



HAL
open science

Diélectrophorèse. Electrodécantation continue d'émulsions à faible concentration d'eau dans des hydrocarbures

Pascal Vedel

► **To cite this version:**

Pascal Vedel. Diélectrophorèse. Electrodécantation continue d'émulsions à faible concentration d'eau dans des hydrocarbures. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1976. Français. NNT: . tel-00880417

HAL Id: tel-00880417

<https://theses.hal.science/tel-00880417>

Submitted on 6 Nov 2013

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

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

N° d'ordre : 5 C.I.

THESE

présentée par

Pascal VEDEL
Ingénieur Civil des Mines

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR
SPECIALITE CHIMIE MINERALE PHYSIQUE



DIELECTROPHORESE

ÉLECTRODÉCANTATION CONTINUE D'ÉMULSIONS
À FAIBLE CONCENTRATION D'EAU DANS DES HYDROCARBURES



Soutenue à Saint-Etienne le 28 juin 1976, devant la Commission d'Examen

MM. M. CHEMLA

Président

F. LANCELOT

M. SOUSTELLE

P. TRAMBOUZE



Examineurs

N° d'ordre : 5 C.I.

THESE

présentée par

Pascal VEDEL
Ingénieur Civil des Mines

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR
SPECIALITE CHIMIE MINERALE PHYSIQUE



DIELECTROPHORESE

ÉLECTRODÉCANTATION CONTINUE D'ÉMULSIONS
À FAIBLE CONCENTRATION D'EAU DANS DES HYDROCARBURES



Soutenue à Saint-Etienne le 28 juin 1976, devant la Commission d'Examen

MM. M. CHEMLA

Président

F. LANCELOT

M. SOUSTELLE

P. TRAMBOUZE

} *Examineurs*



ERRATA-ADDENDA

p. II.1 § 2.1.1. ligne 10

lire " V_1 et V_2 sont respectivement le potentiel à l'extérieur et à l'intérieur de la goutte".

p. II.4 § 2.1.2. ligne 7

$$\text{lire } V = \frac{1}{2} k \text{ Log } \left(1 - 2\frac{r}{x} \cos \phi \sin \theta + \frac{r^2}{x^2} \cos^2 \phi \right)$$

p. II.6 § 2.2. dernière ligne

$$\text{ajouter "avec } K = 4\pi\epsilon_0\epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \left(\frac{1}{\text{Log } \frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{int}}}} \right)^2$$

p. II.8 § 2.2.3. ligne 3

lire " u_z " au lieu de " v_z "

p. II.8 § 2.2.3. ligne 6

$$\text{lire } \frac{4\pi a^2}{3K'} \rho_2$$

p. II.10 ligne 5

$$\text{lire } \epsilon_e = \epsilon_1 \left(1 + 3W_0 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right)$$

p. II.13 § 2.3.3. avant dernière ligne

$$\text{lire } \{-V|R(r_0, d_0, t, x), x| + v(\rho, x)\}$$

p. II.19 § 2.3.4.

$$\text{lire } n'_i = n(i, x, t) + \left(- \sum_{j=0}^{\infty} K_{i,j} n(i, x, t) n(j, x, t) \dots \right)$$

p. III.9

$$\text{lire "Soit } v(r) = K r^2"$$

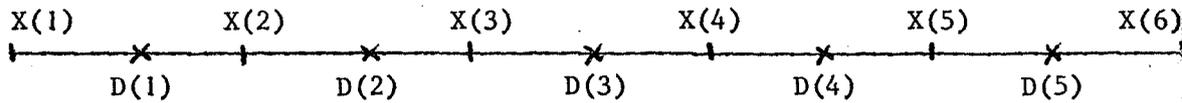
p. A.II.1 ligne 12

lire "volume Vg" au lieu de "rayon Vg"

p. A.IV.11

il manque deux figures

1° exemple



2° exemple

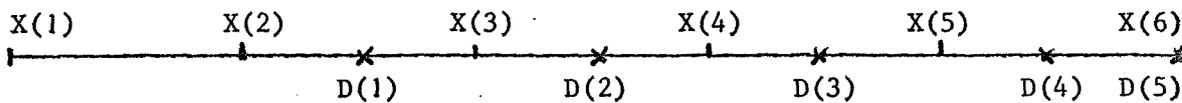


figure 18

Il manque l'échelle des abscisses 1000 ppm_{poids} = 8,5 cm

figure 19 et figure 20

lire "Concentration initiale de l'émulsion 1900 ppm"

p. IV.2 et IV.3 § 4.1.

$$\sigma_2^2 = m\sigma_{1,2}^2 - \sigma_1^2 \text{ et non } \sigma_2^2 = \sigma_{1,2}^2 - \sigma_1^2$$

dans la 4° formule p. IV.2.

Ceci entraîne:

$$\sigma_2^2 = 351 \text{ ppm}^2 \text{ et non } 134 \text{ ppm}^2$$

en haut de la page IV.3.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

Directeur : M. Lucien VIELLEDENT

Directeur des Etudes : M. Jacques BOISSE

PROFESSEURS DE 1ère CATEGORIE

MM. COINDE Alexandre	Gestion
GOUX Claude	Métallurgie
LEVY Jacques	Métallurgie
RIEU Jean	Mécanique-Résistance des Matériaux
SOUSTELLE Michel	Chimie

PROFESSEUR ASSOCIE DE 1ère CATEGORIE

M. FORMERY Philippe	Mathématiques Appliquées
---------------------	--------------------------

PROFESSEURS DE 2ème CATEGORIE

MM. GUIBOUD-RIBAUD Serge	Informatique
LOWYS Jean-Pierre	Physique
TOUCHARD Bernard	Physique Industrielle

PROFESSEURS ASSOCIES DE 2ème CATEGORIE

MM. FONTEILLES Michel	Géologie
SEROR Denis	Informatique

DIRECTEUR DE RECHERCHE

M. LESBATS Pierre	Métallurgie
-------------------	-------------

MAITRES DE RECHERCHE

MM. BISCONDI Michel	Métallurgie
BOOS Jean-Yves	Métallurgie
Mlle FOURDEUX Angéline	Métallurgie
MM. LALAUZE René	Chimie
LANCELOT Francis	Chimie
LE COZE Jean	Métallurgie
THEVENOT François	Chimie
TRAN MINH Canh	Chimie

DIRECTEURS DE RECHERCHE (au sens des arrêtés du 16 avril 1974)

MM. GUIRALDENQ Pierre	Métallurgie
KOBYLANSKI André	Métallurgie
GUILHOT Bernard	Chimie
THOMAS Gérard	Chimie
COUEIGNOUX Philippe	Informatique



A ma femme,

A mes enfants

Ce travail a été effectué au Centre de Chimie-Physique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Que Monsieur le Professeur CHEMLA de l'U.E.R. Pierre et Marie Curie qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury veuille bien trouver ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

J'exprime mes remerciements à Monsieur le Professeur SOUSTELLE Directeur du Centre de Chimie-Physique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne pour sa participation au jury.

Que Monsieur P. TRAMBOUZE Directeur au C.E.D.I.-I.F.P. à Solaize qui a accepté de faire partie du jury après avoir suivi mes travaux veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

A Monsieur F. LANCELOT qui a dirigé avec bienveillance la majeure partie de mon travail vont toute ma reconnaissance et mon amitié.

Je tiens enfin à remercier l'Institut Français du Pétrole dont l'aide matérielle m'a permis de poursuivre ces recherches et plus particulièrement Monsieur EUZEN Ingénieur à l'I.F.P.

PLAN

Introduction

I - BIBLIOGRAPHIE

1.1 - Rappels théoriques et définitions

1.2 - Coalescence dipolaire

- *Définition du temps de relaxation d'un diélectrique*
- *Mécanisme de la coalescence dipolaire et généralités*
- *Etude théorique de la coalescence dipolaire*
- *Notion de champ critique*
- *Appareils de coalescence dipolaire*

1.3 - Electrocoalescence en champ continu : "electrofining"

- *Electrocoalescence en champ continu uniforme*
- *"Electrofining" en champ non uniforme*

1.4 - Diélectrophorèse

- *Description du mécanisme*
- *Autres résultats*

II - ETUDE THEORIQUE DE LA DIELECTROPHORESE

2.1 - Polarisation d'une goutte dans un champ électrique

- *Goutte sphérique dans un champ uniforme*
- *Goutte sphérique dans un champ à symétrie cylindrique*
- *Polarisabilité d'une goutte en cas de déformation*

2.2 - Mouvement d'une goutte dans la cellule de diélectrophorèse

- *Forces agissantes sur la goutte*
- *Mouvement horizontal d'une goutte*
- *Mouvement vertical d'une goutte*
- *Trajectoire d'une goutte*

2.3 - Modèles de rendement théorique de la diélectrophorèse

- *Hypothèses communes au trois modèles*
- *Modèle sans interaction des gouttes*
- *Modèle tenant compte du choc des gouttes*
- *Modèle tenant compte de la coalescence dipolaire*

III - MONTAGE EXPERIMENTAL ET CARACTERISTIQUES DE L'EMULSION

3.1 - L'appareillage et les produits

3.1.1 - La cellule de diélectrophorèse

- *Description*
- *Limitation du courant électrique*

- 3.1.2 - L'appareillage électrique
- 3.1.3 - L'émulsion
- 3.1.4 - Produits utilisés et température
- 3.1.5 - Réentrainement de gouttes d'eau
- 3.2 - Détermination des caractéristiques de l'émulsion
 - 3.2.1 - Dosage de la teneur en eau non dissoute d'une émulsion
 - *Principe de la méthode*
 - *Mise en oeuvre de la méthode de dosage*
 - 3.2.2 - Répartition granulométrique de l'émulsion
 - *Relation entre α (a) et la concentration*
 - *Expériences et résultats*

IV - RESULTATS ET VERIFICATION EXPERIMENTAUX

- 4.1 - Essai hydraulique de la cellule et dispersion des résultats
- 4.2 - Résultats expérimentaux
 - *Résultats sur la cellule de type I*
 - *Résultats sur la cellule de type II*
- 4.3 - Etude de la validité des différents modèles
 - *Détermination des paramètres du modèle avec coalescence dipolaire*
 - *Comparaison des modèles et résultats*

Conclusion

majuscules

- Annexes I - Comportement d'une goutte diélectrique dans un champ uniforme
- II - Diélectrophorèse et agitation thermique
- III - Quelques valeurs de la force de diélectrophorèse
- IV - Ordinogrammes des modèles de rendement
- V - Courbe d'étalonnage du dosage de l'eau
- VI - Commentaires sur les résultats du modèle

Figures

Bibliographie

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES

a	rayon d'une goutte
$c(t)$	concentration au temps t
$c(L)$	concentration à une distance L de l'interface
d	distance entre deux gouttes
e	excentricité
E_0	champ appliqué
E_1	champ régnant dans la phase continue
E_2	champ régnant dans une goutte
F_e	force de diélectrophorèse
F_g	force de pesanteur
F_r	force résistante
g	accélération de la pesanteur
K	constante intervenant dans F_e
K'	constante intervenant dans F_r
K''	constante intervenant dans F_g
$K_{i,j}$	constante de vitesse d'agglomération
L	distance à l'interface
\mathcal{M}	moment dipolaire d'une goutte
$n(r)$	nombre de gouttes de rayon r par unité de volume
n_i	nombre de gouttes de la classe i par unité de volume
P	polarisation
Q	débit d'émulsion
r_{ext}	rayon de l'électrode extérieure
r_{int}	rayon de l'électrode intérieure
r_{sup}	rayon maximum des gouttes de l'émulsion
T	tension interfaciale
t	temps
\vec{u}	vitesse d'une goutte
u_x	u_x vitesse horizontale d'une goutte
u_z	u_z vitesse verticale d'une goutte
$u_f(x)$	vitesse du fluide à la distance x de l'axe

V_0	potentiel du champ appliqué \vec{E}_0
V_1	potentiel de \vec{E}_1
V_2	potentiel de \vec{E}_2
v_i	volume d'une goutte de la classe i
v_f	vitesse d'écoulement du fluide
$v(r,x)$	vitesse de diélectrophorèse d'une goutte de rayon r
W_0	teneur en eau (volume)
x	distance à l'axe de la cellule

Lettres grecques

α	polarisabilité
$\alpha(a)$	fonction définissant la taille des gouttes
ΔV	différence de potentiel entre les électrodes
ϵ	constante diélectrique relative
ϵ_1	constante diélectrique relative de la phase continue
ϵ_2	" " " de la phase dispersée
ϵ_0	" " absolue
μ_1	viscosité dynamique de la phase continue
μ_2	" " de la phase dispersée
ρ_1	masse volumique de la phase continue
ρ_2	" " de la phase dispersée
σ	conductivité
τ	temps de relaxation d'un diélectrique.

INTRODUCTION

L'essentiel de ce travail est consacré à l'électrodécantation d'une émulsion de faible concentration sous l'effet d'un champ électrique non uniforme; nous y étudions en particulier la diélectrophorèse dont les effets sont connus depuis longtemps, mais qui n'a jamais vraiment été mise en application.

Dans le premier chapitre nous présentons les différents moyens d'action d'un champ électrique sur une émulsion ainsi que les études qui en ont été faites.

Le deuxième chapitre est consacré plus spécialement à l'étude théorique de la diélectrophorèse et à la description de modèles.

Le montage expérimental et les méthodes permettant de caractériser l'émulsion sont décrits dans le chapitre III.

Les résultats obtenus pour le traitement d'une émulsion d'eau dans un hydrocarbure sont exposés dans le IVème chapitre et sont interprétés à l'aide des modèles précédemment proposés.

Enfin, pour des raisons d'allègement du texte nous avons préféré placer en annexes les développements de calculs et les résultats intéressants, mais moins directement liés à notre sujet.



I - BIBLIOGRAPHIE

1.1 - Rappels théoriques et définitions

Considérons une émulsion constituée d'une phase continue de constante diélectrique relative ϵ_1 et d'une phase dispersée de constante ϵ_2 supérieure à ϵ_1 et plaçons la dans un champ électrique \vec{E} . Les gouttelettes se polarisent et acquièrent un moment dipolaire \vec{M} . Suivant les conditions expérimentales, trois types de phénomènes provoquant le cassage de l'émulsion peuvent alors se produire.

Des gouttelettes voisines s'attirent sous l'effet de forces créées par la polarisation induite par le champ : elles se rapprochent et coalescent. La taille moyenne des gouttes augmente alors et une décantation accélérée de la phase dispersée s'ensuit. C'est la *coalescence dipolaire*.

Les gouttes peuvent acquérir des charges électrostatiques nettes et se mouvoir sous l'effet du champ : en outre ces charges créent des micro-distorsions du champ qui contribuent elles aussi à faire bouger les gouttes. Ces mouvements augmentent la probabilité de chocs entre gouttes et favorisent donc le grossissement de leur taille ; ce phénomène est appelé "*electrofining*".

Remarque : le terme "electrofining" est un néologisme construit par analogie avec "electrostatic refining" et inventé par L.C. WATERMAN et la société PETRECO. Il n'a pas d'équivalent en français.

Enfin la *diélectrophorèse* consiste à faire mouvoir les gouttes polarisées par l'application d'un champ non uniforme et à les rassembler en certains points privilégiés, où elles coalescent et décantent.

1.2 - Coalescence dipolaire

1.2.1 - Définition du temps de relaxation d'un diélectrique

Pour introduire la notion de temps de relaxation d'un diélectrique, nous allons exposer un calcul effectué par H.A. POHL (1).

Calculons la densité de charge libre ρ_f à l'intérieur d'un milieu linéaire, isotrope et homogène de constante diélectrique relative ϵ et de conductivité σ .

Le vecteur déplacement électrique \vec{D} et la densité de courant J_f créés par les électrons libres s'écrivent respectivement :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E}$$

D'après la théorie de Maxwell.

$$\rho_f = \text{div } \vec{D}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\text{Or } \text{div} (\text{rot } \vec{H}) = \text{div} \left(\vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0$$

$$\text{Soit } \text{div} \left(\frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} D \right) + \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = 0$$

$$\text{Soit } \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} \rho_f + \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = 0$$

$$\text{Donc par intégration } \rho_f = \rho_{f0} e^{-\sigma t / \epsilon \epsilon_0} = \rho_{f0} e^{-t/\tau}$$

ρ_{f0} étant la densité de charge libre à l'instant zéro et $\tau = \epsilon_0 \epsilon / \sigma$ la constante de temps de relaxation du diélectrique.

Cette constante de temps est donc une mesure de la vitesse d'apparition ou de disparition d'une densité volumique de charges libres dans un milieu diélectrique.

C'est l'équivalent de la constante de temps d'un circuit électrique comprenant une résistance et un condensateur.

1.2.2 - Mécanisme de la coalescence dipolaire et généralités

Si nous plaçons dans un champ électrique uniforme une émulsion dont la phase continue a un temps de relaxation faible c'est-à-dire, une conductivité relativement forte -du pétrole brut par exemple- les gouttes peuvent acquérir des charges électrostatiques nettes par contact avec les électrodes, mais elles sont dissipées avant que les gouttes n'aient pu se mouvoir sur une distance appréciable. Donc, seuls les effets de polarisation sont à prendre en compte.

Les gouttes polarisées de l'émulsion se placent suivant les lignes de champ : les charges induites de signes opposés de deux gouttes deviennent adjacentes. La force électrostatique qui existe alors entre ces gouttes les rapproche en les déformant faisant diminuer ainsi l'épaisseur du film de phase continue qui les sépare. Quand cette épaisseur atteint une valeur critique le film se rompt et la coalescence se produit. Au cours de cette coalescence il peut y avoir formation d'une goutte plus petite appelée goutte fille.

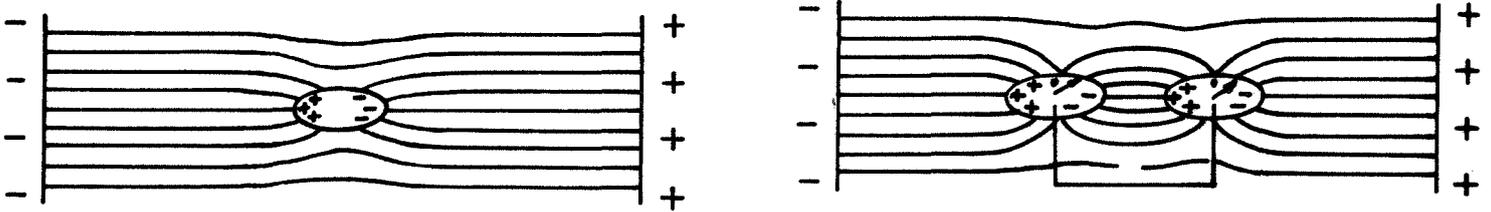


Schéma n° 1 (d'après L.C. WATERMAN)

Dans un champ électrique une goutte acquiert un dipole induit, donc deux gouttes s'attirent mutuellement.

Les études de la coalescence d'une goutte à une interface (2) et de la coalescence entre gouttes (3) ont montré que la présence du champ électrique augmentait la vitesse de drainage du film ainsi que la valeur de l'épaisseur critique par rapport aux valeurs prises par ces variables en l'absence de champ. De plus, l'apparition d'une goutte fille est beaucoup plus rare en présence d'un champ.

Différents modèles de déformation des gouttes au cours de leur rapprochement ont été proposés (4) : ils permettent d'explicitier mathématiquement le phénomène de coalescence dipolaire.

D'autre part L.C. WATERMAN (5, 6) a calculé une valeur approchée de la force d'attraction existant entre deux gouttes de taille égale.

$$F = kE^2 a^2 \left(\frac{a}{d}\right)^4$$

a rayon de la goutte

d distance entre deux gouttes

Pour une émulsion monodispersée -hypothèse faite pour le calcul de la force- le rapport a/d est proportionnel à la puissance $1/3$ de la concentration en phase dispersée W_0 donc :

$$F = kE^2 a^2 (W_0)^{4/3}$$

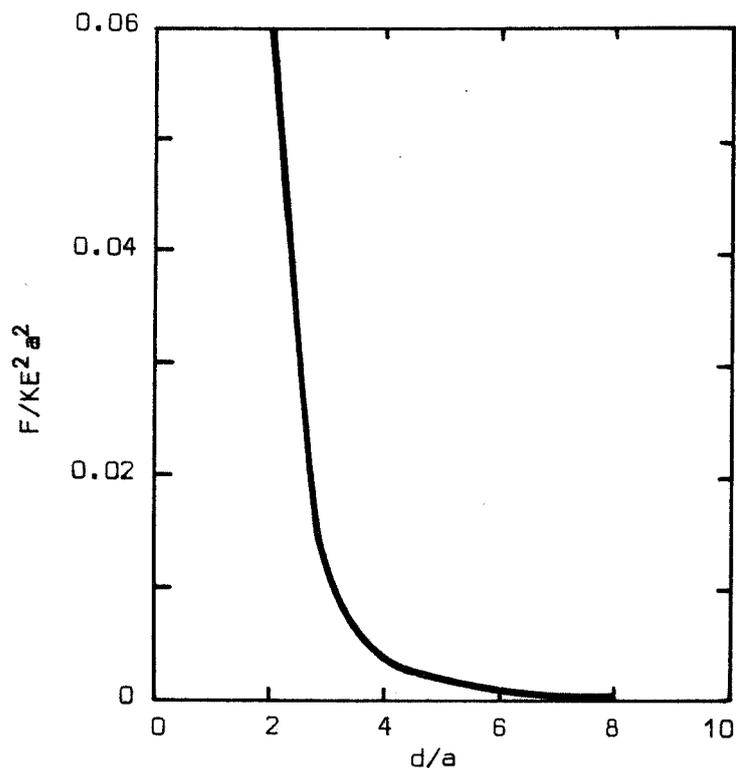


Schéma n° 2

(d'après L.C. WATERMAN)

La force d'attraction entre deux gouttes diminue fortement quand la distance entre leur centre s'accroît

Bien que cette expression ne constitue qu'une valeur approchée de la force d'attraction -elle n'est valable que si $a \ll d$ - on peut en déduire les caractéristiques de la coalescence dipolaire.

- La force, et donc la vitesse de coalescence, diminue fortement quand la teneur en phase dispersée décroît ; en deçà d'une certaine teneur que L.C. WATERMAN fixe à 1000 ppm le phénomène ne se produit pratiquement plus. Les appareils industriels de dessalage des pétroles bruts travaillent en général aux alentours de 7 % d'eau comme phase dispersée (7).

- La force entre deux gouttes est proportionnelle au carré de l'intensité du champ : la coalescence dipolaire se produit donc aussi bien en *champ continu* qu'en *champ alternatif*. L.C. WATERMAN a montré (5) que l'efficacité de

la coalescence dipolaire est la même pour les deux types de champ si la phase continue de l'émulsion a une conductivité supérieure à 10^{-10} mho/cm. Cependant si la conductivité est inférieure à cette valeur, les gouttes conservent des charges électrostatiques, acquises au contact des électrodes par exemple, suffisamment longtemps pour qu'il se produise de l'électrophorèse en cas d'emploi d'un champ continu. On remédie à ce phénomène qui perturbe le bon fonctionnement de la coalescence dipolaire en utilisant un champ alternatif et en protégeant les électrodes -avec du teflon par exemple-.

1.2.3 - Etude théorique de la coalescence dipolaire

G.M. PANCHENKOV et col. ont étudié de façon très approfondie l'aspect théorique de la coalescence dipolaire (8). Ils ont calculé en particulier les constantes de vitesse d'agglomération des gouttes en tenant compte de la diffusion thermique, de la coalescence dipolaire et des chocs dus aux vitesses différentes de décantation des gouttes suivant leur rayon. Puis connaissant la fonction de répartition de tailles des gouttes de l'émulsion, ils en ont déduit le temps T au bout duquel le nombre de gouttes n'était plus qu'un deux centième du nombre initial N_0 .

$$T = kE^{-2/3} N_0^{-1}$$

Ils ont aussi montré que l'efficacité de la coalescence dipolaire décroissait avec l'augmentation de la fréquence du champ alternatif si la phase dispersée contenait un sel dissous : en effet, si la fréquence est trop élevée les ions n'ont pas le temps de se redistribuer à l'intérieur des gouttes à chaque alternance du champ et la constante diélectrique des gouttes diminue.

D'autre part, ils estiment à 3 % la teneur en phase dispersée en deçà de laquelle la coalescence dipolaire n'est plus efficace.

Enfin, en calculant les valeurs critiques du champ, ils trouvent les valeurs optimales des paramètres d'un électrodéshydrateur.

1.2.4 - Notion de champ critique

RAYLEIGH en 1825 a montré qu'une goutte se cassait si elle portait une trop forte charge électrostatique (15). Depuis lors divers auteurs dont G.M. PANCHENKOV (8, 12, 13), L.C. WATERMAN (6), WILLIAM WOELFLIN (14) ont signalé qu'une goutte d'un diélectrique liquide se brisait si on la plaçait dans un champ électrique d'intensité supérieure à une certaine valeur dite "critique".

Ce phénomène est dû aux forces, créées par le champ s'exerçant sur les extrémités opposées de la goutte polarisée qui provoquent son élongation. Quand cette déformation devient trop grande, les forces de cohésion sont insuffisantes pour assurer l'intégrité de la goutte et elle se casse.

G.M. PANCHENKOV et col. ont montré que la relation entre le champ appliqué E et l'excentricité e de la goutte était de la forme :

$$E = A(\epsilon_2, \epsilon, e) \sqrt{\frac{\alpha}{\epsilon a}} \quad (1.1)$$

ϵ constante diélectrique de l'émulsion fonction de la teneur en eau de l'émulsion

α tension interfaciale

a rayon de la goutte

Les hypothèses posées à l'occasion de ce calcul sont les suivantes :

- fréquence du champ appliqué très inférieure à $\frac{1}{\tau}$, τ étant le temps de relaxation de la phase continue.

- fréquence du champ suffisamment grande pour que l'on puisse négliger les phénomènes dissipatifs d'énergie.

- déformation de la goutte initialement sphérique suivant un ellipsoïde de révolution.

Ils calculent alors l'énergie totale U de la goutte qui est une fonction de l'excentricité : comme la goutte constitue d'après les hypothèses un système isolé, la position d'équilibre est celle qui rend l'énergie extrémale ; la résolution de l'équation $\frac{dU}{de} = 0$ fournit alors la relation 1.1.

Puis les auteurs calculent alors l'excentricité dite "critique" à partir de laquelle l'équilibre atteint par la goutte est instable ($\frac{d^2U}{de^2} < 0$).

En reportant la valeur de cette excentricité critique dans la relation 1.1 ils obtiennent enfin la valeur du champ critique : les calculs correspondants sont donnés en annexe I.

Si le champ appliqué dépasse légèrement sa valeur critique, seules les extrémités de la goutte se cassent et se dispersent en petites gouttelettes ; s'il est très supérieur la goutte explose.

Ce calcul a été effectué en négligeant l'influence des autres gouttes sinon dans le calcul de la constante diélectrique de l'émulsion ϵ .

Cependant, pour des émulsions assez concentrées un autre phénomène se produit car il faut en réalité considérer le champ agissant sur la goutte et non le champ moyen E . La différence entre ces deux champs croît lorsque les gouttes sont de plus en plus rapprochées ; c'est-à-dire, pour une émulsion à granulométrie constante lorsque la concentration augmente ; si bien que les gouttes peuvent se casser pour des valeurs du champ moyen appliqué inférieures à la valeur critique.

Les auteurs ont vérifié leur théorie pour des émulsions contenant de 1 à 3 % d'eau dans du brut.

1.2.5 - Appareils de coalescence dipolaire

Ce paragraphe a pour but de décrire les installations d'électrodécantation par coalescence dipolaire existantes ou brevetées.

1.2.5.1 - Description sommaire

Le principe de ces électrodécanteurs est très simple : il consiste à créer un champ électrique aussi uniforme que possible et à faire séjourner l'émulsion dans ce champ un temps suffisamment long pour obtenir la séparation voulue des deux phases : un tel électrodécanteur peut être schématisé comme sur la figure 1.

Cet appareil comprend trois zones :

- la zone de traitement proprement dite est comprise entre les deux électrodes : la coalescence dipolaire s'y produit sous l'effet d'un champ électrique haute tension en général alternatif,
- la zone de décantation située en dessous des électrodes est le siège d'un champ électrique d'intensité plus faible créé par l'électrode inférieure et l'interface eau-huile. Ce champ permet de poursuivre la coalescence sans casser les grosses gouttes ; un recyclage est prévu pour permettre aux gouttes qui n'ont pas décanté de repasser dans la zone de traitement,
- la zone située au dessus des électrodes est une zone de décantation.

1.2.5.2 - Description de quelques brevets

En plus du traitement électrique proprement dit les appareils industriels comprennent en général des systèmes annexes : un chauffage qui permet le dégazage de l'émulsion ainsi que la réduction de la viscosité pour faciliter

la décantation et un système de baffles qui, en créant de brusques changements de direction du flux, favorisent une première décantation des grosses gouttes. Ensuite vient le système d'électrode et une zone de décantation. L'ensemble est soit vertical soit horizontal ou encore oblique mais dans tous les cas le niveau de l'interface eau-huile est soigneusement réglé. En fait ce qui est breveté avant tout c'est le système de baffles qui assure une bonne répartition de l'émulsion dans la zone de traitement électrique. Les électrodes sont en général perpendiculaires à la direction du flux et sont conçues de manière à permettre le passage de l'émulsion à travers elles : plaques perforées, système de grilles. (17, 18, 19, 20, 21).

Les électrodes sont parfois mobiles et leur distance est réglée en fonction de l'intensité du courant électrique afin d'éviter les risques de court circuit (16).

Quand l'émulsion passe dans le champ électrique, des chaînes de gouttes conductrices ont tendance à se former entre les électrodes. L'intensité du courant croît et il y a des risques de court circuit. Des générateurs haute tension permettant de limiter l'intensité du courant ont été conçus. WILLIAM L. SHIRLEY (22) décrit un système fournissant une haute tension continue : quand la conductivité de l'émulsion et donc l'intensité du courant, deviennent trop élevées, la différence de potentiel entre les électrodes devient nulle ; puis des séries d'impulsions sont fournies jusqu'à ce que les chaînes de gouttes se brisent et que la conductivité redevienne normale ; alors la haute tension est rétablie. Un autre brevet (23) décrit un appareillage permettant de créer des séries d'impulsions à partir d'un générateur alternatif.

Les déshydrateurs industriels utilisent des champs de quelques centaines de volts par centimètre et ont des rendements d'extraction d'eau de l'ordre de 90 % (55).

1.3 - Electrocoalescence en champ continu : "electrofining"

Ce terme s'applique à la *séparation par un champ continu* d'émulsions formées d'une phase dispersée polaire et d'une phase continue organique de faible conductivité ($\sigma < 10^{-12}$ mho/cm). Le temps de relaxation de la phase continue est alors relativement élevé ; donc les charges électrostatiques nettes acquises par les gouttes sont conservées suffisamment longtemps pour permettre aux gouttes de se déplacer d'une façon appréciable sous l'influence du champ électrique.

Les mouvements des gouttes chargées augmentent la probabilité de choc avec les non chargées et la coalescence devient plus rapide. Ce phénomène se produit en champ uniforme aussi bien qu'en champ non uniforme. Dans tous les cas les gouttes s'agglomèrent aussi par coalescence dipolaire et si l'on travaille en champ non uniforme le phénomène de diélectrophorèse se produit en plus.

1.3.1 - Electrocoalescence en champ continu uniforme

S.E. Sadek et C.D. Hendricks ont étudié, dans une cellule à électrodes parallèles -champ continu uniforme-, la coalescence de gouttes d'eau en émulsion avec un liquide de faible conductivité (24). Ils supposent que les gouttes se chargent au contact des électrodes, puis qu'elles se déplacent sous l'action du champ électrique : le mouvement incessant des gouttes provoque des chocs qui induisent leur coalescence.

La charge d'une goutte proportionnelle à l'intensité du champ, est calculée suivant la formule de CHO (25) : un facteur d'efficacité η est cependant introduit pour tenir compte du fait que les gouttes ne portent pas leur charge de saturation. Ensuite ils calculent la vitesse de déplacement des gouttes en fonction de la charge qu'elles portent : cette vitesse est proportionnelle au carré de l'intensité du champ. Ils en déduisent alors des constantes de vitesse de collisions dépendant d'un facteur β lié à la répartition spatiale des gouttes dans la cellule. Un modèle est alors élaboré qui permet, à l'aide d'un ordinateur, de calculer la distribution de taille des gouttes à un instant donné en fonction de la distribution initiale : il montre que cette distribution se conserve par homothétie (self preserving distribution). Malheureusement la vérification expérimentale n'a guère été concluante vu la trop faible taille de l'échantillon étudié. D'autre part, les coefficients η et β se révèlent très inférieurs à leur valeur maximale et des mouvements globaux de fluide induits par le champ -appelés électroconvection- se produisent : ces phénomènes viennent encore altérer la validité du modèle. Dans les expériences décrites par ces auteurs l'intensité du champ était de 2 kV/cm et la teneur en eau de 5 %. En tout cas le phénomène de coalescence est rapide -de l'ordre de la seconde-.

1.3.2 - "Electrofining" en champ non uniforme

La technique précédente utilisant un champ électrique uniforme ne peut agir efficacement que si l'émulsion est assez concentrée, sinon les probabilités de chocs entre gouttes restent faibles puisqu'il y en a peu qui se chargent par contact avec les électrodes.

C'est pour cette raison que l'electrofining en champ non uniforme a été étudié ; dans ce cas, en effet, les gouttes peuvent se charger suivant divers mécanismes :

- diélectrophorèse qui les amène au voisinage de l'électrode à haut gradient de champ où elles se chargent par contact,
- charges résultant de chocs avec d'autres gouttes déjà chargées,
- et d'autres actions encore mal expliquées (26).

Les différents mécanismes de coalescence et de décantation sont schématisés sur la figure 2.

Il n'existe pas d'études théoriques du phénomène ; tout au plus, peut-on trouver des articles sur le dépoussiérage électrostatique (27) qui utilisent des méthodes de calcul proches de celles qu'il faudrait, nous semble-t-il, employer pour décrire l'electrofining en champ non uniforme.

Divers brevets font état d'appareils d'electrofining, le champ non uniforme y est créé soit par une série de barreaux de formes diverses, reliés à un générateur haute tension continue et situés à l'intérieur de cellules reliées à la terre (29, 30), soit par un assemblage de plaques ondulées mises à terre et parallèles à une série de barreaux portés à un haut potentiel (31) ; cet appareil est représenté sur la figure 3. La décantation des grosses gouttes formées au cours des chocs s'opère alors pendant le passage dans le système d'électrodes. En général l'émulsion est traitée au préalable dans un électrodécanteur à coalescence dipolaire pour abaisser la teneur en phase dispersée à un taux convenable (de 0,5 à 3 %). Le champ employé vaut de 1000 à 5000 V/cm et le rendement d'extraction en phase dispersée peut dépasser 99 % pour un temps de séjour de une à quatre minutes. Un autre brevet (32) décrit un appareil formé d'une ou de quelques électrodes en forme de barreaux placées dans des cellules ; l'émulsion est introduite à un débit assez élevé pour que la décantation des gouttes ne se fasse pas à l'intérieur de la zone de traitement électrique : les risques de court-circuit étant ainsi limités, le champ électrique employé est plus élevé (15 kV/cm) et le temps de traitement est de l'ordre de la seconde.

1.4 - Diélectrophorèse

"Le mouvement de matière électriquement neutre causé par des effets de polarisation dans un champ électrique non uniforme est appelé diélectrophorèse" H.A. POHL (44). On doit distinguer ce phénomène du mouvement créé par l'effet d'un champ électrique sur une charge appelé électrophorèse.

1.4.1 - Description du mécanisme de la diélectrophorèse

Un corps solide chargé placé dans un champ uniforme se meut suivant les lignes de champ vers l'électrode de charge opposée. Un corps neutre par contre est polarisée mais ne bouge pas.

Dans un champ non uniforme continu le corps chargé se déplace encore, mais contrairement au cas précédent, le corps non chargé en fait de même. Cela est dû au fait que ce corps acquiert par polarisation une charge positive, sur le côté le plus proche de l'électrode négative et inversement sur l'autre côté. Comme le champ appliqué n'est pas uniforme il produit des forces d'intensité inégale sur les deux côtés. Le résultat est l'existence d'une force nette dirigée vers les régions de plus haut gradient de champ. H.A. POHL a montré (45) que cette force était proportionnelle au gradient du carré de l'intensité du champ. *Le sens du mouvement ne dépend donc pas du sens du champ ;* en particulier la diélectrophorèse se produit en champ alternatif ce qui est confirmé par certains autres auteurs (46, 47). On peut aussi observer des phénomènes de diélectrophorèse quand le champ appliqué est uniforme (26) : en effet les particules en se polarisant créent dans leur voisinage des distorsions du champ appliqué. Chaque particule est donc soumise à des forces dues aux inhomogénéités du champ causées par les particules environnantes : ceci produit des rassemblements et donc la coalescence ou l'agglomération des particules. Cependant ce phénomène n'est autre que celui de la coalescence dipolaire. *Nous n'appellerons désormais diélectrophorèse que le phénomène qui se produit quand le champ appliqué est non uniforme.*

H.A. POHL et col. ont d'abord étudié la diélectrophorèse de particules solides pour des suspensions dont la phase dispersée et la phase continue ont la même densité. Ils ont utilisé une cellule cylindrique en travaillant soit en discontinu (44, 48, 49) soit en continu (45). Dans le premier cas ils définissent le rendement de diélectrophorèse par la longueur mesurée sous microscope des chaînes de particules collées à l'électrode centrale et dans le deuxième cas par le rapport des concentrations mesurées d'une part dans la partie centrale de la cellule et d'autre part à la périphérie. Ces auteurs ont étudié l'influence des paramètres de la cellule et des conditions expérimentales sur le rendement de diélectrophorèse et ils fournissent un certain nombre de courbes dont nous avons tiré l'exemple suivant.

exemple : diélectrophorèse en continu de particules de chlorure de polyvinyl ($\epsilon = 4,60$, rayon moyen = $90 \mu\text{m}$, concentration : 6 %) en suspension dans un milieu de constante diélectrique 2,26.

- temps de traitement estimé d'après d'autres auteurs (51) à deux minutes.
- Champ moyen appliqué 2000 V/cm. 60 Hz

Le rapport des concentrations vaut alors 72.

Ces auteurs ont écrit l'expression des forces s'exerçant sur les particules mais ce sont R.H. KIRCHOFF et A. HAMDI qui ont élaboré un modèle donnant le rendement (51). Ce modèle dont les hypothèses sont communes avec celles posées pour un de nos propres modèles -premier modèle décrit au paragraphe 2.3.2- mais en négligeant la décantation, a été vérifié grossièrement sur des données fournies par H.A. POHL.

Cet auteur a aussi étudié la séparation de deux classes de particules de constantes diélectriques différentes en suspension dans un milieu de constante diélectrique et de densité plus faible : pour ce faire il utilise une cellule telle que la force électrique s'exerce sur une particule soit constante, quelle que soit sa position, et soit dirigée en sens inverse de la force de gravitation. Cette cellule dite "isomotrice" est représentée sur la figure 4, les calculs définissant la forme des électrodes sont donnés en annexe III : elle comprend deux sorties, l'une vers laquelle se dirigent naturellement les particules sous l'effet de la pesanteur et l'autre qui n'est accessible qu'aux particules pour lesquelles la force électrique compense au moins la force de pesanteur. Si les conditions expérimentales sont bien choisies, cette dernière sortie est seulement empruntée par les particules qui ont la constante diélectrique la plus élevée : on opère ainsi une séparation des deux classes de particules.

La force électrique réelle s'exerçant sur une particule mesurée lors de ces expériences se révèle d'intensité très supérieure à celle prévue par la théorie. D'après H.A. POHL, ce phénomène serait dû aux distorsions du champ électrique créées par les particules si leur concentration est élevée : ces déformations augmentent la non uniformité du champ et accroissent donc la force électrique (50).

1.4.2 - Autres résultats

Les études ont montré que dans trois circonstances particulières le rendement baissait.

- Quand on augmente la différence de potentiel entre les électrodes, le rendement croît d'abord puis à partir d'un certain seuil il retombe rapidement à zéro. H.A. POHL a montré que ce seuil qu'il appelle *voltage de redispersion* (sluff off voltage) dépend des caractéristiques de la cellule de diélectrophorèse et du type d'isolant placé sur les électrodes. En outre, il existe une relation linéaire décroissante entre la taille des particules en suspension et la valeur de ce potentiel - pour des particules de 100 µm de diamètre la redispersion se produit quand le champ moyen atteint 7 kV/cm. Cet auteur attribue le phénomène à la capture par les particules de charges nettes au voisinage de l'électrode centrale entraînant ainsi une répulsion des particules entre elles.

- Le rendement suit les mêmes variations si on augmente le temps de traitement. En effet si on applique un champ électrique, un courant circule dans la cellule : il entraîne une accumulation de charges de signes opposés à chaque extrémité de la particule (43). La force s'exerçant sur le dipôle induit par ces charges est de sens opposé à la force de diélectrophorèse et son intensité croît avec le temps de traitement. Quand ces deux forces deviennent égales - au bout d'un temps dit "de redispersion" - le sens du mouvement des particules s'inverse et le traitement devient inefficace. Ce temps de redispersion est proportionnel au facteur de résistivité du système $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ - λ_1 et λ_2 résistivités de la phase continue et des particules. Ce phénomène n'apparaît que si le champ appliqué est continu.

- Des expériences menées sur des suspensions ou des émulsions dont les deux phases ont la même densité, ont montré que le rendement baissait quand la concentration augmentait (49, 52). Les essais d'explication du phénomène se fondent sur l'accumulation de phase dispersée autour de l'électrode centrale.

II - ETUDE THEORIQUE DE LA DIELECTROPHORESE

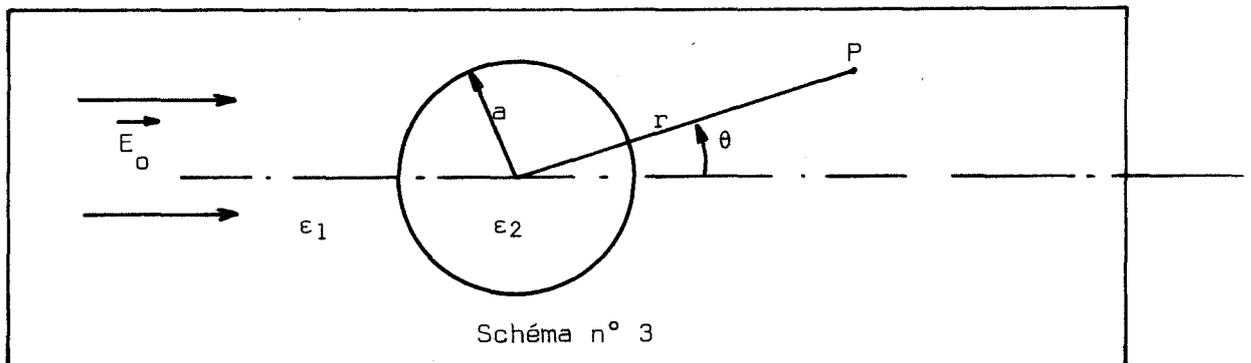
2.1 - Polarisation d'une goutte dans un champ électrique

Nous allons d'abord calculer la polarisation d'une goutte sphérique *non chargée* placée dans un champ électrique uniforme ; puis nous examinerons les corrections à apporter si le champ est à symétrie cylindrique ou si la goutte se déforme comme le signalent certains auteurs.

2.1.1 - Goutte sphérique dans un champ uniforme (33)

Nous supposons que la goutte, constituée d'un liquide de constante diélectrique relative ϵ_2 , se trouve plongée dans un milieu homogène de constante ϵ_1 ; l'ensemble est soumis à l'influence d'un champ uniforme dérivant d'un potentiel

$$V_0 = - E_0 r \cos \theta$$



Cherchons le potentiel créé par le système en tout point P. Montrons que le système d'équation $V_1 = (1 - A \frac{a^3}{r^3}) V_0$

$$V_2 = (1 - A) V_0$$

est solution du problème - V_1 et V_2 sont respectivement le potentiel à l'extérieur de la goutte

- V_1 et V_2 satisfont à l'équation de Laplace $\Delta V = 0$
- Quand r tend vers l'infini V_1 tend vers V_0
- la première condition aux limites $(V_1)_{r=a} = (V_2)_{r=a}$ est satisfaite
- la deuxième condition aux limites s'écrit :

$$\epsilon_1 \left(\frac{\partial V_1}{\partial r} \right)_{r=a} = \epsilon_2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial r} \right)_{r=a}$$

$$\text{Soit } A = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}$$

Le champ à l'intérieur de la goutte est donc uniforme : il s'écrit

$$\vec{E}_2 = (1-A) \vec{E}_0 = \frac{3\epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \vec{E}_0$$

Si les deux milieux étudiés sont à *polarisation linéaire*, ce que nous supposons, la polarisation de la goutte vaut :

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_2 - \epsilon_1) \vec{E}_2 = 3\epsilon_0 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \vec{E}_0$$

Le moment dipolaire est par définition égal au volume de la goutte v que multiplie la polarisation donc :

$$\vec{M}_b = v \vec{P} = 4\pi a^3 \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \vec{E}_0$$

Soit en appelant *polarisabilité* le facteur $\alpha = 3\epsilon_1 \epsilon_0 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}$

ce moment dipolaire s'écrit

$$\vec{M}_b = \alpha v \vec{E}_0$$

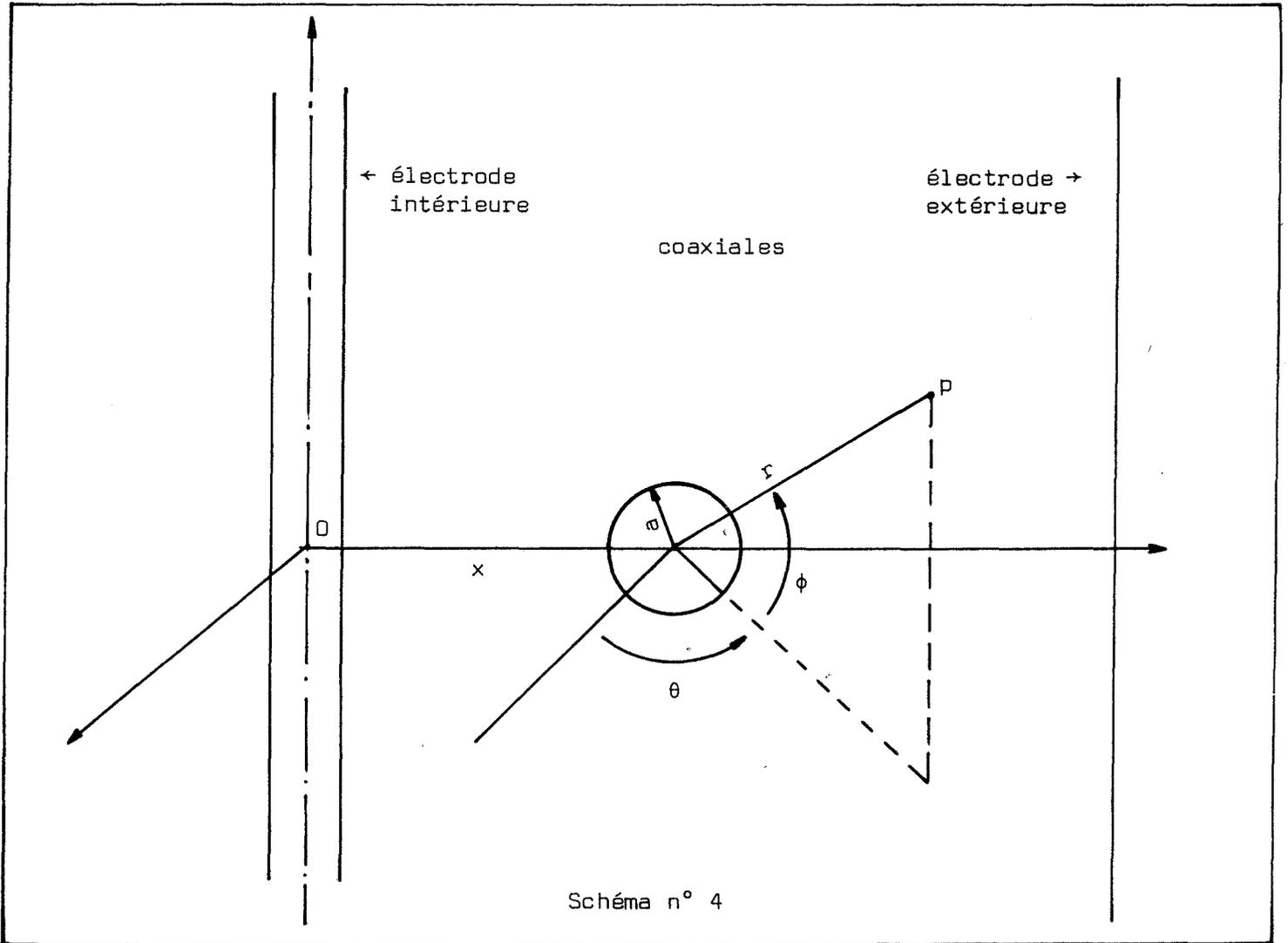
2.1.2 - Goutte sphérique dans un champ à symétrie cylindrique

Supposons maintenant que le champ électrique initial qui agit sur la goutte ne soit plus uniforme mais qu'il soit créé par deux électrodes cylindriques et coaxiales de longueur infinie. Le potentiel à la distance x de l'axe est

$$V_0 = k \text{ Log } x/b$$

k et b sont des constantes dépendant des électrodes et de la différence de potentiel appliqué.

Calculons alors la polarisation de la goutte.



Soit une goutte non chargée placée dans un champ dont le potentiel est défini par une équation en coordonnées sphériques $V = f(r, \theta, \phi)$ - l'origine des coordonnées est située au centre de la goutte et le potentiel y est nul.

Nous savons (33) que la solution de l'équation de Laplace pour ce système est

$$V_1 = f(r, \theta, \phi) - A \frac{a}{r} f\left(\frac{a^2}{r}, \theta, \phi\right)$$

$$V_2 = (1 - A) f(r, \theta, \phi)$$

V_1 et V_2 potentiels à l'extérieur et à l'intérieur de la goutte

- quand $r \rightarrow \infty$, $V_1 \rightarrow V_0$

- $(V_1)_{r=a} = (V_2)_{r=a}$

- la deuxième condition aux limites $\epsilon_1 \left(\frac{\partial V_1}{\partial r}\right)_{r=a} = \epsilon_2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial r}\right)_{r=a}$

$$\text{s'écrit } A = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1 \left[1 + \frac{1}{a} (f/(\partial f/\partial r))_{r=a} \right]}$$

A partir de ces résultats nous allons montrer que la polarisabilité d'une goutte en champ cylindrique est pratiquement égale dans le cadre de nos expériences à celle calculée au paragraphe précédent pour un champ uniforme.

Le potentiel correspondant au champ étudié s'écrit en coordonnées sphériques

$$V = f(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2} k \text{ Log} \left(1 - 2 \frac{r}{x} \cos \phi \sin \theta + \frac{r^2}{x^2} \cos^2 \phi \right) / b$$

Le facteur $(\partial f/\partial r)_{r=a}$ vaut donc

$$\left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_{r=a} = \frac{-x \cos \phi \sin \theta + a \cos^2 \phi}{x^2 - 2ax \cos \phi \sin \theta + a^2 \cos^2 \phi}$$

Calculons alors les extrema du facteur $\frac{1}{a} (f/(\partial f/\partial r))_{r=a}$

Le maximum est atteint pour le point $(a, -\frac{\pi}{2}, 0)$ et vaut

$$\frac{1}{a} (a + x) \text{ Log} \left(1 + \frac{a}{x} \right)$$

Le minimum atteint au point $(a, \frac{\pi}{2}, 0)$ vaut $\frac{1}{a} (a - x) \text{ Log} \left(1 - \frac{a}{x} \right)$

Dans nos expériences, a rayon de la goutte, ne dépasse jamais 50 μm et x ne peut être inférieur au rayon de l'électrode intérieure 6 mm donc

$$\frac{a}{x} < \frac{5 \cdot 10^{-5}}{6 \cdot 10^{-3}} \approx 10^{-2}$$

Nous pouvons alors prendre des développements limités des extrema et trouver des bornes du facteur $\frac{1}{a} (f/\partial f/\partial r)_{r=a}$

$$1 - 10^{-2} < \frac{1}{a} \left(f / \frac{\partial f}{\partial r} \right)_{r=a} < 1 + 10^{-2}$$

Soit, vu les caractéristiques des produits utilisés $-\epsilon_1 = 2,20$
 $\epsilon_2 = 80-$, le facteur A peut être estimé à

$$A = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \text{ avec une erreur inférieure à } 0,1 \%$$

Nous pouvons donc considérer, en ne faisant qu'une erreur inférieure à 0,1 %, que la polarisabilité en champ cylindrique est la même que la polarisabilité en champ uniforme.

2.1.3 - Polarisabilité d'une goutte dans le cas où elle se déforme

Certains auteurs (6, 8) signalent qu'une goutte placée dans un champ électrique uniforme se déforme suivant un ellipsoïde de révolution. Montrons que, dans notre cas, cette déformation, si elle se produit, est suffisamment faible pour qu'on puisse négliger d'opérer une correction sur la polarisabilité calculée précédemment.

Le potentiel à l'intérieur d'un ellipsoïde de révolution s'écrit (33)

$$V_2 = V_0 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1)B}$$

$$\text{avec } B = \frac{b^2}{2a^2 e^3} \left[-2e + \text{Log} \frac{1+b}{1-e} \right] \approx \frac{1}{3} - \frac{2}{15} e^2 \text{ si } e \text{ est petit (a grand}$$

axe de l'ellipsoïde, b petit axe, e excentricité).

Si on place une goutte sphérique dans un champ uniforme elle peut se déformer et la relation qui lie l'intensité du champ appliqué E_0 à l'excentricité s'écrit (Annexe I)

$$E_0^2 = 4,28 e^2 \frac{T}{a\epsilon_1\epsilon_0} \frac{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) (1/3 - 2/15 e^2)}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \text{ si } e \ll 1$$

T est la tension interfaciale de la goutte et du milieu dans lequel elle est plongée.

Dans le cadre de nos expériences E_0 a une valeur maximale de 10^6 V/m : on en déduit donc $e < 0,06$.

Le facteur B est donc compris dans l'intervalle $\left[1/3 - 4 \cdot 10^{-4}, \frac{1}{3} \right]$

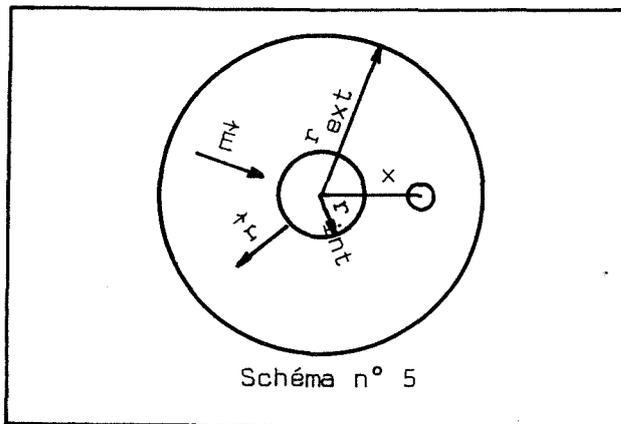
Le potentiel V peut donc être estimé à $V_0 \cdot \frac{3\epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2}$ avec une erreur inférieure à 0,1 ‰. On retrouve ainsi le même résultat que celui obtenu pour une goutte sphérique.

Donc, dans le cadre de nos expériences la polarisabilité d'une goutte peut toujours s'écrire $\alpha = 3\epsilon_1 \epsilon_0 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2}$ (erreur inférieure à 1,1 ‰).

2.2 - Mouvement d'une goutte dans la cellule de diélectrophorèse

Dans nos cellules de diélectrophorèse le champ est créé par deux électrodes coaxiales cylindriques entre lesquelles on établit une différence de potentiel V : ce champ peut être assimilé à celui de deux cylindres de longueur infinie.

$$\vec{E}_0 = \frac{\Delta V}{x \text{ Log } r_{\text{ext}}/r_{\text{int}}} \vec{r}$$



r_{ext} rayon électrode extérieure
 r_{int} rayon électrode intérieure
 \vec{r} rayon vecteur unité

2.2.1 - Forces agissant sur la goutte

- La force électrique agissant sur une goutte de volume v et de moment dipolaire $\vec{M}_b = \alpha v \vec{E}$ est

$$\vec{F}_e = \sum_{i=1}^3 \alpha v (\vec{E}_{oi} \cdot \frac{\partial \vec{E}_{oi}}{\partial x_i}) \vec{i}$$

\vec{E}_{oi} projection de \vec{E}_0 sur l'axe de coordonnées \vec{i}

$$\text{Soit } \vec{F}_e = \frac{1}{2} \alpha v \text{ grad } E_0^2$$

Le sens de la force électrique est donc indépendant du sens du champ ; cette force est radiale et est dirigée vers les régions de plus haut gradient de champ ; c'est-à-dire vers l'électrode centrale ; elle vaut

$$\vec{F}_e = -K \frac{a^3}{x^3} \Delta V^2 \vec{r}$$

- La force de pesanteur s'écrit

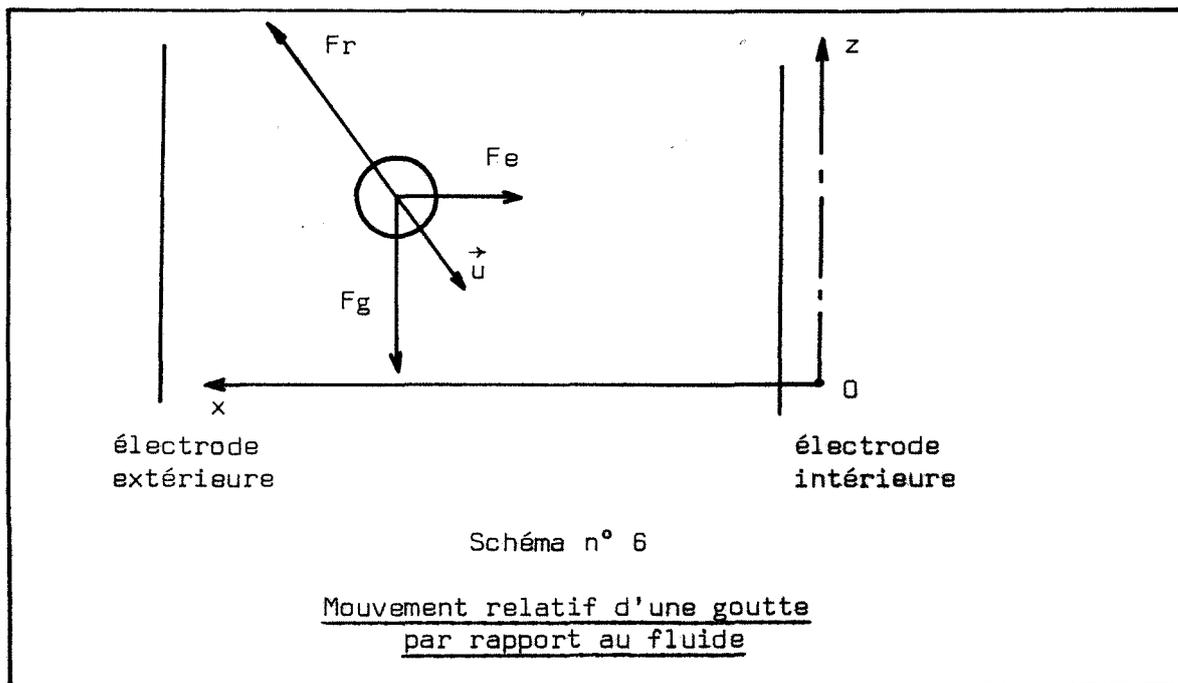
$$F_g = \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_2 - \rho_1) g$$

- La force résistante qui s'oppose au mouvement d'une goutte animée de la vitesse \vec{u} s'exprime par la formule de Stokes - Rybczinski - Hadamard (35) car le nombre de Reynolds de la goutte est très inférieur à 1.

$$\vec{F}_r = - K' a \vec{u}$$

$$\text{avec } K' = 6\pi\mu_1 \frac{3\mu_2 + 2\mu_1}{3(\mu_1 + \mu_2)}$$

Nos expériences ont montré que les gouttes ne portaient pas de charges électrostatiques nettes : il n'existe donc pas de forces correspondantes.



2.2.2 - Mouvement horizontal d'une goutte

L'équation différentielle qui régit la vitesse horizontale u_x d'une goutte s'écrit :

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_2 \frac{du_x}{dt} + K' a u_x = - K \frac{a^3}{x^3} \Delta V^2$$

Le terme lié à l'accélération du mouvement de la goutte a une constante de temps de l'ordre de $\frac{4\pi a^2}{3K'} \rho_2$ soit avec les valeurs numériques appropriées $a = 50 \mu\text{m}$, $\rho_2 = 830 \text{ kg/m}^3$, $K' = 0,042$ de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ donc très faible. La vitesse horizontale de la goutte s'écrit donc :

$$u_x = \frac{dx}{dt} = -\frac{K}{K'} \frac{a^2 \Delta V^2}{x^3} \quad (2.1)$$

Cette vitesse est proportionnelle au carré du rayon de la goutte. Nous donnons ci-dessous quelques valeurs de cette vitesse -avec $r_{\text{ext}} = 0,02 \text{ m}$, $r_{\text{int}} = 0,006 \text{ m}$, $\Delta V = 5000 \text{ V}$, $x = 0,01 \text{ m}$.

rayon (μm)	vitesse u_x (cm/h)
1	0,017
10	1,74
50	43,68

2.2.3 - Mouvement vertical d'une goutte

Appelons $u_f(x)$ la vitesse du fluide constituant la phase continue à une distance x de l'axe de la cellule de diélectrophorèse. La vitesse verticale v_z d'une goutte obéit à l'équation :

$$\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_2 \frac{du_z}{dt} = \frac{4}{3}\pi a^3 (\rho_2 - \rho_1) g - K'a (u_f(x) - u_z)$$

$$\text{Soit } \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_2 \frac{du_z}{dt} - K'au_z = \frac{4}{3}\pi a^3 (\rho_2 - \rho_1) g - K'au_f(x).$$

La constante de temps est de l'ordre de $\frac{4\pi a^3 \rho_2}{K'}$ donc très petit. La vitesse verticale d'une goutte s'écrit donc

$$u_z = \frac{dz}{dt} = u_f(x) - \frac{4}{3} \frac{\pi a^2 (\rho_2 - \rho_1) g}{K'} \quad (2.2)$$

2.2.4 - Trajectoire d'une goutte

En remplaçant dt par sa valeur tirée de l'équation 2.1 et en la reportant dans l'expression de u_z (équation 2.2) on obtient l'équation différentielle régissant la trajectoire de la goutte

$$\frac{dz}{dx} = \left| u_f(x) - \frac{4}{3}\pi \frac{a^2 (\rho_2 - \rho_1) g}{K'} \right| \left(\frac{-K'x}{Ka^2 \Delta V^2} \right) \quad (2.3)$$

La vitesse relative de décantation par rapport au fluide est

$$v(a) = \frac{4}{3}\pi \frac{a^2 (\rho_2 - \rho_1) g}{K'} = K'' a^2$$

en posant $K'' = \frac{4}{3}\pi \frac{(\rho_2 - \rho_1) g}{K'}$

Nous donnons ci-dessous quelques valeurs de cette vitesse

rayon (µm)	vitesse v(a) cm/h
1	0,045
10	4,54
50	113,5

Dans le cadre de nos expériences l'émulsion passait en régime laminaire du bas en haut de la cellule.

La vitesse du fluide s'écrit donc (36)

$$u_f(x) = \frac{2Q}{\pi} \frac{r_{ext}^2 - x^2 + \frac{r_{ext} - r_{int}}{\text{Log } r_{ext}/r_{int}} \text{Log } x/r_{ext}}{(r_{ext}^2 + r_{int}^2 - \frac{r_{ext}^2 - r_{int}^2}{\text{Log } r_{ext}/r_{int}})(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}$$

En reportant cette expression dans (2.3) et en intégrant entre deux bornes on trouve l'équation de la trajectoire d'une goutte.

$$\left| z \right|_1^2 = A \left(r_{ext}^2 \left| \frac{x^4}{4} \right|_1^2 - \left| \frac{x^6}{6} \right|_1^2 + \frac{r_{ext}^2 - r_{int}^2}{\text{Log } r_{ext}/r_{int}} \left| \frac{x^4}{4} \text{Log } \frac{x}{r_{ext}} - \frac{x^4}{12} \right|_1^2 \right) + B \left| \frac{x^4}{4} \right|_1^2$$

en posant $A = \frac{-2QK'}{\pi Ka^2 \Delta V^2 (r_{ext}^2 + r_{int}^2 - \frac{r_{ext}^2 - r_{int}^2}{\text{Log } r_{ext}/r_{int}})(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}$

$$B = \frac{4K'\pi a^3 (\rho_2 - \rho_1)}{Ka^2 \Delta V^2}$$

REMARQUES IMPORTANTES

- Les calculs précédents ont été effectués dans le cas d'une goutte unique : si la goutte est plongée au sein d'une émulsion il faut, en toute rigueur, remplacer la constante diélectrique de la phase continue par la constante diélectrique de l'émulsion ϵ_e (53)

$$\epsilon_e = \epsilon_2 \left(1 + 3W_0 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right)$$

La teneur en eau W_0 des émulsions que nous avons étudiées est très faible nous pouvons donc négliger cette correction.

- Si au lieu d'employer un champ continu on emploie un champ alternatif il faut remplacer les constantes diélectriques par leurs valeurs complexes. Cette correction n'a une répercussion sur les résultats que si la fréquence du champ utilisé est grande. Nous ne l'avons pas effectuée car nous avons seulement utilisé un champ de fréquence 50 Hz.

- Calculons la force de diélectrophorèse que produit sur une goutte un *champ alternatif de faible fréquence.*

Soit $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin \omega t$ l'expression de ce champ électrique.

$$\begin{aligned} \text{La force instantanée est } \vec{F}_e &= \frac{1}{2} \alpha v \operatorname{grad} E^2 \\ &= \frac{1}{2} \alpha v \operatorname{grad} E_0^2 \sin^2 \omega t \end{aligned}$$

La force moyenne s'exerçant sur la goutte vaut donc

$$\vec{F}_e = \frac{1}{2} \alpha v \operatorname{grad} E_0^2 \int_0^T \sin^2 \omega t / T$$

$$\vec{F}_e = \frac{1}{4} \alpha v \operatorname{grad} E_0^2$$

La force moyenne s'exerçant sur une particule est égale à $\frac{1}{4} \alpha v \operatorname{grad} E_0^2$
- E_0 amplitude du champ électrique.

Donc un champ alternatif d'amplitude E_0 est équivalent, en ce qui concerne la force de diélectrophorèse, à un champ continu d'intensité $E_0/\sqrt{2}$

Après avoir étudié le comportement d'une goutte unique dans la cellule de diélectrophorèse nous allons nous préoccuper du mouvement d'ensemble des gouttes d'une émulsion et construire ainsi des modèles donnant le rendement théorique d'extraction de la phase dispersée.

2.3 - Modèles de rendement théorique de la diélectrophorèse

Le but de nos expériences est de casser les émulsions d'eau dans de l'huile ; la séparation d'une goutte de la phase continue peut s'opérer de deux façons : soit par décantation sous l'effet de la pesanteur, soit par agglutination sur l'électrode centrale. Nous avons mis au point successivement trois modèles qui diffèrent par les hypothèses émises sur l'interaction des gouttes et sur leur mouvement global.

2.3.1 - Hypothèses communes aux trois modèles

(a) - Le champ électrique dans la cellule de diélectrophorèse peut être assimilé au champ créé par deux cylindres coaxiaux *infinis* : cette hypothèse est facilement vérifiée si la cellule de diélectrophorèse est conçue de manière à limiter au maximum les effets de bord.

(b) - La distribution des gouttes dans la phase continue est *uniforme* au niveau de l'introduction du fluide dans la cellule.

(c) - *Quand une goutte atteint l'électrode centrale elle y adhère* : cette condition est réalisée s'il n'y a pas acquisition de charge électrostatique par contact ce qui est vrai en particulier si le champ appliqué est alternatif.

(d) - La diffusion des gouttes par agitation thermique est négligeable par rapport aux mouvements créés par les forces électriques : cette hypothèse a été vérifiée (Annexe III).

2.3.2 - Modèle sans interaction des gouttes

Deux hypothèses supplémentaires sont introduites.

(e) - *Le flux est laminaire* : cette condition est vérifiée si la longueur de la cellule de diélectrophorèse est grande devant la largeur de l'espace interélectrodes et si le nombre de Reynolds est petit (débits relativement faibles)

(f) - *Il n'y a pas coalescence de gouttes* entre elles que ce soit sous l'effet de forces électriques (coalescence dipolaire) ou sous l'effet de chocs dus à des vitesses de décantation ou de diélectrophorèse différentes : *le rendement de l'appareil est donc indépendant de la teneur en eau.*

Les paramètres du modèle sont les dimensions de l'appareil : diamètre extérieur et intérieur, longueur. Les variables sont le débit d'émulsion et la différence de potentiel entre les électrodes ainsi que la répartition granulométrique de l'émulsion. Le modèle calcule alors pour chaque goutte de taille donnée la distance limite au delà de laquelle elle n'a plus le temps d'atteindre l'électrode centrale : on en déduit le rendement pour les gouttes de cette taille et, connaissant la fonction de répartition, le rendement global d'extraction en eau. (cf Annexe IV).

Ce modèle se révèle insuffisant car nos expériences montrent une dépendance entre le rendement et la teneur en eau. Aussi avons-nous élaboré deux autres modèles tenant compte :

- soit seulement de la coalescence de gouttes créée par les chocs,
- soit de la coalescence dipolaire.

REMARQUE : En nous inspirant d'une étude faite sur l'électrocoalescence en champ uniforme (24) et sur le même principe que ce modèle nous en avons conçu un autre qui tient compte de l'"electrofining" qui se produit en champ continu.

Nous supposons que les gouttes portent des charges proportionnelles au champ électrique et au temps de séjour dans la cellule. Il est alors possible de réécrire les équations du mouvement d'une goutte et de bâtir un modèle donnant le rendement d'extraction en eau. Il s'avère alors possible d'ajuster la valeur du paramètre de proportionnalité pour faire coïncider les résultats théoriques et expérimentaux.

Comme il n'y a pas vraiment de justification théorique de cette manière de procéder et puisque les auteurs de l'étude (24) n'ont pas réussi à vérifier leurs calculs nous avons abandonné ce modèle.

Il est donc tout à fait probable que la correspondance entre résultats expérimentaux et théoriques sera meilleure en champ alternatif qu'en champ continu puisque nous avons négligé l'electrofining.

2.3.3 - Modèle tenant compte du choc des gouttes

(e') - Ce modèle prend en compte le *grossissement de la taille des gouttes du aux chocs* mais néglige celui du à la coalescence dipolaire. On admet que deux gouttes venant en contact -distance entre leurs centres inférieure ou égale à la somme de leurs rayons- coalescent immédiatement.

(f') - D'autre part pour des raisons de facilité de calcul nous avons admis que le passage du fluide dans l'appareil se fait en *régime piston* -vitesse uniforme dans tout l'appareil. Cette hypothèse, d'après les résultats que nous avons obtenus grâce au modèle précédent, n'introduit qu'une erreur inférieure à 5 % sur le calcul des rendements supérieurs à 0,20.

Une goutte peut atteindre l'électrode centrale de deux manières :

- avoir une taille suffisante après chocs,
- être capturée par une goutte plus grosse qui atteint l'électrode centrale.

Cherchons la distance $d(r_0)$ telle qu'une goutte de *rayon originel* r_0 située en deçà de cette distance acquière, après chocs, une taille suffisante pour lui permettre d'atteindre l'électrode centrale.

Appelons - $n(r)$ le nombre de gouttes de rayon r par unité de volume
 - $R(r_0, d_0, t, x)$ le rayon au temps t d'une goutte de *rayon originel* r_0 située à l'instant zéro à la distance d_0 de l'axe, cette goutte étant située à la distance x au temps t .

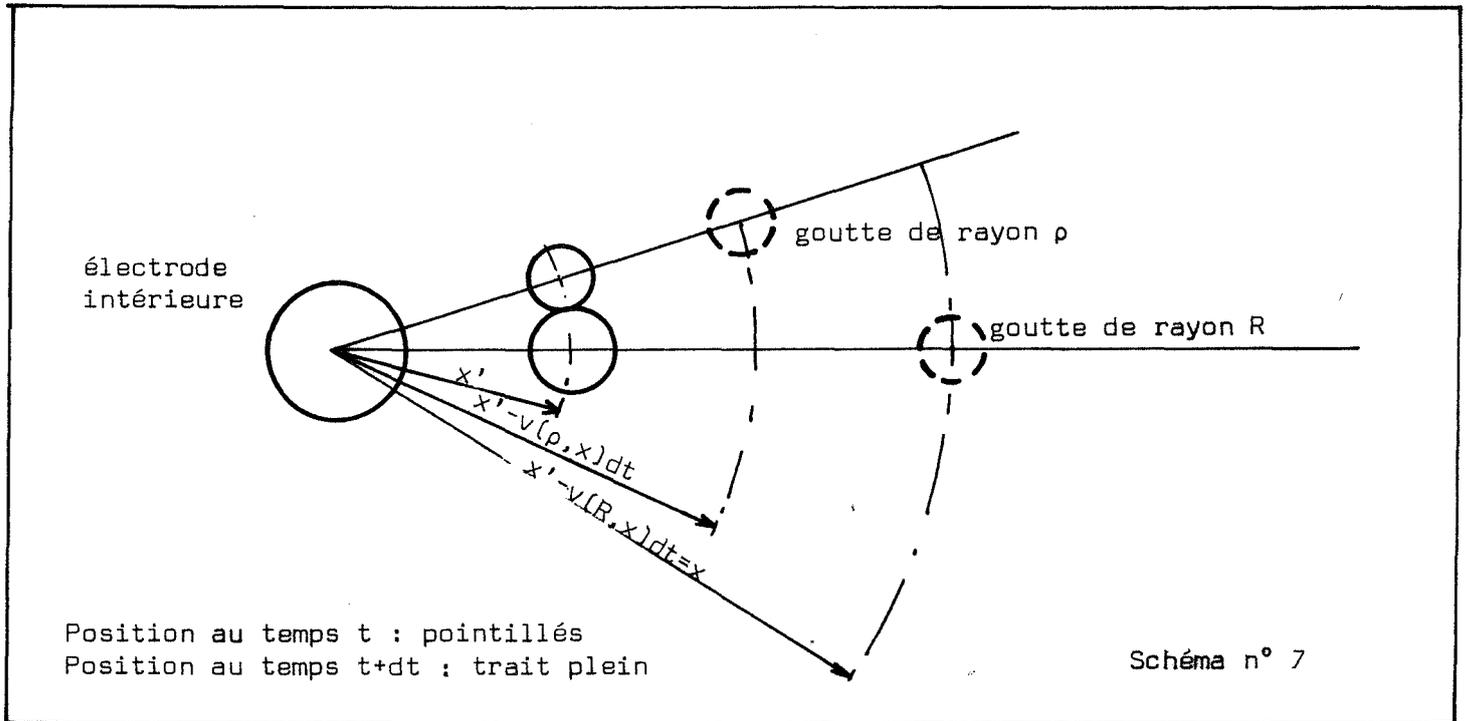
- $v(r, x)$ la vitesse algébrique d'une goutte de rayon r située à la distance x de l'axe (équation 2.1).

Au temps $t + dt$ cette goutte se trouve située à la distance
 $x' = x + v | (r_0, d_0, t, x), x | dt$ (2.4).

De plus, pendant le temps dt elle capture des gouttes de rayon plus faible : sa taille augmente donc. Dans l'intervalle dt elle coalesce avec les gouttes de rayon $\rho < R$ comprises dans un volume de longueur

$$\{- v | (r_0, d_0, t, x), x | + v(\rho, x)\}$$

et de section moyenne $\pi | R(r_0, d_0, t, x) + \rho |^2 | 1 - \frac{v(\rho, x) + v(R, x)}{2x'\pi} dt |$
 (cf. annexe IV).



Donc à l'instant $t + dt$ le rayon de la goutte étudiée sera défini par l'équation

$$R(r_0, d_0, t + dt, x') = R(r_0, d_0, t, x)$$

$$+ \int_0^R n(\rho) \{-v|R(r_0, d_0, t, x), x| + v(\rho, x)\} dt$$

$$\times \pi |R(r_0, d_0, t, x) + \rho|^2 \left(1 - \frac{v(\rho, x) + v(R, x)}{2x'\pi} dt\right) \rho^3 d\rho \quad (2.5)$$

x' est défini par l'équation (2.4).

Nous pouvons, grâce à l'équation (2.5), calculer numériquement les fonctions $d(r)$ par une recherche dichotomique (cf. Annexe IV).

Pour résumer toutes les gouttes de rayon r_0 situées au temps zéro à une distance inférieure à $d(r_0)$ sont séparées de l'émulsion - toutes les gouttes situées à une distance $d(r_{sup}) - r_{sup}$ étant le rayon maximum des gouttes de l'émulsion - ne décantent pas.

Examinons maintenant le cas des gouttes de rayon r_0 situées à une distance comprise entre $d(r_0)$ et $d(r_{sup})$. Elles sont séparées de l'émulsion si elles sont capturées par des gouttes qui ont le temps d'atteindre l'électrode centrale.

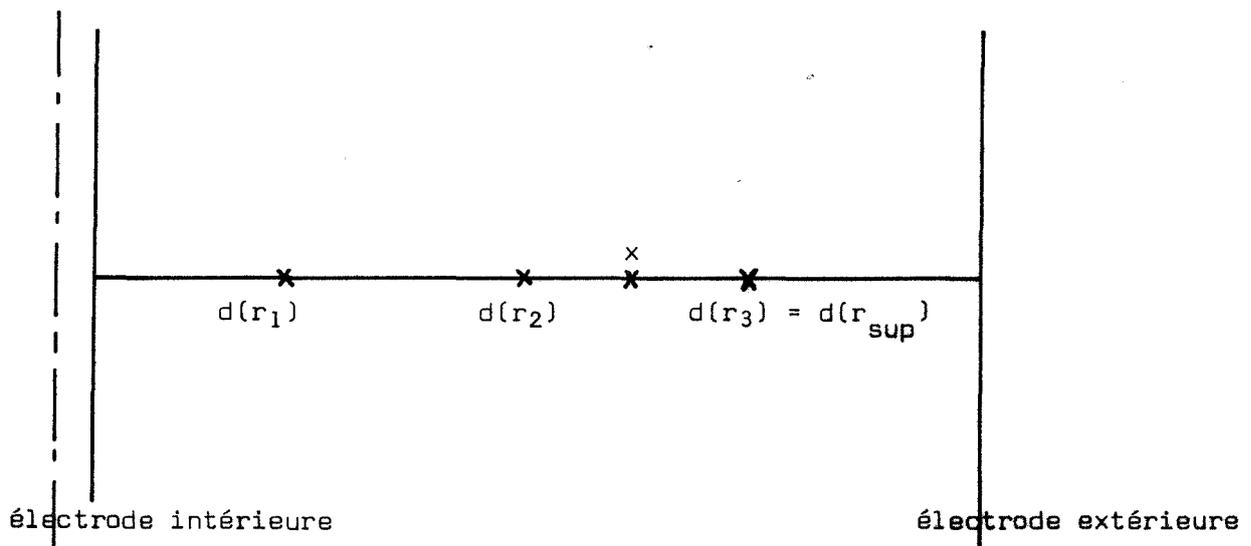
Calculons la probabilité de cette capture.

Une goutte de rayon r_0 située à la distance x tel que $d(r_0) < x < d(r_{\text{sup}})$ est capturée par une goutte de rayon ρ qui atteindra l'électrode centrale sous deux conditions :

- $d(\rho) > x$
- présence au temps $t = 0$ d'au moins une goutte de rayon ρ dans le volume de longueur $d(\rho) - x$ et de base moyenne :

$$\pi(r + \rho)^2 \left| 1 + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{d(\rho)}{x} - 1 \right) \right|$$

Exemple : Considérons une émulsion formée de trois classes de gouttes de rayon r_1, r_2 et $r_3 = r_{\text{sup}}$ ($r_1 < r_2 < r_3$).



Toutes les gouttes de rayon originel r_1 situées en deçà de $d(r_1)$ atteignent l'électrode centrale. Aucune goutte située au delà de $d(r_3)$ n'a le temps d'atteindre l'électrode.

Une goutte de rayon r_1 située au temps $t = 0$ au point x n'atteindra l'électrode que si elle est capturée par une goutte de rayon r_3 ; même si elle est capturée par une goutte de rayon r_2 elle n'aura pas le temps d'atteindre l'électrode car $x > d(r_2)$.

Appelons $p(r, \rho, x)$ la probabilité de présence d'une goutte de rayon ρ dans le tronc de cône défini précédemment. La probabilité qu'une goutte de rayon r située à une distance x soit capturée est donc

$$p(r, x) = 1 - \prod_i (1 - p(r, \rho_i, x))$$

ρ_i varie de ρ_0 , défini par $d(\rho_0) = x$, à r_{sup} .

La probabilité qu'une goutte de rayon r soit capturée est :

$$p(r) = \int_{d(r)}^{d(r_{\text{sup}})} 2\pi x p(r, x) \cdot dx / \pi(d^2(r_{\text{sup}}) - d^2(r))$$

Nous avons calculé les probabilités élémentaires $p(r, \rho_i, x)$ en nous référant à un article sur le nombre aléatoire de gouttes dans un volume donné (37). Elles obéissent à une loi binomiale dont le paramètre est fonction de la teneur en eau de l'émulsion (cf. Annexe IV).

Le volume total d'eau enlevé de l'émulsion est donc proportionnel à

$$\int_0^{r_{\text{sup}}} n(\rho) |d^2(\rho) - r_{\text{int}}^2 + (d^2(r_{\text{sup}}) - d^2(\rho)) p(\rho)| \rho^3 d\rho \quad (2.6)$$

Le volume total d'eau contenu dans l'émulsion est proportionnel à

$$\int_0^{r_{\text{sup}}} n(\rho) |r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2| \rho^3 d\rho \quad (2.7)$$

Le rendement d'extraction en eau est égal au rapport des facteurs (2.6) et (2.7).

Tous les calculs ont été conduits sur ordinateur. En plus des données du précédent modèle il faut introduire un nouveau paramètre : la teneur en eau.

La prise en compte de la coalescence de gouttes due aux vitesses différentes de décantation n'a pas été exposée dans l'étude précédente afin de "faciliter" la lecture : elle se fait par la même méthode.

Les résultats du modèle montrent qu'il existe une *relation linéaire* entre le rendement d'extraction en eau et la teneur en eau si elle est assez faible ($< 0,5 \%$).

Ce modèle cependant ne suffit pas à expliquer le grossissement de la taille des gouttes que nous avons observé. Nous en avons donc élaboré un autre qui tient compte de la coalescence dipolaire.

2.3.4 - Modèle tenant compte de la coalescence dipolaire

(e") - Dans ce cas le grossissement de la taille des gouttes de l'émulsion par coalescence dipolaire est étudié mais celui du aux chocs résultant des vitesses de décantation ou de diélectrophorèse différente est négligé. Nous verrons au chapitre V que ceci n'entraîne qu'une erreur infime.

(f") - Nous supposons d'autre part un régime piston d'écoulement de l'émulsion dans la cellule.

(g") - Enfin pour tenir compte des distorsions du champ créées par les gouttes nous supposons que la force électrique s'exerçant sur une goutte dépend de la teneur en phase dispersée W_0 .

La force de diélectrophorèse s'écrit donc :

$$\vec{F}_e = \frac{1}{2} \alpha v (1 + k_1 W_0) \vec{g} \text{rad } E_0^2$$

Appelons v_i le volume d'une goutte de rayon r_i .

La vitesse d'agglomération par coalescence dipolaire des gouttes de rayon r_i et r_j a été calculée par G.M. PANCHENKOV et col. (8) ; elle est proportionnelle à

$$K_{i,j} = k_2 \left(\frac{\epsilon_1}{T} \right)^{1/3} \frac{v_i v_j}{v_i + v_j} E_0^{2/3}$$

T est la température absolue.

La vitesse de formation des gouttes de rayon r_i s'écrit donc

$$\frac{dn_i}{dt} = - \sum_{j=0}^{\infty} K_{i,j} n_i n_j - K_{i,i} n_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^i K_{j,i-j} n_j n_{i-j} \quad (2.8)$$

n_i est le nombre de gouttes de rayon r_i par unité de volume.

Les deux premiers groupes de la partie droite de l'équation (2.8) expriment la vitesse de disparition des gouttes de rayon r_i ; le dernier représente la vitesse de formation de ces gouttes à partir des gouttes de rayons plus faibles r_j et r_{i-j} . La combinaison de cette équation et de celle exprimant la vitesse de diélectrophorèse permet alors d'écrire un modèle qui calcule la répartition granulométrique des gouttes de l'émulsion à la sortie de l'appareil et le rendement en fonction de la répartition à l'entrée.

A l'instant $t = 0$ les gouttes de la "tranche" d'émulsion comprise entre les plans de cote $z=0$ (au niveau de l'introduction dans l'appareil) et $z = dz$ sont réparties uniformément (hypothèse b) c'est-à-dire $n_i = \text{constante } \forall x$.

Examinons l'état de cette "tranche" d'émulsion à l'instant dt .

Elle se trouve comprise entre les cotes $v_f dt$ et $v_f dt + dz$ en appelant v_f la vitesse de passage de l'émulsion dans l'appareil (hypothèse f"). D'autre part la répartition de la taille des gouttes aura variée conformément à l'équation (2.8). Enfin les gouttes se seront rapprochées de l'électrode centrale et certaines l'auront atteinte (équation 2.1 corrigée suivant l'hypothèse (g")) : donc les concentrations auront variées.

Explicitons ces divers phénomènes.

Appelons $n(i, x, t)$ le nombre des gouttes de rayon r_i par unité de volume à l'instant t et à la distance x de l'axe, $v(r_i, x)$ la vitesse de diélectrophorèse d'une goutte de rayon r_i située à une distance x , $v'(r_i, x)$ la dérivée de $v(r_i, x)$ par rapport à x .

Il existe évidemment une relation entre la cote et le temps qui s'exprime $z = v_f \cdot t$.

Considérons les gouttes de rayon r_i comprises dans un anneau de rayons x et $x + dx$ et de hauteur dz . A l'instant t il y en a $n(i, x, t) 2\pi \cdot x dx dz$.

A l'instant $t + dt$ elles sont situées dans un anneau de hauteur dz , de rayon intérieur $x + v(r_i, x)dt$ et de rayon extérieur

$$\rho_{\text{ext}} = x + dx + v(r_i, x + dx)dt$$

Soit si on se limite à un développement du 1^o ordre

$$\rho_{\text{ext}} = x + dx + |v(r_i, x) + v'(r_i, x) dx|dt$$

Ces gouttes sont donc comprises dans un anneau de volume $2\pi(x + v(r_i, x)dt) (1 + v'(r_i, x)dt)dx.dz$.

En outre leur nombre a varié puisque il se produit de la coalescence dipolaire. Le nombre de gouttes de rayon r_i au temps $t + dt$ dans l'anneau considéré est d'après (2.8)

$$n'_i = n(i, x, t) + \left(\frac{dn(i, x, t)}{dt}\right)dt$$

Les concentrations des gouttes de rayon r_i à des instants différents sont donc reliées par les relations de récurrence.

$$n\{i, x + v(r_i, x)dt, t + dt\} = n'_i \frac{x}{(x + v(r_i, x)dt) (1 + v'(r_i, x)dt)}$$

$$z(t + dt) = z(t) + v_f dt = v_f \cdot (t + dt)$$

$$\text{avec } n'_i = n(i, x, t) + \left[- \sum_{j=0}^{\infty} K_{i,j} n(i, x, t) - K_{i,i} n^2(i, x, t) + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^i K_{j,i-j} n(j, x, t) \cdot n(i-j, x, t) \right]$$

$$\text{et } K_{i,j} = k_2 \left(\frac{\epsilon_1}{T}\right)^{1/3} \frac{r_i^3 r_j^3}{r_i^3 + r_j^3} E_0^{2/3}$$

Il semble difficile de poursuivre les calculs analytiquement aussi les avons nous menés à l'aide d'un ordinateur.

En partant des conditions initiales que l'on connaît on en déduit par récurrence les concentrations de chaque taille de gouttes en tout lieu (itération sur l'espace) et à tout instant (itération sur le temps). On en déduit la répartition granulométrique de l'émulsion à la sortie de la cellule de diélectrophorèse ainsi que le rendement. Les constantes k_1 et k_2 sont déterminées de manière à faire coïncider des résultats donnés par le calcul avec ceux résultant d'expériences.

Un ordinogramme du modèle est donné en annexe IV.

III - MONTAGE EXPERIMENTAL ET CARACTERISTIQUES DE L'EMULSION

3.1 - L'appareillage et les produits

Le montage comprend la cellule de diélectrophorèse, l'appareillage électrique et une partie destinée à la circulation, au stockage et à la mesure du débit des fluides ainsi qu'à la fabrication de l'émulsion (figure n° 5).

3.1.1 - La cellule de diélectrophorèse

3.1.1.1 - Nous avons vu au paragraphe 2.2.1 que la force électrique agissant sur une goutte était proportionnelle à $\text{grad } E_0^2$. Les lignes de champ de \vec{E}_0 et donc la valeur du gradient dépendent de la forme des électrodes entre lesquelles on établit une différence de potentiel ; nous donnons en annexe III quelques valeurs de $\text{grad } E_0^2$ en fonction de cette forme. Pour des raisons de simplicité de fabrication et d'utilisation de la cellule nous avons choisi d'utiliser un champ \vec{E}_0 créé par deux électrodes cylindriques et coaxiales. Nous avons conçu deux cellules différentes : l'une en verre destinée à voir les phénomènes qui s'y produisent et l'autre en acier inoxydable.

Cellule de type I : (voir schéma fig. 6) Elle se compose d'un corps en verre en trois parties afin de faciliter les manipulations. Pour des raisons que nous exposerons plus loin nous avons choisi d'opérer la décantation de l'eau à contre courant : la partie inférieure du corps comprend donc un orifice d'entrée de l'émulsion et une sortie pour l'eau décantée. La partie supérieure comprend un orifice destiné à la sortie du produit traité ainsi que des trous servant à la fixation des électrodes. Les deux électrodes coaxiales sont en acier inoxydable : elles sont fixées à la partie supérieure du corps au moyen de bouchons isolants. Le raccordement électrique des électrodes se fait à l'extérieur de la cellule.

Il est évident que dans les parties inférieures et supérieures de la cellule les lignes de champ diffèrent beaucoup de celles créées par deux cylindres coaxiaux infinis mais cette disposition a l'avantage considérable de permettre la vision des phénomènes.

Cellule de type II : (voir schéma fig. 7) Le corps de cette cellule est un tube en acier inoxydable qui est utilisé aussi comme électrode extérieure ; il est fermé à ses deux extrémités par des cylindres en polychlorure de Vynil : celui du bas permettant la sortie de l'eau et celui du haut la fixation de l'électrode intérieure, en acier elle aussi.

L'entrée de l'émulsion et la sortie du produit traité se font respectivement dans les quarts inférieur et supérieur du corps.

Les lignes de champ dans la zone de traitement de l'émulsion sont identiques à celles créées par deux cylindres coaxiaux infinis.

3.1.1.2 - Limitation de l'intensité du courant électrique

- Le positionnement de l'électrode centrale pose quelques problèmes : il n'est pas possible d'utiliser des entretoises entre les deux électrodes car un film d'eau s'y forme provoquant un passage de courant de forte intensité entre les électrodes. La difficulté a été résolue en guidant l'électrode intérieure à l'aide du bouchon dans la deuxième cellule et en fixant dans la première la partie supérieure de l'électrode par deux guides réglables situés à l'extérieur.

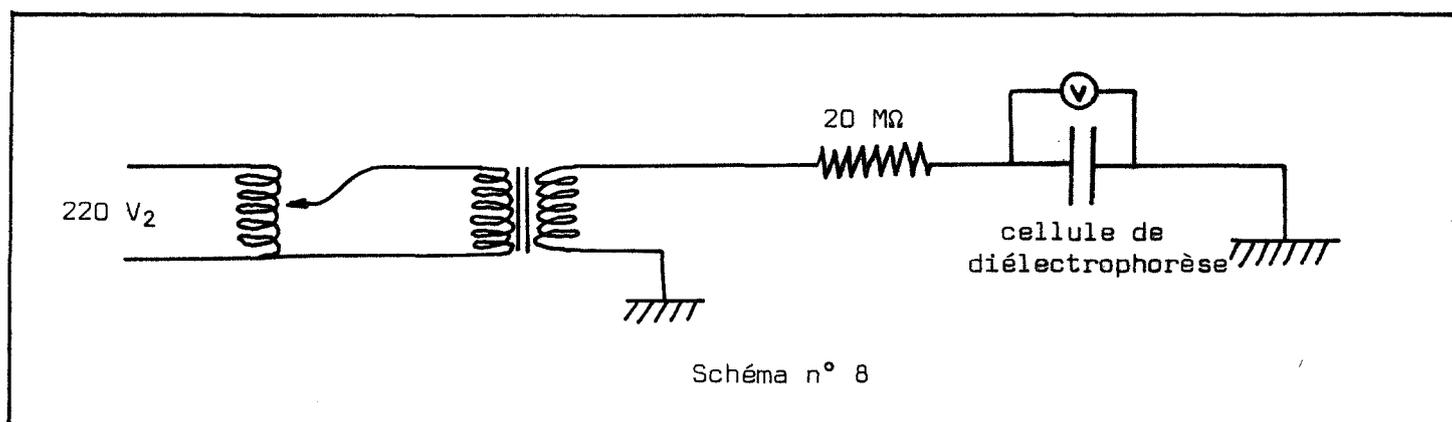
- Si les électrodes ne sont pas recouvertes d'une couche isolante, les gouttes qui atteignent l'électrode centrale se chargent et rebondissent vers l'autre électrode créant ainsi un transfert de charges par conduction. Nous avons pu observer ce fait dans une cellule semblable à celle décrite dans l'annexe I mais dont les électrodes n'étaient pas protégées. L'intensité du courant électrique qui traverse l'appareil est alors relativement élevée en particulier, si on emploie un générateur fournissant une haute tension continue pour créer le champ électrique. Actuellement, les électrodes sont protégées par un film plastique, et ce phénomène est, sinon inexistant, du moins très atténué.

Lorsque ces précautions sont prises, l'intensité du courant qui traverse la cellule est très faible - densité moyenne de courant, y compris les courants de fuite, inférieure à 60 nA/cm^2 dans le cas de la diélectrophorèse d'une émulsion d'eau dans du gas oil.

3.1.2 - L'appareillage électrique

Nous avons travaillé en champ alternatif aussi bien qu'en champ continu. Le générateur haute tension continu est un appareil SAMES qui fournit une tension aux bornes de 0 à 80 kV, l'intensité du courant restant toujours limitée à 200 μA .

L'ensemble alternatif est composé d'un auto transformateur primaire 220 V - secondaire 0-220 V et d'un transformateur haute tension primaire 0-220 V - secondaire 0-15 kV. Des résistances ont été introduites sur le circuit afin de limiter l'intensité du courant en cas de court circuit dans la cellule de diélectrophorèse.



L'intensité dans le circuit est ainsi limitée à 750 μ A. Nous avons toujours utilisé le réseau de fréquence 50 Hz.

3.1.3 - L'émulsion

L'émulsion est fabriquée et entretenue à l'aide de deux pompes centrifuges. Pour la fabriquer il suffit de faire circuler la phase continue puis d'y injecter la phase dispersée dans un tube situé à l'aspiration d'une des pompes. Les gouttes qui se forment sont alors cassées en très fines gouttelettes par le rotor de la pompe. On doit ensuite continuer à recycler l'émulsion sinon la teneur en eau diminue : nous avons observé une diminution de 400 ppm en trois heures pour 80 l d'émulsion de teneur initiale 1400 ppm circulant à un débit de 300 l/h obtenu en utilisant une seule pompe. Si on utilise deux pompes, par contre, la teneur en eau reste constante mais la taille moyenne des gouttes a tendance à diminuer légèrement.

Le débit d'émulsion introduit dans la cellule de diélectrophorèse est ajusté en jouant sur le taux de recyclage : il est mesuré à l'aide d'un des trois rotamètres situés en parallèles que l'on peut brancher sur le circuit grâce à des vannes de réglage. Nous avons ainsi une gamme de mesures possible de 0,3 l/h à 25 l/h.

Nous n'avons pas jugé nécessaire de réguler le niveau d'émulsion dans le bac. Le débit d'émulsion traité est en effet faible vis à vis de la contenance du bac ; le niveau ne baisse donc que très lentement. Comme la charge reste à peu près constante un ajustement du débit toutes les heures suffit.

Les prises d'échantillon se font avec des seringues à travers des bouchons en caoutchouc placés en divers endroits sur les tuyauteries. Les risques d'hydratation de l'émulsion au contact de l'air humide sont ainsi évités.

3.1.4 - Produits utilisés et température

Le produit choisi pour phase continue de l'émulsion, doit obéir à certains critères :

- forte résistivité pour permettre d'appliquer des champs électriques élevés sans qu'il y ait apparition de courant trop intense,
- point éclair situé à une température suffisante afin de limiter au maximum les risques d'incendie qui pourrait se produire en cas de surchauffe locale due à un court circuit au sein de la cellule.

Notre choix s'est porté sur du gas oil pour moteur diesel - constante diélectrique relative $\epsilon_1 = 2,20$, viscosité dynamique $\mu_1 = 3,37$ cp, masse volumique $\rho_1 = 830,6$ kg/m³ à 21°C. Ce produit contient de 60 à 100 ppm d'eau dissoute à température ambiante.

REMARQUE : le choix du gas oil présente un autre aspect avantageux il constitue en quelque sorte un "point moyen" représentatif des produits pétroliers.

La résistivité du gas oil est élevée ($> 10^{12} \Omega m$) donc la constante de temps de relaxation de ce diélectrique est de l'ordre de la seconde : au phénomène de diélectrophorèse viendra donc s'ajouter l'"electrofining" quand nous utiliserons un champ continu.

La phase dispersée est constituée d'eau distillée.

L'émulsion formée par ces deux corps est non stabilisée.

La température optimale de traitement de l'émulsion est celle qui permet la plus grande vitesse de décantation de la phase dispersée : or cette vitesse est proportionnelle à $\frac{\rho_2 - \rho_1}{\mu_1}$. La température optimale doit donc être choisie de manière à rendre ce rapport maximum.

Dans notre cas cependant, la différence des masses volumiques de la phase dispersée et de la phase continue est grande et le gas oil est peu visqueux à température ambiante : nous l'avons donc choisi comme température de travail pour des raisons de simplicité expérimentale.

La pièce dans laquelle nous travaillons est située en sous-sol si bien que la température y est à peu près constante -écart maximal été hiver 3°C- .

L'émulsion qui circule dans les pompes se réchauffe : il faut considérer une élévation de température de 3°C après huit heures de recyclage dans les conditions opératoires courantes (60 litres d'émulsion).

Pour nos calculs nous avons considéré les valeurs des paramètres des produits utilisés à la température moyenne 21°C.

3.1.5 - Réentraînement de gouttes d'eau

Les gouttes d'eau viennent s'agglomérer sur l'électrode centrale : le film d'eau ainsi constitué glisse sur l'électrode et décante à la base de la cellule de diélectrophorèse. Cependant si des micro-turbulences se forment au sein de l'émulsion une partie de cette eau peut être réentraînée et ressortir de l'appareil sous forme de grosses gouttes.

Ces turbulences peuvent être d'origine soit hydraulique, liées au débit de fluide circulant dans la cellule, soit électriques, fonctions du champ appliqué : elles se traduisent par une baisse du rendement.

Pour éviter au maximum ce réentraînement il semble naturel de placer la sortie du produit traité dans la partie de la cellule qui contient le moins d'eau c'est-à-dire la partie supérieure. Nous avons effectivement constaté que le pourcentage d'eau réentraînée est moindre si la décantation s'opère à contre courant : c'est ce qui explique que *l'admission d'émulsion se fait à la base de la cellule.*

3.2 - Détermination des caractéristiques de l'émulsion

Nous décrivons ci-dessous les méthodes que nous avons employées pour le dosage de la teneur en eau émulsionnée avec du gas oil et pour la détermination de la répartition granulométrique des gouttes.

3.2.1 - Dosage de la teneur en eau non dissoute d'une émulsion

Les forces engendrées par l'agitation thermique sur des molécules d'eau sont très supérieures aux forces créées par un champ électrique (cf. Annexe III) : il est donc impossible d'extraire, par diélectrophorèse, l'eau dissoute dans le gas oil.

Seules les gouttelettes d'eau sont affectées par ce phénomène et l'efficacité du traitement peut s'exprimer par un rendement ainsi défini.

$$\text{rendement} = 1 - \frac{\text{concentration en eau non dissoute après traitement}}{\text{concentration en eau non dissoute avant traitement}}$$

Des méthodes de dosage soit chimiques à l'aide du réactif de Karl Fischer, soit physiques par mesure de la constante diélectrique en présence (38) ou non d'un tiers solvant sont citées dans la littérature. Nous avons préféré mettre au point une méthode de mesure, par absorption infrarouge, qui se révèle à la fois simple de mise en oeuvre et précise.

3.2.1.1 - Principe de la méthode

Nous utilisons un spectrophotomètre d'absorption infrarouge à double faisceau. La cuve de mesure contient l'émulsion et de la méthylethylcétone solvant nécessaire pour obtenir une homogénéisation des deux phases liquides. La cuve de référence contient du *gas oil saturé en eau* et de la méthyléthylcétone. Le spectrophotomètre fournit alors la différence d'absorption entre les deux cuves, due seulement à *l'eau non dissoute* de l'émulsion. La valeur de l'absorption est repérée à 3550 cm^{-1} nombre d'onde caractéristique de la liaison O-H de l'eau. Il suffit alors de se reporter à une courbe d'étalonnage pour connaître la teneur en eau non dissoute de l'émulsion.

3.2.1.2.1 - Tracé de la courbe d'étalonnage

Les étalons sont préparés en mettant des quantités connues d'eau distillée dans un mélange constitué de deux tiers en poids de *gas oil saturé en eau* et d'un tiers de méthyléthylcétone (M.E.C.). Les étalons de concentration la plus élevée sont obtenus en ajoutant l'eau à l'aide d'une micro burette à piston plongeur ; les autres sont fabriqués par dilution des premiers.

Nous mesurons alors l'absorption de ces étalons en prenant comme référence le mélange 2/3 *gas oil*, 1/3 M.E.C. ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage.

Cette courbe qui est pratiquement une droite a été estimée par la méthode des moindres carrés (cf. Annexe V). Nous constatons donc que le logarithme de l'absorption obéit à la loi de Beer-Lambert, résultat tout à fait normal puisque la concentration en eau est très faible.

La courbe d'étalonnage a été établie dans l'intervalle 0-2000 ppm_{poids} et a été vérifiée jusqu'à 4000 ppm. Le spectrophotomètre utilisé est un appareil PERKIN ELMER. Les cuves d'une épaisseur de 2 mm sont en infrasil.

3.2.1.2.2 - Limites de la méthode

Sensibilité : D'après la loi de Beer Lambert le logarithme de l'absorption est proportionnel à l'épaisseur de la cuve de mesure : il suffirait donc théoriquement d'accroître cette épaisseur pour mesurer des teneurs en eau très faibles. Mais si la cuve est trop épaisse le "bruit" dû à l'électronique du spectrophotomètre devient supérieur au signal et plus aucune mesure n'est possible. Pour mesurer la teneur en eau de l'émulsion on ne peut pas employer une cuve d'épaisseur supérieure à 2 mm et la sensibilité est alors de 5 ppm poids d'eau. A partir de cette teneur et jusqu'à 40 ppm il est possible de faire une estimation ; au delà la teneur en eau peut être mesurée.

Précision : Nous donnons ci-dessous un tableau définissant les précisions atteintes.

teneur en eau ppm poids	précision relative moyenne
0 - 40	—
40 - 200	5 %
200 - 1000	2 %
> 1000	1 %

Reproductibilité : Cette mesure est reproductible à condition de régler l'appareil à l'aide d'une ligne de base qui doit rester fixe dans le temps.

3.2.1.2.3 - Méthode pratique de dosage

Le prélèvement d'émulsion à doser se fait dans une seringue de poids connu. Par pesée on en déduit le poids M d'émulsion et on rajoute un poids M' de méthyléthylcétone aussi proche que possible de M/2. L'emploi de la seringue permet d'éviter l'hydratation de la M.E.C. Le dosage est ensuite fait, la cellule de référence contenant un mélange de 2/3 poids de gas oil saturé en eau et un tiers en poids de M.E.C. On lit alors l'absorption $(\log \frac{I_0}{I})_{1\mu}$.

Deux corrections sont alors apportées à ce résultat.

- Une due aux concentrations différentes de gas oil et de M.E.C. dans les deux cellules. Ce fait pourrait entraîner des interférences entre l'absorption résultant de la liaison O-H de l'eau et celle de la cétone. Des expériences faites avec avec des échantillons de diverses teneurs en M.E.C. ont montré que dans une limite raisonnable $M' = M/2 (1 \pm 0,1)$ la hauteur du pic d'absorption n'était pas influencée par ces différences de concentration. Cette correction n'a donc pas lieu d'être.

- Une correction due à la dilution de l'eau créée par une plus ou moins grande concentration en M.E.C., qui s'écrit :

$$(\log I_0/I)_{\text{réel}} = (\log I_0/I)_{\text{lu}} \left(1 + \frac{\rho_{\text{gas oil}}}{\rho_{\text{MEC}}} \cdot \frac{M'}{M} \right) / \left(1 + \frac{\rho_{\text{gas oil}}}{\rho_{\text{MEC}}} \cdot 0,5 \right)$$

$\rho_{\text{gas oil}}$ masse volumique du fuel

ρ_{MEC} masse volumique de la méthyléthylcétone

Une fois cette correction apportée on peut connaître le pourcentage en eau par comparaison avec la courbe d'étalonnage.

3.2.2 - Répartition granulométrique de l'émulsion

Pour la mesure de la taille des gouttes, la littérature cite diverses méthodes : microphotographie avec ou sans encapsulation préalable des gouttes (39), diffraction de la lumière, différence de vitesse des ondes acoustiques suivant les milieux qu'elles traversent (40), observation de la hauteur d'une interface au cours d'une décantation (41). Cette dernière méthode est inemployable dans notre cas vu la faible teneur en eau de l'émulsion.

Les essais de mesure de tailles sous microscope ne se sont guère révélés concluants car la distance frontale de l'appareil employé était trop petite, aussi ne parvenions-nous à voir que les gouttes collées sur le support d'échantillon. Nous avons donc mis au point une méthode fondée sur la mesure des concentrations en phase dispersée lors d'une décantation.

Appelons $\alpha(a)$ la fonction telle que $\alpha(a)da$ soit la proportion d'eau constituée par des gouttes de rayon compris entre $a + da$. La relation entre cette fonction et la fonction de densité de probabilité de tailles de gouttes est

$$\alpha(a) = a^3 f(a) / \int_0^{\infty} r^3 f(r) dr.$$

A partir de mesures de concentration effectuées lors de la décantation de l'émulsion nous allons estimer cette fonction.

3.2.2.1 - Relation entre $\alpha(a)$ et la concentration

Première méthode : Laissons décanter une émulsion d'eau dans du gas-oil et mesurons à divers instants t la teneur en eau $c(t)$ à une distance L de la surface libre.

Posons les hypothèses suivantes :

- Pour une goutte de taille donnée la vitesse de décantation est constante, c'est-à-dire la période d'accélération peut être négligée. Cette simplification n'entraîne qu'une erreur infime si les gouttes sont petites ce qui est notre cas.

- Il n'y a pas coalescence de gouttes entre elles.

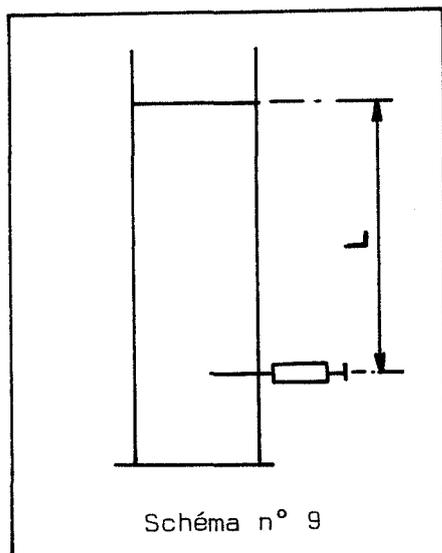
Alors les gouttes de l'émulsion décanteront à une vitesse qui peut s'exprimer suivant la formule de Stokes-Rybczynsky-Hadamard à condition que la teneur en eau de l'émulsion soit relativement faible (34).

$$v(r) = \frac{2g}{9\mu_1} (\rho_2 - \rho_1) \frac{3(\mu_1 + \mu_2)}{3\mu_2 + 2\mu_1} r^2$$

Soit $v(r) = K''r$.

A l'instant t toutes les gouttes dont la vitesse de chute est supérieure à L/t sont situées en dessous de la prise d'échantillon. C'est dire qu'à l'instant t on mesure la teneur en eau de l'émulsion constituée par des gouttes de vitesse inférieure à L/t donc de rayon inférieur à

$$a = (L/K''t)^{1/2} \quad (3.1)$$



La teneur en eau mesurée à l'instant t vaut donc :

$$c(t) = c(0) \int_0^a \alpha(r) dr \quad (3.2)$$

Soit en dérivant cette équation par rapport à t

$$\alpha(a) \frac{da}{dt} = \frac{1}{c(0)} \frac{dc(t)}{dt}$$

Et en reportant $\frac{da}{dt}$ par sa valeur tirée de l'équation (3.1)

$$\alpha(a) = - \frac{2}{c(0)} \sqrt{\frac{k''}{L}} t^{3/2} \frac{dc(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Donc la connaissance de la fonction $C(t)$ représentant la teneur en eau de l'émulsion à tout instant à une distance donnée L de la surface libre permet de déterminer la fonction de répartition de gouttes $\alpha(a)$ cherchée.

Deuxième méthode : Au lieu de mesurer la teneur en eau à tout instant on peut la mesurer à un instant donné t à différentes distances L de la surface libre.

Soit $C(L)$ ces teneurs mesurées.

D'après l'équation (3.2)

$$C(L) = C(0) \int_0^a \alpha(r) dr$$

D'où après dérivation par rapport à L

$$\alpha(a) \frac{da}{dL} = \frac{1}{c(0)} \frac{dc(L)}{dL}$$

Et en remplaçant $\frac{da}{dL}$ par sa valeur tirée de l'équation (3.1)

$$\alpha(a) = \frac{2}{c(0)} \sqrt{K''tL} \frac{dc(L)}{dL} \quad (3.4)$$

3.2.2.2 - Expériences et résultats

Le problème qui se pose dans la réalisation de la décantation, par application de la première méthode, consiste à opérer les prélèvements d'émulsion sans pour autant perturber le régime hydraulique pour les prélèvements suivants.

La difficulté est tournée en opérant la décantation dans plusieurs bacs identiques remplis avec la même émulsion. Le temps de remplissage des bacs -de l'ordre de la minute- est petit vis à vis du temps de décantation -de l'ordre de la dizaine d'heures- : nous pouvons donc considérer qu'ils ont été remplis au même instant.

Nous pouvons alors supposer que les phénomènes de décantation sont identiques dans tous les bacs et il suffit de faire un *seul prélèvement dans chaque bac* à des instants différents pour pouvoir tracer la courbe $c(t)$ après dosage de la teneur en eau.

L'application de la deuxième méthode est plus aisée : il suffit d'opérer des prélèvements à différentes hauteurs dans un *seul bac*.

Le lissage de l'ensemble des points obtenus constitue une courbe dont on peut calculer la dérivée. On en déduit enfin la courbe de répartition granulométrique en volume $\alpha(a)$ par application soit de l'équation (3.3), soit de (3.4) suivant la méthode employée.

Les bacs de décantation sont en chlorure de polyvinyl ; l'emploi de ce matériau qui possède des propriétés antimouillantes permet d'éviter le dépôt de gouttes sur les parois des bacs qui sont des cylindres de 50 cm de hauteur et de 5 cm de diamètre.

Les seringues utilisées pour opérer les prélèvements servent aussi pour le dosage de l'eau : ce procédé permet de réduire au maximum les erreurs dues aux manipulations.

Résultats : Les deux méthodes donnent des résultats comparables. L'expérience nous a montré qu'il fallait faire les prélèvements à une certaine distance de la surface libre afin d'obtenir une meilleure précision -au minimum 5 cm-.

Les courbes de répartition granulométrique dépendent

- essentiellement de la puissance transmise par unité de volume de phase continue,
- plus faiblement de la teneur en eau.

Nous présentons ci-dessous quelques valeurs du rayon médian de l'émulsion -définition : le rayon médian est tel que 50 % de l'eau de l'émulsion est constituée de gouttes de rayon inférieur au rayon médian- en fonction de ces deux paramètres.

temps d'émulsionnage (h)	concentration eau (ppm _{poids})	rayon médian (μ m)
0,75	1800	5,5
3	600	2,5
5	1800	1,76

La courbe présente un seul pic si on fabrique l'émulsion à partir des deux phases ; elle en présente deux en général si on enrichit en eau une émulsion déjà existante.

Des exemples de courbes de décantation et de répartition granulométrique sont représentés sur les figures 8-9-10-11.

IV - RESULTATS ET VERIFICATION EXPERIMENTAUX4.1 - Essai hydraulique de la cellule et dispersion des résultats

Si nous mesurons la teneur en eau de l'émulsion en continu la précision des résultats serait entachée seulement de l'erreur due à la méthode de dosage de l'eau. Comme ce n'est pas le cas, d'autres facteurs viennent altérer la précision : à l'entrée de la cellule les erreurs dues à l'inhomogénéité éventuelle de l'émulsion auxquelles viennent s'ajouter à la sortie les erreurs dues aux variations instantanées de la teneur en eau causée par les petites turbulences qui se produisent au sein de l'appareil de diélectrophorèse.

En faisant circuler l'émulsion dans la cellule *en l'absence de champ électrique*, nous avons essayé de trouver la part relative due à chacun des trois facteurs.

- (1) dosage de l'eau.
- (2) inhomogénéité éventuelle de l'émulsion à l'entrés.
- (3) inhomogénéités dues aux *turbulences hydrauliques* dans la précision des résultats.

Pour cela, introduisons dans la cellule, une émulsion de concentrations variées. Opérons m prélèvements numérotés de $i = 1$ à m à un instant j à l'entrée de la cellule et mesurons en la teneur en eau x_{ij} . Faisons de même à la sortie : nous obtenons des teneurs en eau y_{ij} . Répétons la même opération à n instants différents.

La variance des mesures de la teneur en eau à l'entrée est due seulement aux facteurs (1) et (2) : elle vaut (54).

$$\sigma_{1,2}^2 = \frac{\sum_j \sum_i (x_{ij} - x_{.j})^2}{n(m-1)} \quad \begin{array}{l} i \text{ variant de } 1 \text{ à } m \\ j \text{ variant de } 1 \text{ à } n \end{array}$$

en appelant $x_{.j}$ la moyenne par rapport à i $x_{.j} = \frac{\sum_i x_{ij}}{m}$

Calculons la droite de régression des moyennes $x_{.j}$ par rapport au temps soit $x = at + b$ son équation.

La variance due à cette régression vaut

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_j (at_j + b - x_{.j})^2}{n - 2}$$

Posons l'hypothèse suivante : il ne se produit pas de décantation dans la cellule. Dans ce cas toute l'eau qui rentre dans la cellule en ressort et donc s'il n'y avait pas de perturbations introduites par les turbulences hydrauliques, la droite de régression des moyennes $y_{.j} = \frac{\sum y_{ij}}{m}$ serait identique à celle des moyennes $x_{.j}$ mais décalée du temps de séjour T de l'émulsion dans l'appareil. Son équation serait donc $y = a(t - T) + b$. Soit σ_y^2 la variance des moyennes $y_{.j}$ par rapport à cette droite

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_j (a(t_j - T) + b - y_{.j})^2}{n - 2}$$

L'excédent de σ_y^2 sur σ_x^2 représente la part d'erreur due au troisième facteur, commise sur les moyennes $y_{.j}$. La variance due aux turbulences hydrauliques vaut donc :

$$\sigma_3^2 = m(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)$$

Connaissant l'erreur commise sur le dosage de l'eau, nous pouvons estimer la variance σ_1^2 due à ce facteur (erreur absolue $\approx 1,65$ écart type au seuil de confiance 90 %) et donc en déduire la variance due à l'inhomogénéité de l'émulsion σ_2^2

$$\sigma_2^2 = \sigma_{1,2}^2 - \sigma_1^2$$

Pour réaliser cette expérience, nous avons effectué à peu près toutes les heures, deux prélèvements à l'entrée et deux à la sortie en un temps suffisamment court par rapport au temps de séjour pour qu'on puisse considérer qu'ils ont été faits simultanément. Les teneurs en eau correspondant à ces expériences sont représentées sur la figure 12.

Nous avons aussi vérifié à cette occasion qu'il n'y a pas de décantation des gouttes dans la cellule de diélectrophorèse en l'absence de champ électrique.

Soit après calculs :

$$\sigma_{1,2}^2 = 217 \text{ ppm}^2$$

$$\sigma_x^2 = 220 \text{ ppm}^2$$

$$\sigma_y^2 = 1065 \text{ ppm}^2$$

L'erreur absolue moyenne commise sur le dosage de l'eau au voisinage de 1000 ppm, c'est-à-dire dans les conditions où s'est déroulée l'expérience est 15 ppm. Elle correspond à une variance $\sigma_1^2 = \left(\frac{15}{1,65}\right)^2$. Les variances dues à chaque facteur d'incertitude sont donc :

$$\sigma_1^2 = 83 \text{ ppm}^2$$

$$\sigma_2^2 = 134 \text{ ppm}^2$$

$$\sigma_2^3 = 1690 \text{ ppm}^2$$

De ces résultats nous pouvons tirer les conclusions suivantes.

La variance σ_2^2 est faible donc l'erreur due aux inhomogénéités de l'émulsion est faible elle aussi. *L'émulsion préparée pour la diélectrophorèse est donc très homogène.* En outre, la plus grande part d'erreur commise sur la mesure des concentrations en eau à la sortie de l'appareil provient des turbulences hydrauliques qui se produisent au sein de la cellule -en effet σ_2^3 est très supérieur à $\sigma_1^2 + \sigma_2^2$ - .

Enfin nous pouvons estimer les erreurs commises sur la mesure de la teneur en eau (erreur absolue $\approx 1,65$ écart type).

- à l'entrée, erreur absolue 25 ppm
soit pour un taux de 1000 ppm erreur relative 2,5 %
- à la sortie, erreur absolue 65 ppm
correspondant à une erreur relative de 6,5 %.

Pour définir l'incertitude totale commise sur la mesure d'un rendement de diélectrophorèse en présence d'un champ électrique il faut en plus introduire l'erreur due aux turbulences électriques mais nous n'avons aucun moyen de l'estimer.

Cependant, d'après la dispersion des résultats expérimentaux, nous pouvons estimer à 12 % l'erreur relative commise sur la mesure d'un rendement de diélectrophorèse.

4.2 - Résultats expérimentaux

REMARQUE IMPORTANTE : nous définissons la valeur d'un champ alternatif par la différence de potentiel existant entre les électrodes, équivalente à la différence de potentiel continue qui créerait les mêmes effets de diélectrophorèse.

exemple : une différence de potentiel alternative de 5 kV a, d'après nos conventions, une amplitude de $5\sqrt{2}$ kV.

4.2.1 - Résultats sur la cellule de type I

L'utilisation de cette cellule, conçue pour permettre de voir les phénomènes qui se produisent au cours du traitement, a montré qu'il est possible de réduire de façon considérable le taux de phase dispersée d'une émulsion de faible concentration, rendement de 80 % pour une concentration de 700 ppm d'eau par utilisation d'un champ continu moyen de 2 kV/cm.

D'autre part, ces premiers essais ont permis d'estimer les caractéristiques et les dimensions de la cellule de type II. Nous n'avons donc pas fait d'études systématiques des variations du rendement.

Nous nous sommes limités à l'emploi d'un champ continu et d'une gamme assez réduite de débits d'émulsion traitée -de 1,5 l/h à 10 l/h-. Les courbes correspondantes sont tracées sur les figures 13 et 14.

L'influence des paramètres de fonctionnement a été étudiée sur la cellule de type II.

4.2.2 - Résultats sur la cellule de type II

Nous allons d'abord préciser les variations du rendement en fonction des paramètres -nature du champ électrique, temps de traitement, valeur du champ appliqué, teneur en eau- en considérant la répartition granulométrique de l'émulsion comme une donnée exogène des expériences. Nous définirons ensuite les changements intervenant dans cette répartition au cours du traitement.

4.2.2.1 - Influence des paramètres de fonctionnement

- Nature du champ électrique : Toutes les expériences montrent que le rendement d'extraction de l'eau est toujours supérieur si le champ appliqué est continu plutôt qu'alternatif. Pour une même émulsion nous avons obtenu, par exemple, les résultats suivants.

{ émulsion 1172 ppm d'eau temps de traitement 3,60 mn différence de potentiel entre électrodes 5 kV	rendement	{ continu 0,81 alternatif 0,40	

L'écart relatif entre ces rendements décroît quand l'extraction en eau devient plus efficace. Le tableau suivant fournit des exemples de cet écart.

rendement en champ continu	$\frac{\text{rendement en champ continu}}{\text{rendement en champ alternatif}}$
0,57	4,56
0,83	2,24
0,90	1,24

- D'une part si l'on emploie un champ continu certaines gouttes peuvent se charger et venir se déposer sur les électrodes par électrophorèse : c'est le phénomène d'"electrofining" décrit précédemment. Ceci se vérifie dans la cellule à champ uniforme (décrite dans l'annexe I) bien que les électrodes soient protégées.

- D'autre part, la quantité d'eau séparée de l'émulsion mais non encore décantée à la base de la cellule est plus importante en cas d'emploi d'un champ alternatif plutôt que continu. Nous avons pu observer ce phénomène au moment de la coupure du champ. Les réentrainements de gouttes sont donc moins nombreux dans ce dernier cas.

- Influence du temps de traitement (fig. 15 et 16)

Bien que nous ayons effectué le traitement de l'émulsion d'une manière continue, nous préférons parler de temps de traitement plutôt que de débits.

- relation entre ces deux variables dans la cellule de type II temps de traitement (mn) = 24/débit (l/h).

Quand on augmente le temps de traitement le rendement commence par croître très rapidement avant d'atteindre un seuil à partir duquel il ne progresse plus que lentement.

Pour des faibles temps de traitement (forts débits) le réentrainement de gouttes devient important (fig. 15). Pour une émulsion de 3000 ppm, la teneur en eau à la sortie de la cellule a été mesurée, soit directement, soit après une décantation de deux minutes, temps suffisant pour que les grosses gouttes puissent décanter.

Les rendements calculés à partir de ces deux types de dosage varient dans de fortes proportions comme le montrent les exemples suivants.

temps de traitement (mn)	débit l/h	$\frac{\text{rendement avec légère décantation}}{\text{rendement sans décantation}}$
0,94	25,3	2,35
1,3	18,7	1,31
1,75	13,7	1

- Influence de l'intensité du champ électrique (fig. 17)

Le rendement d'extraction de l'eau est une fonction croissante de la différence de potentiel établie entre les électrodes. Cette fonction présente trois aspects suivant la valeur du champ appliqué.

- si le champ appliqué est inférieur à quelques centaines de V/cm la diélectrophorèse est inefficace : des expériences l'ont montré,

- pour des champs plus élevés la croissance du rendement en fonction de la différence de potentiel est pratiquement linéaire,

- enfin à partir d'un certain seuil le rendement ne croît plus. On peut remarquer que le rendement limite qui est alors atteint n'est pas une fonction croissante du champ appliqué. Au cours d'expériences effectuées sur des émulsions similaires, nous avons trouvé, par exemple, les résultats suivants.

$\left\{ \begin{array}{l} \text{temps de traitement 12 mn} \\ \text{émulsion de concentration 1750 ppm} \\ \text{champ continu} \end{array} \right.$	rendement limite	$\left\{ \begin{array}{l} 0,92 \text{ pour } \Delta V = 2,5 \text{ kV} \\ 0,89 \text{ pour } \Delta V = 5,5 \text{ kV} \end{array} \right.$
--	------------------	---

Ce phénomène est dû aux turbulences électriques qui sont d'autant plus intenses que le champ est plus élevé.

Il est d'ailleurs significatif que le meilleur rendement que nous n'ayons jamais obtenu l'ait été avec l'emploi d'une différence de potentiel relativement faible : 2,5 kV continu, -rendement de 0,98 pour 40 mn de traitement d'une émulsion de concentration 1700 ppm d'eau-. Une telle valeur du temps de traitement n'offre évidemment aucun intérêt pratique.

- Influence de la teneur en eau de l'émulsion (fig. 18)

La forme des courbes du rendement en fonction de la concentration en phase dispersée diffère sensiblement suivant la nature du champ appliqué : en alternatif la croissance est d'abord faible puis forte et enfin modérée tandis qu'en champ continu le rendement croit d'abord très vite puis plafonne.

Dans tous les cas l'influence de la teneur en eau sur le rendement d'extraction est indéniable. Ceci a deux causes.

- soit des distorsions du champ électrique appliqué dues aux gouttes ; cette déformation est d'autant plus importante que leur nombre est plus élevé. Ce fait entraîne une augmentation de la force de diélectrophorèse comme l'a constaté H.A. POHL (50),

- soit des interactions entre gouttes.

L'étude suivante sur la mesure des répartitions granulométriques de l'émulsion avant et après traitement électrique montre qu'effectivement il existe des interactions des gouttes entre elles.

Remarque : il faut bien noter que le rendement est une fonction croissante de la concentration. D'autres auteurs qui ont constaté l'inverse expliquent leurs résultats par l'accumulation de particules autour de l'électrode centrale, entraînant ainsi une dégradation de la non uniformité du champ (52). Tel n'est pas notre cas puisque l'eau séparée de l'émulsion décanse à la base de la cellule.

4.2.2.2 - Variation de la granulométrie pendant le traitement
(fig. 19, 20, 21)

Les répartitions granulométriques sont déterminées avant passage dans la cellule et après, lorsqu'une partie de l'eau a déjà décanse.

Deux faits se dégagent des résultats :

- la taille moyenne des gouttes augmente au cours du traitement électrique,
- les courbes de densité de probabilités des tailles des gouttes sont plus étalées.

Deux exemples de variations du rayon médian et de l'écart entre les deux déciles extrêmes qui illustrent ces faits sont présentés dans le tableau suivant.

avant traitement		après traitement	
rayon médian (μm)	écart entre déciles (μm)	rayon médian (μm)	écart entre déciles (μm)
1,76	1,4	4,7	14,4
2,3	3,1	4	6,8

Des gouttes coalescent donc pour en former de plus grosses. Cette coalescence peut être induite par les chocs survenant entre gouttes ou il peut s'agir de coalescence dipolaire.

La comparaison de ces résultats avec ceux prédits par la théorie nous permet de préciser l'importance respective de chacun de ces phénomènes.

4.3 - Etude de la validité des modèles

Comme nous l'avons déjà fait remarquer au chapitre II, il est fort probable que les résultats des modèles seront meilleurs en champ alternatif qu'en champ continu à cause de l'electrofining qui se produit alors.

Avant de pouvoir tester les différents modèles, il faut ajuster les paramètres que contient le troisième.

4.3.1 - Détermination des paramètres du modèle avec coalescence dipolaire

Deux paramètres interviennent dans ce modèle : celui lié à la vitesse d'agglomération des gouttes et celui régissant la valeur de la force de diélectrophorèse en fonction de la teneur en eau.

Ils ont été déterminés de façon à assurer une correspondance raisonnable entre les valeurs théoriques et expérimentales de la courbe granulométrique et du rendement pour une même expérience (celle représentée sur la figure 19).

Il serait possible d'obtenir *mathématiquement* un meilleur ajustement sur l'ensemble des résultats en augmentant la valeur du paramètre de la force de diélectrophorèse mais alors l'ordre de grandeur de cette force n'aurait plus

aucun rapport avec celui que nous laissent prévoir les lois physiques et qui a été vérifié grossièrement par certains auteurs pour des suspensions solides (51).

4.3.2 - Comparaison des modèles et résultats

Nous avons représenté sur la figure 18 les courbes de rendement en fonction de la teneur en eau, estimées d'après chaque modèle.

Comme nous pouvions le prévoir d'après l'étude des répartitions granulométriques, le modèle sans interactions des gouttes est totalement inadéquat sauf aux très faibles teneurs en eau.

Celui qui ne considère que la coalescence due aux chocs ne suffit pas, et de beaucoup, à expliquer la croissance du rendement.

Remarque : Même si dans ce modèle nous introduisons un paramètre de distorsion du champ, il n'est pas possible d'assurer une concordance entre résultats théoriques et expérimentaux sans altérer ici aussi l'ordre de grandeur de la force de diélectrophorèse.

Le modèle avec grossissement des gouttes du à la coalescence dipolaire représente, par contre, de manière satisfaisante les phénomènes réels.

En comparant d'autres résultats prévus par la théorie avec ceux résultant d'expériences, nous voyons que ce modèle est valide pour des temps de traitement supérieurs à 3 mn. Nous en donnons ci-dessous quelques exemples.

concentration ppm poids	rayon médian μm	ΔV kV	temps de traitement (mn)	rendement réel	rendement théorique
3000	5,5	2,5	4,8	0,715	0,665
1500	5,25	2,5	8	0,675	0,60
2300	2,3	4	4	0,48	0,53
1900	1,76	5	2,72	0,23	0,25
400	5,25	5	3,57	0,13	0,165
2000	5,25	5	3,57	0,73	0,69
3000	5,5	1	3,57	0,175	0,115
3000	5,5	3	3,57	0,74	0,60

Nous constatons que, la concordance entre les rendements est bonne malgré les grandes variations des paramètres de fonctionnement.

A de plus forts débits ce modèle fournit des résultats qui peuvent être jusqu'à 50 % trop faibles : ceci est dû aux conditions d'entrée et de sortie de l'émulsion dans la cellule. En effet si le débit est élevé les lignes de courant du fluide ne sont pas parallèles à l'axe de la cellule sur une grande partie de sa longueur ce dont nos hypothèses de calcul ne tiennent pas compte.

D'autre part, nous constatons que la répartition granulométrique calculée à la sortie de l'appareil par le modèle est légèrement plus étalée que celle qui a été tracée à partir des résultats expérimentaux. (fig. 23).

Il faut cependant considérer deux points :

- la taille des gouttes est très variée ; une petite erreur commise par le modèle sur le nombre de grosses gouttes entraîne donc une beaucoup plus forte sur la répartition en volume. Nous avons illustré ce fait en traçant sur la figure 22 des courbes de densité de probabilités en nombre.

- la répartition granulométrique à la sortie de la cellule est mesurée et calculée après l'extraction d'une partie de l'eau. Donc la moindre erreur commise sur le rendement entraîne une déformation de la courbe.

Compte tenu de ces remarques nous pouvons affirmer qu'il existe une *bonne concordance entre les répartitions granulométriques calculées et expérimentales.*

Nous considérons donc que le modèle avec coalescence dipolaire est pleinement apte à reproduire la réalité. Nous donnons en annexe VI quelques commentaires sur ses hypothèses et ses extensions possibles.

Nous pouvons donc conclure que le modèle avec grossissement des gouttes dû à la coalescence dipolaire convient pour représenter les phénomènes se produisant pendant le traitement électrique.

CONCLUSION

Toutes nos expériences montrent que l'utilisation d'un champ électrique non uniforme permet l'extraction de l'eau contenue en émulsion dans un hydrocarbure. Ce procédé est hautement efficace, même à faible concentration, que le champ soit alternatif ou continu.

Cette séparation est réalisée de façon continue sur un appareil permettant d'atteindre de hauts rendements d'extraction avec des temps faibles de traitement.

L'électrodécantation est produite par des effets de diélectrophorèse accompagnés d'un grossissement des gouttes par coalescence dipolaire.

Un modèle intégrant ces deux phénomènes a été élaboré ; il permet de prévoir le rendement de façon précise pour une large gamme de fonctionnement de l'appareil.

L'étude entreprise ici se poursuit sous deux aspects :

- extension du domaine d'application de la cellule de diélectrophorèse à la séparation des suspensions.
- cassage d'une goutte dans un champ électrique et application au mélange de deux phases.

ANNEXE I - COMPORTEMENT D'UNE GOUTTE LIQUIDE DANS UN CHAMP UNIFORMEI - Déformation d'une goutte en champ électrique uniforme (8)

Supposons qu'une goutte de rayon r_0 de constante diélectrique relative ϵ_2 suspendue dans un milieu de constante ϵ_1 soit soumise à l'action d'un champ électrique uniforme \vec{E}_0 et supposons d'autre part que la goutte constitue un système isolé : sa position d'équilibre est alors celle qui rend son énergie extrême.

Cette énergie se compose de deux termes :

- une énergie électrique égale à

$$W_e = -\frac{1}{2} v \cdot \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1)A} E_0^2 \quad (33)$$

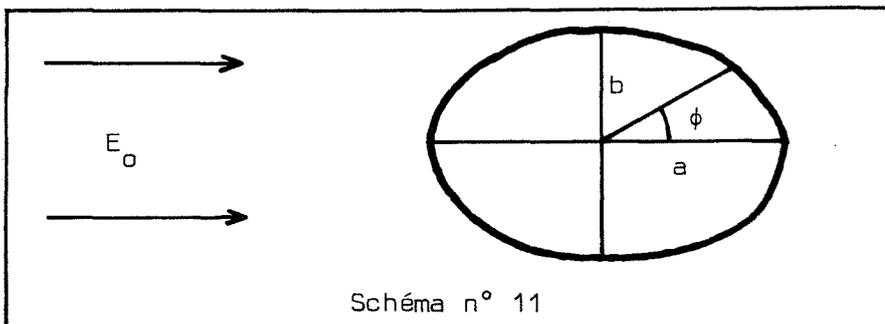
E_0 est le champ appliqué à la goutte et v est le volume de la goutte ; A est un facteur dépendant de la forme de la goutte. (Nous avons vu que $A = \frac{1}{3}$ pour une sphère).

- une énergie de tension interfaciale.

$$W_T = ST$$

S est la surface de la goutte et T la tension interfaciale.

Si nous supposons que la goutte se déforme suivant un ellipsoïde de révolution allongé nous pouvons alors définir A et S .



$$A = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\text{Log} \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right) \quad (33)$$

$$S = 2\pi r_0^2 \left[(1 - e^2)^{1/3} + \frac{(1 - e^2)^{1/6}}{e} \text{Arc sine} \right]$$

e est l'excentricité $e = \frac{1}{a} \sqrt{a^2 - b^2}$

La condition d'équilibre de la goutte s'écrit alors :

$$\frac{d}{de} \left[2\pi r_0^2 T \left\{ (1 - e^2)^{1/3} + \frac{(1 - e^2)^{-1/6}}{e} \text{Arc sine} \right\} - \frac{2\pi}{3} r_0^3 \epsilon_0 \epsilon_1 (\epsilon_2 - \epsilon_1) \left\{ \epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\text{Log} \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right) \right\} E_0^2 \right] = 0$$

Cette relation permet d'obtenir une relation entre le champ électrique appliqué E_0 et l'excentricité de la goutte déformée e . Après des calculs assez laborieux nous obtenons la relation :

$$E_0 = K \sqrt{\frac{T}{r_0 \epsilon_1 \epsilon_0} \left(\frac{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) A}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \right)} \quad (\text{eq. A.1})$$

$$\text{avec } K^2 = - \frac{(3 - 2e^2) - \frac{3 - 4e^2}{e(1 - e^2)^{1/2}} \text{Arc sine}}{\frac{1}{2e^2} \left[\left(e - \frac{3}{e} \right) \text{Log} \frac{1 + e}{1 - e} + 6 \right] (1 - e^2)^{2/3}}$$

En développant en série A et K^2 nous trouvons pour une petite excentricité :

$$\begin{cases} K^2 = 4,28 e^2 \\ A = \frac{1}{3} - \frac{2}{15} e^2 \end{cases}$$

$$\text{Soit si } e \text{ est petit } E_0 = 2,07 \sqrt{\frac{T}{r_0 \epsilon_0 \epsilon_1} e \left[\frac{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \left(\frac{1}{3} - \frac{2}{15} e^2 \right)}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \right]^{1/2}}$$

II - Champ critique

PANCHENKOV et col. ont calculé l'expression du champ critique -champ à partir duquel la goutte se casse- à l'aide de la condition classique de la dérivée seconde de l'énergie :

$$\frac{d^2(W_e + W_T)}{de^2} < 0$$

Nous avons mis au point une méthode de recherche du champ critique à partir des forces s'exerçant sur la surface de la goutte.

Sur la surface de la goutte s'exercent deux types de force :

- des forces de cohésion liées à la tension interfaciale,
- des forces électriques qui ont tendance à casser la goutte.

Si les forces d'origine électrique deviennent *en un point quelconque* de la goutte et pour une certaine valeur du champ appliqué, supérieures aux forces de cohésion la goutte se rompt. Nous avons ainsi un moyen de calculer le champ critique.

La pression interfaciale en un point quelconque de la goutte s'écrit :

$$P_T = T \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

R_1 et R_2 étant les deux rayons de courbure principaux de la surface de la goutte au point considéré.

Soit après calcul

$$P_T = \frac{T}{r_0} \left(\frac{(1 - e^2)^{5/6}}{(\sin^2\phi + (1 - e^2) \cos^2\phi)^{3/2}} + \frac{(1 - e^2)^{-1/6}}{(\sin^2\phi + (1 - e^2) \cos^2\phi)^{1/2}} \right)$$

La pression électrique en un point quelconque de la goutte vaut (33)

$$f_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon_2 - \epsilon_1) \left[E_{(-)t}^2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} E_{(-)n}^2 \right]$$

$E_{(-)t}$ et $E_{(-)n}$ sont les composantes tangentielles et normales à la goutte du champ régnant à l'intérieur de celle-ci.

Soit après calcul

$$f_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon_2 - \epsilon_1) \left[\frac{\epsilon_1}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)A + \epsilon_1} \right]^2 E_0^2 \left[\frac{a^2 \sin^2\phi + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} b^2 \cos^2\phi}{b^2 \cos^2\phi + a^2 \sin^2\phi} \right]$$

Puis en remplaçant E_0^2 par sa valeur en fonction de l'excentricité (équation A.1) ainsi que

$$a = r_0 (1 - e^2)^{-1/3}$$

$$b = r_0 (1 - e^2)^{1/6}$$

$$\text{On obtient } f_e = \frac{K^2 T}{2(\epsilon_2 - \epsilon_1) r_0} \frac{\epsilon_1 \sin^2 \phi + \epsilon_2 (1 - e^2) \cos^2 \phi}{\sin^2 \phi + (1 - e^2) \cos^2 \phi}$$

Ces forces dépendent de ϕ et de e : écrivons les $f_e(\phi, e)$ et $f_T(\phi, e)$. Il nous faut maintenant chercher l'excentricité, dite critique, telle qu'en un point, défini par son angle ϕ , et en un seul la force $f_e(\phi, e)$ devienne égale à $f_T(\phi, e)$.

Cette excentricité critique est telle que

$$\max_{\phi} (f_e(\phi, e_c) - f_T(\phi, e_c)) = 0$$

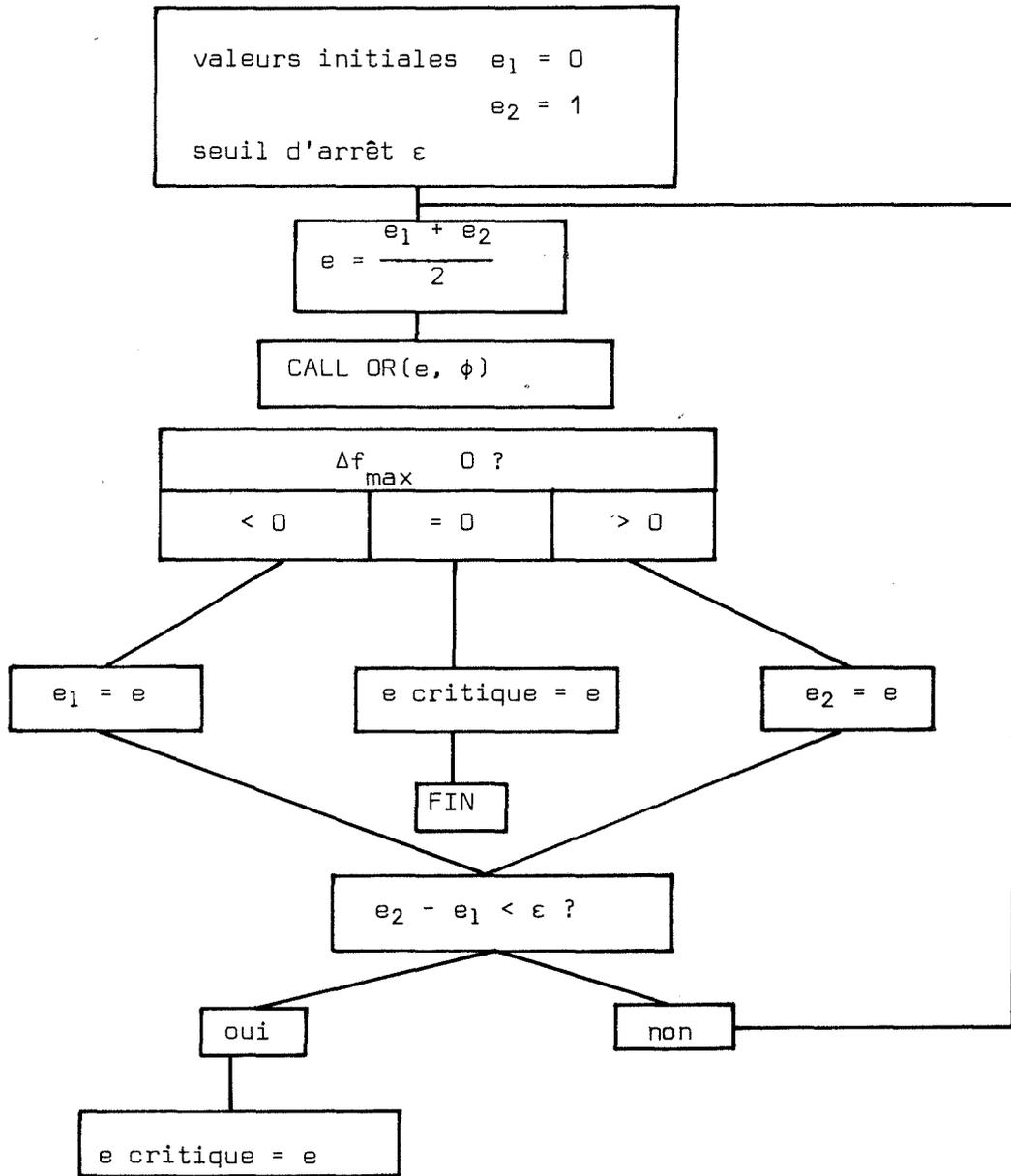
Cette recherche a été menée à l'aide d'un ordinateur.

Ensuite la connaissance de l'excentricité critique nous fournit la valeur du champ critique (équation A.1).

Ordinogramme de la recherche de l'excentricité critique

Le sous-programme OR donne le maximum de la fonction :

$f_e(\phi, e) - f_T(\phi, e) = f_{\max}$ ainsi que l'angle ϕ pour lequel ce maximum est atteint quand l'excentricité e est fixée les calculs correspondants se font selon la méthode du nombre d'or (42).



III - Expériences et résultats

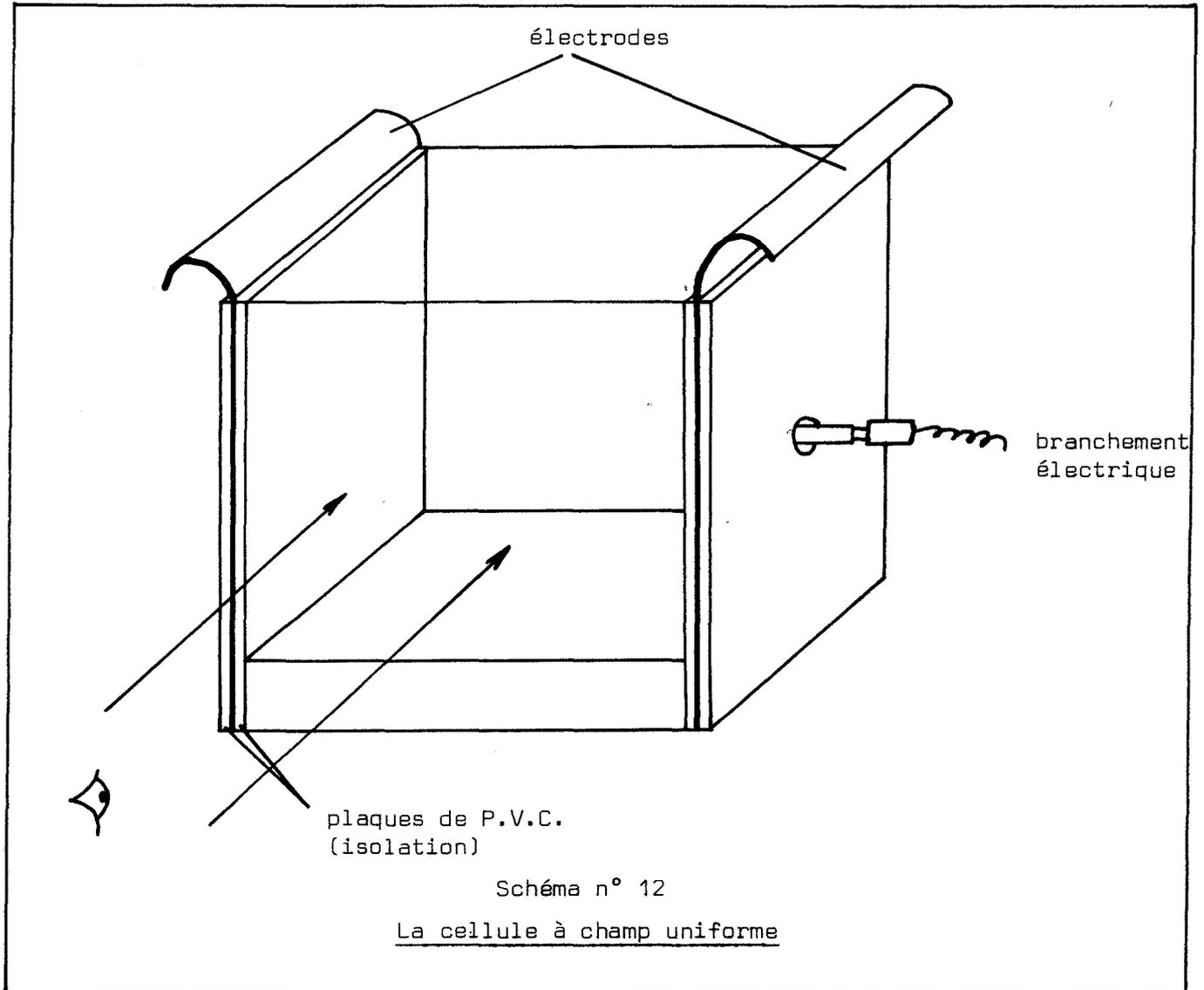
Nous avons trouvé une excentricité critique $e_c = 0,98$ et un angle de rupture à peu près égal à zéro. C'est dire que la goutte se casse aux extrémités : cela correspond bien aux phénomènes que nous avons observés sur des photographies parues dans la littérature. Il faut cependant émettre quelques réserves sur la précision du modèle car pour une excentricité aussi élevée on peut difficilement admettre que la goutte se déforme suivant un ellipsoïde de révolution : nous obtenons cependant une approximation du champ critique.

Pour une goutte d'eau de $10 \mu\text{m}$ de rayon, plongée dans du gas oil ($T \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{N/m}$) le champ critique vaut $E_{\text{crit}} = 70 \text{ kV/cm}$.

Cette valeur du champ est bien supérieure à celles employées pour nos expériences : nous n'aurons donc pas à tenir compte du cassage des gouttes.

Nous avons cependant essayé d'observer la déformation d'une grosse goutte (de 1 à 5 mm de rayon) : le champ critique vaut alors de 3,2 à 7 kV/cm, valeurs que nous pouvons facilement obtenir. Pour cela nous avons construit une cellule parallélépipédique dont deux faces sont transparentes et dans laquelle régnait un champ uniforme. Après l'avoir remplie de gas oil nous injectons une goutte d'eau puis nous augmentons l'intensité du champ électrique. Nous n'avons cependant jamais observé de déformation avec cette manière de procéder mais par contre nous avons vu la goutte se déformer lors d'une variation rapide du champ dans le temps. Nous pouvons expliquer ces phénomènes par le fait que dans le premier cas la goutte n'est pas isolée alors qu'elle l'est dans le second. Or le modèle de déformation n'est valable que si la goutte est isolée.

Pour observer des déformations de gouttes il faut donc agir sur la fréquence du champ afin de se replacer dans le cadre des hypothèses émises par PANCHENKOV. (paragraphe 1.2.3.).



Nous avons d'autre part vérifié dans cette cellule que les gouttes des émulsions étudiées ne portaient pas de charges électrostatiques nettes.



ANNEXE II - DIELECTROPHORESE ET AGITATION THERMIQUE

La diélectrophorèse est un phénomène qui crée des gradients de concentration de gouttes dans la cellule. Or les molécules constitutives d'une goutte sont soumises au mouvement brownien ; phénomène aléatoire qui se traduit par une tendance à l'uniformation des concentrations en gouttes. Ces deux phénomènes sont concurrents ; montrons que les forces de diffusion par agitation thermique s'exerçant sur une goutte sont négligeables vis à vis des forces électriques de diélectrophorèse.

POHL (43) a effectué ce calcul à partir de la pression osmotique ; nous avons préféré nous servir de la définition de l'entropie pour opérer cette démonstration.

Considérons un volume unité V d'émulsion monodispersée formée de gouttes de rayon V_g . Supposons que la teneur en phase dispersée est faible. Chaque goutte occupant un volume V_g , le nombre maximum de gouttes qui peuvent être contenues dans le volume V est $N = V/V_g$. Cherchons de combien de façons n gouttes peuvent se répartir dans le volume V . Il y en a $W = \frac{N!}{n!(N-n)!}$

L'entropie de ce volume V contenant n gouttes est donc

$$S = k \text{ Log } W \approx k [N \text{ Log } N - n \text{ Log } n - (N - n) \text{ Log } (N - n)]$$

$$\text{Soit } S \approx k \left[-n \text{ Log } \frac{n}{N} - (N - n) \text{ Log } \left(1 - \frac{n}{N}\right) \right]$$

$$\text{C'est-à-dire } S \approx k n \left[1 - \text{Log } \frac{n}{N} \right] \text{ car } \frac{n}{N} \ll 1.$$

La variation de l'énergie d'un volume V d'émulsion en fonction de la concentration en gouttes n s'écrit donc

$$\bar{S} = \frac{d(TS)}{dn} = T \frac{dS}{dn} = -kT \text{ Log } \frac{n}{N}$$

La force s'exerçant sur une goutte due aux gradients de concentration de gouttes $\frac{dn}{dr}$ vaut donc

$$F_b = \frac{d\bar{S}}{dr} = -kT \frac{dn}{n dr}$$

Nous allons maintenant comparer la valeur maximale de cette force à la force de diélectrophorèse.

Le maximum du facteur $\frac{dn}{n}$ est 1.

Le minimum de dr ayant un sens est $2a$ en appelant a le rayon de la goutte.

Le maximum de F_b est donc $F_{b \text{ max}} = \frac{kT}{2a}$.

La force électrique vaut $F_e = K \frac{a^3}{x^3} \Delta V^2$ (paragraphe 2.2.1).

Supposons $\left\{ \begin{array}{l} x = 0,02 \text{ m} \quad \text{Pour l'émulsion étudiée } K = 2,25 \cdot 10^{-10} \text{ UMKSA} \\ \Delta V = 2500 \text{ V} \\ T = 300^\circ\text{K} \end{array} \right.$

donc $\left\{ \begin{array}{l} \log F_e = 2,24 + 3 \log a \\ \log F_{b \text{ max}} = - 22,7 - \log a \end{array} \right.$

Soit pour quelques valeurs du rayon a

$a(\text{m})$	$\log F_e$	$\log F_{b \text{ max}}$
10^{-10}	- 27,76	- 12,7
10^{-8}	- 21,76	- 14,7
10^{-6}	- 15,76	- 16,7
10^{-5}	- 12,76	- 17,7

En conclusion dans le cas des gouttes étudiées dont les rayons vont de quelques microns à quelques dizaines de microns la force de diélectrophorèse est bien supérieure aux forces créées par l'agitation thermique : nous n'avons donc pas à tenir compte de ces forces.

Pour des particules de quelques angström -par exemple des molécules dissoutes dans un solvant- la diélectrophorèse est inefficace, les forces de diffusion thermique étant très supérieures aux forces électriques.

Enfin pour séparer des particules de taille colloïdale (quelques centaines d'angström) il faut employer un champ électrique d'intensité plus élevée que celle utilisée dans le cadre de nos expériences. Pour un champ moyen de 10 kV/cm il serait possible de séparer des particules de 0,1 μm de rayon dans notre cellule.

ANNEXE III - QUELQUES VALEURS DE LA FORCE DE DIELECTROPHORESE EN FONCTION DE LA FORME DES ELECTRODES

Nous avons vu que la force de diélectrophorèse était proportionnelle à $\text{grad } \vec{E}_0^2$. Suivant la nature du champ appliqué ce facteur prend diverses formes.

- Champ à symétrie sphérique : il est créé par deux électrodes sphériques concentriques ; l'électrode extérieure de rayon r_{ext} est à la terre, l'électrode intérieure de rayon r_{int} est au potentiel V_1 .

Le potentiel d'un point situé à une distance x du centre est

$$V = \frac{V_1 r_{\text{int}}}{x} \left(\frac{r_{\text{ext}} - x}{r_{\text{ext}} - r_{\text{int}}} \right)$$

$$\text{et } \text{grad } (\vec{E}_0^2) = - 2 \frac{V_1^2 r_{\text{int}}^2 r_{\text{ext}}^2}{x^5 (r_{\text{ext}} - r_{\text{int}})^2} \vec{r}$$

La force est donc inversement proportionnelle à la puissance cinquième de la distance au centre.

- Champ à symétrie cylindrique : nous avons vu que la force agissant sur une goutte est inversement proportionnelle à la puissance troisième de la distance à l'axe.

$$\text{grad } (\vec{E}_0^2) = - \frac{2V_1^2}{x^3 \text{Log}^2(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})} \vec{r}$$

- Géométrie isomotrice : cherchons s'il existe un système d'électrode tel que la force exercée sur une goutte soit constante.

Une solution de l'équation de Laplace en coordonnées cylindriques est $V_0 = Ar^n \sin(n\theta)$

$$\text{donc } \vec{E}_0 = - nAr^{n-1} |\vec{a}_r \sin(n\theta) + \vec{a}_\theta \cos(n\theta)|$$

\vec{a}_r et \vec{a}_θ vecteurs unités radial et tangential.

La force vaut donc $\vec{F}_e = \frac{1}{2} \alpha v \text{ grad } (E_0^2) = \frac{1}{2} \alpha v (n-1)n^2 A^2 r^{2n-3} \vec{a}_r$.

La force est constante si $2n-3 = 0$. Les surfaces équipotentiellles qui définissent la forme des électrodes telles que la force de diélectrophorèse est constante ont donc pour équation :

$$V = \frac{2}{3} k r^{3/2} \sin \frac{3\theta}{2}$$

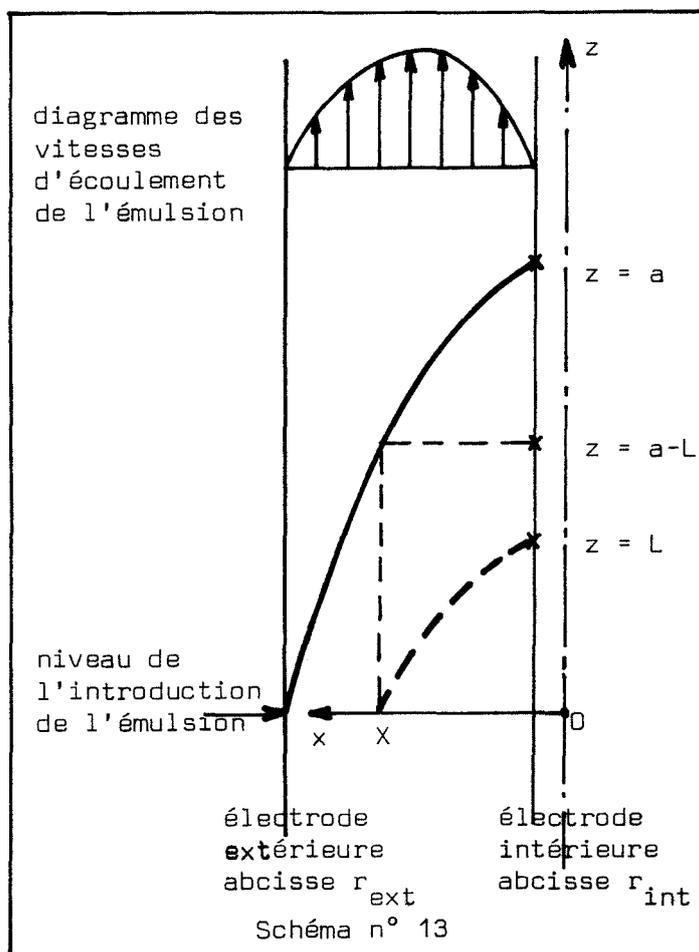
ANNEXE IV - ORDINOGRAMMES DES MODELES ET COMPLEMENTS

1° Modèle

Dans ce modèle, nous avons supposé un régime laminaire d'écoulement de l'émulsion et nous avons tenu compte des forces de pesanteur : la forme de la trajectoire des gouttes dans la cellule varie donc suivant leur taille.

- Gouttes dont la vitesse de décantation est toujours inférieure à la vitesse de passage du fluide.

La trajectoire d'une goutte située à l'instant zéro tout près de l'électrode extérieure est représentée sur le schéma 12. La trajectoire d'une goutte située à une abscisse X quelconque s'obtient en décalant par translation suivant oz la trajectoire précédente.



Nous voyons sur le schéma que, si la longueur de la cellule est L , toutes les gouttes situées à l'origine à une distance de l'axe inférieure à X vont pouvoir atteindre l'électrode centrale. X est le point de la trajectoire dont l'ordonnée est $a-L$. Les autres ressortiront de l'appareil.

Le rendement d'extraction de ces gouttes s'écrit donc :

$$\text{rendement} = \frac{\text{débit d'émulsion passant entre } r_{\text{int}} \text{ et } X}{\text{débit total d'émulsion}}$$

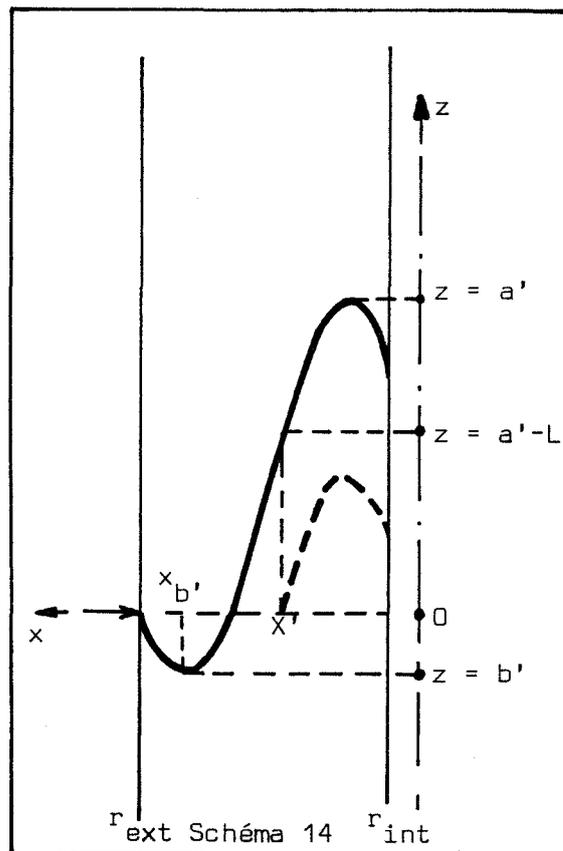
En particulier si a est inférieur à L le rendement est égal à 1.

- gouttes dont la vitesse de décantation est du même ordre de grandeur que la vitesse d'écoulement du fluide.

Elles vont être entraînées par le fluide où vont décanter suivant leur position dans l'appareil.

La trajectoire d'une goutte située près de l'électrode extérieure est représentée sur le schéma 13.

Par le même raisonnement que celui fait précédemment nous voyons que toutes les gouttes dont la distance à l'axe, est supérieure à x_b , ou inférieure à X' , vont pouvoir atteindre l'électrode centrale.



Le rendement d'extraction de ces gouttes s'écrit donc :

$$\text{rendement} = \frac{\text{débit passant entre } r_{\text{int}} \text{ et } X' + \text{débit passant entre } x_b \text{ et } r_{\text{ext}}}{\text{débit total}}$$

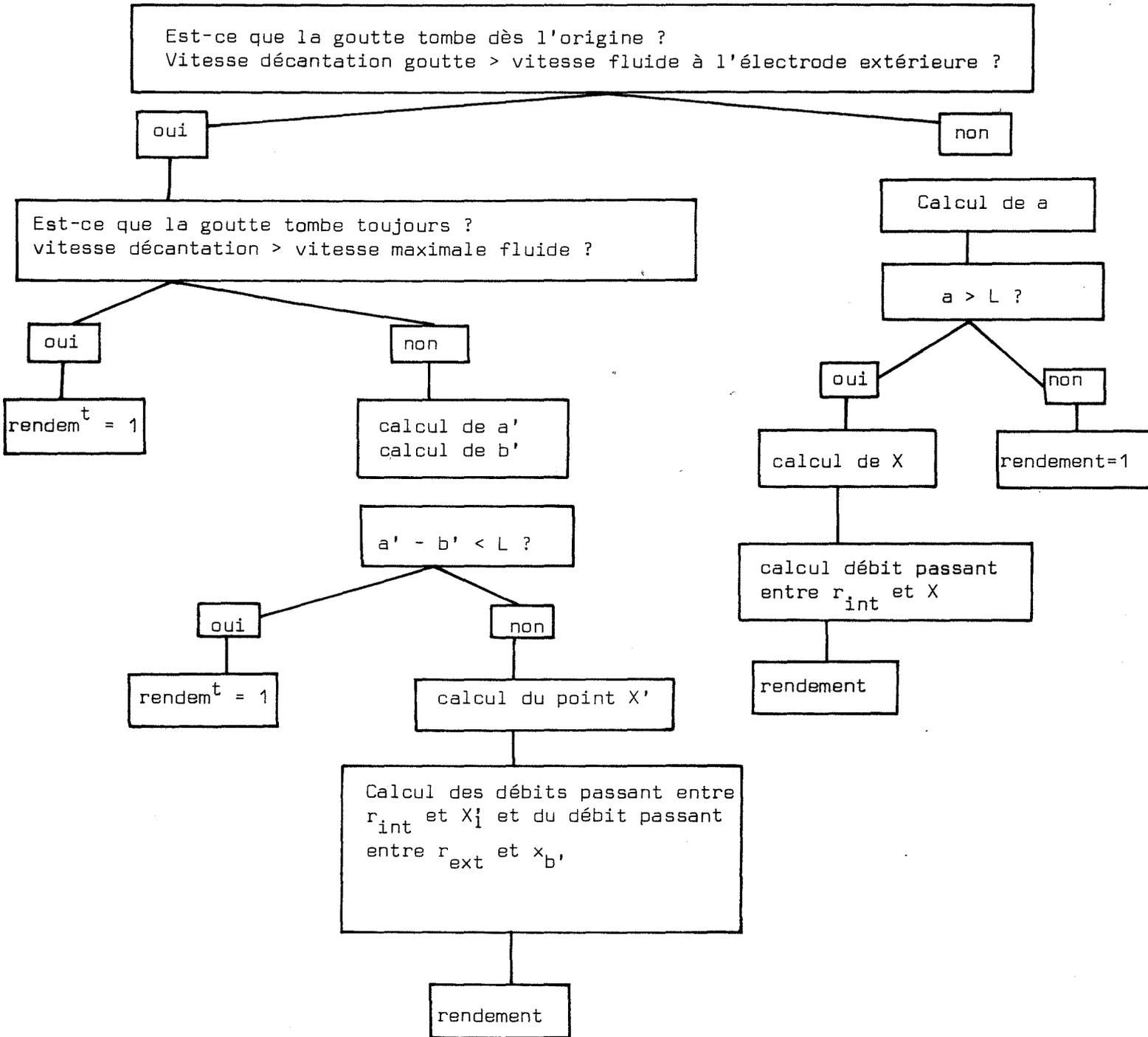
En particulier, si $a' - b'$ est inférieur à L le rendement est égal à 1.

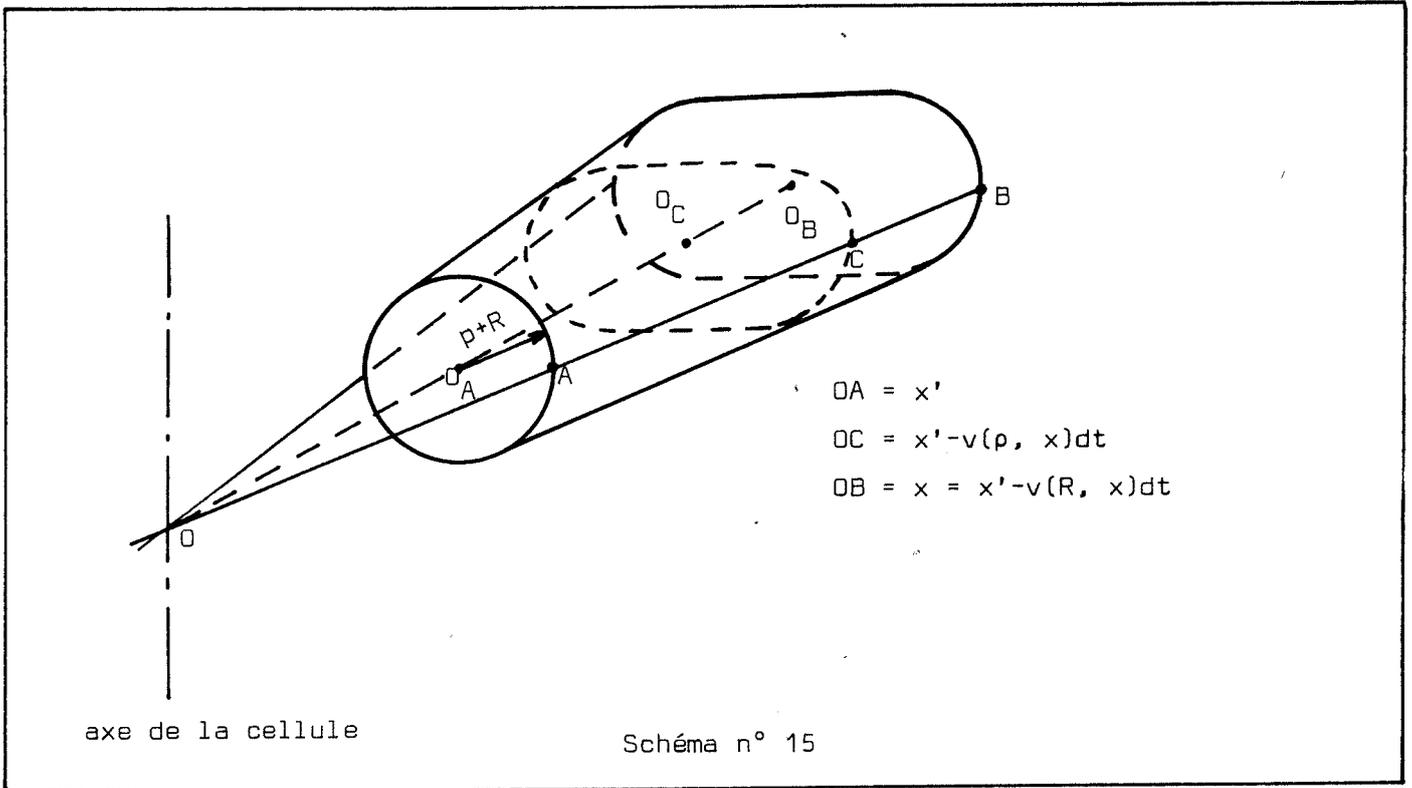
- gouttes dont la vitesse de décantation est toujours supérieure à la vitesse d'écoulement du fluide.

Elles tombent toujours ; leur rendement d'extraction est donc égal à 1.

Le modèle reconnaît d'abord la forme de la trajectoire des gouttes puis il calcule les coordonnées des extrema si ils existent et enfin il calcule les points X et X' .

Nous donnons ci-dessous l'ordinogramme du sous-programme qui calcule le rendement d'extraction des gouttes de taille donnée.



2° ModèleCalcul des dimensions du volume défini au § 2.3.3.

La section de ce volume au point A est un cercle de rayon $\rho + R$.

La section au point C est un ovale de largeur $R + \rho$ et de longueur $(R + \rho) \left(1 - \frac{v(\rho, x)}{x'} dt\right)$

donc de section $\pi(R + \rho)^2 \left(1 - \frac{v(\rho, x) dt}{\pi x'}\right)$

La section au point B a pour surface $\pi(R + \rho)^2 \left(1 - \frac{v(R, x) dt}{\pi x'}\right)$

La section moyenne vaut donc $\pi(R + \rho)^2 \left|1 - \frac{v(\rho, x) + v(R, x)}{2\pi x'} dt\right|$

Nombre aléatoire de gouttes dans un volume fixé

Nous nous sommes servis d'un article de Yu. A. BUYEVICH sur le nombre aléatoire de gouttes pour une émulsion de forte concentration (37) et nous l'avons adapté au cas d'une émulsion de faible concentration.

1° cas : émulsion monodispersée

Considérons un volume V d'une émulsion monodispersée contenant n_V gouttes de volume v_g . La teneur en phase dispersée de l'émulsion est $W_0 = \frac{n_V v_g}{V}$.

Supposons que l'état macroscopique du système ne change pas et que le comportement aléatoire d'une goutte ne dépende pas du comportement des autres.

Cherchons la probabilité $W(n_A)$ qu'il y a exactement n_A gouttes dans un volume $A \ll V$ ($A \ll V$).

Le nombre maximum de gouttes que peut contenir A est $N_A = A/v_g$.

On peut montrer que $W(n_A)$ est égal à $W(n_A) = C_{N_A}^{n_A} W_0^{n_A} (1 - W_0)^{N_A - n_A}$

La probabilité qu'il y ait au moins une goutte dans le volume A est donc W (au moins une goutte) = $1 - (1 - W_0)^{N_A}$.

2° cas : émulsion polydispersée

On peut montrer que dans un système polydispersé la probabilité qu'il y ait $n_{A,j}$ gouttes de rayon j dans un volume A est

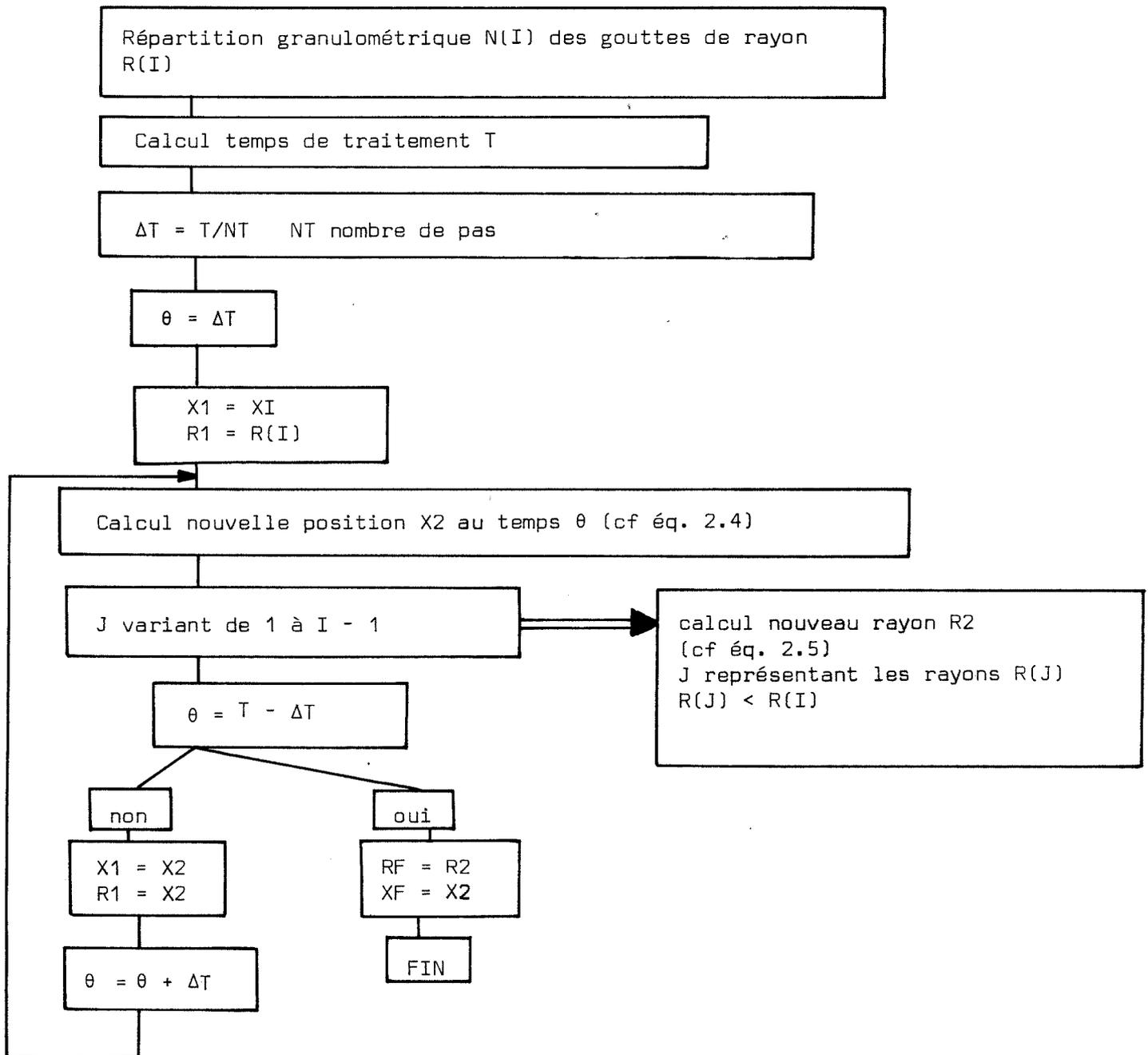
$$W(n_{A,j}) = C_{N_{A,j}}^{n_{A,j}} v_j^{n_{A,j}} (1 - W_0)^{N_{A,j} - n_{A,j}}$$

$N_{A,j}$ est le nombre maximum de gouttes pouvant être contenues dans le volume $\alpha_j A$. α_j est le pourcentage en volume de phase dispersée occupé par des gouttes de rayon j .

En particulier la probabilité qu'il y ait au moins une goutte de rayon quelconque dans le volume A est

$$1 - \pi W(0_{A,j}) = 1 - \pi (1 - W_0)^{N_{A,j}} = 1 - (1 - W_0)^{\sum_j N_{A,j}}$$

Or $N_{A,j} = A \sum \frac{\alpha_j}{v_j} v_j$ volume d'une goutte de rayon j .

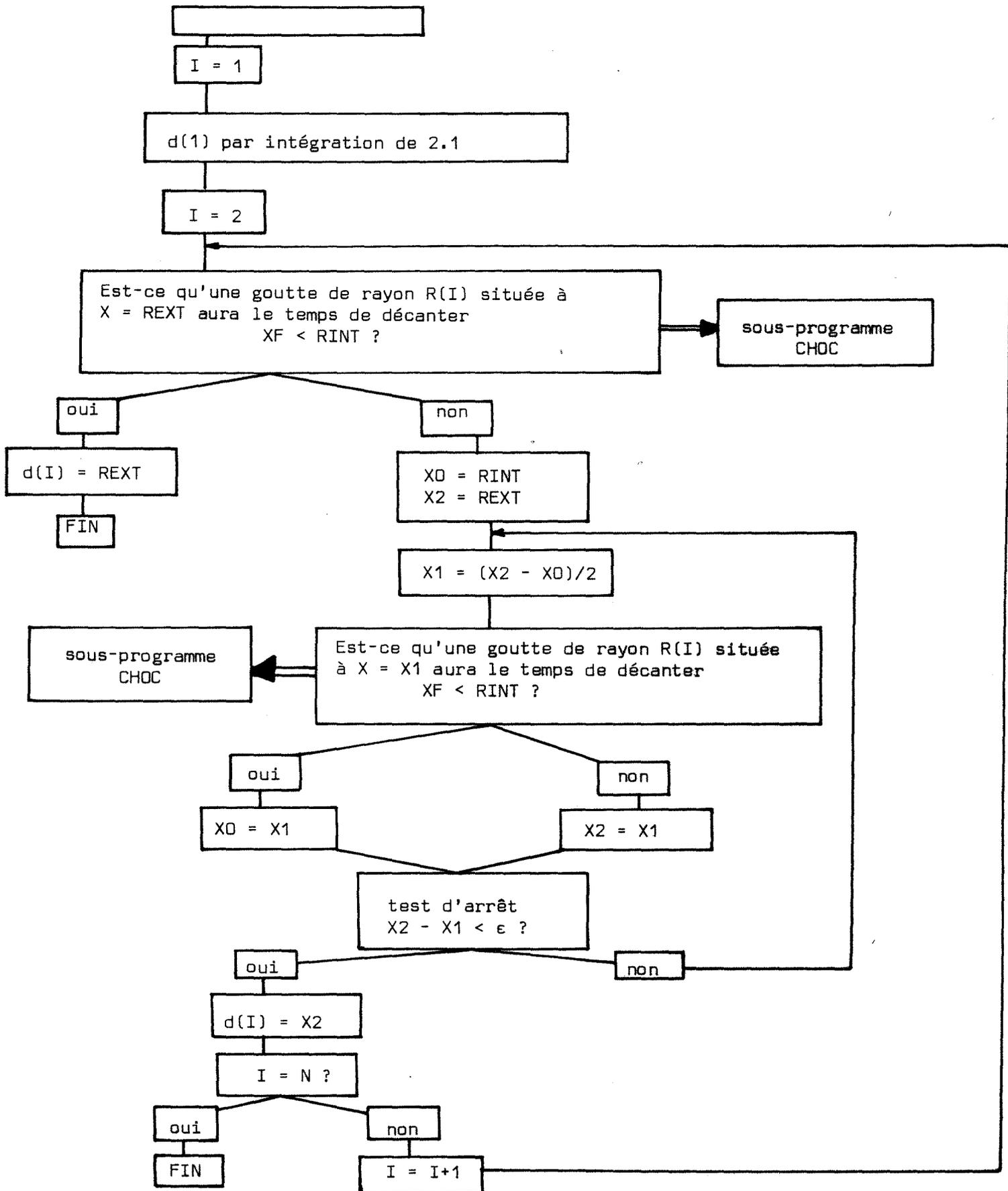


On peut montrer que $\sum \frac{\alpha_j}{v_j} = \frac{1}{\text{volume moyen d'une goutte}}$

Connaissant donc les volumes dans lesquels la présence d'une goutte est recherchée nous pouvons en déduire la probabilité de cette présence.

Ordinogramme de la recherche dichotomique des fonctions d(r)

Le programme de calcul fait appel à un sous-programme CHOC permettant de calculer le rayon final RF et la position finale XF d'une goutte de rayon initial R(I) et de position initiale XI ; nous en donnons l'ordinogramme ci-dessous.

L'ordinogramme de calcul de fonction $d(r)$ 

3° Modèle

Nous subdivisons la zone de traitement comprise entre les deux électrodes en NX couronnes d'égale épaisseur : la I^{em} couronne a pour rayon intérieur $X(I)$ et pour rayon extérieur $X(I + 1)$. Nous avons bien sur les relations

$$\begin{cases} X(1) = \text{rayon de l'électrode intérieure} \\ X(NX + 1) = \text{rayon de l'électrode extérieure} \end{cases}$$

Nous divisons le temps de traitement en NT partie égale de durée ΔT . Nous définissons dans la I^{em} couronne la répartition granulométrique par 10 classes de gouttes $R(I, J)$ dont le nombre par unité de volume est $AN(I, J)$. Les limites de ces classes varient au cours des calculs, mais elles sont toujours dans la même relation d'ordre au sein d'une même couronne

$$R(I, J) < R(I, J + 1) \quad \forall I$$

Remarque : Il peut arriver par contre que $R(I', J + 1) < R(I'', J)$ si $I' \neq I''$.

A partir de ces données à l'instant T nous allons examiner les changements survenus au temps $T + \Delta T$.

Les gouttes vont grossir par coalescence dipolaire pendant l'intervalle ΔT : l'équation (2.8) nous fournit les vitesses d'agglomération de gouttes. Nous en déduisons donc des nouvelles répartitions granulométriques à l'intérieur de chaque couronne.

Puis les gouttes se déplacent par diélectrophorèse : des gouttes vont changer de couronne, d'autres vont atteindre l'électrode centrale. Il nous faut donc définir les répartitions granulométriques dans chaque couronne à l'issue de ces mouvements.

Pour y parvenir nous cherchons pour chaque classe de gouttes (c'est-à-dire J constant, I variable) où étaient placées à l'instant T les gouttes situées à l'instant $T + \Delta T$ sur les limites des couronnes.

Exemples : une goutte de rayon $R(I, J)$ qui se trouve à l'instant T au point d'abscisse $D(K)$ sera située au point d'abscisse $X(K)$ à l'instant $T + \Delta T$ (cf. équation 2.1). Il est nécessaire bien sur que $D(K)$ soit compris entre $X(I)$ et $X(I + 1)$.

Si tel n'est pas le cas toutes les gouttes de rayon $R(I, J)$ auront dépassé à l'instant $T + \Delta T$ le point d'abscisse $X(K)$. Nous définissons à l'occasion de cette recherche un indice $IND(K)$ tel que $IND(K) = I$ si $D(K) \in [X(I), X(I + 1)]$. Nous nous servirons plus tard de cet indice.

1° exemple

Les gouttes de rayon $R(1, J)$ se trouvant à l'instant T au point $D(1)$ sont situées à l'instant $T + \Delta T$ au point $X(1)$ et $IND(1) = 1$.

2° exemple

Les gouttes de rayon $R(4, J)$ placées au temps T au point $D(3)$ se trouvent au temps $T + \Delta T$ au point $X(3)$ et $IND(3) = 4$. Comme $D(5)$ est sur la limite de l'appareil. $D(5) = X(6)$ il n'y a plus de gouttes de rayon $R(5, J)$ au temps $T + \Delta T$ dans la cinquième couronne.

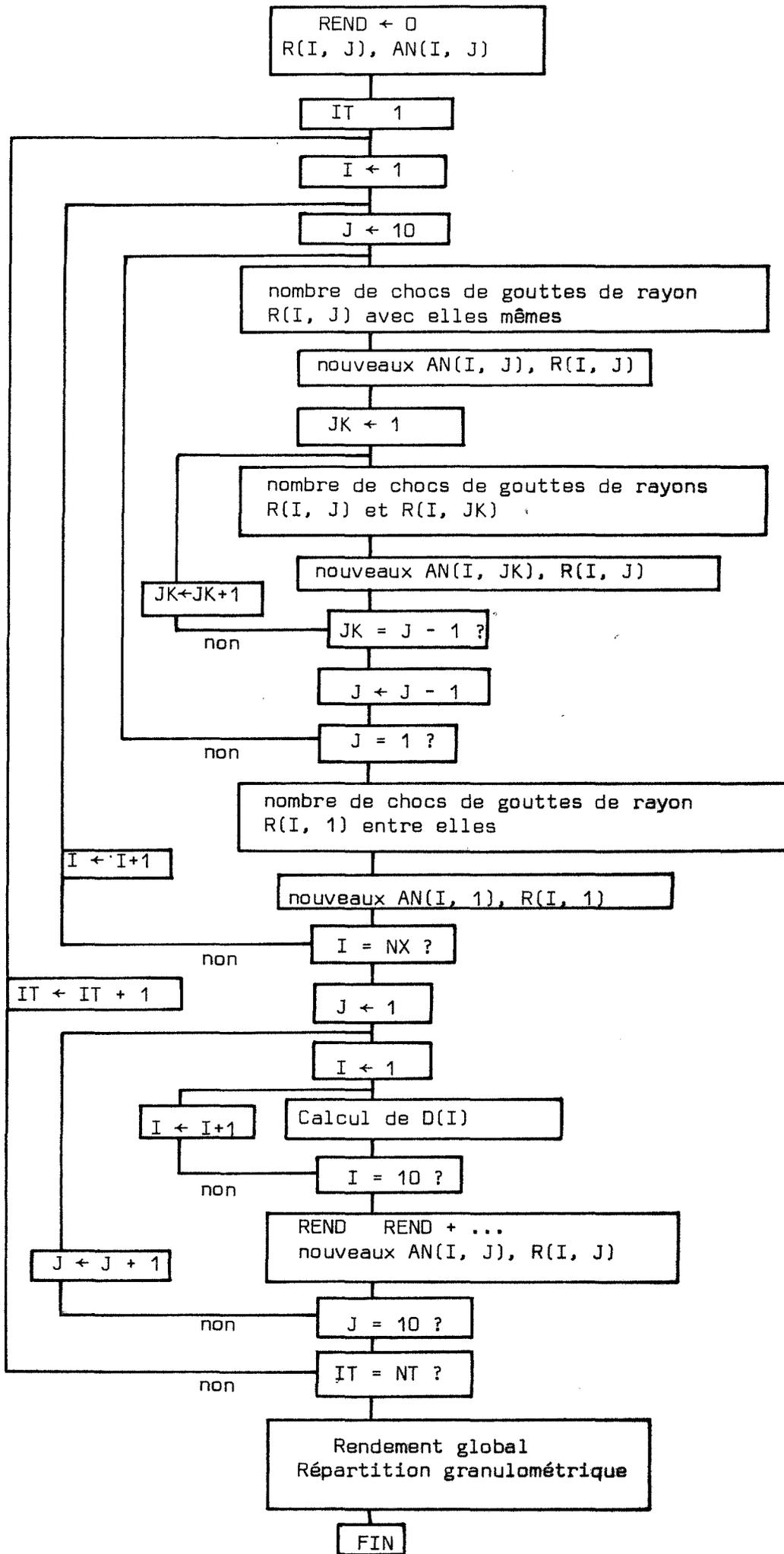
Connaissant alors les $D(K)$ pour une classe de gouttes nous en déduisons le rendement d'extraction de gouttes de la classe J pendant le temps ΔT . C'est le nombre de gouttes comprises entre $D(1)$ et le rayon intérieur $X(1)$ c'est-à-dire $AN(1, J) * R^3(1, J) * (D^2(1) - X^2(1))$ dans le premier exemple, $AN(2, J) * R^3(2, J) * (D^2(1) - X^2(2)) + AN(1, J) * R^3(1, J) * (X^2(2) - X^2(1))$ dans le deuxième exemple. Les indices $IND(K)$ servent à cette occasion pour calculer les limites de la somme.

Puis nous pouvons déduire les nouveaux rayons et les nouvelles concentrations des gouttes de la classe J .

Dans le premier exemple les gouttes situées entre $D(1)$ et $D(2)$ au temps T seront situées dans la première couronne au temps $T + \Delta T$.

Le nombre de gouttes par unité de volume dans cette couronne sera égal à la moyenne des concentrations concernées.

$$\text{nouveau } AN(1, J) \leftarrow \frac{AN(1, J) * (X^2(2) - D^2(1)) + AN(2, J) * (D^2(2) - X^2(2))}{X^2(2) - X^2(1)}$$



La quantité globale d'eau constituée par des gouttes de la classe J situées à l'instant T entre D(1) et D(2) doit se retrouver à l'instant T + ΔT dans la 1^o couronne. Le nouveau rayon de la classe J sera choisi de façon à assurer cette égalité donc

$$\text{nouveau R (1, J)} \leftarrow \frac{\text{AN(1, J)} * (\text{X}^2(2) - \text{D}^2(1)) * \text{R}^3(1, \text{J}) + \text{AN}(2, \text{J}) * (\text{D}^2(2) - \text{X}^2(2)) * \text{R}^3(2, \text{J})}{\text{nouveau AN}(1, \text{J}) * (\text{X}^2(2) - \text{X}^2(1))}$$

En recommençant ceci pour chaque classe de gouttes nous définirons les répartitions granulométriques dans chaque couronne à l'instant T + ΔT en fonction des répartitions à l'instant T.

Il suffit alors de procéder à une itération sur le temps pour arriver à connaître le rendement global et la répartition granulométrique de l'émulsion à la sortie de l'appareil.

ANNEXE V - METHODE DES MOINDRES CARRÉS APPLIQUÉE AU TRACE DE LA COURBE D'ÉTALONNAGE

Cuves de 2 mm en Infrasil.

n° étalon	teneur en eau ppm poids/fuel	100 Log $\frac{I_0}{I}$
i	C_i	P_i
1	0	0
2	37,5	1,8
3	75	3,5
4	150	7
5	500	23,5
6	750	34,7
7	1000	45,5
8	1500	69
9	2000	62

La droite des moindres carrés peut s'écrire

$$p = kC + b$$

$$\text{avec } k = \frac{\sum_{i=1}^9 p_i C_i - \frac{\sum p_i \sum C_i}{9}}{\sum_{i=1}^9 C_i^2 - \frac{(\sum C_i)^2}{9}} \text{ et } b = \frac{\sum p_i}{9} - k \frac{\sum C_i}{9}$$

$$\text{Soit après calcul } \begin{cases} k = 45,91 \cdot 10^{-3} \\ b = 0,1067. \end{cases}$$

Une estimation de la variance est

$$s^2 = \frac{\sum (p_i - kC_i - b)^2}{9 - 2} = 0,0707$$

$$\text{La variance de } b \text{ peut être estimée } \sigma_b^2 = s^2 \frac{\sum C_i^2}{9 \sum C_i^2 - (\sum C_i)^2}$$

c'est-à-dire $\sigma_b = 0,113$.

La variance de k est $\sigma_k^2 = \frac{s^2}{\sum (C_i - \bar{C})^2}$

c'est-à-dire $\sigma_k = 130.10^{-6}$.

Si b_0 et k_0 sont les valeurs réelles des valeurs estimées b et k, les variables

$\frac{b_0 - b}{\sigma_b}$ et $\frac{k_0 - b}{\sigma_k}$ suivent la loi de Student-Fischer à 7 degrés de liberté.

Nous pouvons donc construire des intervalles de confiance pour b_0 et k_0 .

$$\begin{cases} 45,66.10^{-3} < k_0 < 46,16.10^{-3} \\ - 0,11 < b_0 < 0,32 \end{cases} \quad \text{seuil de confiance 90 \% .}$$

Donc b n'est pas significativement différent de zéro au seuil de confiance 90 %. On s'aperçoit d'autre part que les points expérimentaux sont situés de façon aléatoire autour de la droite des moindres carrés avec une variance faible. Nous pouvons donc conclure que la courbe d'étalonnage est une droite d'équation

$$p = 100 \text{ Log } \frac{I_0}{I} = 46.10^{-3}C.$$

ANNEXE VI - COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS DU MODELE

Nous avons vu au chapitre V que :

- d'une part le rendement d'extraction de l'eau, calculé par le modèle, est généralement inférieur au rendement réel.

- d'autre part, même s'ils coïncident (cas de la figure 23) l'émulsion prévue à la sortie de la cellule comprend plus de grosses gouttes que l'émulsion réelle.

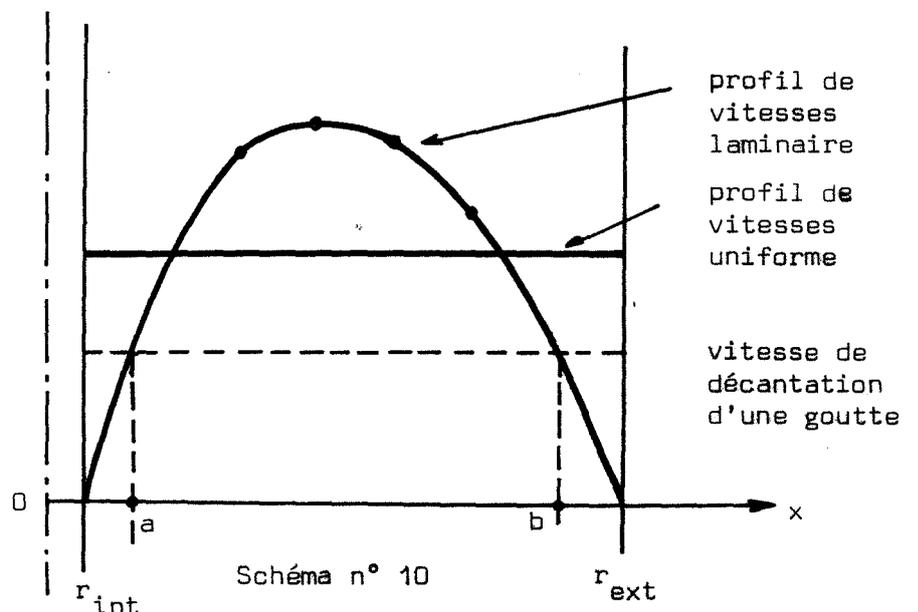
Ces phénomènes peuvent avoir trois causes.

- Notre modèle ne prend pas en compte les forces de pesanteur, or plus une goutte est grosse plus son temps de séjour dans la cellule est grand. Le nombre de ces gouttes qui atteignent l'électrode centrale est donc plus élevé que prévu.

- Nous avons fait l'hypothèse d'un régime de vitesse uniforme dans toute la cellule. Le régime réel étant laminaire, les gouttes situées près des électrodes décantent plus nombreuses et celles qui se trouvent au milieu de l'espace interélectrodes grossissent moins que prévu par la théorie. En particulier, dans toutes les applications du modèle que nous avons faites, aucune goutte n'atteint une taille suffisante pour décantent sous l'effet de son poids, or en régime laminaire il y a toujours des gouttes qui décantent.

- légende -

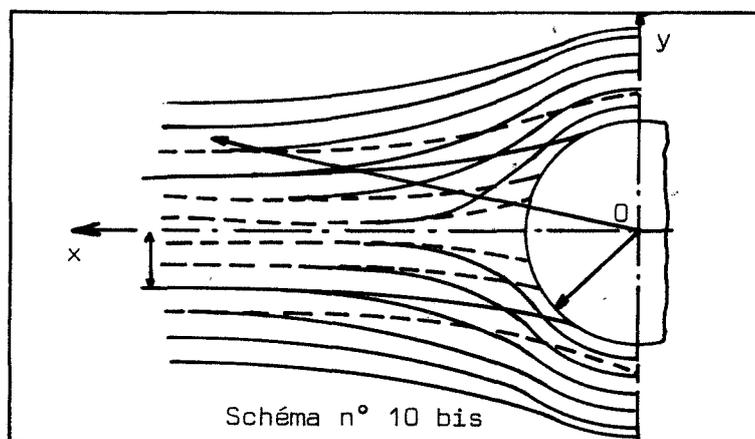
Une goutte située à un point d'abscisse $x \in]b, r_{ext}[$ décante si l'on fait l'hypothèse d'un régime laminaire ; elle ne décante pas en cas de régime uniforme.



- En outre, il peut se produire un phénomène que nous dénommons "impaction électrostatique" par analogie avec l'impaction par inertie (35).

Définition : On appelle impaction électrostatique le procédé par lequel un contact direct, dû à des forces électrostatiques, est établi entre une particule et un corps solide de dimensions relativement plus grandes que celles de la particule.

Considérons une émulsion circulant autour d'un barreau placé transversalement au flux : les lignes de courant se déforment au niveau du barreau.



Si les gouttes ne sont soumises à aucune force elles suivent les lignes de courant et aucune n'atteint le barreau.

Si les gouttes sont soumises aux forces d'inertie certaines atteignent le barreau et y restent agglomérées : ceci constitue l'impaction par inertie étudiée en particulier par V.G. LEVICH (35).

Examinons maintenant le cas où le barreau est porté à un haut potentiel. Des forces d'inertie et de diélectrophorèse agissent sur les gouttes.

Si nous supposons que le champ électrique est à symétrie cylindrique la force de diélectrophorèse s'exerçant sur une goutte est $F_e = -K \frac{a^3}{\rho^3} \Delta V^2$ et le mouvement de la goutte est défini par les équations (nous supposons le régime hydraulique établi)

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_2 \frac{du_\rho}{dt} = -K a^3 \frac{\Delta V^2}{\rho^3} - K' a (u_\rho - v_\rho)$$

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_2 \frac{du_\theta}{dt} = -K' a (u_\theta - v_\theta)$$

u_ρ et u_θ composantes radiales et tangentielles de la vitesse de la goutte
 v_ρ et v_θ " " " " " " du fluide

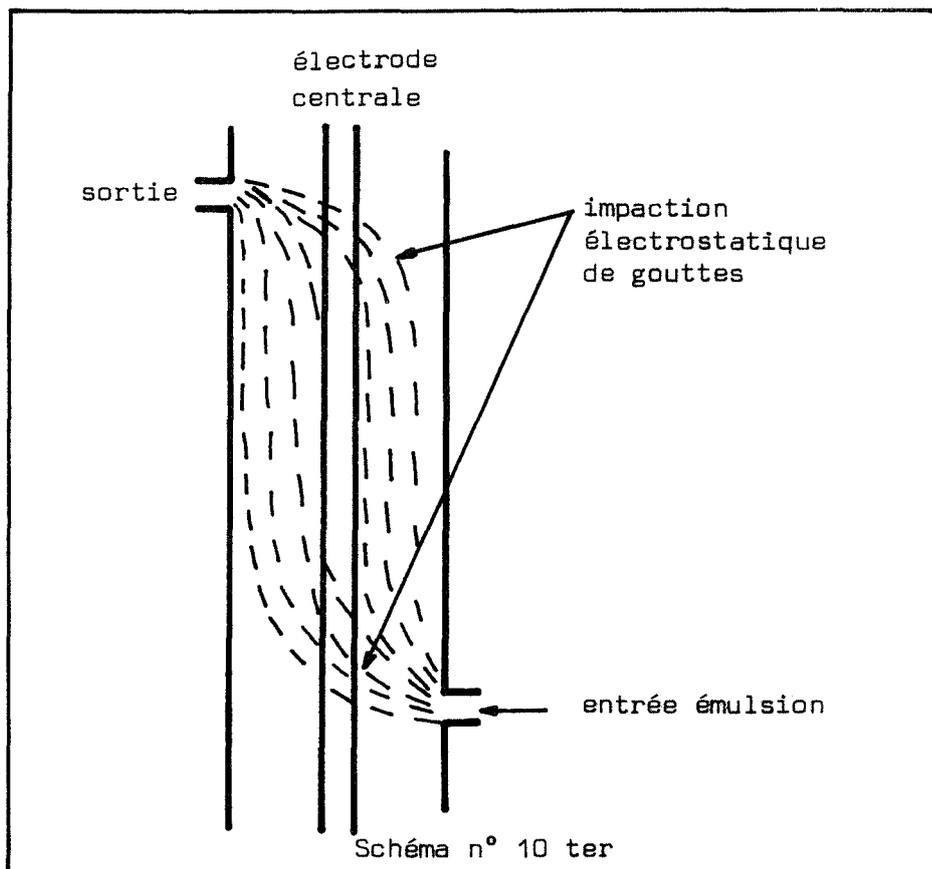
Remarque : Le rendement d'impaction défini comme la proportion des gouttes de l'émulsion atteignant le barreau est proportionnel à h défini sur le schéma - une goutte située à une distance de l'axe inférieure à h atteint le barreau.

Ces équations ne sont pas résolubles analytiquement mais de la comparaison des variations de u_ρ et u_θ nous pouvons déduire les faits suivants.

Quand on augmente la valeur de a ou de ΔV l'accroissement de u_ρ est proportionnellement plus fort que celui de u_θ donc le rendement d'impaction augmente.

Or à l'entrée et à la sortie de la cellule de diélectrophorèse "l'impaction électrostatique" peut se produire. Donc les grosses gouttes plus sujettes à ses effets seront moins nombreuses à ressortir de la cellule. (schéma n° 10 ter).

Il serait intéressant d'étudier ce phénomène et de l'utiliser si possible pour augmenter l'efficacité de l'extraction de l'eau.



BIBLIOGRAPHIE

- (1) A.D. MOORE : éditeur *Electrostatics and its applications*, pp. 336-62, 1973, WILEY INTERSCIENCE PUBLICATION.
- (2) A.H. BROWN, C. HANSON : *Chem. Eng. Sci.* (1968), 23, pp. 841-48.
- (3) R.S. ALLAN, S.G. MASON : *J. of Colloid Sci.* (1962), 17, pp. 383-408.
- (4) G.A. DAVIES, G.V. JEFREYS : *Filtration and Separation* (1970), pp. 546.
- (5) L.C. WATERMAN : *Chem. Eng. Process*, vol. 61, n° 10, pp. 51-57.
- (6) L.C. WATERMAN : A.I.C.H.E. Symposium, Mai 1955, San Francisco, abstract 21 b.
- (7) *Brut et Sel* : Table ronde organisée par trois sections de l'A.F.T.P. le 21 Avril 1971.
- (8) L.K. TSABEK, G.M. PANCHENKOV, U.V. PAPKO : Special Paper n° 7, 8° congrès mondial du pétrole, MOSCOU 1971.
- (9) L.K. TSABEK, G.M. PANCHENKOV, U.V. PAPKO : *Chem. and Techn. of fuels and oils* (1969), vol. 14, n° 11, pp. 27-29.
- (10) G.M. PANCHENKOV, L.K. TSABEK : *NEFT I GAZ* (1968), vol. 11, n° 7, pp. 109-12.
- (11) U.A. MULLER : *Oil and Gas, J.* (1968), vol. 66, n° 39, pp. 172-4.
- (12) G.M. PANCHENKOV, L.K. TSABEK : *Jurnal fizicheskoy Khimijee (J.F. Kh)*, 1968, vol. 42, pp. 1244-48.
- (13) G.M. PANCHENKOV, L.K. TSABEK : *J.F. Kh* 1968, vol. 42, pp. 2300-304.
- (14) W. WILLIAM : A.I.C.H.E. Symposium on coalescence equipment, 55° congrès annuel, Chicago, 1962, paper 31.
- (15) L. LANDAU, E. LIFCHITZ : *Electrodynamique des milieux continus*, éditions MIR, Moscou 1969, p. 54.
- (16) FORREST L. MURDOCK : US PATENT 3 476 678, US PATENT 3 441 496.
- (17) WILLIAM WOELFLIN : US PATENT 3 574 085.
- (18) LLOYD C. RATHBURN : US PATENT 3 437 581.
- (19) WILLIAM WOELFLIN : Brevet allemand 1 420 894.
- (20) PAUL E. MEYER : US PATENT 3 401 501.

- (21) ROBERT L. PETTEFER : CANADIAN PATENT 849 507.
- (22) WILLIAM L. SHIRLEY : US PATENT 3 532 614.
- (23) J.D. WINSLOW, ROY N. LUCAS, HOMER M. WILSON : Brevet britannique 1 208 067.
- (24) S.E. SADEK, C.D. HENDRICKS : Ind. Eng. Chem. Fund (1974), vol. 13, n° 2, pp. 139-142.
- (25) CHO A.Y.H. : J. Applied Phys. (1964), 35, pp. 2561.
- (26) A.D. MOORE : éditor electrostatics and its applications, pp. 57, 1973, WILEY INTERSCIENCE PUBLICATION.
- (27) K.R. CHOUDARY, J.W. GENTRY : J. of Colloid and Interface Sci. (1974), vol. 48, n° 2, pp. 263-280.
- (28) R.W. STENZEL : US PATENT 3 205 160.
- (29) WATSON F.D., WINSLOW jun. J.D. : brevet allemand 1 914 267.
- (30) HOWE BAKER Eng., brevet anglais 1 204 206.
- (31) H.G. NAPIER : US PATENT 3 540 994.
- (32) E.A. COLE, W.D. MAYSE, F.D. WATSON : US PATENT 3 701 723.
- (33) E. DURAND : Electrostatique T III, Masson et Cie Editeur.
- (34) E. WACHOLDER : Chem. Eng. Sci (1973), vol. 28, pp. 1447-53.
- (35) V.E. LEVICH : Physico Chemical hydrodynamics (1962), Prentice Hall, Inc.
- (36) COULSON, RICHARDSON : Chemical Engineering, vol. 1, 1960, PERGAMON PRESS.
- (37) Yu. A. BUYEVICH : Chemical Eng. Sci. (1971), vol. 26, pp. 1195-1201.
- (38) ABADIE, RIPOCHE, ROQUES : Analysis (1975), vol. 3, n° 3, pp. 183-89.
- (39) A.S. MADDEN, MC COY B.J. : Chem. Eng. Sci. (1964), vol. 19, pp. 506.
- (40) T.N. SMITH (1974) : Chem. Eng. Sci. (1974), vol. 29, pp. 583-87.
- (41) G. GOSSMANN : Ind. Eng. Chem. Process. Des. Develop. (1972), vol. 11, n° 4, pp. 537-42.
- (42) D.J. WILDE : Optimum Seeking methods (1964), PRENTICE HALL, Inc.
- (43) H.A. POHL : J. of the Elect. Soc. (1960), vol. 107, n° 5, pp. 386-90.
- (44) H.A. POHL : J. of Applied Phys. (1951), vol 22, n° 1, pp. 869-71.
- (45) H.A. POHL : J. of Applied Phys. (1958), vol. 29, n° 8, pp. 1182-88.

- (46) E. HATSCHEK, P.C.L. THORNE : Kolloid Zurnal (1923), vol. 23, pp. 1.
- (47) B.C. SOYENOFF : J. Phys. Chem. (1931), vol. 35, pp. 2993.
- (48) H.A. POHL, J.P. SCHWAR : (1959), J. of Applied Phys., vol. 30, n° 1, pp. 73.
- (49) H.A. POHL, J.P. SCHWAR : (1960), J. of the Electroch. Soc., vol. 107, n° 5, pp. 383-89.
- (50) H.A. POHL, C.E. PLYMALE : (1960), J. of the Electroch. Soc., vol. 107, n° 5, pp. 390-96.
- (51) R.H. KIRCHOFF, A. HAMDI : (1973), J. of the Electroch. Soc., vol. 120, n° 1, pp. 80-82.
- (52) B.C. BLACK, E.G. HAMMOND : (1965), J. of Amer. Chemist's Soc., vol. 42, pp. 931-36.
- (53) EGON MATIJEVIC : Surface and Colloid Science (1971), volume 3, WILEY INTERSCIENCE.
- (54) S. EHRENFELD, S.B. LITTAUER : (1964), Introduction to Statistical Method Mc Graw Hill Book Company.
- (55) H.A. POHL : US PATENT 3 162 592.



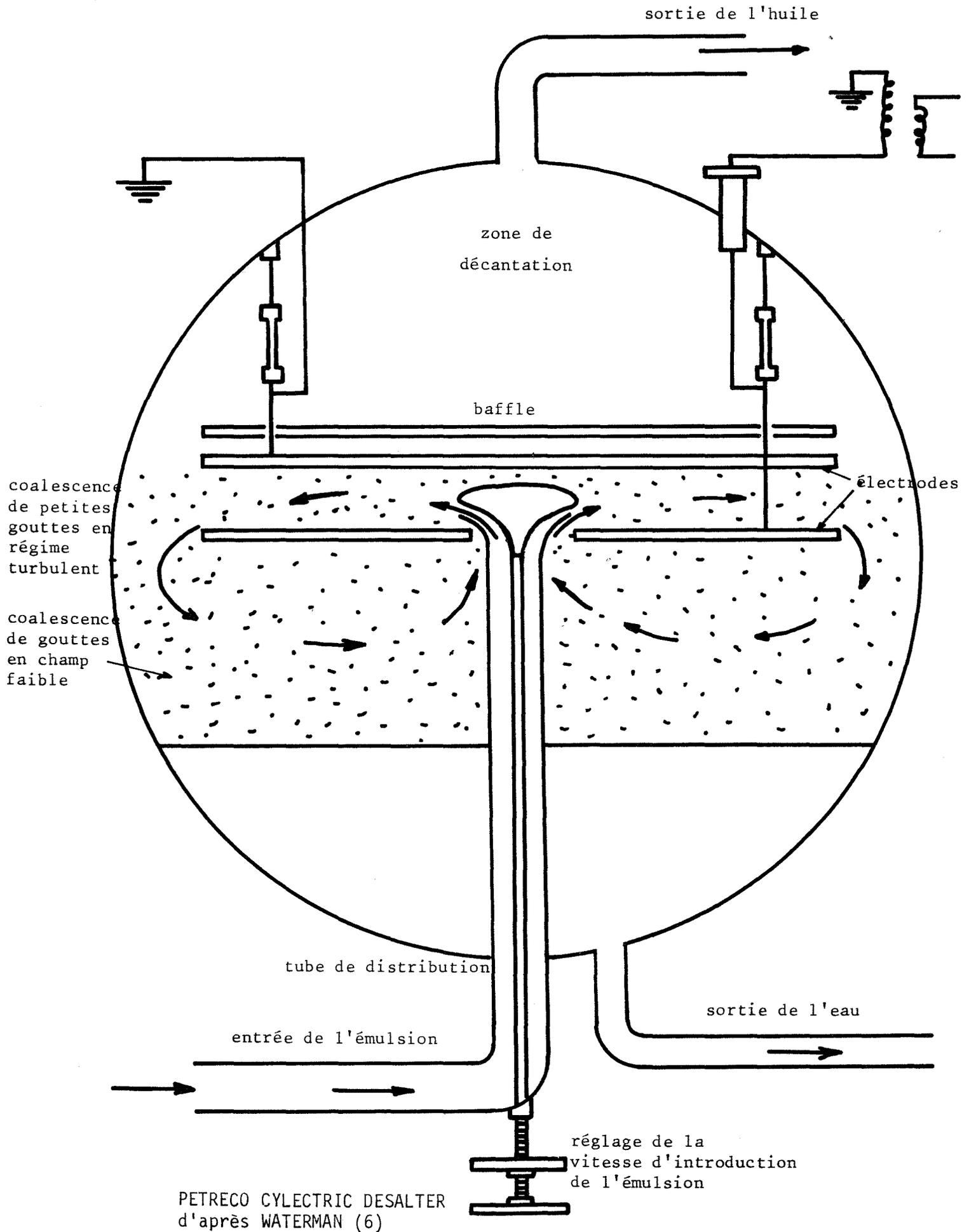


figure 1

électrode +

+ +



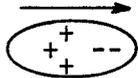
initialement un dipole induit dans une goutte



dipole induit avec une charge nette créée par le champ



dipole induit se déplaçant par diélectrophorèse

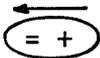


rebond et disparition progressive de la charge

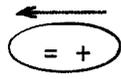


dipole induit

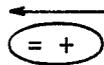
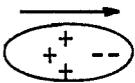
phénomènes se produisant quand il y a une seule goutte



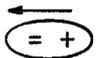
impaction des très petites gouttes



décantation sous l'effet de la pesanteur des grosses gouttes



collision de gouttes circulant en sens inverse. Coalescence due aux charges nettes apposées et à la coalescence dipolaire.



coalescence dipolaire créée par des vitesses différentes



coalescence dipolaire

phénomènes se produisant au sein de l'émulsion

figure 2

Mécanismes de coalescence et de décantation

se produisant au cours de l'électrofining

(Schéma repris d'après L.C. WATERMAN)

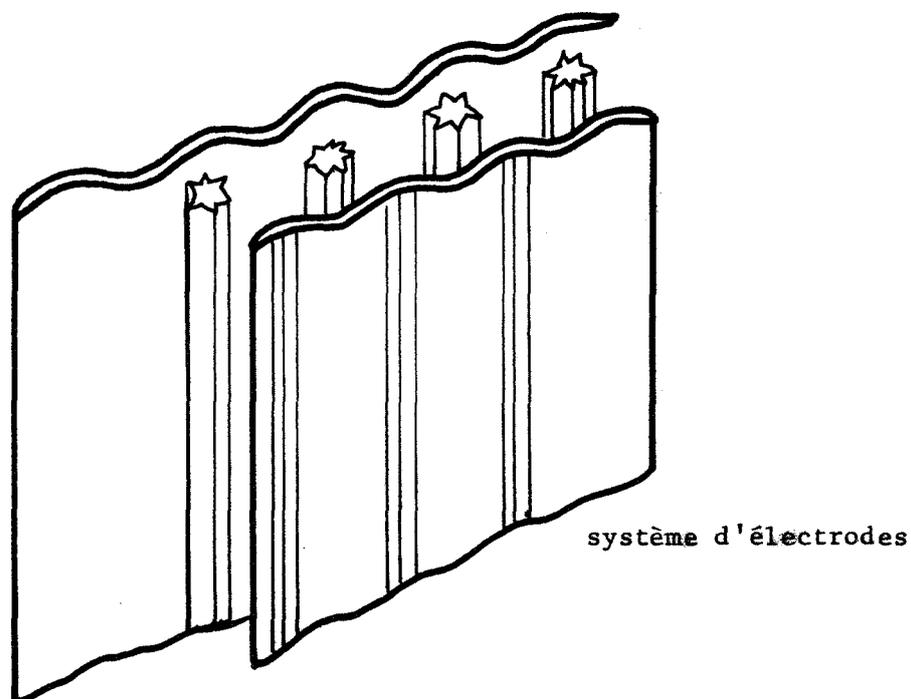
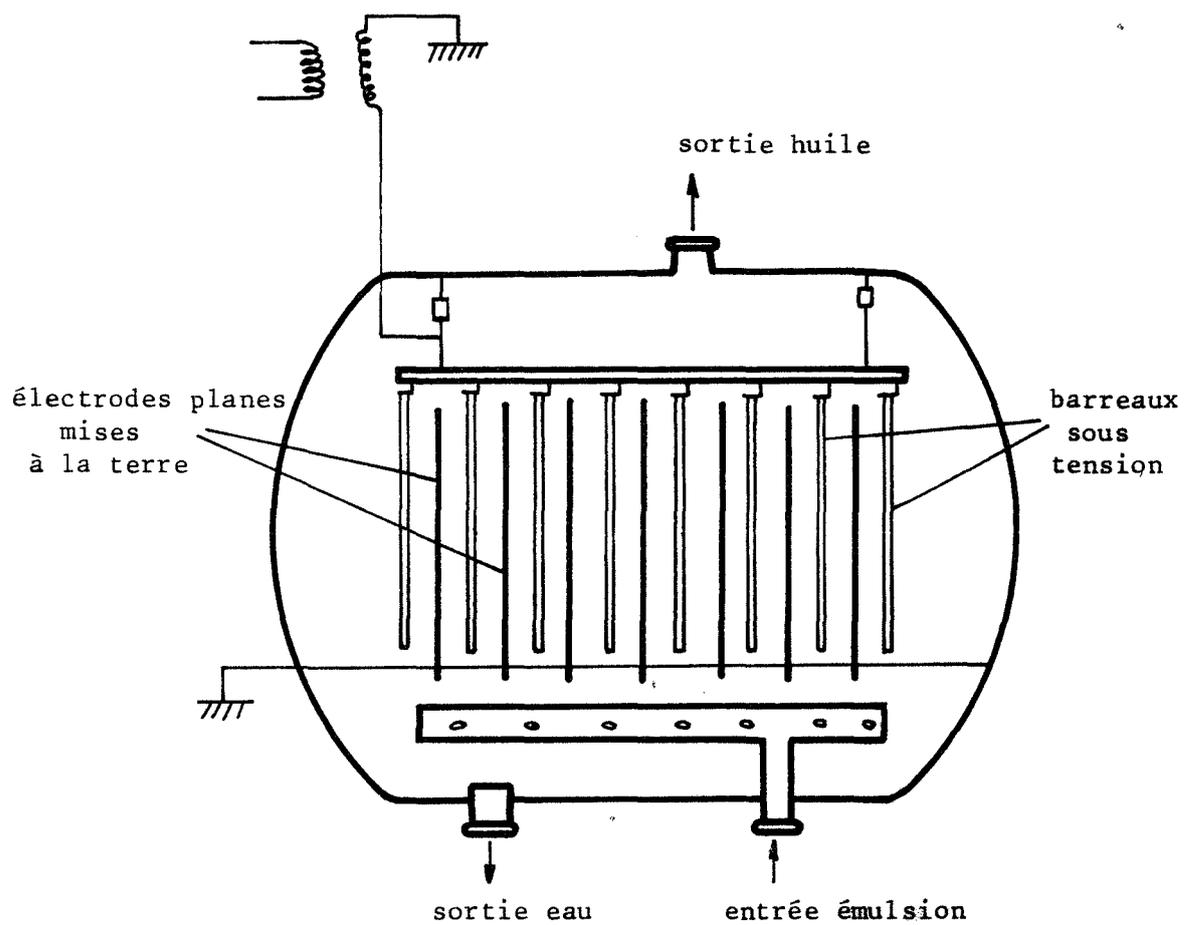
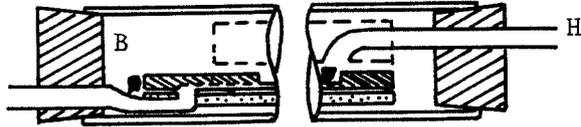
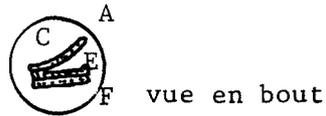


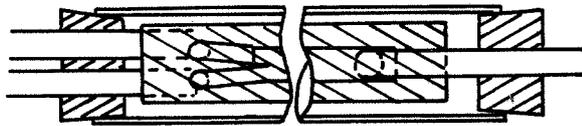
figure 3

SCHEMA D'UN APPAREIL D'ELECTROCOALESCENCE
EN CHAMP CONTINU

(D'après un brevet (31))

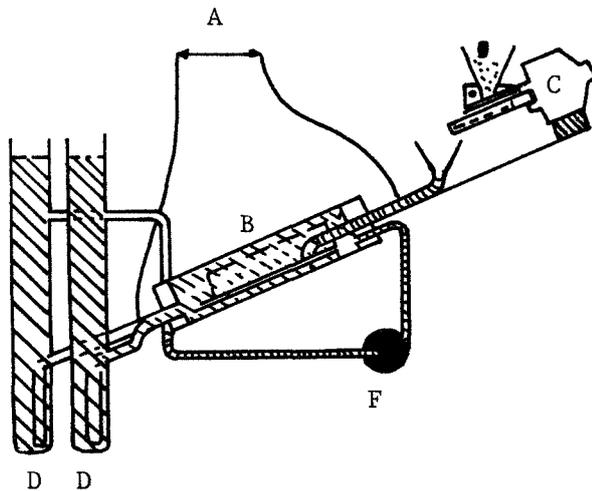


vue de côté



vue de dessus

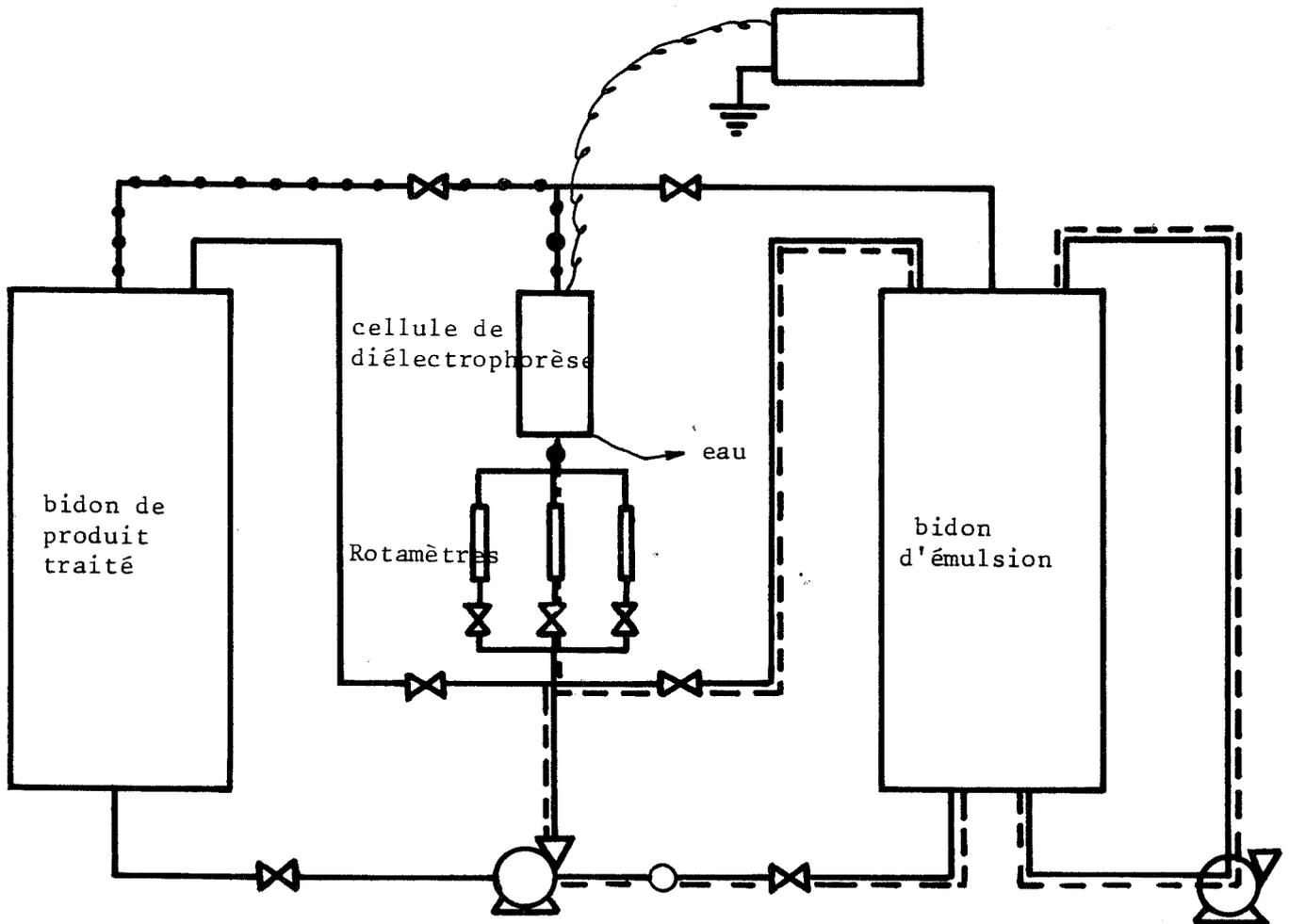
A, paroi extérieure en verre ; B liquide diélectrique ; C électrode supérieure courbée ; F électrode inférieure plate ; H entrée de la charge ; I tube inférieur de sortie ; J tube supérieure de sortie ; K, trous de sortie



A source fournissant une haute tension ; B, cellule isomotrice ;
C vibreur ; D collecteurs de poudre ; F pompe

figure 4

CELLULE ISOMOTRICE
(d'après H.A. POHL (55))



- 
 vanne de réglage
- 
 circuit de l'émulsion
- 
 circuit de produit traité
- 
 point de prélèvement d'échantillons
- 
 point d'introduction de l'eau pour la fabrication de l'émulsion

figure 5

SCHEMA DU MONTAGE



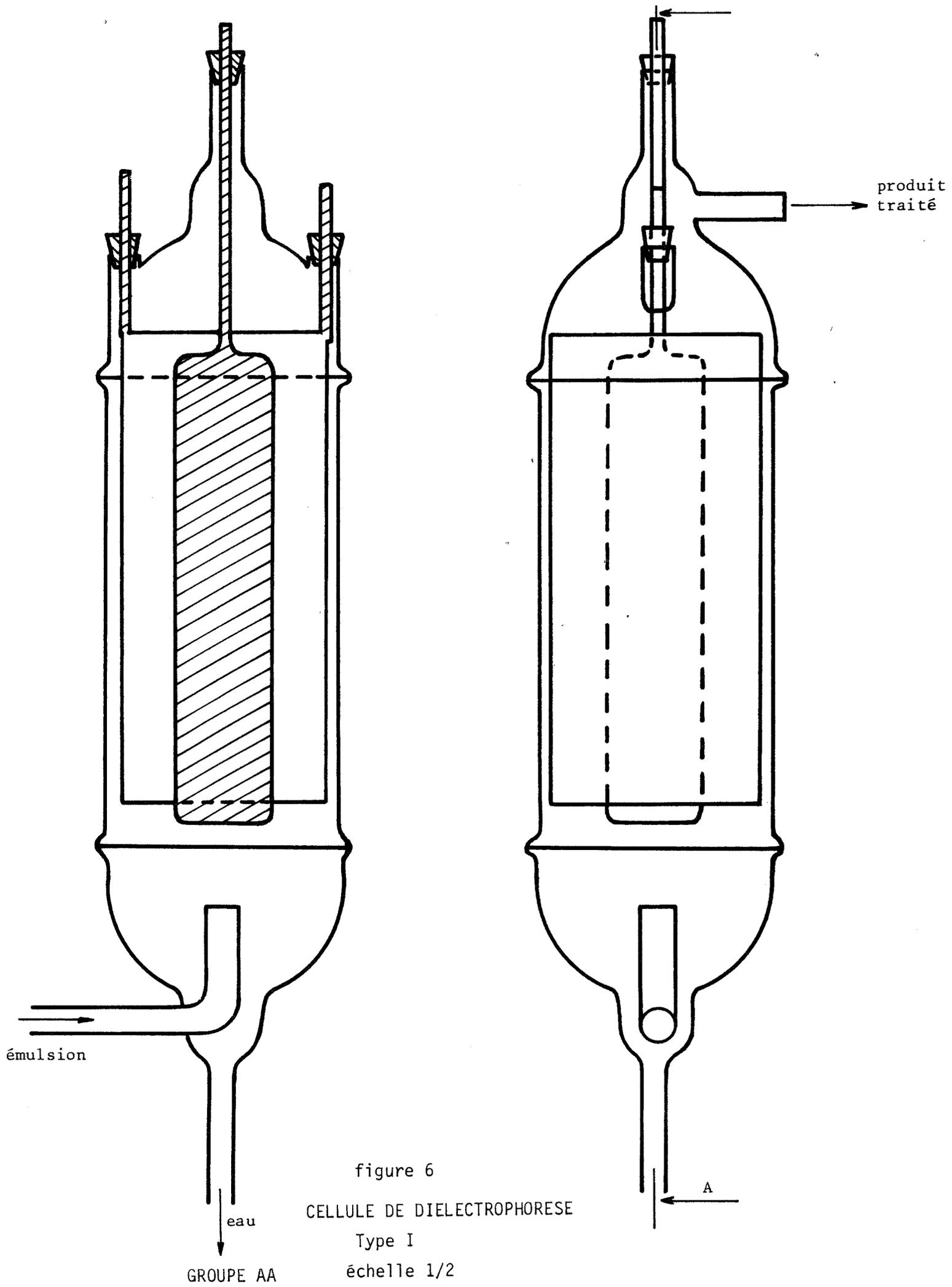


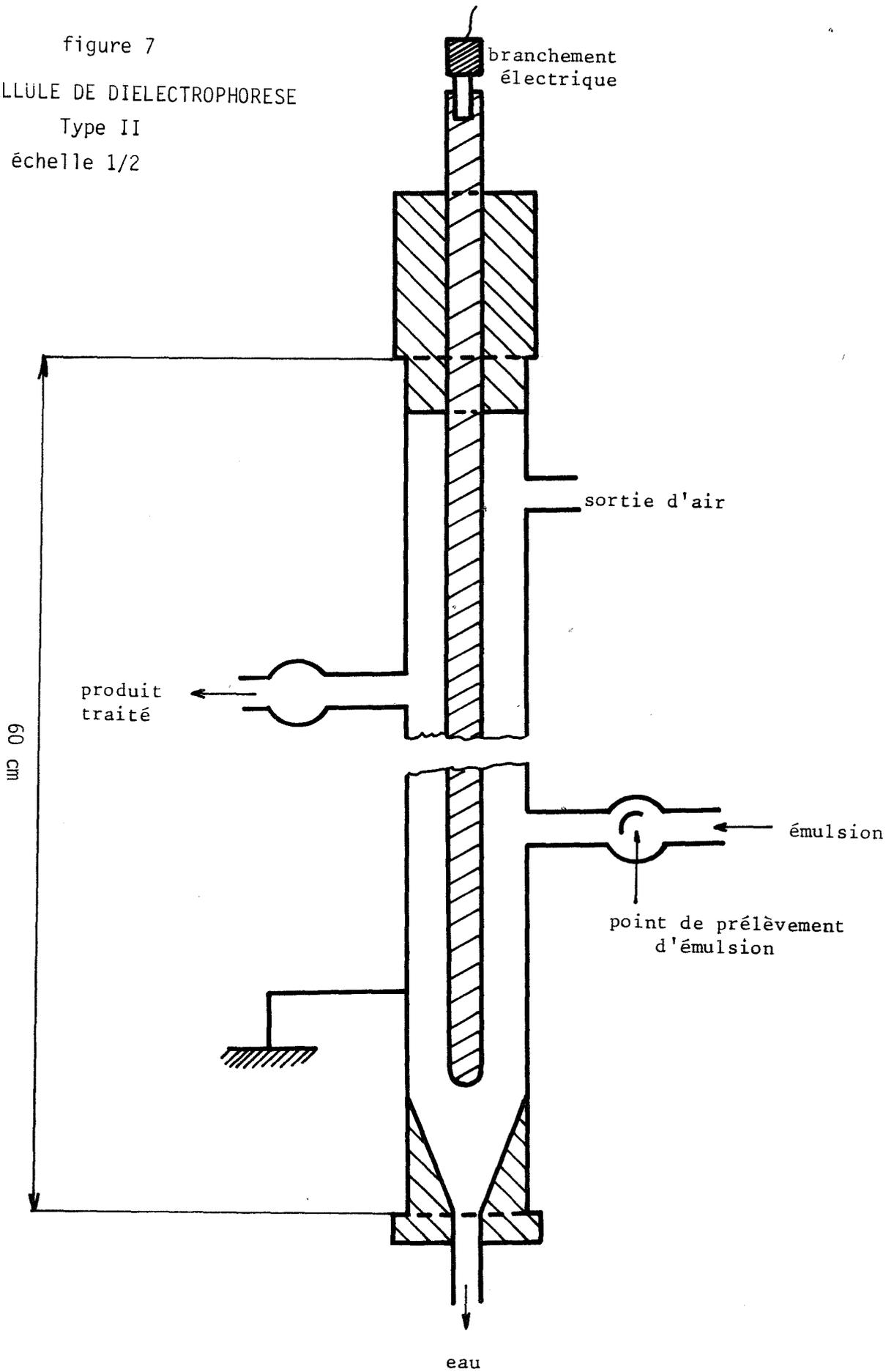
figure 6

CELLULE DE DIELECTROPHORESE

Type I

échelle 1/2

figure 7
CELLULE DE DIELECTROPHORESE
Type II
échelle 1/2





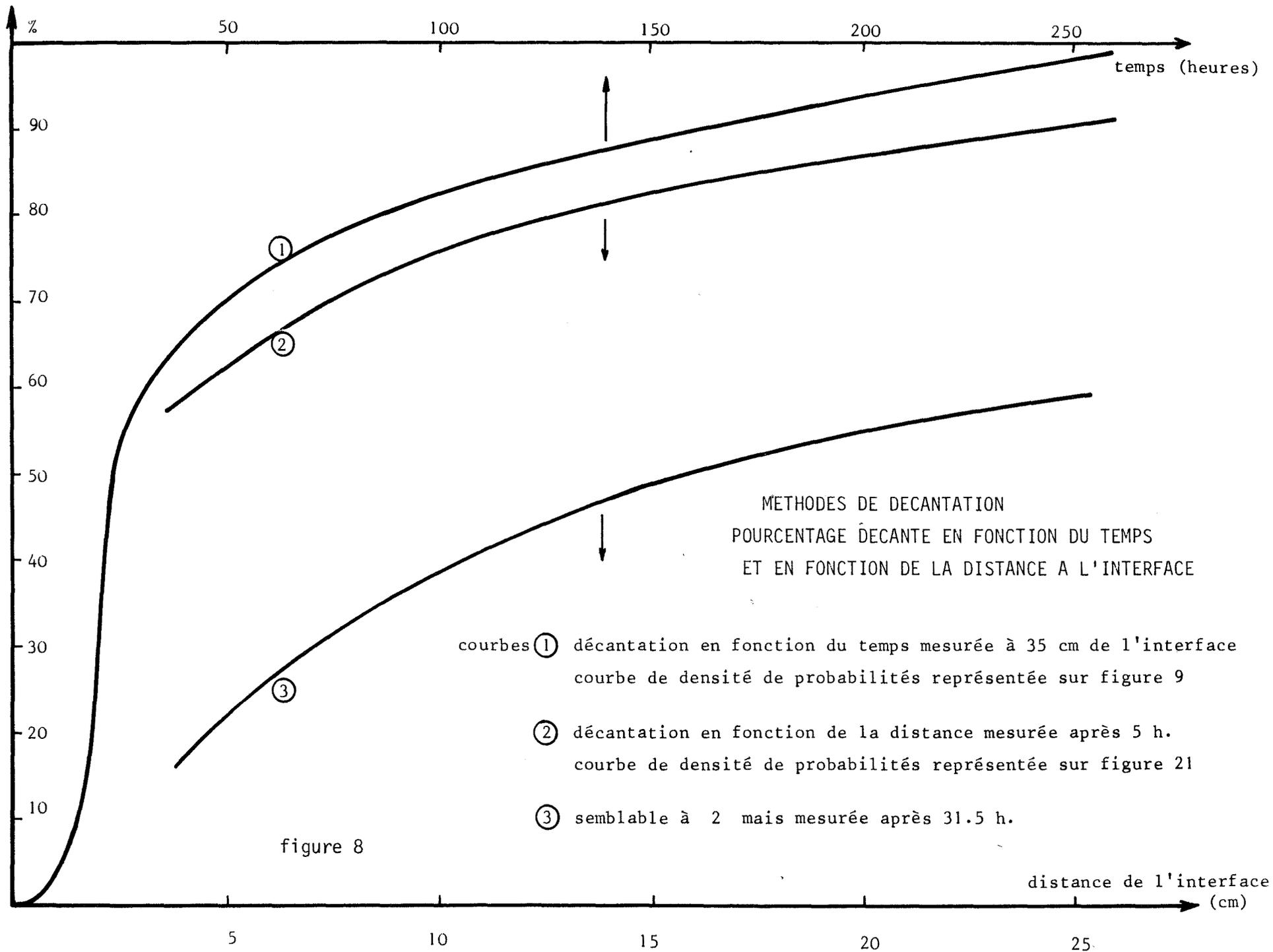
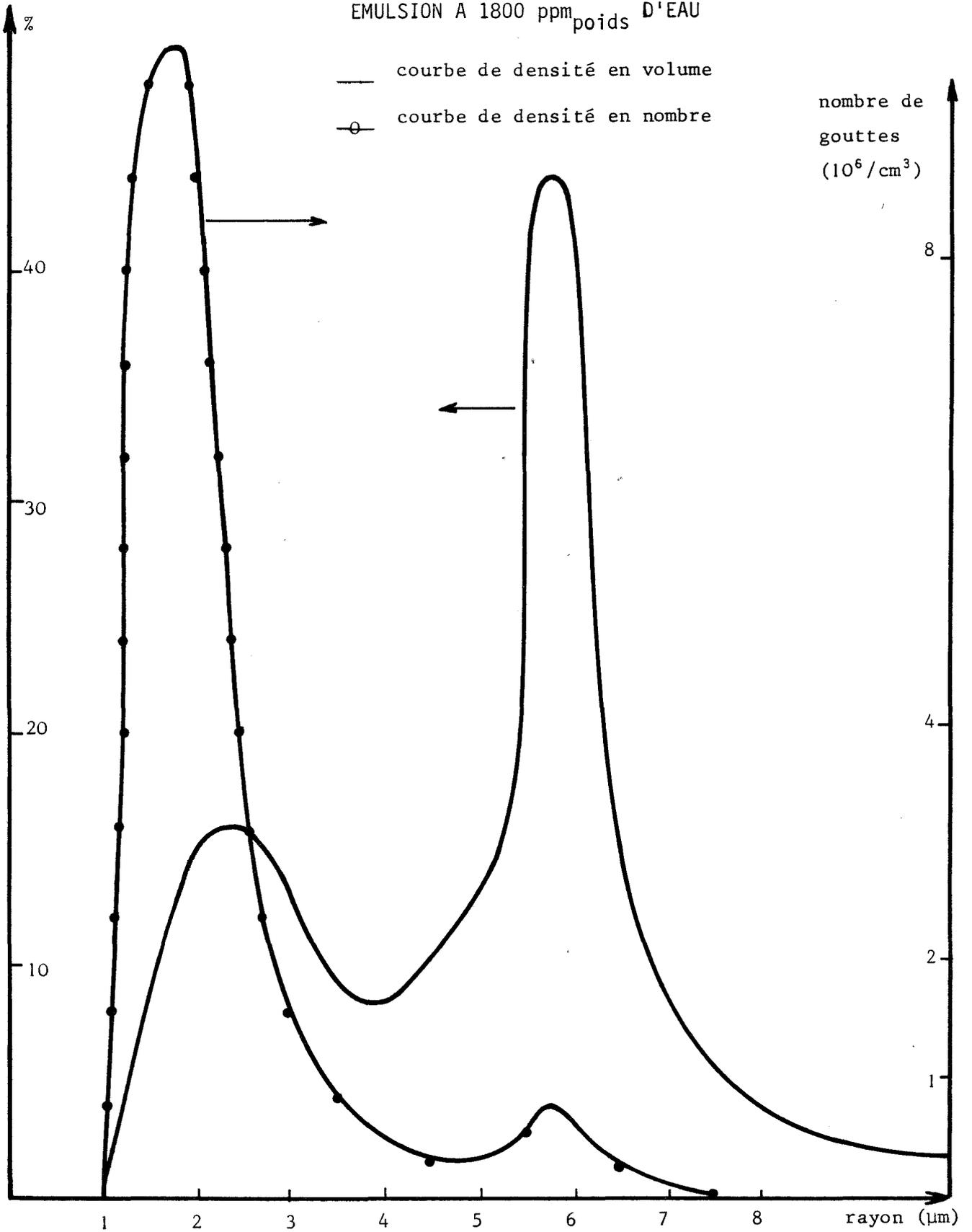
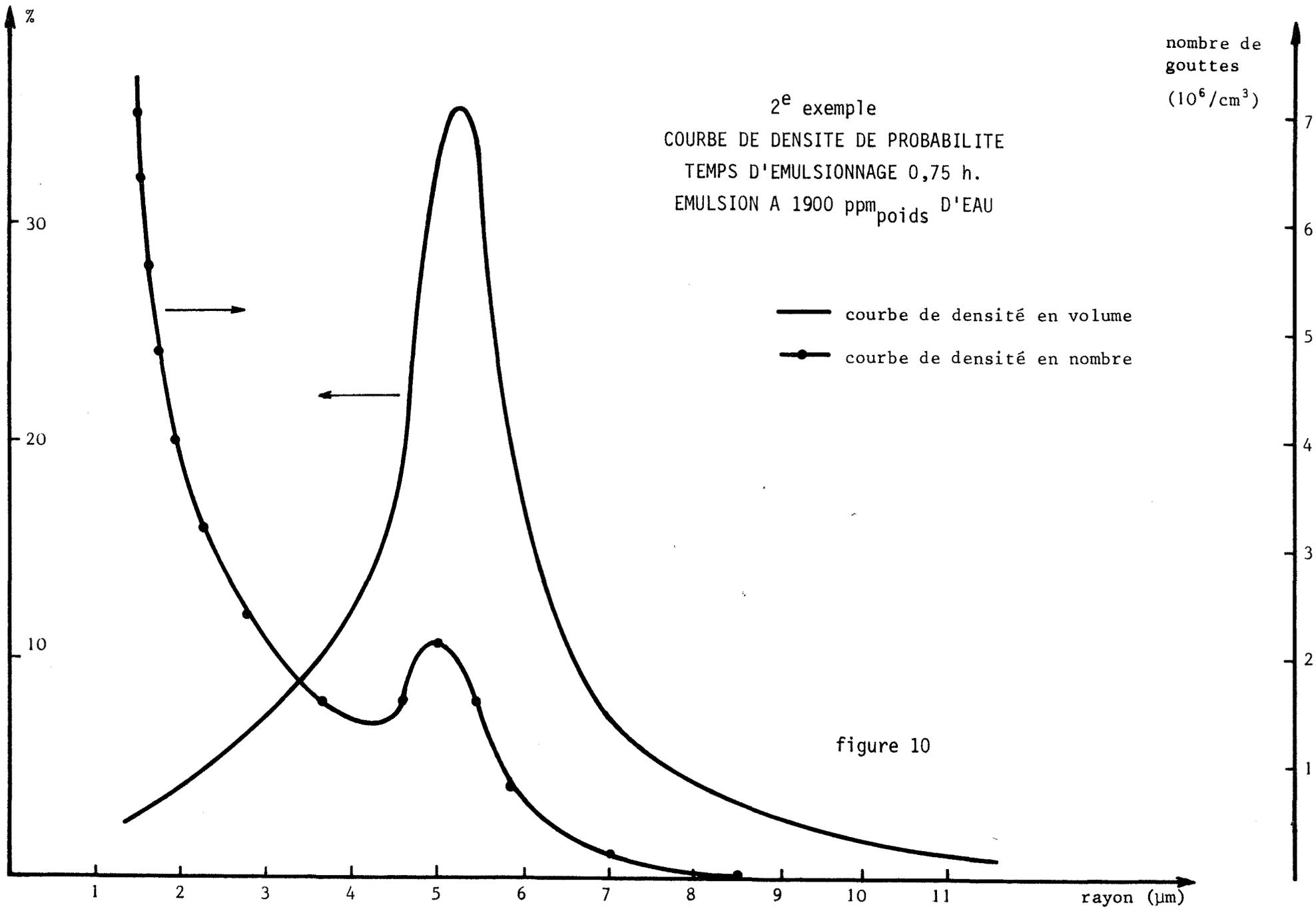


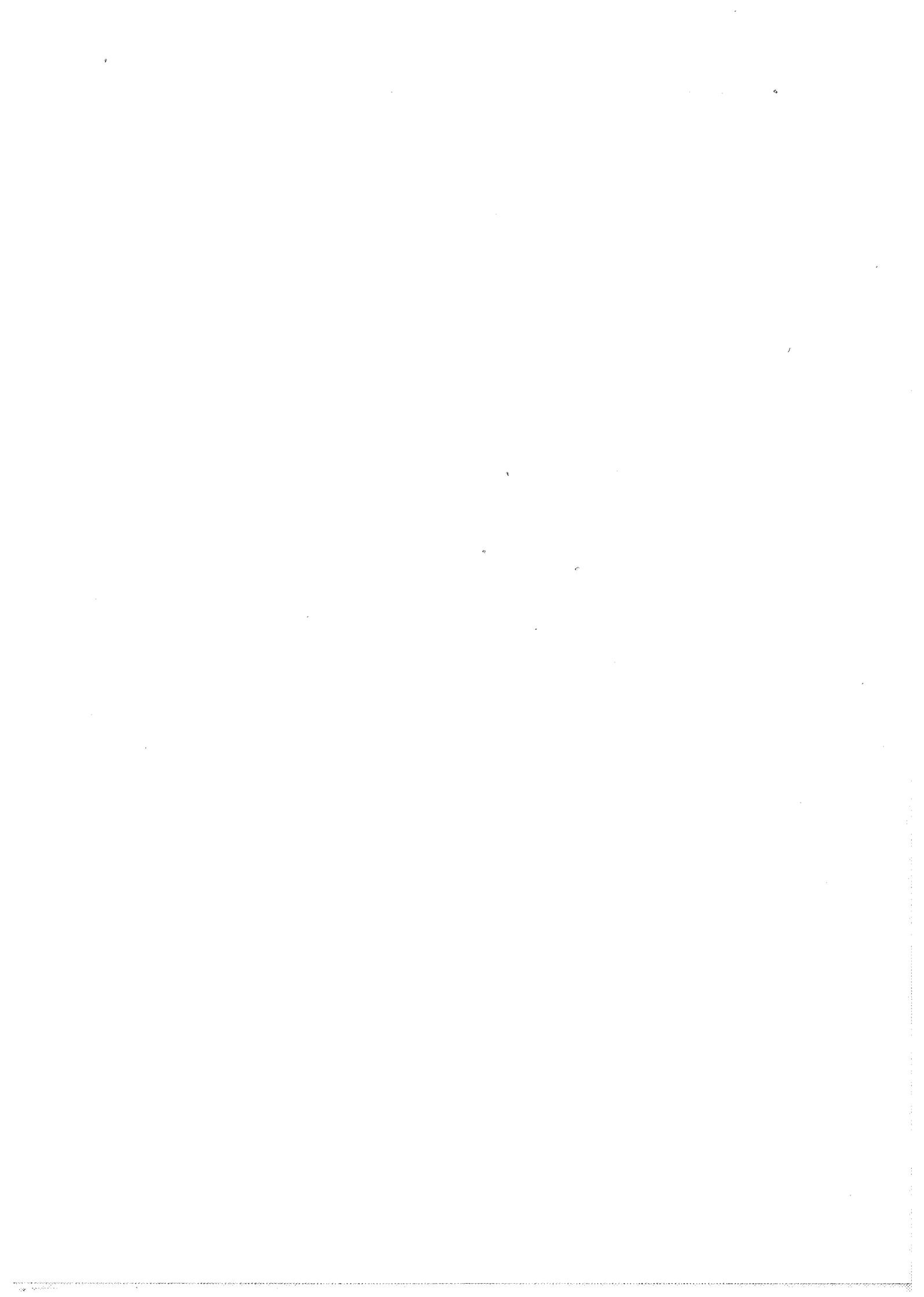
figure 8

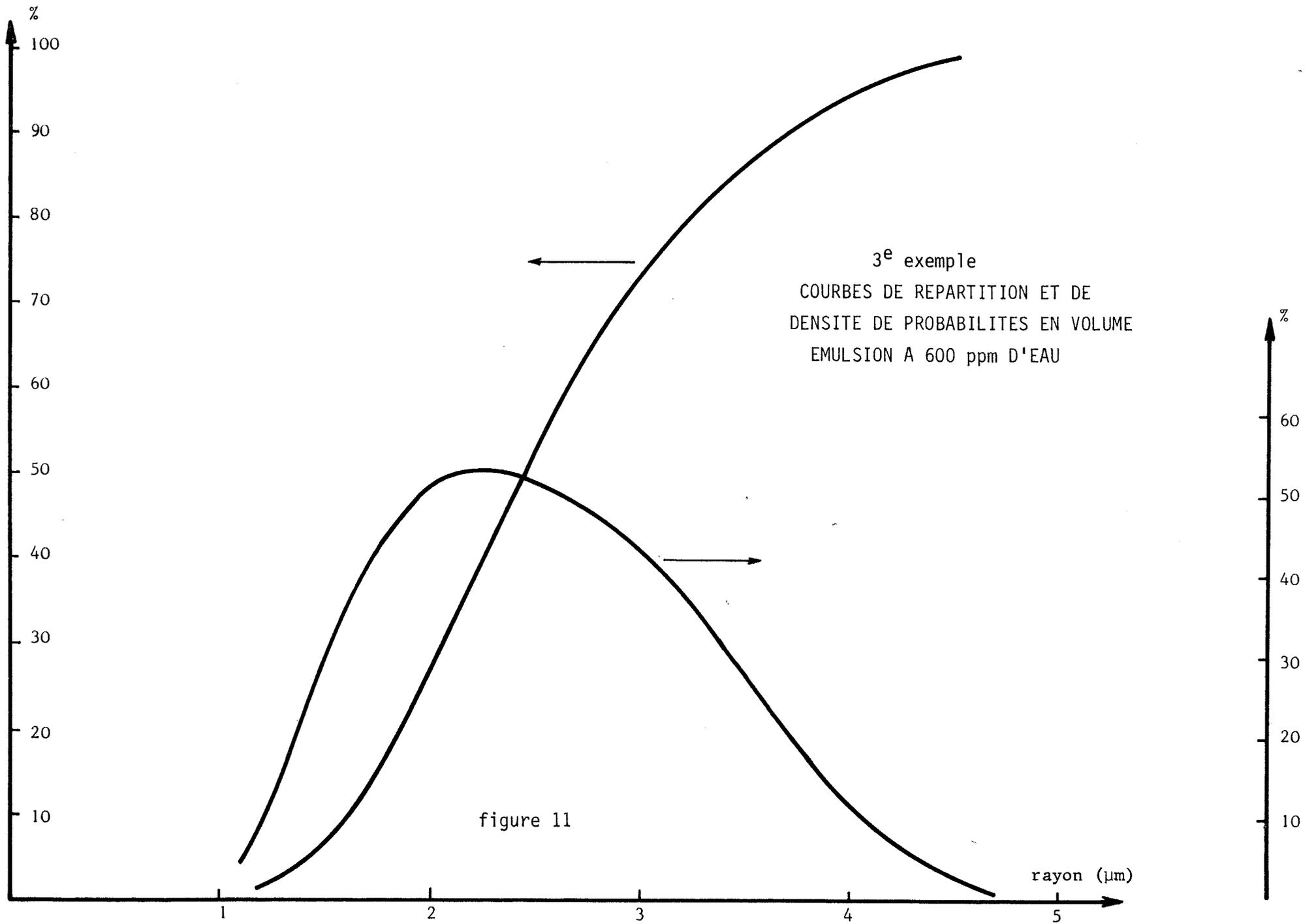
figure 9

1^e exemple
COURBES DE DENSITE DE PROBABILITE
TEMPS D'EMULSIONNAGE 0,75 h.
EMULSION A 1800 ppm_{poids} D'EAU









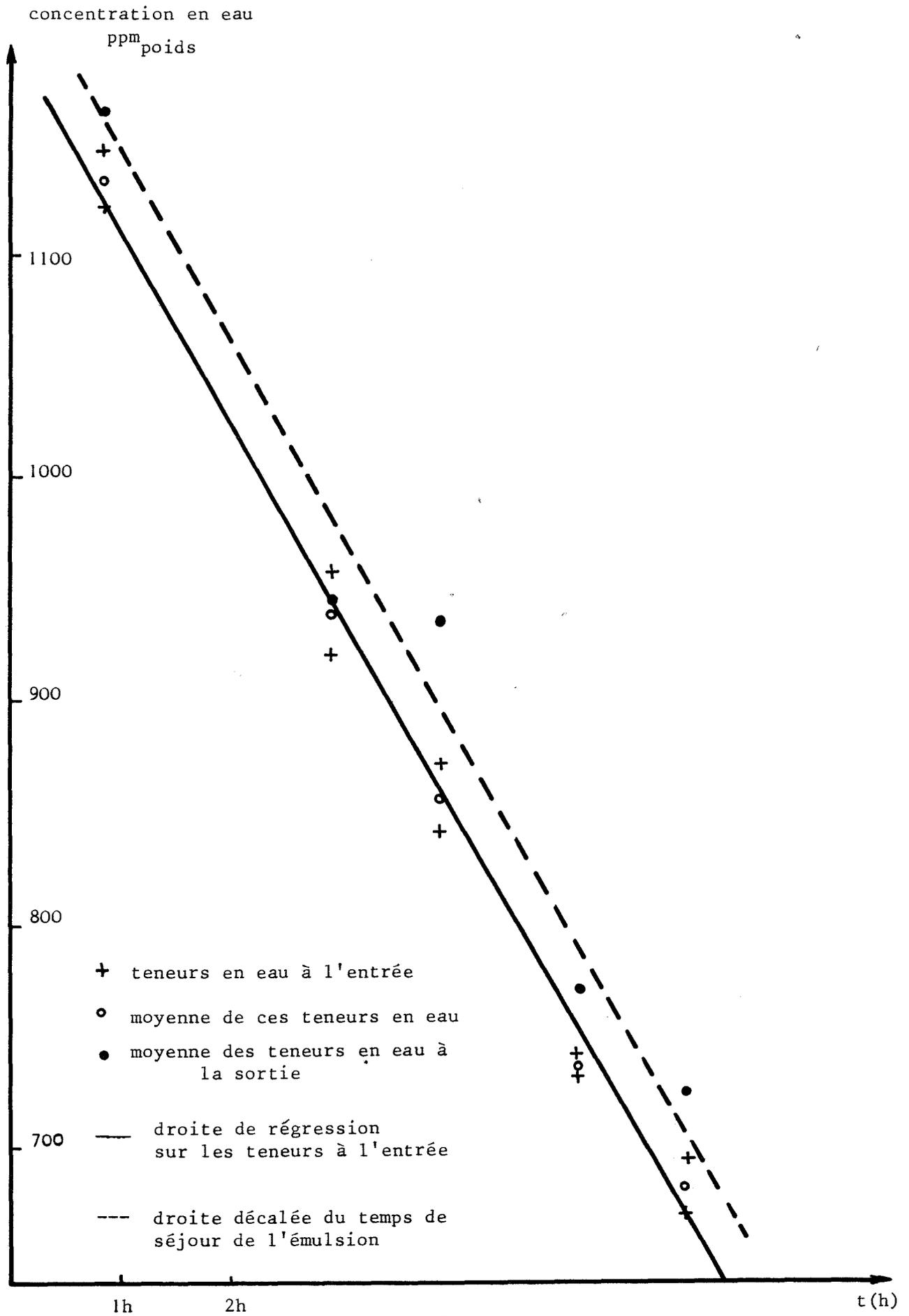
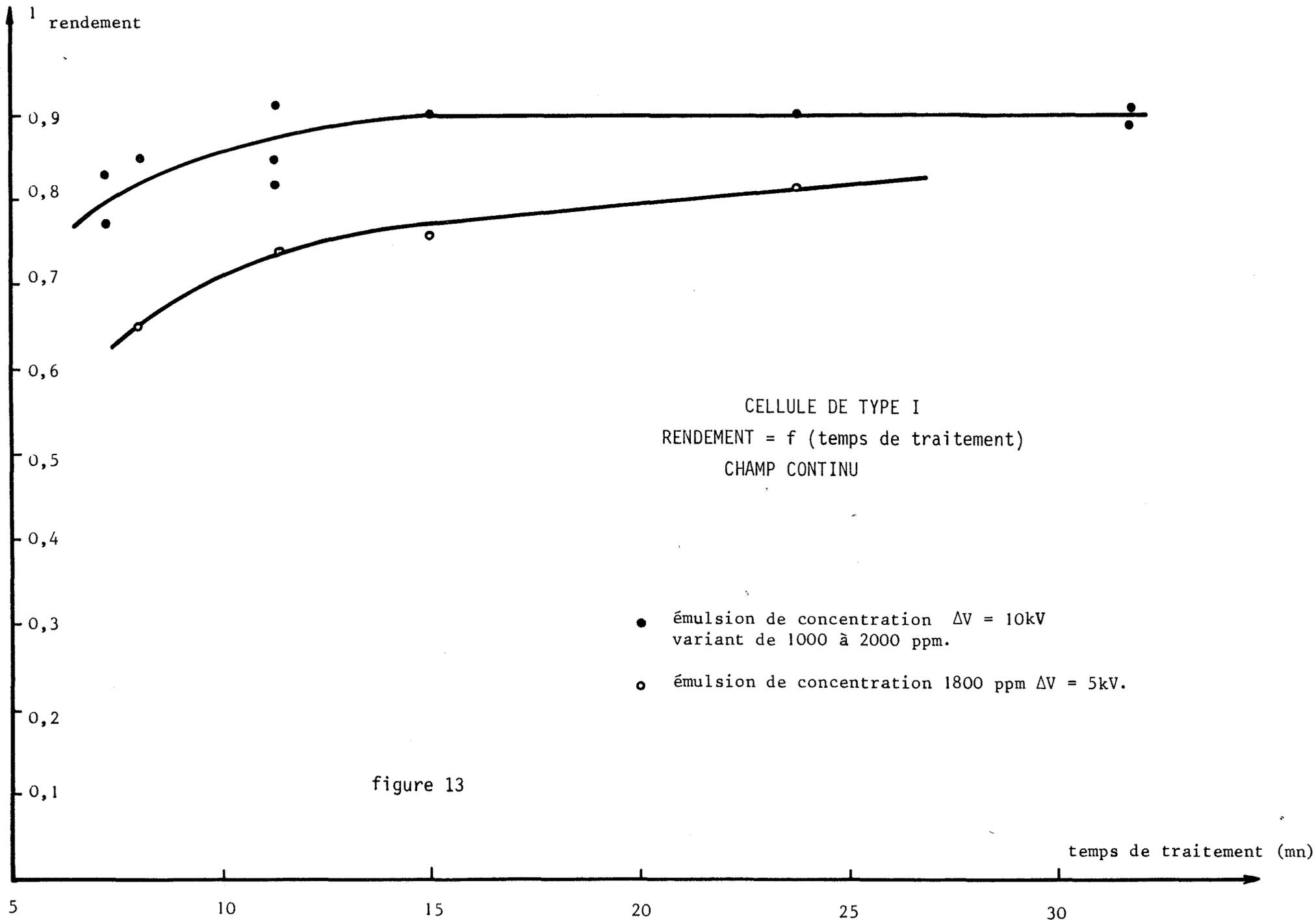


figure 12



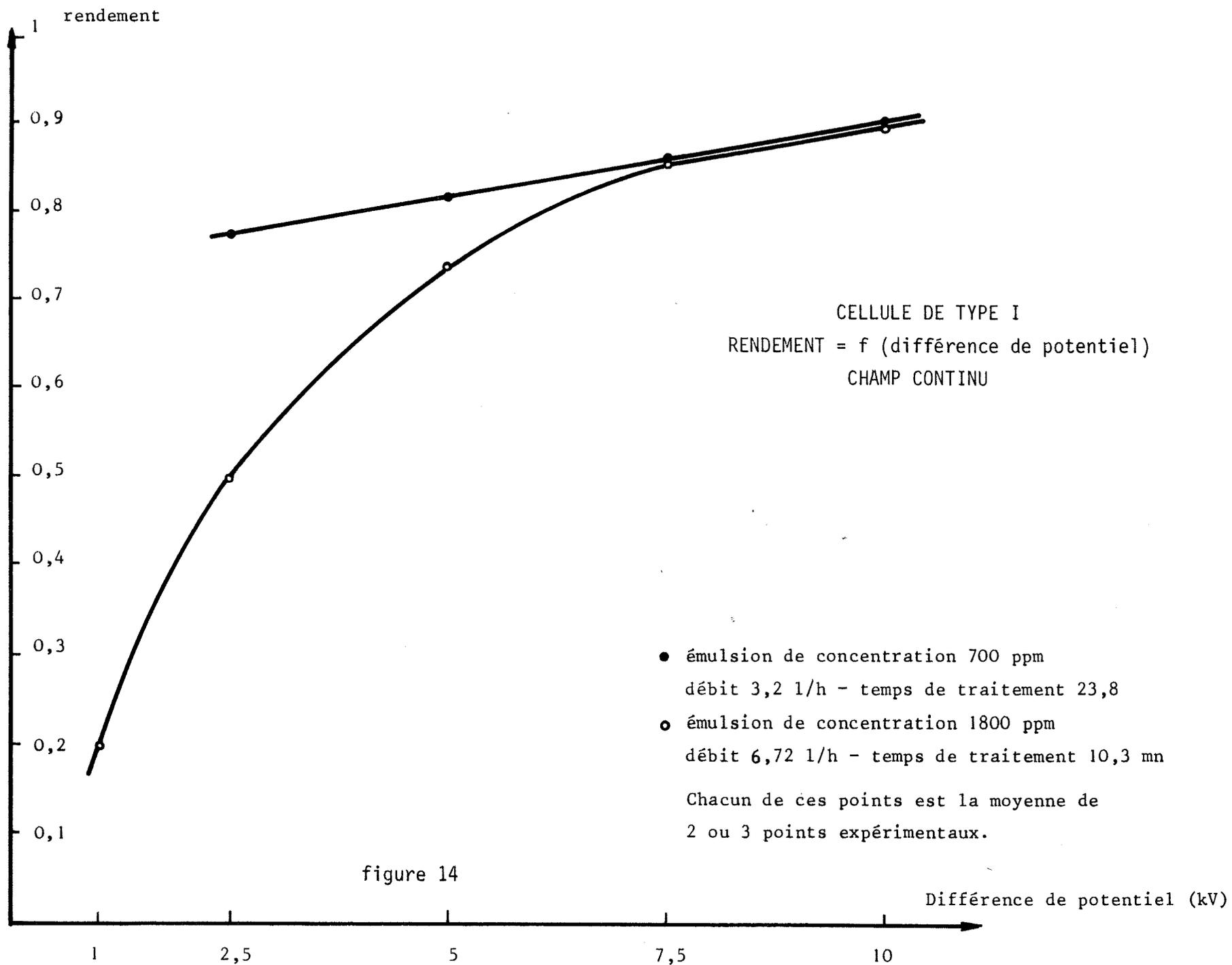
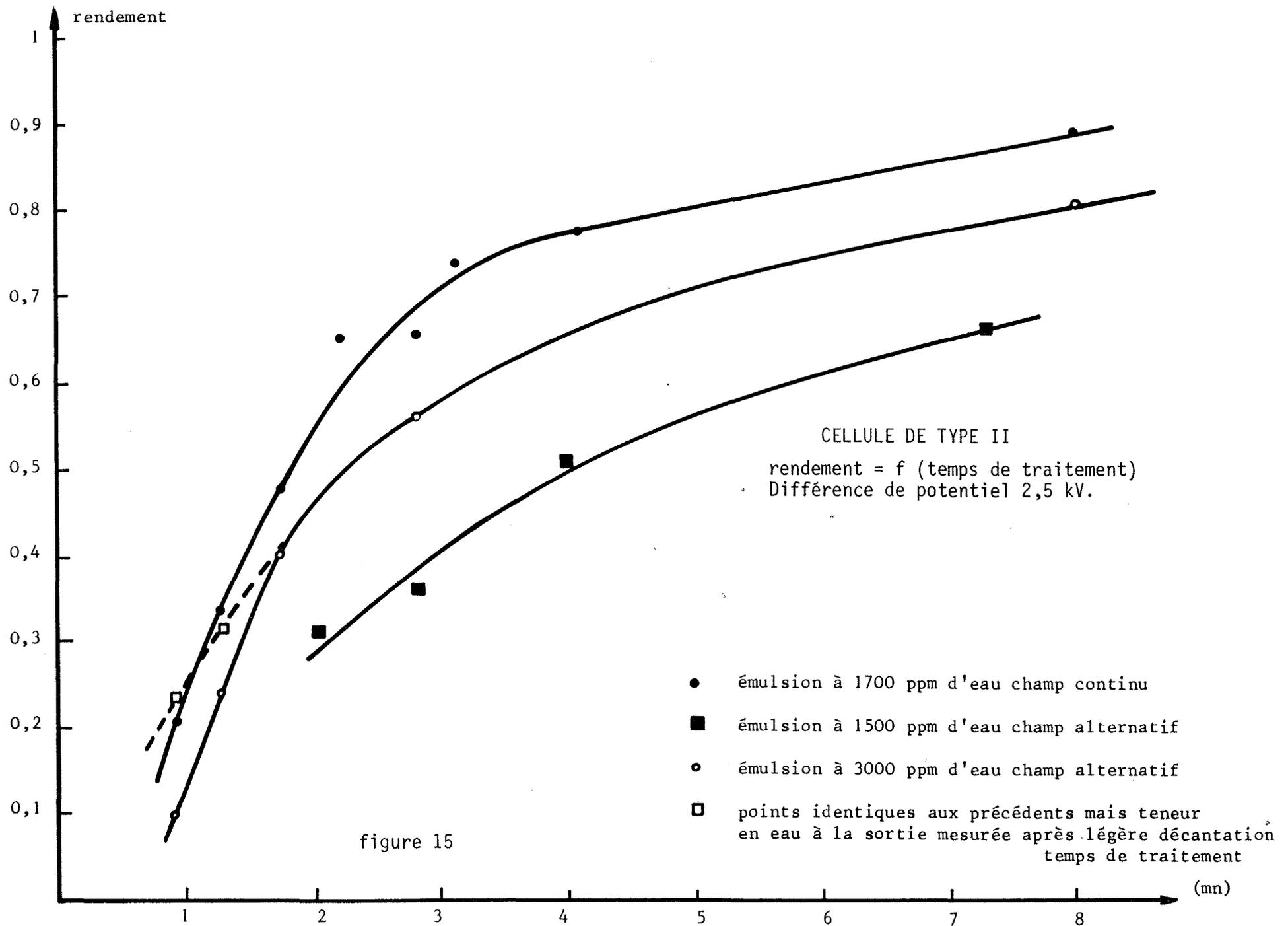
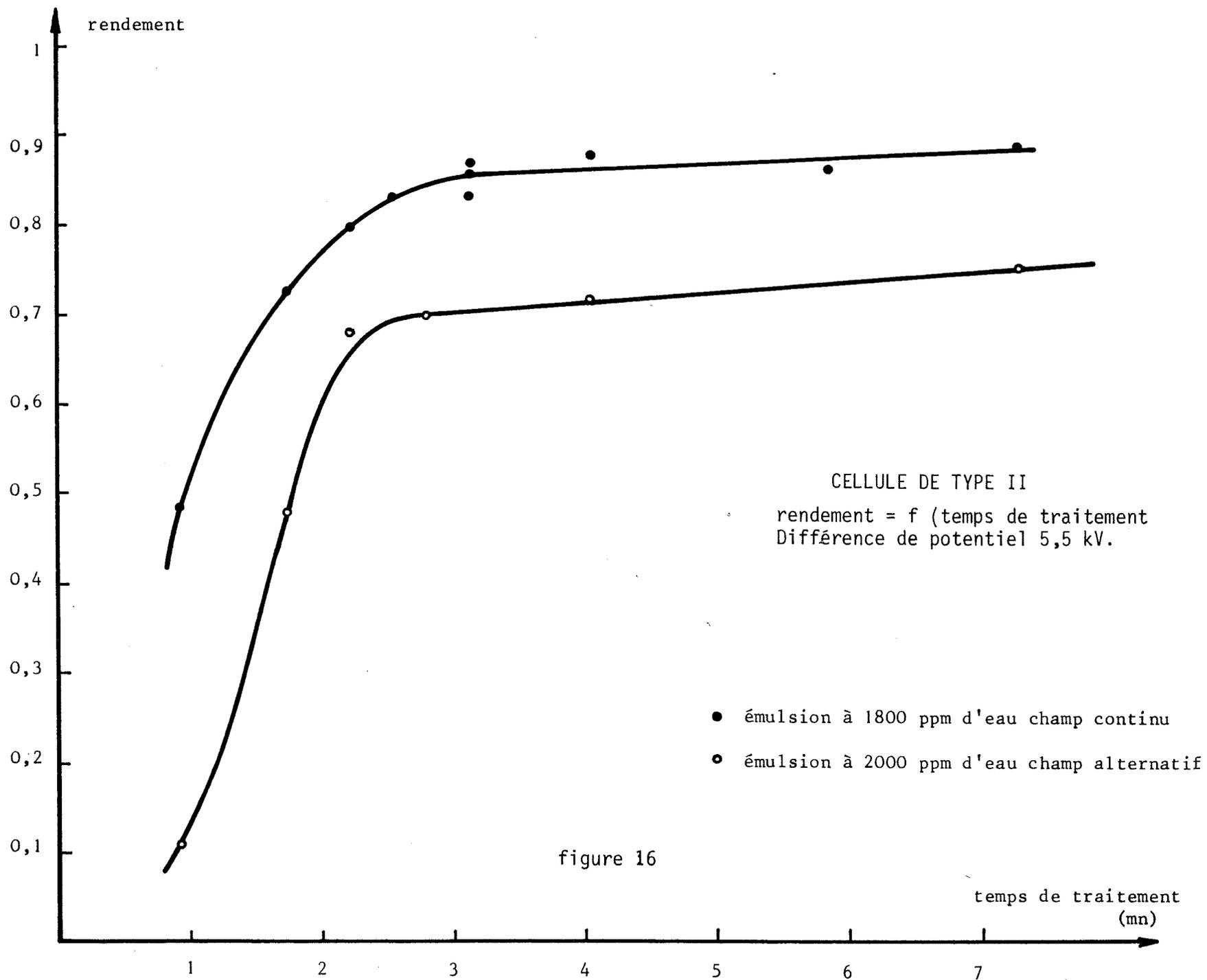


figure 14





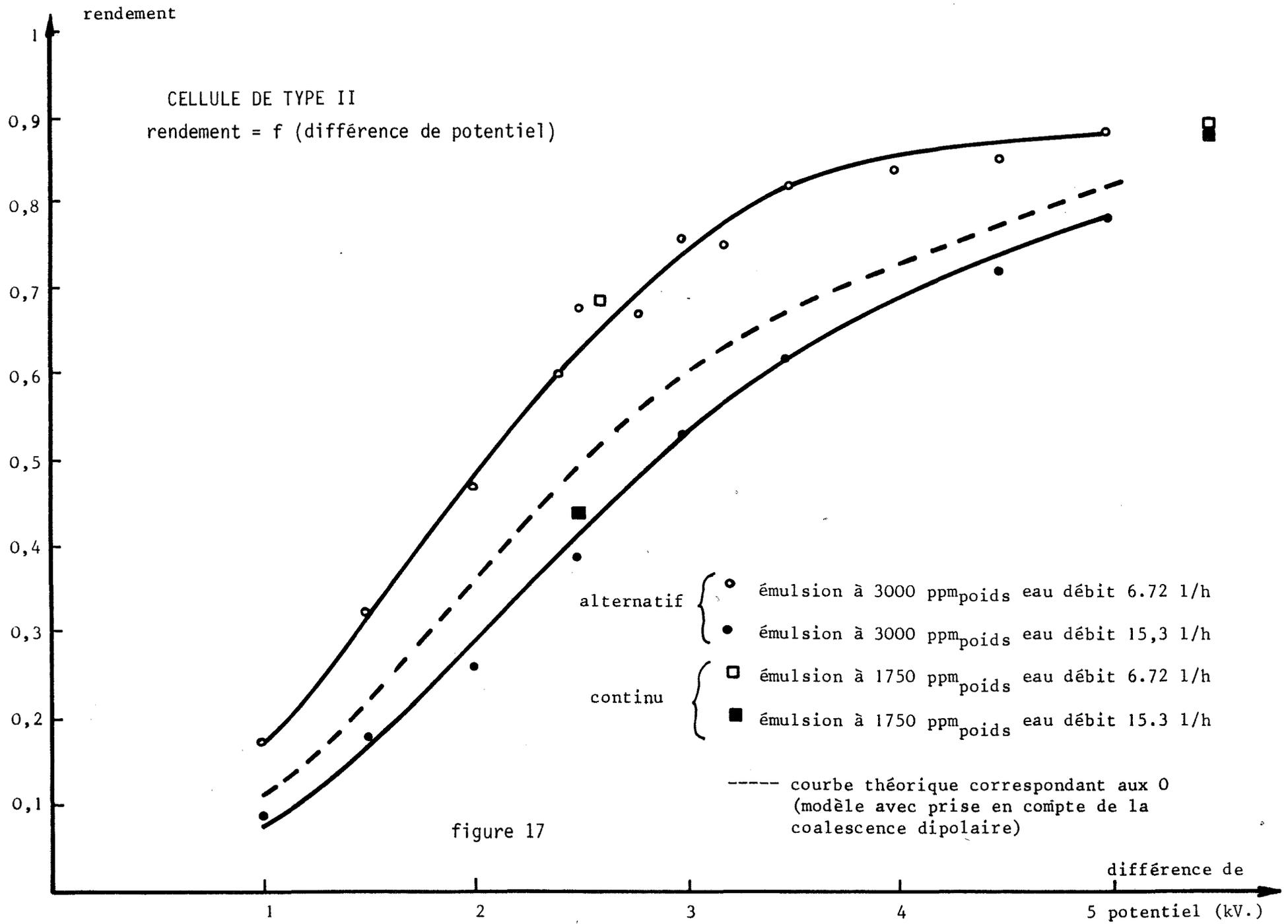


figure 17

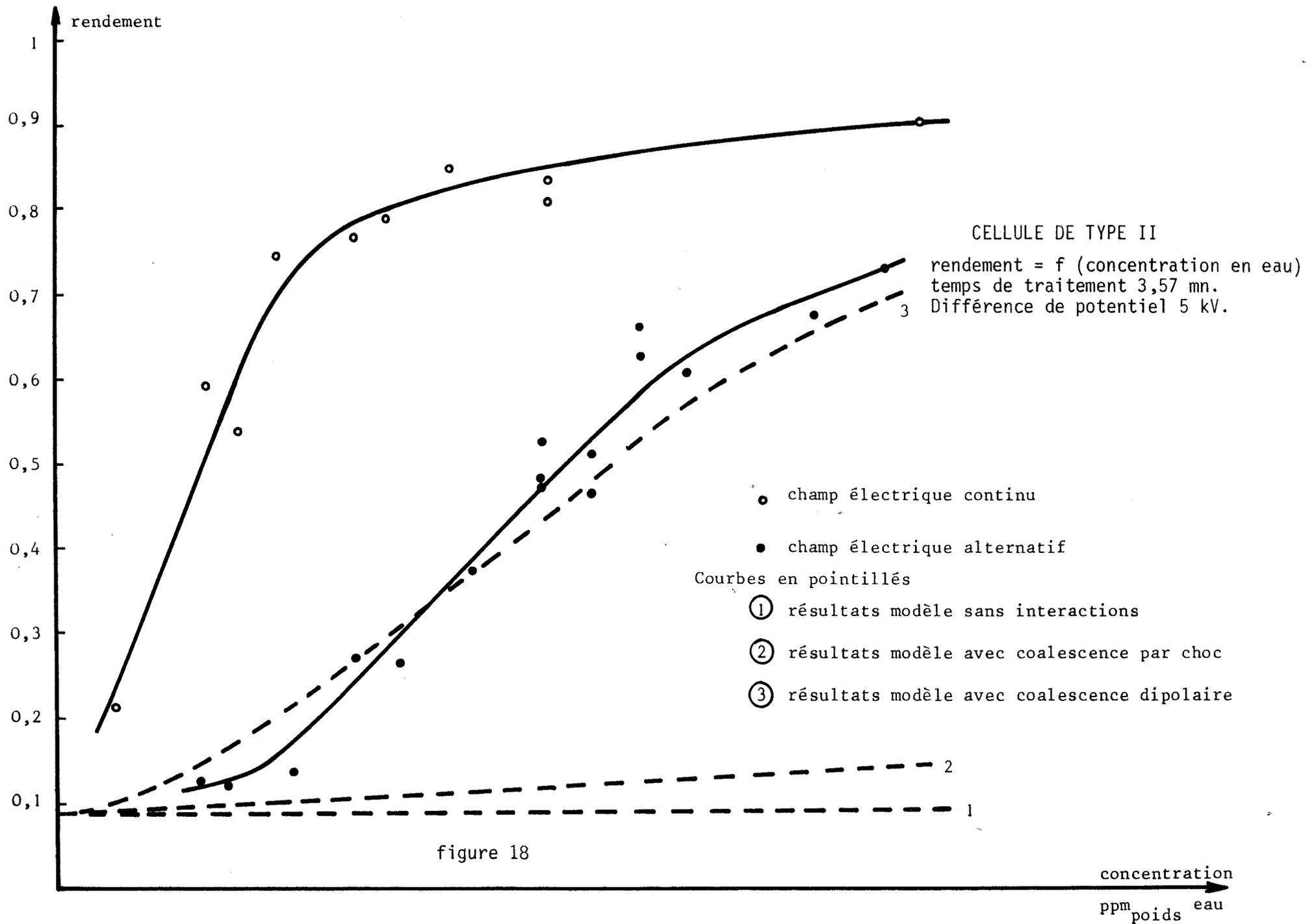
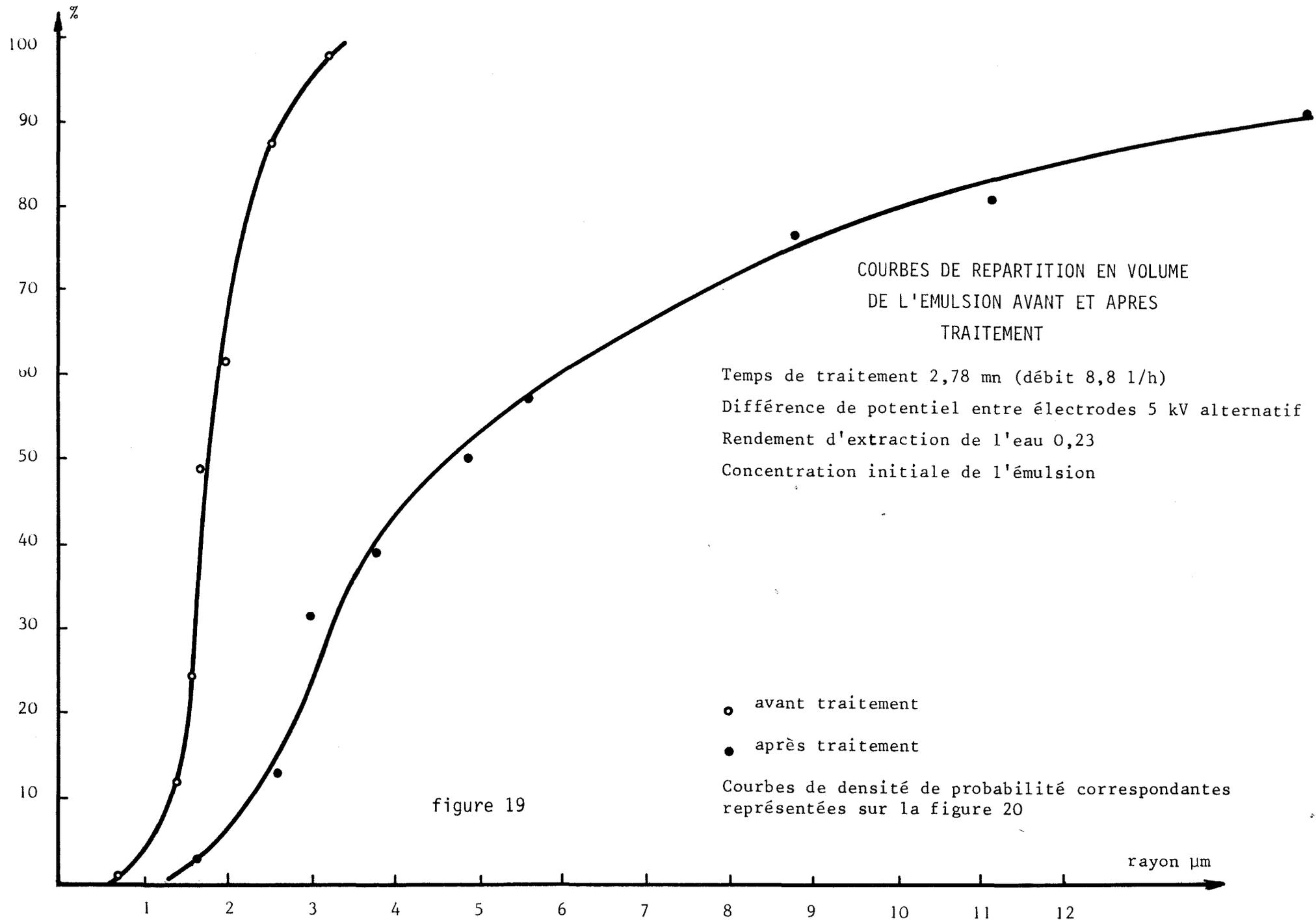
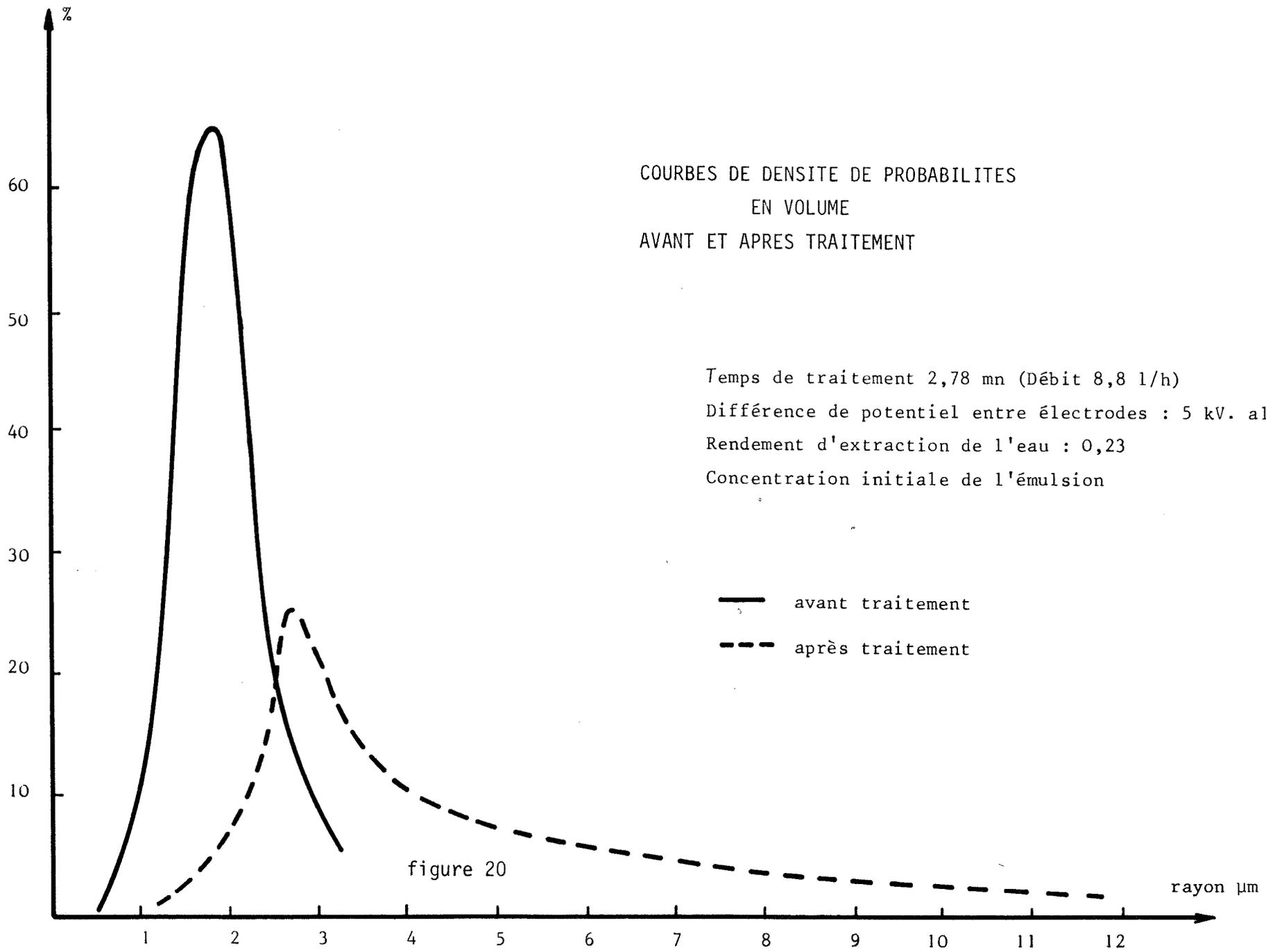


figure 18





COURBES DE DENSITE DE PROBABILITES
EN VOLUME
AVANT ET APRES TRAITEMENT

Temps de traitement 2,78 mn (Débit 8,8 l/h)
Différence de potentiel entre électrodes : 5 kV. alternatif
Rendement d'extraction de l'eau : 0,23
Concentration initiale de l'émulsion

— avant traitement
- - - après traitement

figure 20

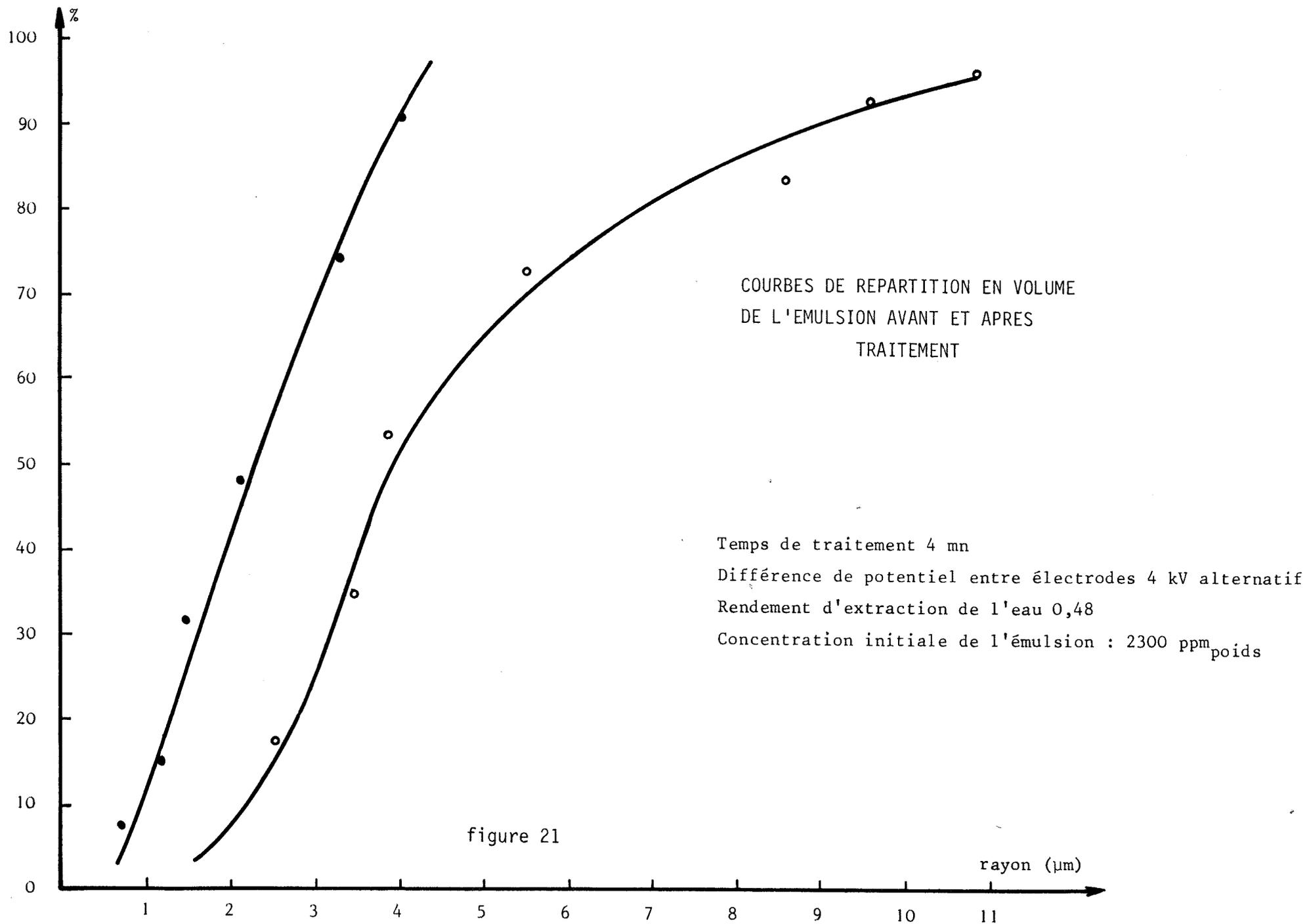


figure 21

