	D2	V(-)	D9	V(-)	D2	V(-)
				D7	V(-)			D4	V(-)
								D11	V(+)
TD3	Présence de soufre dans le mazout Présence d'acide sulfurique	objet	R	D2		D3			
TD4	Couleurs et caractéristiques de la bauxite (sèche et hydratée)	objet	R	D3		D2	V(o)	D5	
				D5	V(-)	D5			
TD5	Température élevée	Mesure et perception	R	D4		D4	V(-)		
						D10	V(-)		
TD6	Valeurs de température et de pression	mesures	R	D6	V(-)	D5			
TD7	« Chambres de combustion, chambre de transfert »	objets	R	D8	V(o)				
				D9	V(o)				
TD8	Ventilateur	objet	R	D10	V(+)				
TD9	Abaissement température	Mesure				D7	V(-)		
						D8	V(-)		

TD10	Chaleur							D12	V(-)
TD11	Air, gaz, eau	Objet				D6		D7	
								D8	V(-)
								D9	
								D10	
TD12	Température, pression, énergie, entropie,	Paramètre						D3	V(-)
								D1	V(-)

Certains éléments de « description » indiqués par les étudiants en fiche 2 sont en fait peu reliés aux observables, mais peut être au commentaire de l'expert (« vapeur d'eau assimilable à un gaz parfait » D6, « condensation dans le four, abaissement de la température d'équilibre chimique » D7 du groupe 2 ou encore « chaleur travail » D12, « entropie énergie », D3, du groupe 3).

Dans les fiches 1 et 2 sont repérés des caractéristiques de substances, des valeurs de grandeurs physiques, des lieux ou des effets inhabituels.

Les liens exprimés avec le cours sont assez pauvres, parfois inadéquats ; ils peuvent témoigner d'interrogations (adiabatique ?) ou de perplexité (source d'énergie ?) ou au contraire de liens établis sur des concepts mieux connus (système chimique, réaction chimique, changement d'état) ou sur des connaissances de sens commun (combustion/fumée).

II-1- Les questions que les étudiants formulent lors de cette visite

Beaucoup des questions formulées traduisent les difficultés que les étudiants ont à interpréter ce qui leur est montré ou ce qui est présenté par l'expert.

On peut distinguer tout d'abord ce qui est pour eux étranger à leur schéma théorique ou même pratique, de la combustion (zone R1).

Le ventilateur de tirage et les brûleurs ne leur sont pas familiers, alors même qu'ils peuvent être présents dans des installations domestiques.

« Est-ce qu'on peut remplacer les brûleurs comme on utilise les allumettes à la place de briquets » Q22, groupe 2.

Le préchauffage est également un procédé inconnu. « Pourquoi le préchauffage du mazout avant la combustion ? », Q19 groupe 2. « Est-ce qu'on peut changer le mazout pour éviter le préchauffage ? », Q9 groupe 2. Ils sont peu familiers des procédés liés aux aspects

techniques, économiques ou réglementaires (viscosité du combustible, colmatage, minimisation des pertes énergétiques, contrainte sur les gaz évacués par la cheminée).

Ils cherchent à reconstituer un raisonnement qui implique le combustible, les brûleurs, les gaz de combustion, la température de la chambre de combustion, l'effet thermique de la réaction, température de combustion, préchauffage...et ne sont pas toujours au clair sur la relation /cause conséquence.

Ainsi nous relevons sur cet aspect :

- « *pourquoi le CO₂ ne se dégage pas après sa formation dans la chambre de combustion ?* » Q20 groupe 2 ;
- « *quel est le rôle de la chambre de combustion dans le chauffage* », Q12 groupe 3 ;
- « *le réchauffage augmente-t-il la température de combustion du mazout* », Q9, groupe 3 ;
- « *est-ce que la température de la chambre de combustion influence l'effet thermique de la réaction* », Q13 groupe 3.

Mais d'autres questions révèlent une représentation plus élaborée :

- « *quel est le rapport entre la température de la chambre de combustion et la nature du combustible* », Q2 groupe 1.
- « *est-ce qu'ils peuvent changer la température de combustion ?* », Q8 groupe 1
- « *est-ce que la température de la chambre de combustion est égale à la température de combustion du mazout* », Q10 groupe 1 ou « *est-ce qu'on peut changer le mazout par un autre combustible pour avoir le même rendement* », Q10 groupe 2.

Un autre ensemble de questions concerne le four (zone R3).

Le four est habituellement un lieu de production de chaleur ; ici les lieux de production et d'utilisation de la chaleur sont distincts ce qui donne naissance à des questions :

- « *quel est le rapport entre température de la chambre de combustion et nature de combustible* », Q2 du groupe 1
- « *est-ce que la température de la chambre de combustion est égale à la température de combustion du mazout* », Q10 du groupe 1
- « *est-ce qu'on peut changer la chambre de combustion avec la chaleur de combustion* », Q17 du groupe 2
- « *quel est le rôle de la chambre de combustion dans le chauffage ?* », Q12 du groupe 3

Ils cherchent à reconstruire un raisonnement qui prend en compte les variations de T et de P, l'arrivée de gaz chauds et humides (l'eau étant un des produits de la combustion) et ont du mal à identifier ce qui relève du phénomène et ce qui est manipulé en tant que paramètre externe.

- « *dans le four est ce qu'on passe d'un corps chaud à un corps froid* », Q14 groupe 2
- « *qu'est ce qui est à la base de la variation de pression dans le four ?* », Q1 groupe 3
- « *dans le séchage pourquoi on ne part pas de petites températures pour les grandes températures ?* », Q4 groupe 1

D'autres se posent des questions plus subtiles sur le séchage de la bauxite et sa réhydratation possible

- « *La formation de l'eau dans le four permet-elle l'obtention de la bauxite réhydratée ?* », Q6 groupe 1

Un autre ensemble de questions concerne la corrosion (zones 3 et 4). Deux groupes sur les trois notent dans leurs descriptions la présence de soufre dans le mazout et essayent d'écrire des réactions chimiques qui permettent de justifier la présence d'oxydes de soufre

- « *quel est le rôle de l'acide sulfurique dans le four ? Pourquoi faut il qu'il se forme ?* », Q1 groupe 1.

II - 2- Les liens avec le programme

Dans les tableaux IV-2 et IV-3, nous avons dégagé les liens établis par les étudiants dans les fiches 1 et 2 entre les questions qu'ils se posent ou les descriptions qu'ils ont fait à l'usine.

- Les liens « non valides » V(o) établis par les étudiants sont des cas d'erreurs ou de confusion :

Groupe 1 : questions Q8, descriptions : D1, D2, D9

Groupe 2 : descriptions D1, D2

Groupe 3 : description D3

- Les liens « valides non pertinents » V(-) sont des renvois à des théories et principes généraux de la thermodynamique :

Groupe 1 : questions Q3, Q4, Q7, Q8 descriptions D2, D5, D7

Groupe 2 : questions Q3, Q6, Q7, Q14, Q15, Q20, Q21 ; descriptions D4, D7, D8, D9, D10 ;

Groupe 3 : questions Q1, Q2, Q4, Q6, Q8, Q13, Q15 ; descriptions : D1, D2, D5, D8, D12 ;

- Les liens valides et pertinents V(+) ne sont pas nombreux :

Groupe 1 : le lien entre la description D10 et le programme qui est établi par les étudiants est pertinent, ils mettent en relation le « ventilateur » observé à l'usine et la « source d'énergie » évoquée dans les programmes. Le ventilateur fournit de l'air au système dont la température est supérieure à la température de référence donc l'air apporte de l'énergie et devient une source d'énergie.

Groupe 2 : la question Q19 relative à la nécessité du préchauffage dans la combustion et son renvoi sur les équations chimiques dans les programmes est pertinente, étant donné que la description du phénomène de combustion à l'université à l'aide des équations chimiques ne tient pas compte du préchauffage.

Nous constatons ainsi, que la plupart des liens établis par les étudiants sont des liens incompatibles avec des explications ou des définitions d'objets techniques à l'aide de concepts inappropriés. Nous constatons aussi des cas de confusion entre concepts (confusion entre phénomènes physiques et phénomènes chimiques (déshydratation considérée comme un phénomène chimique), confusion entre le lieu où se déroule la réaction chimique à l'usine « chambre de combustion » et le « système »).

Les liens valides pour la plupart sont des renvois sur des théories et principes généraux de la thermodynamique (premier principe, deuxième principe, relation des gaz parfaits, etc) et des notions générales de température, pression, chaleur . Les liens inexistantes correspondent à des questions ou des descriptions qui se situent au niveau uniquement académique et ne tiennent pas compte du contexte de l'usine.

III - Analyse des productions des élèves dans l'étape 2

A la suite de cette visite, au cours d'une séance en classe, les étudiants vont retravailler sur l'ensemble des fiches ; ils disposent d'une bande vidéo tournée dans l'usine et de documents. Ils vont avoir à rédiger dans cette étape un ensemble de propositions à la suite d'un débat entre étudiants. Ces fiches sont rassemblées en annexe 4 – étape 2.

III -1- Echanges entre groupes

Dans cette étape de mise en commun, nous essayons de repérer dans les échanges les questions qui donnent lieu à reformulation. Nous repérons également les questions qui ne sont reprises par aucun groupe. Le tableau IV-4 regroupe pour chaque groupe les questions Q et les reformulations R selon les contenus (notés TQ). Le tableau IV-5 fait de même avec les éléments de description D face aux contenus (notés TD).

Tableau IV-4: mise en regard des reformulations et des questions

N°	Eléments	Type d'élément	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
TQ1	Rôle du Ventilateur de tirage	objet	Q1 →	Q2 → F2	
TQ2	T de la chambre de combustion / nature du combustible	mesure	Q2 → F2	Q10 → Q16 → Q17 →	Q7 → F8 Q13 → Q14 →
TQ3	Présence d'acide sulfurique corrosion	observable	Q3 →		Q1 → Q11 →
TQ4	Variation de T et/ou P dans le four	mesures	Q4 → F8	Q6 → F12 F5	Q10 →
TQ5	Eau bauxite	Phénomène d'hydratation séchage	Q5 → Q6 → Q11 →		

TQ6	Rôle des brûleurs	objet	Q7 → F10 Q8 →	Q3 → F6F7 Q18 → F6 Q22 → F7	
TQ7	Préchauffage	paramètre	Q9 → F4	Q9 → F8 Q19 → F8	Q9 → F11 F12
TQ8	T chambre de combustion	mesure	Q10 →		Q → F10
TQ9	Couleur de flamme	phénomène		Q1 →	
TQ10	« Joint à écaille »	objet		Q4 →	
TQ11	Revêtement du four	objet		Q5 →	
TQ12	Transformation de la bauxite	phénomène		Q7 → F10 F11 Q12 → F10	
TQ13	Rôle de l'air et de l'eau	Paramètre		Q8 → Q13 →	
TQ14	Combustion complète/incomplète Lente ou vive			Q11 → F4	Q6 →
TQ15	Passage corps chauds/froids			Q14 → F5	
TQ16	Variation d'entropie d'énergie, d'enthalpie conservation de l'énergie chaleur de formation			Q15 → Q2 → F2	Q2 → Q3 → F3 Q4 → F10 Q8 → Q15 →
TQ17	Gaz de combustion			Q20 →	
TQ18	Système ouvert fermé isolé				Q5 → F2

Tableau IV-5 : Mise en regard des reformulations et éléments de description

N°	Eléments		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
TD1	Couleur et état du mazout	objet	D1→	D1→F1	D6→
TD2	Fumée poussière	objet	D2→ F11 D7→	D9→	D2 →F10 D4 → D11→
TD3	Présence de soufre dans le mazout Présence d'acide sulfurique	objet	D2→	D3→	
TD4	Couleurs et caractéristiques de la bauxite (sèche et hydratée)	objet	D3→ D5→F6F7	D2→F10 D5→F10F11	D5→ F5
TD5	Température élevée	Mesure et perception	D4→F8	D4→F5 D10→	
TD6	Valeurs de température et de pression	mesures	D6→	D5→	
TD7	Chambres de combustion, chambre de transfert	objets	D8→F11 D9→F14		
TD8	Ventilateur	objet	D10→F2		
TD9	Abaissement température	Mesure		D7→F12 D8→	
TD10	Chaleur				D12→
TD11	Air, gaz, eau	Objet		D6→F12	D7→ D8→ D9→ D10→
TD12	Température, pression, énergie, entropie,	Paramètre			D3→ F6 F7 D1→

L'analyse des résultats présents dans le tableau nous permet de confronter ce que chaque groupe emprunte aux autres.

Les questions et descriptions du groupe 1 reformulées par les autres groupes :

- Sur 11 questions du groupe 1, aucune question n'a été reprise par le groupe 2, quatre questions ont été reprises par le groupe 3 dont trois questions (Q5→F5, Q6→F5, Q11→F5) sur le même élément (TQ5) et une question (Q10→F10) sur la combustion (élément TQ8). L'élément TQ8 se trouve dans d'autres descriptions : D5 du groupe 3 et D5 du groupe 2 sur « couleur et caractéristique de la bauxite » (élément TD4).
- Un seul élément de description (D2→ F1) du groupe 1a a été repris par le groupe 2, il porte sur la présence du soufre dans le mazout et la formation de l'acide sulfurique dans le four (élément TD3). La description D3 du groupe 2 traite de la corrosion par la formation de l'acide sulfurique, mais F1 du groupe 1 n'est pas une reformulation de D3.

Les questions et descriptions du groupe 2 reformulées par les autres groupes :

- Sur les vingt-deux questions du groupe 2 aucune n'a été reprise par le groupe 1, deux questions Q14→ F3 portant sur l'élément (TQ15) et Q19 →F11 sur l'élément (TQ7) sont reprises par le groupe 3 ; aucun de ces éléments ne figure dans les questions ou descriptions du groupe 3.
- Sur les dix éléments de description du groupe 2, trois ont été repris par le groupe 1 : D2→F5 et D5→F6 sur le même élément (TD4) et D9→F9 sur l'élément TD7.
- Aucune description du groupe 2 n'a été reformulée par le groupe 3.

Les questions et descriptions du groupe 3 reformulées par les autres groupes :

- Aucune question du groupe 3 n'a été reprise par le groupe 1.
- Un seul élément de description D5→F5 (élément TD4) a été repris par le groupe 1 mais cet élément existe dans ses descriptions.

Questions et descriptions non reformulées du groupe 1 :

- Trois questions sur 11 du groupe 1 n'ont pas été reformulées avec différents éléments de description : Q1 (élément TQ1), Q3 (élément TQ3), Q8 (élément TQ6).
- Quatre descriptions sur 10 du groupe 1 n'ont pas été reformulées avec différents éléments de description D1 (élément TD1), D7 (élément TD11), D3 (élément TD4), D6 (élément TD6).

Questions et descriptions non reformulées du groupe 2 :

- Neuf questions sur 22 du groupe 2 n'ont pas été reformulées : Q1 (élément TQ2), Q4 (élément TQ10), Q5 (élément TQ11), Q8 (élément TQ9), Q10 (élément TQ2), Q16 (élément TQ2), Q17 (élément TQ2), Q13 (élément TQ13), Q15 (élément TQ16).
- Cinq éléments de question sur 10 du groupe 2 n'ont pas été reformulés : D9 (élément TD2), D3 (élément TD3), D10 (élément TD5), D5 (élément TD4), D8 (élément TD9).

Questions et descriptions non reformulées du groupe 3 :

- Huit questions du groupe 3 n'ont pas été reformulées : Q13 (élément TQ2), Q14 (élément TQ2), Q1 (élément TQ3), Q11 (élément TQ3), Q10 (élément TQ4), Q6 (élément TQ14), Q2 (élément TQ16), Q3 (élément TQ16).
- Sept descriptions du groupe 3 n'ont été reformulées par aucun groupe : D1 (élément TD12), D4 (élément TD2), D7 (élément TD11), D8 (élément TD11), D10 (élément TD110), D11 (élément TD2), D12 (élément TD10).

Éléments de convergence des groupes :

Le groupe 1 et le groupe 2 convergent sur les éléments de description suivants :

TD4 : couleur et caractéristiques de la bauxite (sèche et hydratée)

TD7 : chambre de combustion, chambre de transfert

TD 3 : présence de soufre dans le mazout, présence d'acide sulfurique.

Le groupe 1 et le groupe 3 convergent sur les éléments suivants :

TQ5 : eau et bauxite

TQ8 : température et chambre de combustion

TD4 : couleur et caractéristiques de la bauxite (sèche et hydratée)

Le groupe 2 et le groupe 3 convergent sur les éléments suivants :

TQ15 : passage corps chauds/froids

TQ7 : préchauffage.

Nous constatons que les groupes convergent sur des observables : objets, couleurs, caractéristiques d'objets, propriétés (pureté).

III – 2- Analyse des reformulations, par groupe d'étudiants

Nous avons distingué trois types de reformulations : reformulation sur les objets, reformulation sur les liens entre différents éléments de l'usine, reformulation sur les liens entre usine et connaissances scientifiques.

Nous avons noté pour la validité des liens : (+) pour les liens valides et (-) pour les liens non valide (inappropriés ou incomplets).

Les tableaux IV-6, IV-7, IV-8 indiquent pour chaque groupe sur quoi porte les reformulations et code leur validité.

Tableau IV-6; reformulations du Groupe 1

Reformulation portant sur les objets		Validité	Reformulation portant sur les liens entre différents éléments dans l'usine		Validité	Reformulation portant sur les liens entre usine et connaissances scientifiques		Validité
F1	caractéristique mazout	(+)				F1	Combustion mazout / écriture équation chimique	(-)
			F2	combustion / température élevée	(+)			
			F3	combustion mazout / source d'énergie	(+)			
			F4	Préchauffage / combustion mazout	(-)			
F5	bauxite	(+)						
						F6	Changement d'état / transformation physique	(+)
			F7	sécheur / température	(+)			
						F8	Température / séchage	(-)
			F9	Produits de combustion / fumée	(+)			
F10	brûleurs	(+)						
			F11	Thermomètre / température 35°C 120°C	(+)			

Tableau IV-7 ; reformulations du Groupe 2

Reformulation portant sur les objets		Validité	Reformulation portant sur les liens entre différents éléments dans l'usine		Liens	Reformulation portant sur liens entre usine et connaissances scientifiques		Validité
F1	mazout caractéristique	(+)				F1	Substance organique / formule chimique H ₂ O CO ₂	(+)
			F2	chaleur / température	(-)			
			F3	Mazout brûlant / température	(-)	F3	relation ΔU / échauffement	(-)
						F4	combustion mazout / réaction complète	(-)
						F5	échange thermique/ échauffement	(+)
			F6	Brûleur / chaleur combustion mazout / fumée	(-)			
						F7	Brûleur/catalyseur	(-)
						F8	Réchauffage/ chaleur de combustion	(+)
			9	Combustible/ séchage	(+)			
10	Bauxite couleur	(+)				F10	propriétés /substance	(+)
						F11	Composition/ bauxite	(+)
			F12	Température/ condensation Condensation / température	(-)			
						F13	Volume gaz / relation des gaz parfaits	(-)

Tableau IV-8 ; reformulations du Groupe 3

Reformulation portant sur les objets		Validité	Reformulation portant sur liens entre différents éléments dans l'usine		Validité	Reformulation portant sur les liens entre usine et connaissances scientifiques		Validité
			F1	chaleur produite par combustion et absorbée par la bauxite	(-)	F1	four / système thermodynamique / conservation énergie	(-)
						F2	four / système thermodynamique ouvert/fermé	(-)
			F3	Transfert chaleur / chambre de combustion	(+)	F3	transfert chaleur entropie (faux)	(-)
				Chambre de transfert / température	(-)	F4	transformation adiabatique (faux) température /entropie	(-)
						F5	déshydratation /réaction chimique (faux)	(+)
						F6	Equilibre chimique	(+)
F7	Bauxite	(+)						
			F8	Mazout / chaleur		F8	Combustible / ΔH_c	(+)
			F9	Brûleur /réchauffage/ ΔH_c	(+)	F9	ΔH_c / masse	(-)
			F10	Chambre combustion / combustion T_i, T_f	(+)	F10	Calcul $\Delta H_c C_p C_v$	(+)
			F11	Réchauffage	(+)			
			F12	Réchauffage / flux	(+)		Mazout fluidité	
			F13	Variation température / four	(-)	F13	Echange thermique	(-)

Les reformulations valides sont celles qui portent sur les effets « observables » (couleur, sensation de chaud, valeurs de température et chaleur), sur les objets techniques, mais peuvent aussi correspondre à des éléments d'une nouvelle phénoménologie.

Ainsi nous pouvons sélectionner quelques exemples qui mettent en évidence ces relations.

Pour le Groupe 1 :

- F3 « *la combustion du mazout est une source d'énergie* »
- F9 « *La fumée qui se dégage à la cheminée(est le produit) de la combustion qui se déroule dans la chambre de combustion* »

Pour le Groupe 2 :

- F1 « *le mazout liquide c'est un combustible organique parce que sa combustion donne H₂O et CO₂* »
- F3 « *la chaleur produite 32251450 Kcal est liée à la température de la chambre de combustion* »
- F8 « *le réchauffage augmente la chaleur dans la chambre de combustion mais ne change pas la chaleur de combustion* »
- F11 « *.....l'évaporation de l'eau change le nombre de constituants dans la bauxite* »

Pour le Groupe 3 :

- F6 « *la formation de l'eau dans le four peut donner de la bauxite hydratée* »
- F11 « *on a pas besoin de réchauffage pour la combustion du mazout,* »

Par ailleurs, les lectures du déroulement du processus sont parfois erronées de même que les tentatives de lien de cause à effet.

Pour le Groupe 1 :

F8 « *On refroidit le four après séchage de 800° à 70°C suivant le premier principe, on ne peut pas dans ce cas passer des petites aux grandes températures* »F

Pour le Groupe 2 :

- F12 « *l'abaissement de la température dans le four provoque la condensation de la vapeur d'eau qui devient liquide*»

Pour le Groupe 3 :

- F13 « *le four est chauffé avec les chaleurs de combustion et refroidi avec de l'eau, il y a échange thermique* »

En synthétisant les reformulations de chaque groupe, nous mettons en évidence des progrès d'apprentissage dûs à cette recherche de relations.

Pour le groupe 1 en fin d'étape 2 :

Il s'agit de déshydrater la bauxite hydratée (rouge) en bauxite blanche ; ceci est une transformation physique (F5, F6 et F7) ou tout au moins dépend de la température (F7).

Cette transformation se fait dans un four (F3)

Ce four chauffé grâce à la combustion du mazout est une réaction chimique (F 3)

Le mazout « contient » 'C' 'H' et 'S' (F1).

Ce mazout brûle dans une chambre de combustion qui atteint ainsi une température élevée (F2).

La combustion se fait en mélangeant mazout et air dans le brûleur (F9).

Cette combustion du mazout est préparée par un réchauffage (F4).

Les différentes températures ne sont pas encore bien repérées, ni dans le temps ni dans l'espace (F12).

Pour le Groupe 2 (Etape 2) nous constatons :

1- Enoncé liant les caractéristiques visuelles du mazout (R1), son identification comme combustible, son caractère organique, les produits de sa combustion.

2- Indication de la valeur de la chaleur produite lors de la combustion du mazout (R1, R2) (mais sans indication temporelle ou quantitative) et lien avec la température de la chambre de combustion.

3- Essai de réinterprétation des données sous forme de variation d'énergie interne en utilisant les valeurs de température 21150° et 35° (éléments R1, R2), mais avec une mauvaise identification des lieux (confusion four/chambre de combustion)

4- Réponse à l'interrogation sur le caractère complet de la combustion mais l'argument énoncé est sans lien avec la réalité (« *il n'y a pas de mazout dans la chambre de combustion* ») ; le régime continu des matières n'est pas pris en compte (élément R1)

5- Essai de lien entre « échauffement », (élément R2) « échange thermique » (élément R3) dans le référent de l'usine d'une part et dans le formalisme habituel d'autre part.

6- Essai de lien entre « brûleur », combustion, mazout (élément R1) et fumée (élément R4)

7- Essais d'interprétation du rôle des brûleurs par comparaison avec un catalyseur (hors contexte)

8- Distinction entre chauffage du mazout et chaleur de combustion du mazout avec des valeurs numériques (élément numérique), mais toujours sans repérage de quantité ou de durée (les données de l'élément R1 ne sont pas prises en compte).

9- Lien entre chaleur dégagée par la combustion et son utilisation pour le séchage de la bauxite (R3).

10- Identification du changement de couleur de la bauxite (R 3) comme une différence de « propriété », énoncé juxtaposé à « *la bauxite ne contient plus d'eau* ».

11- Tentative de repérage des liens propriétés, bauxite/eau en termes de « constituants » (hors contexte)

12- Tentative de lien causal entre abaissement de la température dans le four (élément R3) et condensation de l'eau (élément R4).

13- Tentative d'utilisation du modèle des gaz parfaits pour la chambre de combustion (R1).

Pour le Groupe 3 (Etape 2), nous constatons :

1- Lien entre « chambre de combustion » et « système thermodynamique » (risque de confusion entre lieu et système)

Tentative d'explication de la conservation de l'énergie par la mise en relation chaleur produite (R2) et chaleur absorbée (R3) sans précision sur les valeurs.

2- Lien entre « chambre de combustion » et système thermodynamique (risque de confusion entre lieu et système)

3- Explication d'une mise en relation d'objets techniques « chambre de combustion » « four » avec « la chaleur » (élément R2) « corps chauds et corps froids » (élément R3) Tentative d'explication de la variation d'entropie (hors contexte)

4- Lien entre température (R2) et un objet technique « chambre de transfert » (élément R2) Tentative d'explication de la variation d'entropie (hors contexte)

5- La déshydratation de la bauxite (R3) lue comme une réaction chimique (erreur associée à une écriture)

6- Tentative d'explication de la réhydratation de la bauxite par la formation d'eau (élément R4)

7- la bauxite hydratée (R3) est identifiée par ses caractéristiques visuelles (rouge/blanche) lien avec mélange homogène.

8- Explication académique de « chaleur de combustion » par « nature combustible » (hors contexte)

9- Exclusion du « rôle des brûleurs » et de la nécessité du préchauffage du mazout dans le processus de combustion (R1) les étudiants ne tiennent pas compte des données

10- Essais d'interprétation des valeurs de température par « température initiale » et « température finale » sans précision de ce qu'elle caractérisent. La relation avec H , G , C_p , C_v est hors contexte.

11- Exclusion du réchauffage dans le processus de combustion lien avec pétrole et lampe (hors contexte)

1é- Tentative d'explication du réchauffage et de son exclusion du processus de combustion par des données (R1) Les étudiants se réfèrent à une définition habituelle de la combustion.

13- Relation entre chaleur de combustion (R1), l'eau et un objet technique « four » tentative d'explication par « échange thermique » (R3)

Les questions sont ici aussi orientées par l'utilisation des connaissances du cours dans ce contexte plutôt que la compréhension de ce contexte dans sa spécificité puis la mise en relation avec les connaissances de cours.

III-3 Analyse des productions des élèves en réponse aux propositions de problèmes

Pour l'analyse des propositions de solution aux problèmes, formulées par les étudiants, nous déterminons trois niveaux de lecture par rapport au descriptif de l'usine :

le niveau académique sans relation avec le contexte de l'usine noté (Théorique T) ;

le niveau empirique correspondant à une description des objets technique sans relation avec la théorie (technique R) ;

le niveau de mise en relation entre théorie et objet, phénomène (R/T).

Groupe 1 problème 1 :

- Relation entre grandeurs (T)

« L'augmentation du volume entraîne une diminution de la pression et par suite une diminution de la température $PV = nRT \Rightarrow P = nRT / V$ »

Explication théorique du processus technique :

- relation entre savoir scientifique (énergie, température, volume) et la technique (chambre de transfert)

« La quantité d'énergie transférée de la chambre de transfert au four de séchage augmente avec l'augmentation du volume de la chambre de transfert pour la même température à la sortie de la chambre de transfert. »

- relation entre énergie, température, volume et « chambre de transfert » (niveau théorie R)

« Le processus de transfert de chaleur de la chambre de transfert au four est un processus isotherme, la température reste constante

$$\Delta Q = \Delta m C T$$

$$\Delta m = d (V2 - V1)$$

C = chaleur massique des gaz

m = masse des gaz chauds dans la chambre de transfert

d = densité des gaz est une constante

V_1 = volume initial de la chambre de transfert

V_2 = volume final de la chambre de transfert

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = d (V_2 - V_1) C T$$

$T = 850^\circ\text{C}$ est constante $\Rightarrow Q_2 - Q_1 > 0 \Rightarrow Q_1 < Q_2$ augmentation de l'énergie transférée

$$Q_2 = Q_1 + C d (V_2 - V_1) (T_1 - T_2) \gg$$

Relation entre effet thermique et température (niveau théorie T)

Dans cette deuxième proposition, le groupe propose une relation avec le chauffage de la chambre de transfert.

« Changement du combustible. Selon la loi de Kirchhoff, l'effet thermique

$$\Delta H = C_p \Delta Q / \Delta T$$

C_p est la capacité calorifique du combustible,

Pour une même température finale, on peut chercher un autre combustible dont l'effet thermique de la réaction de combustion est faible »

Groupe 1 – Problème 2

- proposition académique (niveau de la théorie T)

« On peut utiliser une base pour neutraliser l'acide sulfurique formé



Cette proposition est centrée sur la « corrosion ». Pour le groupe, l'essentiel vient du fait que le corps formé est un acide qui peut être neutralisé par une base comme dans une éprouvette, pour réduire ses effets corrosifs lié à l'acidité.

« On peut aussi changer de combustible. Trouver un autre combustible qui ne contient pas de soufre pour éviter la formation de l'acide sulfurique »

Groupe 2 – Problème 1

- Explication théorique du processus technique (R/T)

relation entre énergie et volume de gaz

« Il faut augmenter (agrandir) la chambre de transfert :

En augmentant la chambre de transfert, on augmente le volume des gaz, ce qui diminue la quantité de chaleur »

Le groupe ne tient pas compte de la conservation de l'énergie entre le phénomène de combustion et le transfert d'énergie. La quantité de chaleur produite ne dépend pas du volume de la chambre de transfert.

- proposition académique qui ne tient pas compte des objectifs de l'usine (niveau de la théorie)

« Diminution de la quantité de mazout pour qu'on ait une température moyenne au niveau de la chambre de combustion »

- proposition académique (niveau de la théorie T)

« Abaissement de la pression au niveau de la chambre de transfert en augmentant le volume de la chambre »

- Une solution technique (R)

« On peut mettre le système en contact avec l'extérieur pour réduire la température »

Groupe 2 - Problème 2

- Explication théorique

« Notre première solution est de chercher un autre diluant différent de l'eau pour éviter la formation de l'acide sulfurique »

Solution technique (R)

« Notre deuxième solution est de changer les parois du four par des corps qui ne réagissent pas avec l'acide sulfurique »

Groupe 3 - Problème 1

- proposition académique (niveau de la théorie T)

« Pour éviter les surpressions et le sur chauffage de la chambre de transfert, on doit changer le mazout pour le remplacer par un autre combustible qui brûle à une faible température (moins de chaleur) et qui peut sécher la bauxite avec un grand rendement »

- Explication théorique du processus technique (R/T)

« Il faut augmenter le volume de la chambre de transfert, pour avoir une faible température dans le four, l'énergie ne change pas »

Groupe 3 - Problème 2

- proposition académique (niveau de la théorie T)

« On peut jouer sur la chaleur latente de changement d'état pour empêcher la transformation de la vapeur d'eau en liquide

$\Delta HL = T dP / dT \Delta V$ »

Solution académique, explication insuffisante, la chaleur latente pour une même quantité de substance est constante.

Les problèmes proposés ont été formulés à partir des explications de l'expert, ce sont donc des problèmes réels à l'usine. Simplement formulés, le but de ces problèmes est de permettre aux étudiants dans la recherche de solution, de faire un raisonnement scientifique pouvant aboutir à une modélisation.

Problème 1 : modélisation de la quantité de chaleur produite dans la chambre de combustion, passant par la chambre de transfert et le processus de refroidissement par dilution. Les quantités de chaleur utilisées et perdues par dilution étant connues le calcul. Le but donc est de faire le choix entre plusieurs solutions possibles en fonction de la quantité de chaleur : augmenter les dimensions de la chambre de transfert, augmenter la dilution des gaz de combustion ou changer les parois.

Problème 2 : modélisation de la formation d'eau liquide dans le four et raisonnement entre les températures 70°C et 140°C dans le four autour des phénomènes d'évaporation et de vaporisation dans le four.

Mais étant donné qu'aucune consigne n'a été donnée, les réponses des étudiants se situent au niveau académique.

Le problème de corrosion lié à la formation de l'acide sulfurique est traité dans un cadre purement académique sans tenir compte du contexte : pour les un, nous sommes en présence d'un acide, il faut le neutraliser par une base, pour les autres, il faut éviter sa formation en changeant de combustibles.

Les étudiants ne sont donc pas parvenu jusqu'à l'étape de la modélisation.

IV - Analyse critique de la séquence d'enseignement

En laissant un libre choix d'observation aux étudiants lorsqu'ils sont confrontés à la réalité industrielle, nous constatons que les formulations des étudiants dans les questions, les descriptions et dans les propositions de solutions aux problèmes, traduisent les difficultés qu'ils ont à interpréter ce qu'ils observent directement en dehors du contexte universitaire.

Seules quelques propositions s'appuient sur le référent empirique que constitue le contexte industriel. Nous pouvons dire qu'il n'existe pas pour les étudiants, une mise en relation directe entre une pratique professionnelle et les déclinaisons qu'ils pourraient en faire à propos des savoirs académiques qu'ils auraient pu révéler dans cette pratique et qui sont relatifs à leur programme d'enseignement.

Pour obtenir cette attitude nous faisons l'hypothèse qu'un guidage initial permettrait d'orienter l'observation des étudiants. Ce travail d'analyse pourrait se concevoir à partir du moment où l'enseignant établit un « dispositif intermédiaire » qui donne accès aux étudiants à la double mise en relation allant du référent empirique au modèle mais aussi du modèle au référent empirique.

Chapitre V : Conclusions et perspectives

Nous avons cherché à utiliser l'usine de séchage de la bauxite de Kamsar pour pallier au caractère trop théorique et trop formel de l'enseignement de la thermodynamique en DEUG.

Les analyses présentées au chapitre 3 sur les descriptions possibles du fonctionnement de l'usine de Kamsar et les analyses des productions des étudiants lors des activités que nous avons mises en place dans un premier essai peuvent permettre d'avancer de nouvelles propositions.

Ces propositions devront prendre en compte les limites de l'utilisation de visite (s) d'usine pour faire progresser les étudiants dans leur acquisition du programme prescrit, élargir les types d'activités envisageables, prévoir une progressivité de tâches s'appuyant sur des documents préparés sur la base des documents techniques fournis par l'usine et diversifier les rôles possibles de l'enseignant.

En ce qui concerne les contenus (voir annexe 2-A), le schéma III-3 fait apparaître les éléments de contenu qui peuvent être abordés dans chacune des zones repérées (R1 à R5). L'identification des éléments de contenu relativement à une zone peut être guidée par une expertise thermodynamique reposant sur la compréhension du procédé, mais aussi tenir compte du recueil de données analysées dans le chapitre III, paragraphe III-2 et donc de ce qu'il est possible de prévoir de la lecture des étudiants, de leur essai de lien entre leurs observations, leurs tentatives d'interprétations et leurs connaissances scolaires.

Une entrée possible est celle issue de la liste des concepts éventuellement mobilisables indiquée au chapitre III, paragraphe I-2 (système, chaleur, état, conservation de l'énergie, pression partielle et totale, changement d'état équilibre de phase).

On pourrait ainsi distinguer des activités centrées sur les objets, centrées sur les grandeurs, centrées sur les aspects techniques, centrées sur les modèles.

A partir des données recueillies dans l'usine, des activités de modélisation pourraient être envisagées ainsi que des activités d'application de théories, avec comparaison entre résultats théoriques, résultats réels quantitatifs et discussion sur les causes de l'écart.

I- Des questions que l'enseignant peut poser à différents moments, reprendre éventuellement à d'autres moments

I-1- Des questions sur les observables

- Quels sont les différents objets constituant le dispositif de séchage de la bauxite ?

Peut-on repérer les appareils de mesure ? dans quelles unités sont-ils gradués ? quelles sont les limites d'indications du cadran ?

- Comment l'expert s'assure-t-il que sa production est conforme au cahier de charge (taux d'humidité de la bauxite sortante comprise entre 13% et 16%) ?

I-2- Des questions précises pour s'appropriier des termes

Qu'est ce qui est en équilibre thermique, qu'est ce qui est en équilibre de phase ? Dans quelle zone ? dans quelle partie de zone ?

Comment appliquer ici le concept de système ? au dispositif global ? à chaque élément du dispositif ? Le système défini est-il ouvert ? fermé ? isotherme ? isochore ? isobare ? adiabatique ?

Les bilans thermiques caractérisent de façon assez variable les différentes quantités de chaleur entrant ou sortant du dispositif global (chaleur fournie par..., contenue dans..., chaleur de..., chaleur sortant dans..., chaleur perdue en..., chaleur sortant avec...). Pouvez-vous discuter la validité de ces formulations, proposer des reformulations ?

Ce n'est bien sûr pas la réponse en tant que telle qui nous intéresse dans le cadre d'un apprentissage, mais les arguments qui sont avancés et qui peuvent être discutés.

Il n'est pas question non plus de se borner à une recherche d'information dans le discours de l'expert puisque nous avons vu que ses propos étaient parfois éloignés d'une lecture « thermodynamiquement correcte » même s'ils sont par ailleurs tout à fait efficaces.

I-3- Des questions pour attirer l'attention et susciter un questionnement

Pourquoi le bilan de masse distingue-t-il des quantités de matière qui ne sont pas séparées ? (masse d'eau dans les poussières, masse des poussières sèches par exemple) ?

L'expert indique des pressions négatives (- 4 pouces d'eau par exemple) ? quelle est la référence par rapport à laquelle il se situe pour repérer un écart ?

Pourquoi les matériaux qui entrent dans le dispositif ne sont-ils pas à la même température ?

Les quantités de chaleur sont indiquées avec parfois 9 chiffres significatifs. La précision d'évaluation des quantités est elle compatible avec ces données ?

La cheminée rejète-t-elle des fumées ou des gaz ?

Où se font les entrées d'air ? sont elles volontaires ou involontaires ?

Quelle est la différence de pression entre l'air entrant et les gaz contenus dans le système à cet endroit là ?

Quelle est la différence entre évaporation et vaporisation ?

A quoi est due la corrosion observable dans les zones R3 et R4 ?

Quelle est la composition du fuel en pourcentage d'éléments ? en pourcentage de différentes substances présentes dans un mélange ?

II - Des modélisations successives globales ou locales

Dans le chapitre III plusieurs schémas de l'ensemble du dispositif peuvent être objets d'élaboration par les étudiants moyennant un questionnement :

Quel schéma de principe du dispositif peut-on proposer faisant apparaître les flux croisés de matière ? Le questionnement devrait conduire à l'élaboration du schéma III-5 du chapitre III, avec des productions individuelles discutées collectivement sous le contrôle de l'enseignant.

Que se passe-t-il en amont et en aval du four sécheur dans le circuit gaz chauds ? Ce questionnement devrait conduire au schéma III-3 du chapitre III.

Quels sont les problèmes techniques que ce dispositif complet présente ? comment sont ils résolus (ou non résolus) ? ce questionnement devrait conduire au repérage des objets ou dispositifs annexes (tels que circuit de préchauffage... pour que le mazout reste suffisamment fluide, ventilateur de tirage,... pour extraire les fumées à la sortie du four-sécheur, tamis séparateur de poussières entre le four sécheur et la cheminée pour diminuer la pollution).

Qu'est ce qui est fait des poussières ? (le bilan de matière fait apparaître une quantité importante) ; y a-t-il récupération de chaleur pour le préchauffage ?

Quelles sont les quantités de matière entrant et sortant du système global ? peut on faire des bilans par zone ? repérer les lieux où se font ces entrées et ces sorties ; vérifier que ce qui est constant par principe l'est bien dans les bilans. Repérer ce qui est introduction volontaire à des fins de régulation et ce qui ne l'est pas (infiltrations, fuites).

Qu'est ce qui est appelé « air d'infiltration » qui justifie sa séparation de l'air total entrant » dans le système ?

Quelles sont les quantités de chaleur entrant et sortant du système global ? peut on faire des bilans par zone ?

Peut-on repérer les lieux où se font ces entrées et ces sorties ? Comment vérifier que ce qui est constant par principe l'est bien dans les bilans. Qu'est ce qui est d'ordre 1, qu'est ce qui est d'ordre deux quantitativement ?

Quelles sont les quantités d'eau présentes dans les différents éléments du dispositif et quelles sont les valeurs des grandeurs d'état caractéristiques en chaque lieu ? Peut-on réaliser un schéma en utilisant les données quantitatives du bilan de masse ? Ce questionnement devrait conduire à un schéma similaire au schéma III-6 du chapitre III.

De façon plus ponctuelle : que peut on imaginer à l'intérieur du four sécheur, compatible avec les données disponibles ? cette question peut renvoyer à une recherche documentaire sur d'autres dispositifs analogues de séchage ou de torréfaction par exemple, et/ou à la construction de maquette sommaire permettant de se représenter les flux croisés de matière.

Y a-t-il dans le four sécheur, équilibre thermique ? équilibre de phase ? en précisant les éléments pris en compte pour en juger. A quelle échelle (ponctuelle ? locale ? globale ?)

Quelle comparaison peut-on faire entre une combustion dans un calorimètre (manipulation effectuée en TP) et la combustion qui a lieu dans l'usine ? classer les éléments de comparaison selon qu'ils portent sur les objets, les dispositifs techniques, les conditions de déroulement du phénomène, les descripteurs thermodynamiques disponibles, pertinents.

III – Application de théories, contextualisation

Il pourrait y avoir des tâches relevant d'une démarche qualitative et d'autres d'une démarche quantitative.

- Identifier les phénomènes principaux et les phénomènes secondaires (parasites ?) dans chacune des zones Ri. Distinguer les phénomènes physiques et les phénomènes chimiques qui ont lieu dans le dispositif.

- Quelles sont les quantités de chaleur entrant ou sortant qui sont formalisables par une relation du type $Q = \sum m_i c_i \Delta T$, par une relation du type $Q = \Delta U$? du type $Q = \Delta H$, autre ? préciser les relations : quelles sont les masses qu'il faut prendre en compte ? quelles sont les capacités calorifiques en jeu (schémas III-7 et III-8)?

- Connaissant le débit du circuit de bauxite, le pourcentage moyen d'eau prélevée et les températures et pression dans le four sécheur, de quelles données a-t-on besoin pour calculer la quantité de chaleur nécessaire ? quelles approximations faire ? comparer cette quantité de chaleur calculée à la quantité de chaleur effectivement dépensée pour ce résultat.

La combustion du mazout est-elle complète ou incomplète ?

- Comment modéliser la chaudière et les substances qu'elle contient pour calculer la température maximum compte tenu des données numériques disponibles ? comparer à la température mesurée.

- Comment expliquer que la régulation par entrée d'air dans la chambre de transfert entraîne une plus grande condensation d'eau dans le four sécheur ?

- Comment expliquer qu'il y ait à la fois déshydratation de la bauxite et condensation de l'eau dans le four sécheur ?

- Comment expliquer : qu'il y ait corrosion en R3 et R4 et pas en R2 ?

- Ecrire les réactions chimiques qui ont lieu au cours du processus.

IV – Les attendus et les limites

Ces propositions ne sont actuellement que des idées pour construire des tâches et inventer des modalités de gestion de classe. De nombreux travaux peuvent aider à construire ces tâches et à préciser le rôle de l'enseignant.

Quel est l'impact de ces activités et comment peut-on articuler ce type d'activité avec d'autres sans doute plus classiques mais nécessaires pour faire le tour du programme prescrit ?

Ces propositions relèvent d'un possible épistémologique. Elles seront à tester sur deux aspects, le possible psychologique et le possible pédagogique. Dans quelles mesures les étudiants sont ils prêts à entrer dans des modes d'activité qui ne leur sont pas familiers ?

Dans quelle mesure l'enseignant est-il prêt à changer de rôle ? dans quelle mesure les contraintes extérieures permettent-elles les évolutions ?

Notre recherche met en évidence des ébauches de mise en relation entre référent empirique et modèles présents dans l'enseignement, cependant les confusions entre des relations induites par la construction de modèle ou l'application de modèles soulignent la nécessité d'un travail de médiation qui correspond au schéma de Martinand (1995).

Dans leurs productions, la majorité des étudiants ne construit pas de relation allant du référent empirique au modèle. Les relations que nous mettons en exergue concernent essentiellement la recherche d'application de modèles vers le référent empirique. Cette relation est incomplète puisqu'ils ne recherchent, n'observent et n'utilisent du référent empirique que ce qui « proviendrait » de leur connaissances théoriques. En contact avec le référent industriel, les étudiants ont tendance à décontextualiser la situation didactique qui leur est proposée.

L'utilisation d'un référent empirique comme dispositif intermédiaire de formation devrait ainsi tenir compte de l'élaboration distinguée des deux relations : construction de modèle et application de modèle.

Le travail présenté ici sur l'exemple de l'utilisation de l'usine de Kamsar aurait alors un enjeu plus large que le seul apprentissage de la thermodynamique en DEUG et contribuerait à renouveler les pratiques pédagogiques dans l'enseignement de façon plus générale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAGAM, A. (1986) Théorie ou expérience : un débat archaïque In HAMBURGER, J. et al. (Eds) *La philosophie des sciences aujourd'hui*, (pp 21-37) Paris : Gautier Villars

BARLET, R., & MASTROT, G. (2000). L'algorithme-refuge, obstacle à la conceptualisation. L'exemple de la thermochimie en premier cycle universitaire. *Didaskalia*, 17, 123-159.

BEAUFILS, D. (1992). La simulation numérique comme élément d'une démarche expérimentale In actes du colloque. *L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants*. CREPI Paris : INRP-EPI.

BEAUFILS, D. (1998). Quelques éléments de réflexion à propos des exercices à caractère expérimental In *Activités expérimentales des élèves en physique-chimie : quel enjeu d'apprentissage ?* (pp.101-115). Caen : C.N.D.P.

COQUIDE, M. (2003). Activité expérimentale et perspectives curriculaires In C.Larcher., & M.Goffard (Eds), *L'expérimental dans la classe : enjeux, références, fonctionnements, contraintes* (pp.85-107). Paris : INRP.

DAVOUS, D., FEORE, M.C., & LÉVÊQUE, T. (1999). Transformation d'un système. Le modèle de la réaction chimique, *Bulletin de l'union des physiciens*, 817, 3-13.

DIALLO, A. (2000). *Des pratiques sociales à la classe : élaboration des connaissances de chimie en classe*. Thèse de doctorat en didactique des sciences et de la technologie. ENS. Cachan.

DUREY, A. & MARTINAND, J.L. (1994). Un analyseur pour la transposition didactique entre pratiques de référence et activités scolaires. In. G. Arzac. et al. (Eds), *La Transposition didactique à l'épreuve* (pp.73 –104). Paris : La pensée sauvage.

EVARD, N. (2001). *Objectivation d'un phénomène chimique : exemple de l'électrolyse*. Thèse de doctorat en didactique des sciences et de la technologie. ENS. Cachan.

FOUREZ, G., & al. (1997). *Nos savoirs sur nos savoirs. Un lexique d'épistémologie pour l'enseignement*. Bruxelles : De Boeck.

GANARAS, K. (1998). *La conceptualisation des équilibres chimiques*. Thèse de doctorat en didactique des sciences et de la technologie. ENS. Cachan.

GOFFARD, M. (1994). Des programmes de chimie à leur mise en œuvre. *Didaskalia*, 3, 129-137.

GREA, J., & VIARD, J. (1995). From Language to concept appropriation in Physics two Cases studies In C. Bernadini, C Tarsini et M, Vincentini (Eds), *Proceedings of the International conference : Thinking Physics for Teaching, Roma 1994* (pp .97-106). New York : Plenum Press.

HACKING, I. (1990) *concevoir et expérimenter*, Paris: Christian Bourgeois

HARRE (1981) *Gréat scientific experiments*. Oxford. Oxford University press.

HULIN, M. (1992). *Le mirage et la nécessité, pour une redéfinition de la Formation scientifique de base*, Ed. Presse de l'Ecole Normale Supérieure et Palais de la Découverte. Paris

HULIN, N. (1991). La constitution et les début de la commission Lagarrigue (1969-1971) ou Du rôle moteur des sociétés savantes. In *Bulletin de l'Union des Physiciens*, N° 730.

JOUIN, B. (2000). *Problème de l'enseignement des sciences physiques en lycée professionnel, dans leur fonction de « discipline de service » par rapport à la technologie dans le domaine de la mécanique automobile*. Thèse de doctorat en didactique des sciences et de la technologie. ENS Cachan.

JOACHIM, S.H. (1978). "Energie" et "dégradation de l'énergie" aspects complémentaires des processus énergétiques : une introduction progressive au concept d'énergie. In *Nouvelles tendances de l'enseignement de la chimie*. (pp 49). Paris : UNESCO. volume V.

KATTMAN, U., & al. (1995). A model of Educational Reconstruction. Paper presented at the NARST *Annual Meeting*. San Fransisco.

KESIDOU. S., & DUIT, R. (1993). Students' conceptions of the second Law of thermodynamics, An interpretative Study, *Journal of Recherche in Science teaching*, vol 30, 1, 85-106.

LARCHER, C. (1994) . Point de vue à propos des équilibres chimiques *Aster*, 18, 57-62.

LARCHER, C. (1994). Etude comparative des démarches de modélisation. Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation ? In. J.L. Martinand (Eds), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : LIREST.INRP.

LARCHER, C. (1996). La physique et la chimie, sciences de modèles. In. J.Tousaint. (Eds), *Didactique appliquée de la physique-Chimie*. Paris : Nathan.

LARCHER, C. (1998). Des TP différents pour des enjeux différents. In *Activités expérimentales des élèves en physique-chimie :Quels enjeux d'apprentissage ?* (pp.7-26) Caen : C.N.D.P.

LARCHER, C., CHOMAT, A., & MEHEUT.M. (1990). A la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états. *Revue française de pédagogie* , 93, 51 – 61.

LARCHER, C., CHOMAT, A., & MEHEUT.M (1992). Modèle particulière et démarche de modélisation In. J.L. Martinand, (Eds), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Equipe INRP/LIREST (pp.169). Paris : INRP

LAUGIER, L. et DUMON, A. (2003) résolution de problème et pratique expérimentale : analyse du comportement des élèves en début de seconde In *Chemistry Education :Recherch and practice* Vol 4, 3, 335-332.

LEMEIGNAN, G., & WEIL-BARAIS, A. (1990). *L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie*, Rapport de fin de contrat. Paris : LIREST INRP.

LEMEIGNAN, G., & WEIL-BARAIS, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris : Hachette.

MARTINAND, J.L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.

MARTINAND, J.L, ASTOLFI, J.P, CHOMAT,A., DROUIN, A.M , GENZLING, J.C, LARCHER, C. LEMEIGNAN, G. MAHEUT, M. RUMELHARD, G., & WEIL-BARAIS. A. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation*. Paris : INRP.

MARTINAND, J.L. , GENZLING, J.C., LARCHER, C., ORANGE, C., RUMELHARD, G. WEIL-BARAIS, A., & LEMEIGNAN, G. (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : LIREST-INRP.

MARTINAND, J.L.. (1994). La didactique des sciences et de la technologie et la formation des enseignants, *Aster*,19, 61-75.

MARTINAND, J.L, (1995). Introduction à la modélisation. Séminaire de didactique des disciplines technologiques 1994-1995. LIREST ENS Cachan, 17.

ORANGE, C. (1996). *Problème de modélisation en biologie. Quels apprentissages pour le lycée ?* Paris, Presses Universitaires de France.

ORANGE, C. (2003). Investigations empiriques, construction de problèmes et savoirs scientifiques C. Larcher., & M. GOFFARD (Eds). *L'expérimental dans la classe, enjeux, références, fonctionnements, contraintes*.(pp.59-84). Paris : INRP.

PRIGOGINE, I., & STENGERS, I. (1979). *La nouvelle alliance. Métaphore de la science*. Paris : Ed. Gallimard.

ROGALSKI, J. (1994.) Modélisation d'un savoir de référence et transposition didactique dans la formation professionnelle de haut niveau. In Arsac. G.& al.(Eds), *La Transposition didactique à l'épreuve* (pp.115 –125). Paris: *La pensée sauvage* .

RICHARD, E. (2000). A teaching toolbox for thermodynamics chemical Engineering Dept the University of AKRON

ROZIER, S., & VIENNOT, L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 13, 2, 159 – 170

ROBARDET, G., & al. (1997). *Eléments de didactique des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France

ROMAN, U.S., & PFLUG, A. (1978). Entropie et information In *tendances nouvelles de l'enseignement de la physique* (pp39). UNESCO, volume IV

SERE, M. G. (1993). *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans en liaison avec la notion de pression, et propositions de stratégie pédagogique pour en faciliter l'évolution*. Thèse de doctorat. Université Paris 6.

TIBERGHIEU, A. (1985). Heat and temperature, In R. Driver et al (Eds) *Children Ideas in sciences*. Milton Keynes: Open University press. (pp 52 –84)

WEIL-BARAIS, A. (1994) Les apprentissages en sciences physiques. In G.Vergnaud. (Eds), *Apprentissages et didactiques : où en est on ?* (pp99-126). Paris : Hachette Education

WRIGT, P.(1978). Contre l'enseignement de la thermodynamique au lycée. In *Nouvelles tendances de l'enseignement de la chimie*. Paris : UNESCO. volume V

LES OUVRAGES

ARNAUD, P. (2001). *Chimie physique (premier cycle)* 5^e édition Paris Dunod

BERNARD, M., & BUSNOT, F. (1996). *Usuel de chimie générale et minérale*. Paris : Dunod.

BOREL, L. (1991). *Thermodynamique et énergétique*. 3^e édition, volume 1. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires

GRUGER, A. (1997). *Thermodynamique chimique* 2^e édition Paris Dunod

KIREEV, V. (1975). *Cours de chimie physique* Moscou : MIR.

LEMARCHAND , H. & al. (1999). *Thermodynamique de la chimie* Paris : Hermann

MALLET, J.C. (1995). *Cours de chimie 1^e année MPSI-PTSI/PCSI*. Paris Dunod

OUAHES, R. (1995). *Cours de chimie physique : enseignement supérieur*. Paris : Ellispes.

PRIGOGINE, I. (1968). *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*. Paris : Dunod.

PRIGOGINE, I., & DILIP, K. (1999). *Thermodynamique : des moteurs aux structures dissipatives*. Paris : ODILE JACOB.

PROVOST, P., & al.(1984). *Thermodynamique physique et chimique : notions de flux et d'irréversibilité*. Paris : Fernand Nathan.

RICHET, P. (2000). *Les bases physiques de la thermodynamique et application à la chimie* Paris : Belin.

PROGRAMME

Programme de thermodynamique (septembre 1998). Centre préparation commun (CPC).
Institut polytechnique – Université de Conakry. R. Guinée.