

وزارة التعليم العالي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *Genie de l'environnement*

# PROJET DE FIN D'ETUDES

### S U J E T

*Optimisation du procédé de  
microsélection par application  
d'un champ électrique*

Proposé par :  
N. MAMERI  
AB. CHERGUI

Etudié par :  
SILEM Farida  
ZEBOUSSI Bahia

Dirigé par :  
N. MAMERI  
AB. CHERGUI

PROMOTION :  
1992

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة الجامعات والبحث العلمي  
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT *Genie de l'Environnement*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Optimisation du procédé de  
microfiltration par application  
d'un champ électrique*

Proposé par :

*N. MAMERI  
AB. CHERGUI*

Etudié par :

*SILEM Farida  
ZEBOUNJI Bahis*

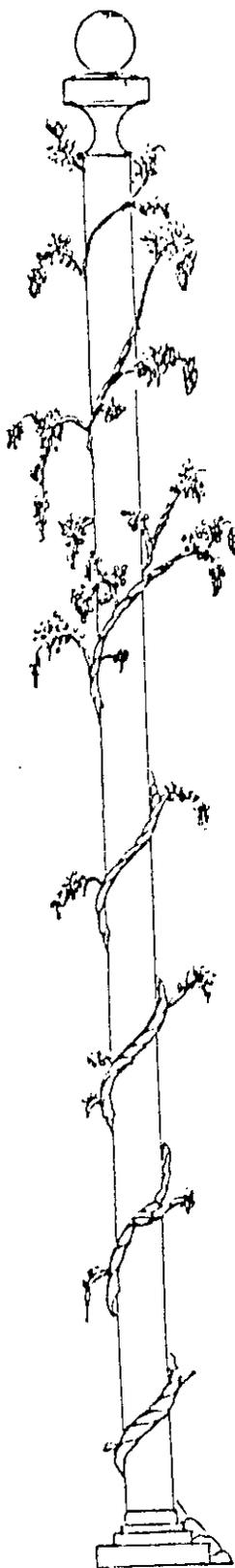
Dirigé par :

*N. MAMERI  
AB. CHERGUI*

PROMOTION

1992

## Vœux



à mes très chers parents, qui m'ont  
soutenu et permis d'atteindre  
le but

à ma grand mère  
à mes deux sœurs Malika et Lynda  
à mes frères et beau frère  
à ma meilleure et fidèle amie Djida  
à mon petit neveu Hamel  
à Hamid  
à tous mes amis (es)  
à tous ceux qui me sont chers je  
dédie ce travail

Farida

à ma très chère mère  
à la mémoire de mon père  
à mes sœurs Zhor et A. Lila  
à mes frères  
à Noureddine  
à tous mes amis (es) je  
dédie ce travail

Bahia

# Remerciements.

Arrivant au terme de ce modeste mémoire, nous ne saurions exprimer la gratitude qui nous anime et la reconnaissance que nous vouons à Mr. A. Chergui pour son aide précieuse et ses nombreux conseils qui n'ont d'équivalents que la noble mission qu'il poursuit dans la dispense du Savoir.

Nous tenons à remercier le Dr. N. Mameri tant pour son soutien moral que pour le matériel qu'il a bien voulu mettre à notre disposition.

Qu'il trouve ici notre grande et parfaite considération.

Nous adressons une particulière reconnaissance à Mr. H. Lounici et ne saurions trop le remercier pour toute l'aide qu'il nous a prodiguée.

Nos remerciements vont également aux membres de Jury :

- Dr Abdi (E.N.P) Présidente
- Melle Ben Imaili (U.S.E.H.B)
- Mr Chikhi (U.S.E.H.B)
- Dr N Mameri (E.N.P)
- Mr. A. Chergui (E.N.P)
- Mr. D. Abdessamec (E.N.P).

qui ont consenti à juger ce travail.

Nous remercions de même le personnel de notre département de Génie de l'Environnement et les étudiants de notre promotion pour leur aide précieuse au moment voulu.

Enfin nous remercions vivement les personnes qui ont de près ou de loin prêté main forte à l'élaboration de ce document.

## NOMENCLATURE : LISTE DE SYMBOLES

A	Surface de la membrane [m <sup>2</sup> ]
C	Concentration de la solution (Kg/m <sup>3</sup> ).
C <sub>0</sub>	Concentration initiale de la solution (Kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>p</sub>	Concentration de perméat (g/l)
C <sub>m</sub>	Concentration à l'interface de la solution (Kg/m <sup>3</sup> )
D	Coefficient de diffusion (m <sup>2</sup> /s).
E	Champ électrique (volt)
evf	Épaisseur de la veine fluide (m)
J <sub>v</sub>	Flux de perméat (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h).
k	Coefficient de transfert de masse (m/s).
K	Coefficient de transfert de masse (m/s)
K <sub>p</sub>	Coefficient de coût énergétique (DA/joule)
K <sub>c</sub>	Coefficient de coût en capital (DA/m <sup>2</sup> .s)
l	Longueur du canal de recirculation (m).
L <sub>p</sub>	Perméabilité hydraulique de la membrane (m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> bar)
N	Nombre de pores par unité de surface.
ΔP	Pression transmembranaire (bar)
ΔP <sub>r</sub>	Pertes de charge (Pa)
Δπ	Pression osmotique (Pa)
Q <sub>v</sub>	Débit de recirculation (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>p</sub>	Débit d'ultrafiltration (m <sup>3</sup> /s)
R <sub>obs</sub> ou Tr <sub>obs</sub>	Taux de rejet observé (%)
R <sub>reel</sub>	Taux de rejet réel (%)
κ (Cond.)	Conductivité électrique (mS/cm)
t	temps de filtration (mn)
Turb.	Turbidité NTU
r <sub>p</sub>	Rayon du pore moyen (m)
Sh	Nombre de Sherwood
Sc	Nombre de Schmidt
T	Température (°C)
μ	Viscosité dynamique (Pa.s)
u	Coefficient de mobilité électrophorétique
V	Vitesse de circulation
S	Épaisseur de la couche de polarisation (m)
δ	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
Δx	Épaisseur de la membrane
α	Coefficient de l'investissement en capital en EMF
UF	ultrafiltration
MF	Microfiltration
EMFT	Electromicrofiltration tangentielle.

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

### CHAPITRE UN :

- I.1 **GÉNÉRALITÉS SUR LES TECHNIQUES À MEMBRANES.**
- I.2 **PRINCIPALES APPLICATIONS DES TECHNIQUES À MEMBRANES.**
- I.3 **L'ULTRAFILTRATION**
  - I.3.1 Définition de l'ultrafiltration
- I.4 **MICROFILTRATION TANGENTIELLE**
  - I.4.1 Introduction
  - I.4.2 Présentation générale
  - I.4.3 Rôle des colloïdes dans la MFT
  - I.4.4 Effet d'adsorption des macromolécules et colloïdes
- I.5. **MÉCANISMES DE TRANSFERT**
  - I.5.1 Introduction
  - I.5.2 Modèle du tamis moléculaire
  - I.5.3 Modèle du film
  - I.5.4 Modèle osmotique
- I.6 **PHÉNOMÈNES D'ADSORPTION**
- I.7 **PHÉNOMÈNE DE COLMATAGE**

### CHAPITRE DEUX AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DE L'ULTRAFILTRATION

- II.1 **INTRODUCTION**
- II.2 **PROMOTEURS DE TURBULENCE**
  - II.2.1 Promoteur fixe

- II.2.2 *Promoteurs mobiles*
- II.2.3 *Débits pulsés*
- II.2.4 *Modules tournants*
- II.2.5 *Ultrasons*
- II.2.6 *Champ électrique*

### II.3 **TECHNIQUES D'ÉLIMINATION DU COLMATAGE EN EMFT**

## CHAPITRE TROIS

### ELECTROMICROFILTRATION TANGENTIELLE EMFT

- III.1 **ÉLECTROMICROFILTRATION TANGENTIELLE : EMFT**
- III.2 **APPLICATIONS ET MODELE D'EMFT**
  - a) **MODELE du film**
- III.3 **INFLUENCE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES SUR  
LES PERFORMANCES D'UNE EMFT**
  - III.3.1 *Influence de la tension appliquée et la  
vitesse appliquée*
  - III.3.2 *Influence de la pression appliquée*
  - III.3.3 *Influence de la concentration de la suspension*
  - III.3.4 *Influence du pH de la suspension*
  - III.3.5 *Influence de la conductivité de la suspension*

## CHAPITRE QUATRE MATÉRIELS ET MÉTHODES

### IV.1 **INSTALLATION EXPERIMENTALE**

### IV.2 **DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES CELLULES UTILISÉES**

- iv.2.1 *cellule tubulaire de microfiltration*
- IV.2.2 *Cellule tubulaire d'ultrafiltration*
- IV.2.3 *Cellule tubulaire d'électromicrofiltration*

Les opérations de filtration sont des opérations en phase hétérogène (liquide-solide), les techniques de séparations par membrane permettant d'étendre ces méthodes à des séparations en phase homogène (liquide/liquide).

Dans le cas de l'ultrafiltration, comme dans le cas de la microfiltration, la force agissante est une différence de pression appliquée de part et d'autre de la membrane, qui permet le passage du solvant à travers la membrane, qui entraîne les constituants dont la taille est suffisamment petite pour que le passage à travers les pores soit possible.

La différence entre l'ultrafiltration et la microfiltration réside essentiellement dans la taille des constituants qu'elles permettent de séparer et par conséquent dans la taille des pores des membranes utilisées.

Cependant les procédés d'ultrafiltration et de microfiltration voient leur débit de filtrat diminuer tout au long du procédé.

Ainsi le phénomène de polarisation limite les performances de ces deux procédés et constitue parfois un frein au développement industriel dans ce domaine.

De nombreux travaux ont été entrepris pour tenter d'en diminuer les effets en cherchant en particulier à améliorer les conditions d'écoulement au voisinage de la paroi à l'aide de promoteurs de turbulence placés près de la membrane. Ces promoteurs créent des turbulences locales augmentant, ainsi, le transfert de matière en contrepartie de l'accroissement des pertes de charges par frottement.

Le but de notre travail est d'augmenter le flux de perméat en fonction du temps de filtration. Pour cela nous avons utilisé comme moyen de promotion, un champ électrique.

Le dernier exercice sur les solutes chargés, permet en plus de l'augmentation du flux de perméat, une augmentation des dépenses en énergie, une étude économique est donc nécessaire pour réaliser son importance.

# Introduction

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ecole Nationale Polytechnique

D'autre part, une étude d'optimisation énergétique faisant intervenir d'une part le champ électrique et d'autre part la vitesse de circulation, pour l'obtention d'un même débit de perméat est nécessaire pour justifier l'efficacité du champ par rapport à la vitesse.

Il est donc important de mesurer l'efficacité de cette promotion de turbulence en tenant compte des performances du système puis dans l'ensemble.

La solution utilisée est une solution de bentonite bien connue qui nous permettra d'observer l'efficacité du promoteur utilisé

CHAPITRE UN

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR  
L'ULTRAFILTRATION ET LA  
MICROFILTRATION

## I.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES PROCÉDÉS A MEMBRANES [1-4]

Un grand nombre d'opérations industrielles, n'ont d'autres but que la séparation de deux éléments ; par exemple en séparant le sel de l'eau de mer, on obtient deux produits ; du sel et de l'eau douce.

Les techniques séparatives conventionnelles telles que : distillation, cristallisation, filtration et extraction par solvant ; se sont récemment enrichis d'un groupe de procédés qui utilisent des membranes .

Celles ci sont capables d'en séparer les constituants en fonction de propriétés de transport qualifiées pour cette raison de permselectives.

Les procédés à membranes sont des techniques avantageuses, du point de vue énergétique, plus rapides et plus économiques .

Elles apportent un moyen de purification d'une grande souplesse sans créer de pollution supplémentaire.

Dans ces techniques, il y a quatre opérations de base : la concentration, la séparation, la purification, la stérilisation, pour lesquelles l'industrie peut avoir recours.

Par exemple dans de nombreux secteurs : agro-alimentaire, pharmaceutique les techniques membranaires (électrodialyse, osmose inverse, ultrafiltration, microfiltration, etc) sont de plus en plus utilisées car elles permettent d'éliminer l'eau avec une faible consommation d'énergie, sans changement de phase et sans altération de propriétés physico-chimiques du produit séparé .

Dans les techniques à membrane, on trouve:

- Électrodialyse : les ions d'une solution sont transportés à travers une membrane ionique sous l'effet d'une tension électrique .
- Dialyse : les solutés diffusent à travers une membrane neutre sous l'effet d'une différence de concentration.
- L'ultrafiltration, osmose inverse, microfiltration : le solvant est séparé du soluté, sous l'effet d'une différence de pression imposée de part et d'autre d'une membrane microporeuse ou dense, dans le cas de l'osmose inverse.
- L'électrophorèse : leur techniques sont fondées sur des différences de mobilités des pellicules chargées

D'une manière générale, on peut distinguer les types de constituants d'après la figure (I.1).

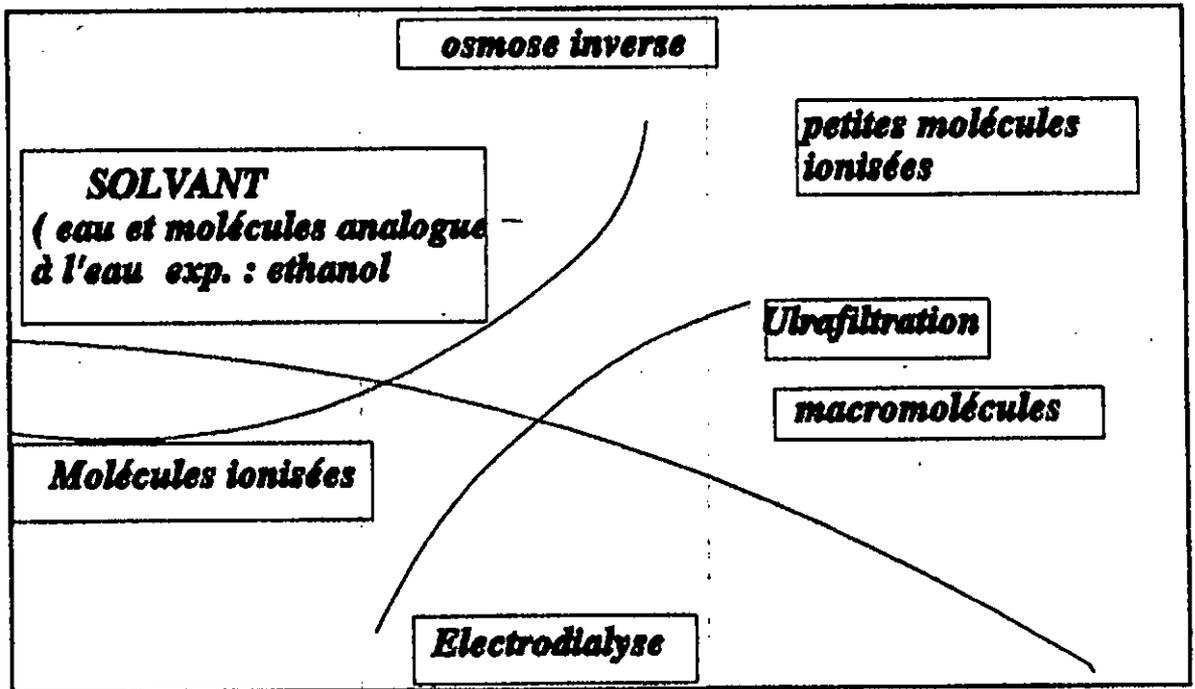


Figure I.1 Différents types de constituants d'une solution

sur les plans des applications industrielles, trois (03) grandes techniques se heurtent à la concurrence : l'osmose inverse, l'ultrafiltration et la microfiltration dont les domaines respectifs sont : fig (I.2)

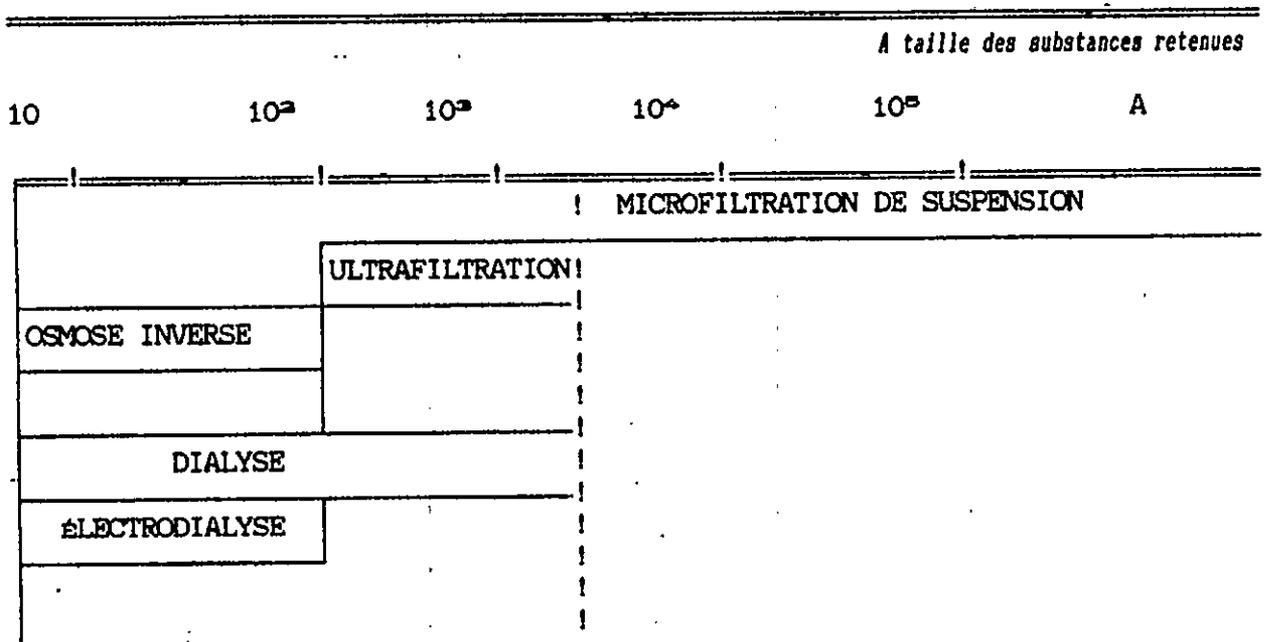


Figure I.2 LES DOMAINES RESPECTIFS D'EMPLOI DE PROCÉDÉS À MEMBRANES D'APRÈS CHARLES KYRAUD.

Les techniques à membrane peuvent être différenciées soit par la nature de la force motrice, soit par la taille des particules retenues le tableau suivant nous montre :

	DIAMÈTRE DE PARTICULE	PRESSION	FLUX DE MATIÈRE (L/M <sup>2</sup> /J BAR)
MICROFILTRATION	< 500 A	0.3 - 3 BARS	> 1
ULTRAFILTRATION	20 - 1000 A	1 - 7 BARS	0,1- 1
OSMOSE INVERSE	2 - 10 A	7 - 100 BARS	< 0.05

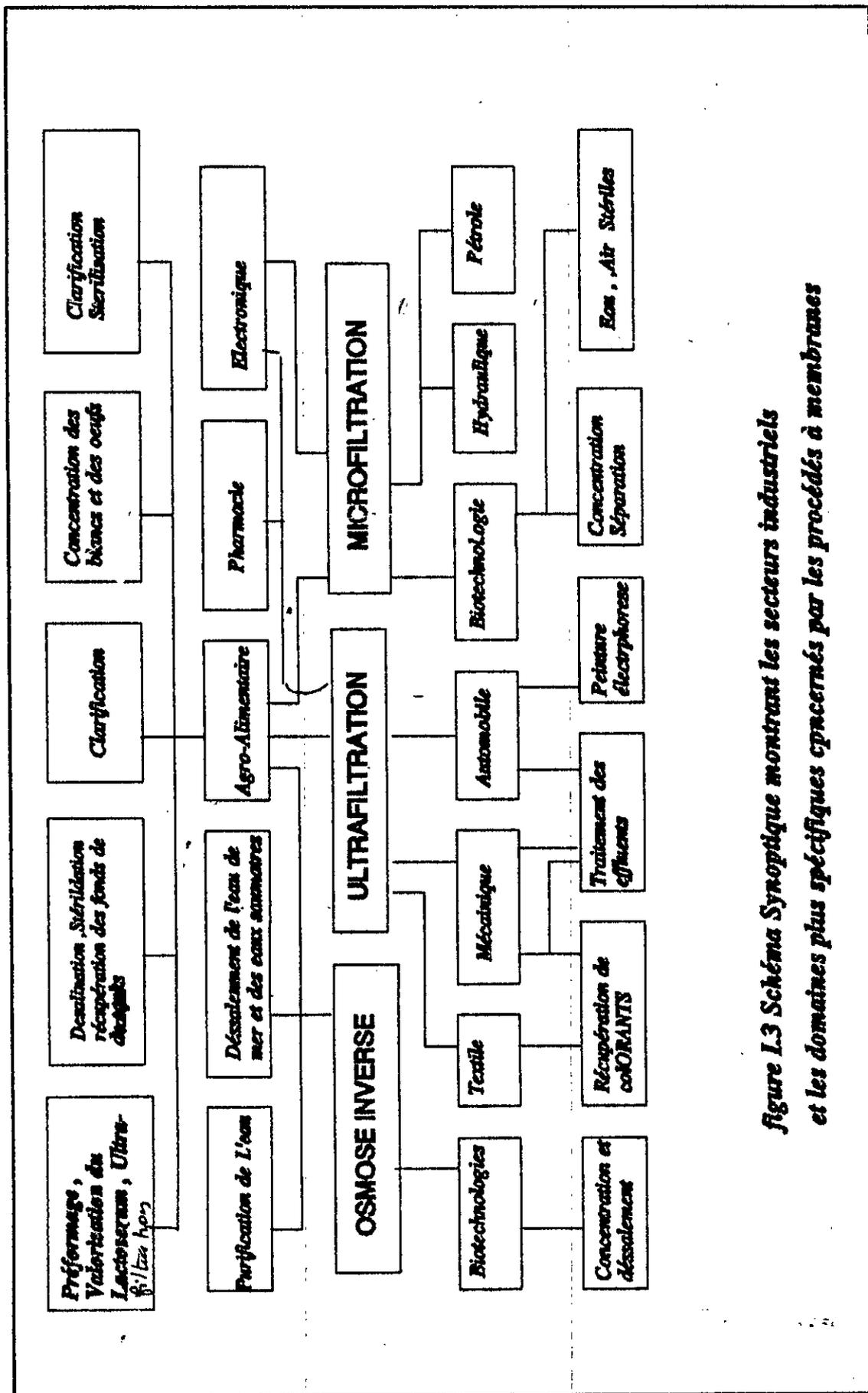
Le transport de matière à travers une membrane et sous la dépendance des forces qui dérivent des potentiels suivants :

- La pression hydraulique pour la microfiltration.
- La pression associée à une faible pression osmotique pour l'UF.
- La pression hydraulique associée à une forte pression osmotique pour l'Osmose Inverse (OI).
- Le potentiel chimique du soluté pour la dialyse.
- Le potentiel électrochimique du soluté pour l'électrodialyse.

## I.2 PRINCIPALES APPLICATIONS DES TECHNIQUES A MEMBRANES

Les membranes sont utilisées sur une large échelle:

- La production de l'eau douce à partir de l'eau de mer (21).
- Le traitement des effluents industriels gazeux ou liquides (22),
- La récupération des constituants valorisables (22).
- Le fractionnement, la concentration, la purification des solutions macromoléculaires dans des industries alimentaires et pharmaceutiques (23).
- La séparation du sang, de l'urée et de dioxines diverses (24).
- Les applications des techniques à membranes ont été soigneusement classées par HASTRATMAN dans la figure (I.3)



**Figure 1.3 Schéma Synoptique montrant les secteurs industriels et les domaines plus spécifiques concernés par les procédés à membranes**

## I.3 MEMBRANES ET MODULES [5-11]

### I.3.1 MEMBRANES

La membrane constitue l'élément essentiel des techniques de séparation, leur origine remonte au siècle dernier, mais leur performances étaient très limitées, Ce n'est que depuis une trentaine d'années qu'apparaissent de nouvelles classes de membranes de LOEB et SOURIRAJAN.

Ce sont des membranes asymétriques constituées de :

- très fine pellicule semi perméable (couche active) est très dense de quelques micromètre d'épaisseur.
- d'une couche support de forte porosité varie de 100 à 200  $\mu\text{m}$  servant de soutien mécanique pour l'ensemble (peau +support).

Cette mise en forme, d'abord appliquée à l'acétate de cellulose qui est peu couteuse, mais présente l'inconvénient d'être sensible à la température et aux attaques bactériennes et aux agents chimiques.

Depuis quelques années, on assiste à la naissance de nombreuses membranes composites à base de polymères synthétiques, celle-ci présentent une meilleure tenue aux températures (75 °C, 80° C).et au pH (2-12).

Des membranes minérales (oxydes de Zirconium supportée sur du carbone graphite) connaissent aussi un développement important et présentent l'avantage d'être résistants aux agents chimiques, ont une grande stabilité thermique (400 °C), et une bonne résistance à la pression (20 à 30 bars). Citons pour l'exemple les membranes CARBOSEP.

### I.3.2 MODULES

L'utilisation des membranes implique leur insertion dans des modules dont la conception technologique varie suivant les constructeurs.

Un module ; appareil unitaire de séparation supportant le membranes, doit assurer une circulation suffisante de liquide à traiter.

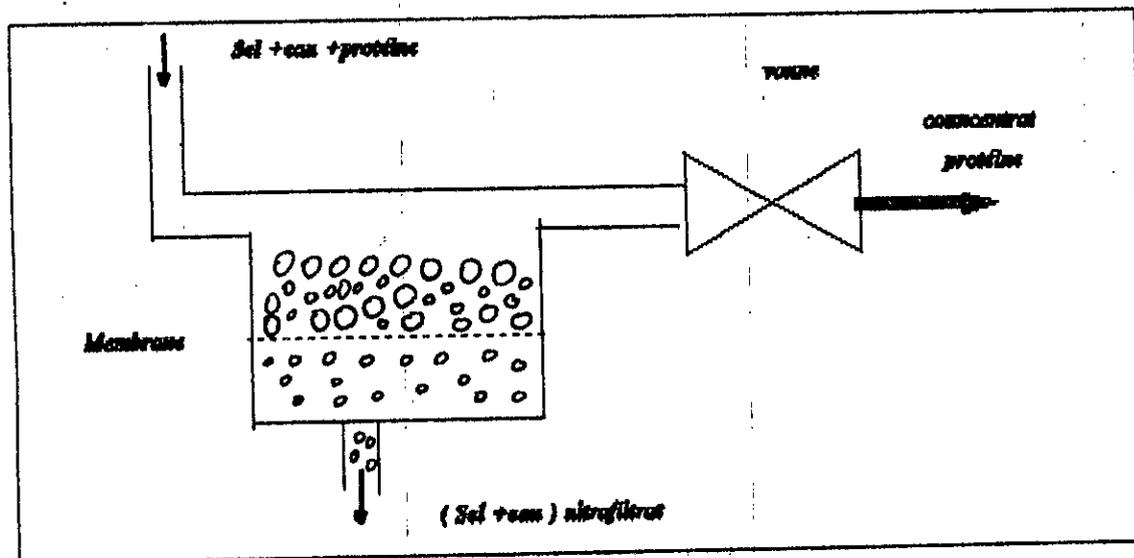


Figure 1.4 Schéma de principe de l'ultrafiltration

## 1.5 MICROFILTRATION TANGENTIELLE

### 1.5.1. INTRODUCTION :

La microfiltration tangentielle est une technique de séparation liquide-solide qui s'apparente à l'ultrafiltration tant par l'utilisation des membranes que par la conception hydraulique : caractérisé par un écoulement à grande vitesse le long de la membrane .

La MFT est une technique de séparation des phases qui présente un flux de filtrat élevé.

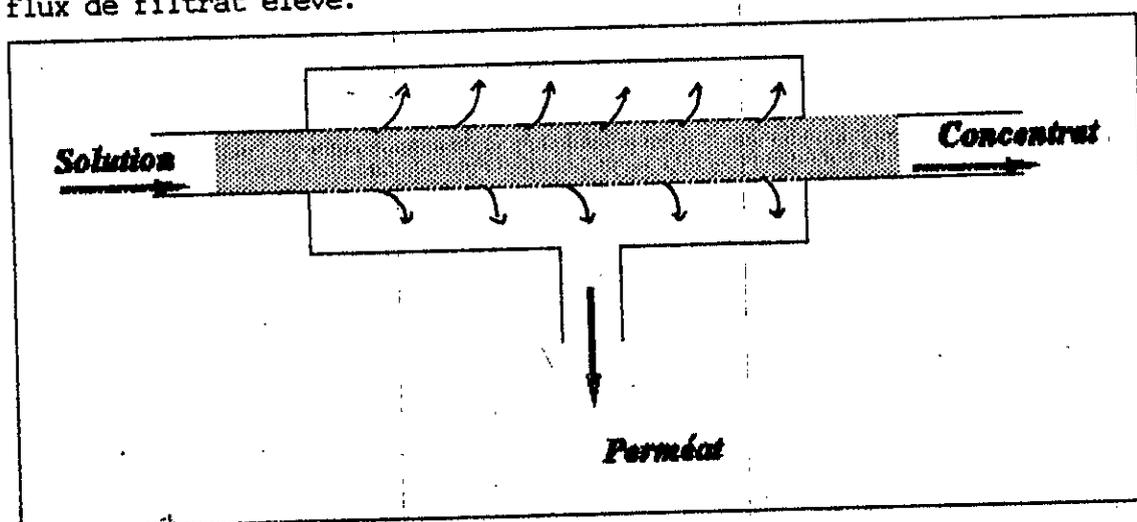


Figure 1.5 Schéma de principe simplifié de la MFT

### I.5.2 PRÉSENTATION GÉNÉRALE [23]

Dans le processus de filtration , un certain nombre de forces sont mises en jeu et qui sont :

a) *Les forces hydrodynamiques* : le fluide en mouvement exerce des contraintes sur la particule ,lesquelles vont créer une force hydrodynamique provoquant un déplacement de la particule sous forme de translation ou de rotation.

b) *Inertie* : à cause de l'inertie , les particules ne suivent pas toujours les lignes de courant.

L'intensité de ce mécanisme augmente avec la taille et la masse des particules.

c) *Gravité* : vue la différence de densité entre le fluide et les particules , il y a création d'une vitesse de sédimentation qui va faire dévier les particules des lignes de courant du fluide .

d) *Diffusion* : les particules sont inférieures au million , elles seront soumises à l'agitation brownienne qui leur imprime un déplacement aléatoire qui augmente avec la diminution de la taille des particules.

e) *Forces de Van der Waals* : cette force inter-moléculaire voit son intensité augmenter lorsque la distance inter-particulaire diminue.

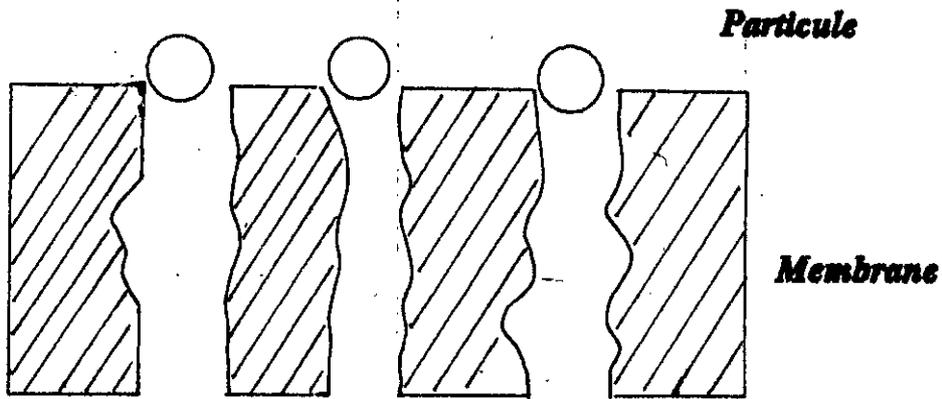
Dans le cas des particules microscopiques , les forces de surface prennent la prédominance sur les forces de volume.

Les forces hydrodynamiques et les forces physico-chimiques sont du même ordre de grandeurs.

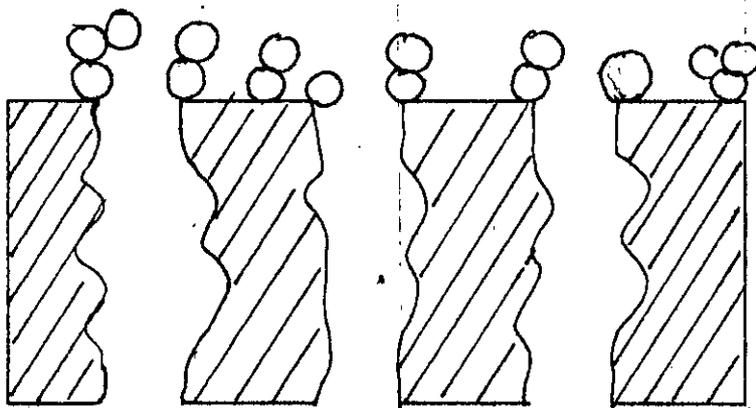
### I.5.3 RÔLE DES COLLOÏDES DANS LA M.F.T. [24]

La présence des colloïdes rend plus complexe la MFT , dont le principal objectif est la séparation des particules , c'est à dire que la présence des colloïdes dans la suspension conduit à une rapide colmatage interne et externe de la membrane et à d'éventuelles réductions du flux de perméat .

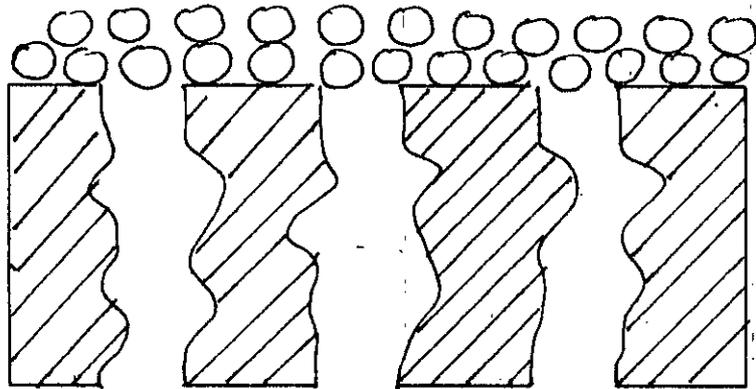
- La fraction particulaire , constituée de particules de dimensions supérieures à celles des pores .



(A) Colmatage total des pores



(B) Colmatage partiel des pores



(C) : Filtration sur gâteau

**Fig. I.6 Les mécanismes de rétention des particules**

### I.5.3. EFFET D'ADSORPTION DES MACROMOLÉCULES ET COLLOÏDES :

Le phénomène d'adsorption des macromolécules et colloïdes sur membrane joue un rôle très important à l'interface membranes , suspension, mais ce phénomène est beaucoup plus développé en ultrafiltration qu'en microfiltration .

### I.6 MÉCANISMES DE TRANSFERT:

Plusieurs théories ont été avancées pour les transferts de masse à travers les membranes , et expliquer le mécanisme de la sélectivité de ces membranes [15] .

En pratique , on caractérise une membrane par :

a) son seuil de coupure qui est le poids moléculaire de l'espèce de plus petite taille totalement arrêtée par la membrane [16].

Pour les produits de plus bas poids moléculaire , on parle de taux de rejet ou pourcentage de produit qui est arrêtée par la membrane qui est donnée par le relation.

$$R_{\text{observé}} = 1 - \frac{C_p}{C_o} \quad (1)$$

$C_p$  : Concentration du soluté après traversée de la membrane

$C_o$  : Concentration avant traversée de la membrane.

La zone de coupure représente la zone des poids moléculaires dont le taux de rejet varie de quelques pour-cent à 100 % , on peut schématiser seuil et zone de coupure par la figure (I.8)

b) sa perméabilité à l'eau : elle est obtenue par mesure de débit pure à travers la membrane à une pression et une température donnée.



### 1.6.1 Modèle de tamis moléculaire (5)

Dans ce mode tous les pores de la membranes sont assimilés à des capillaires cylindriques , les molécules du soluté sont transportées par convection.

Le flux de solvant  $J_v$  est proportionnel à  $\Delta P$  on admet généralement qu'il est donné par la loi de Poiseuille :

$$J_v = \frac{N \pi r_p^4}{8 \mu h} \Delta P \quad (I.2)$$

$N$  : nombre de pores de rayon  $r_p$  et de longueur  $h$  par unité de surface de la membrane.

Dans le cas d'une solution , le flux de perméat varie d'abord linéairement avec  $\Delta P$  , mais au delà d'une certaine pression la courbe  $J_v$  en fonction de  $\Delta P$  s'incurve et  $J_v$  tend à devenir indépendamment de  $\Delta P$ .

La courbe (A) représente le flux de perméation d'un solvant pur qui suit la loi de Darcy.

La courbe (B) représente le flux de perméation d'une solution de macromolécules qui ne suit pas la loi de Darcy , elle atteint une valeur limite pour une certaine pression ,

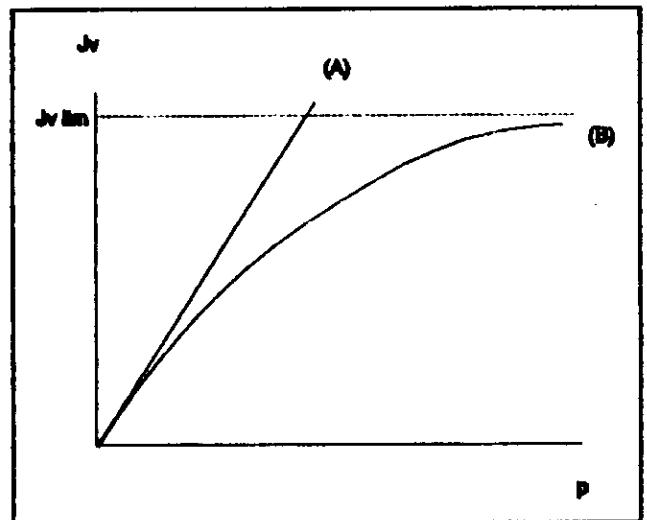


Figure I.9 Variation du flux de perméat en fonction de la pression transmembranaire

Cette diminution de flux peut être expliquée par l'apparition de deux phénomènes :

L'existence d'une couche de polarisation qui est due à l'accumulation du soluté au voisinage de la membrane, l'adsorption du soluté , le colmatage de la membrane.

C'est afin d'expliquer cela que le modèle du film a été proposé.

### 1.6.2 Modèle du film [7,10,12]

Le modèle du film suppose que le transfert est localisé à l'intérieur d'une couche d'épaisseur  $\delta$  au voisinage de la membrane.

Après ajout d'un soluté à la concentration  $C_0$  dans le compartiment I fig (I-4), la création d'une surpression, supérieure à la pression osmotique, dans ce même compartiment, va provoquer un flux de matière vers la membrane.

Si le solvant peut traverser la membrane et si le soluté est assez bien retenu; on aura une accélération de concentration de polarisation et donc d'un flux de diffusion de soluté en sens inverse du flux principal qui suit la première loi de Fick.

On a alors:

$$J_v(C-C_p) = D \frac{dc}{dy} \quad (I.3)$$

l'intégration de cette équation sur l'épaisseur de la couche conduit à l'expression

$$J_v = K \ln \frac{(C_m - C_p)}{(C_0 - C_p)} \quad (I.4)$$

avec

$K = D / \delta$  : coefficient de transfert de matière à l'interface fluide-membrane.

$C_0$  = Concentration en soluté dans la charge.

$C_m$  = Concentration dans la charge en soluté à la surface de la membrane.

$C_p$  = Concentration en soluté dans le perméat.

Lorsque le soluté est parfaitement retenu par la membrane c.à.d le taux de rejet = 1 l'expression (I.4) devient :

$$J_v = K \ln \left( \frac{C_m}{C_0} \right) \quad (I.5)$$

Pour une solution de concentration  $C_0$ , une augmentation de pression dans le compartiment (I) entraîne une augmentation de  $C_m$  et de donc de  $J_v$ .

Toutefois,  $C_m$  atteint une valeur limite  $C_{gel}$  qui va correspondre à la formation d'un gel. fig (I.8)

L'équation devient alors

$$J_v = k \cdot \ln\left(\frac{C_{gel}}{C_0}\right) \quad (1.6)$$

où  $C_{gel}$  : concentration de gel

Il faut remarquer que  $k$  va dépendre essentiellement de l'épaisseur de la couche de diffusion.

Différentes relations empiriques permettent de relier  $k$  à d'autres paramètres du système.

En régime turbulent, on a une expression de la forme

$$Sh = a Re^m Sc^n \quad (1.7)$$

En régime laminaire :

$$Sh = a (Re \cdot dH/l)^m Sc^n \quad (1.8)$$

avec  $Sh = Kd / D$  nombre de SHERWOOD

### 1.6.3 Modèle osmotique

D'après Sanchez la différence de concentration de part et d'autre de la membrane peut donner à une différence de pression osmotique  $\Delta\pi$  non négligeable devant la pression  $\Delta P$ .

Le flux de transfert peut alors s'écrire

$$J_v = \frac{\Delta P - \Delta\pi}{\mu R_h} \quad (1.9)$$

On représente convenablement la pression osmotique des solutions macromoléculaires dans un large domaine de concentrations moléculaires par un polynôme de degré 3 :

$$\Delta\Pi = a_1 C_m + a_2 C_m^2 + a_3 C_m^3 \quad (I.10)$$

VILKER et Coll ; ont déterminé la valeur des coefficients  $a_i$  pour des solutions d'albumine à différents pH [4].

Une représentation plus approximative mais plus simple peut être donnée sous la forme d'un monôme de degré  $n$ ,

$$\Delta\pi = a \cdot C_m^n \quad (I.11)$$

### I.7 PHÉNOMÈNE D'ADSORPTION [4, 18]

Le phénomène d'adsorption macromoléculaire sur la membrane joue un rôle très important à l'interface membrane -suspension.

Cet effet d'adsorption de certains solutés dans les pores de la couche active située en surface de la membrane conduit à une réduction de porosité, une augmentation de la résistance au transfert de matière.

FANE et BAKLOUTI ont modélisé ce phénomène pour rendre compte de la diminution du flux avec le temps comparable à l'augmentation de la résistance hydraulique due à la seule adsorption de macromolécules telles que, protéines et lactosérum qui est décrite par la relation suivante.

$$R_m = R_{ac} [1 - q \cdot \exp(-pC^x t)] \quad (I.12)$$

où

$R_{ac}$  : résistance adsorbée à l'équilibre qui dépend de la concentration à la membrane  $C$ .

$p, q, x$  sont des coefficients qui dépendent du pH de la solution.

### I.8 PHÉNOMÈNE DE COLMATAGE [8, 19]

Le colmatage d'une membrane est généralement un phénomène irréversible, il résulte de l'obstruction mécanique des pores des membranes qui peut être externe ou superficielle.

# BIBLIOGRAPHIE

- 1 **GRANIER P. BIMBENY J.J.**  
Procédés de séparation par les membranes : électrodialyse , osmose inverse, ultrafiltration.  
APRIA , Mars 1976
- 2 **POUY M. BISCART , BERTRAND J**  
Séparation des protéines dans une cellule d'électrophorèse préparative .  
Vol N° 2 , 1987
- 3 **GUILLOT .G**  
Membrane : les trois procédés de l'avenir  
Sciences et Techniques N°15 , Mai 1985
- 4 **HALET .F YEDDOU A.R.**  
Conception et réalisation d'une cellule d'UF . Application aux effluents  
d'abattoirs et de poissonnerie.  
PFE école Nationale Polytechnique d'Alger 1989.
- 5 **MENDJEL H.**  
Synthèse et caractérisation de nouvelles membranes synthétiques asymétriques  
à propriétés hémocompatibles  
Thèse de Doctorat Montpellier (1984)
- 6 **JAQUEMET J.C.**  
Séparation industrielle à l'aide des membranes  
Sciences et techniques Juin 1978 N° 52
- 7 **CHERGUI .A**  
Amélioration des performances de l'ultrafiltration par application des  
promoteurs de turbulence  
Thèse de Magister école Nationale Polytechnique d'Alger 1992
- 8 **DENDENE K.**  
Optimisation du procédé de l'ultrafiltration pour la récupération des  
protéines des eaux de lavage .  
PFE école Nationale Polytechnique d'Alger 1990.
- 9 **MAUREL A.**  
Osmose inverse et ultrafiltration pour la récupération des protéines des eaux  
de lavage des abattoirs et de poissonnerie
- 10 **DAHIN M.**  
INTERACTIONS soluté-membranes en ultrafiltration , influence d'un champ  
électrique  
DEA Nant 1989
- 11 **HAUBOIS J.L.**  
Récents développements dans l'emploi des techniques d'ultrafiltration , en  
agro-alimentaires  
Filtru 1978.
- 12 **ENTROPIE**  
Revue internationale de science et technique N° 93 1980.

## CHAPITRE DEUX

AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DE  
L'ULTRAFILTRATION (UF) ET LA  
MICROFILTRATION (MF)

Plusieurs phénomènes apparaissent au cours de l'ultrafiltration , ou de microfiltration de solutions colloïdales , en l'occurrence le phénomène de polarisation de concentration et le phénomène de colmatage. Ces deux phénomènes entraînent une diminution notable du flux de perméat et peuvent limiter l'utilisation de ces pores .

Pour diminuer l'ampleur de ces phénomènes et augmenter le flux de perméat ; des moyens sont mis à profit . Parmi ces moyens , il y a ceux qui font appel à la solution , à la membrane , aux conditions opératoires et aux promoteurs de turbulence :

### II .1 PRÉTRAITEMENT DE LA SOLUTION

- Un prétraitement préalable afin d'éviter le colmatage .
- Addition de certains additifs qui modifient la structure de la couche de gel formée .
- Une augmentation de la température pour certains effluents qui influe sur la viscosité et la diffusion.

### II.2. RÉGÉNÉRATION DE LA MEMBRANE :

Le nettoyage des membranes est une des étapes , les plus importantes, pour l'optimisation d'un procédé d'ultrafiltration ou de microfiltration, un simple rinçage à l'eau permet de retrouver en grande partie le débit des membranes en cellulose régénérée ; mais cela n'a aucun effet sur les membranes en polysulfone.

Les techniques les plus courantes reposent sur sur l'utilisation des produits chimiques . Les procédures et les agents de nettoyage utilisés sont :

- \* les détergents
- \* les acides
- \* les bases
- \* les enzymes

### II.3 CHOIX LES CONDITIONS OPÉRATOIRES :

Augmentation de la vitesse ou de la pression

## II.4 UTILISATION DES PROMOTEURS DE TURBULENCE :

### 11.4.1 PROMOTEUR FIXE (2-5)

C'est des grilles de métal déployés , obtenues par découpage et étirage d'une tôle en inox , et sont placées dans les sens CD ou LD , indiqués sur les schémas (fig II.1.a) et (fig II.1.b)

SHEN ET PROBSTEIN , ont traité de façon plus quantitative l'intérêt de l'utilisation de promoteurs de turbulence en cherchant à optimiser le procédé du point de vue économique .

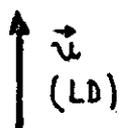
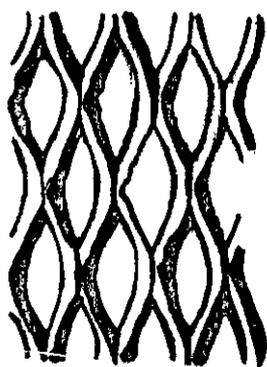
SCHLUMPF (5) avec ses travaux , confirme l'intérêt de l'utilisation de ce promoteur de turbulence dans le cas de l'ultrafiltration d'émulsion huileuse .

Il a constaté que pour une pression et une vitesse données identiques, le débit de perméat est quatre fois plus élevé en présence de promoteur , et que le prix de revient de l'unité de volume de perméat est minimum lorsque l'écoulement est perpendiculaire à la grande diagonale de la maille.

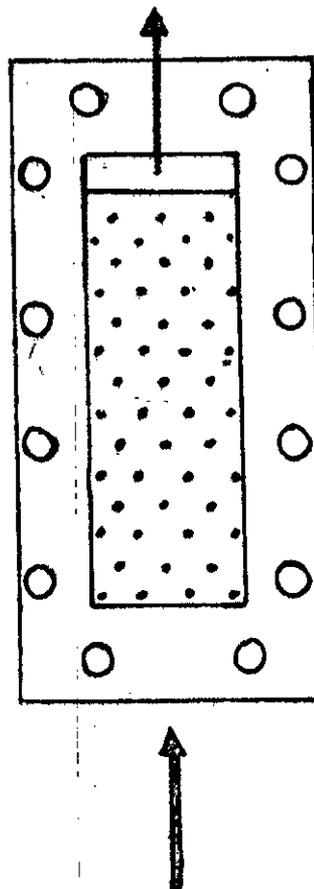
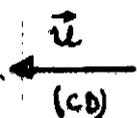
Lors de l'étude sur maquette , simulant le fonctionnement hydrodynamique de la cellule plane , SCHLUMPF (5) a montré qu'on obtient une meilleure agitation turbulente au voisinage de la membrane, lorsque la plus petite diagonale de la maille est placée dans le sens de l'écoulement CD.

FOYEN et Coll. (4) ont utilisé " les grilles de métal déployé " pour traiter un tensioactif en solution organique dans une cellule plane, et ils ont trouvé qu'il était possible d'améliorer le flux de perméat , et cela , en ayant un coût économique moins important.

N. MAMERI , avec des membranes minérales tubulaires à parois lisses ou torsadées et en utilisant deux types de promoteurs " tige filetée et tube creux fermé à une extrémité , dont la paroi est percée de trous " a montré qu'il était possible d'améliorer sensiblement le flux de perméat



(a)



(b)

- Schéma des promoteurs avec le sens d'écoulement du fluide

fig II - 1 - a - Grille déployée

fig II - 1 - b - Plaque percée de trous

et de diminuer de façon notable le coût du procédé , cela en utilisant la relation établie par SHEN et PROBSTEIN .

A. CHERGUI <sup>(3)</sup> a pu constater que le promoteur de turbulence " grille déployé " apporte une certaine amélioration du flux de perméat , et contribue à la diminution du coût global de l'opération .

Par contre , pour le promoteur de turbulence " plaque trouée " , aucune amélioration du flux de perméat n'a été constaté , de plus , il augmente les pertes de charges et donc le coût global de l'opération .

#### II.4.2 PROMOTEUR MOBILE <sup>(2-5)</sup>

Ce sont des promoteurs qui peuvent se déplacer dans le canal de circulation.

HENRI RAKOTAORISOA HERWOLA a constaté que les particules solides, en agissant comme des promoteurs de turbulence fluidisés dans une colonne d'ultrafiltration, permettent une augmentation du transfert de matière à différents niveaux , par réduction de l'épaisseur de la couche limite diffusionnelle et par réduction du colmatage en surface de la membrane.

Les promoteurs mobiles , modifient et érodent parfois la couche de polarisation formée , cette érosion peut également se manifester sur la membrane elle-même.

Pour cela VAN DER WAALS et Coll. ont testé cette dégradation éventuelle par des billes de verre de différents diamètres , et ont montré l'importance de leurs tailles sur l'accroissement du flux de perméat.

MONTLAHUC et Coll , ont fluidisé des billes de verre de 3 mm de diamètre dans une membrane minérale tubulaire placée verticalement .

Sur lait écrémé , ils obtiennent un débit de filtrat dix à vingt fois supérieur à celui observé en absence des billes et ils ont mis en

évidence la résistance de ces membranes aux sollicitations mécaniques sont imposées.

#### II.4.3 DÉBITS PULSÉS [2,6,7,9]

L'utilisation d'un débit pulsé permet d'augmenter le débit et de diminuer la vitesse moyenne de circulation .

D'après les travaux de MILISIC et BERSILLON sur la filtration d'une solution de Bentonite , la fermeture brusque de la vanne pendant une durée de 0.1 à 0.3 secondes à intervalles de 15 secondes à 1 minute permet de multiplier le flux de perméat par 5 , cette augmentation est en fonction du paramètre  $F.V/Q_b$  où

*F* : fréquence des pulsations

*V* : volume pulsé

*Q<sub>b</sub>* : débit moyen d'alimentation .

de ce fait R.BENAIMAR et Coll ont constaté une augmentation du débit de perméat jusqu'à un maximum de 70 % dans le cas du lait et 140 % dans le cas du vin .

#### II.4.4 MODULES TOURNANTS [3]:

L'utilisation des modules tournants permet d'augmenter le flux de perméat , cette augmentation dépend de la formation des tourbillons de TAYLOR dans l'espace annulaire qui augmente le coefficient de transfert de masse .

#### II.4.5 ULTRASONS [2,3]

Les ondes ultrasoniques , sont utilisées pour réduire le phénomène de polarisation de concentration dans les procédés d'ultrafiltration

Ces sons ultrasoniques procurent une efficacité remarquable , puisque pour une pression transmembranaire donnée , le flux de perméat augmente de 1700 % par rapport à un flux déterminé en travaillant dans des conditions normales.

#### II.4.6 CHAMP ÉLECTRIQUE [3-5, 8-9, 11, 13-14]

Des travaux réalisés par plusieurs auteurs , il a été montré que la superposition d'un champ électrique sur le procédé de filtration permet de réduire l'ampleur de la couche de polarisation et donc de la résistance au transfert de matière en agissant sur le mouvement des macromolécules chargées qui se dirigent de la membrane vers la solution.

YUKAWA, SHIMURA SUDA ET MANIVA [8] ont montré que lors de l'ultrafiltration à différents concentrations le flux de perméat varie linéairement avec le champ électrique appliqué. Ils ont constaté aussi une variation du taux de rejet , il diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds et avec la diminution de la concentration de la solution  $C_0$  , mais cette variation est faible pour les petites valeurs relativement aux fortes valeurs du nombre de Reynolds.

RADOVITCH ET BEHMAN [9] ont montré que les performances des procédés d'ultrafiltration et de diafiltration pour la concentration des solutions d'albumine de sérum bovin sont améliorées par l'application d'un champ électrique .

RAKOTOARISOA ET COLL . ont montré que le champ électrique améliore la rétention améliore la rétention et la vitesse de perméation en réduisant l'épaisseur et ou la compacité du dépôt formé .

Le couplage de techniques d'électroultrafiltration et de la fluidisation influe peu sur les valeurs de la vitesse de perméation car l'effet de promotion de turbulence est prépondérant et voilà l'effet électrophorétique.

A, CHERGUI [3] a montré que le champ électrique apporte une amélioration du flux de perméat . le prix optimum est atteint avec une pression de 1 bar et un nombre de Reynolds compris entre 3.000 et 4.000 (régime turbulent ) .

M. BAHIM [13] a pu constaté que sous l'effet d'un champ électrique, on peut éliminer ou modifier la couche de polarisation au niveau de la membrane, avec un champ moyen pouvant atteindre 1.200 V/m ,

Il a pu constater l'absence du colmatage dans les conditions opératoires fixées .

C. VISVANATHAN [14] a montré qu'il était possible d'appliquer l'EMFT à une suspension de précipités de  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  qui sont très faiblement chargés , pour cela il a augmenté la charge superficielle de ces précipités par l'addition de dispersant . Cette technique de modification de la charge superficielle permet d'accéder à une très grande gamme de suspensions qui peuvent être traitées par EMFT , une optimisation de la sélection du type de dispersant , ainsi que de la dose appropriée , est toutefois nécessaire .

Des expériences préliminaires avec une suspension de précipité de  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , ont indiqué que l'augmentation de flux de filtrat est une fonction linéaire du champ électrique et est de l'ordre de 30 % en passant de 0 à 10,83 V.cm

# BIBLIOGRAPHIE

- 1 **GRANIER P. BIMBENET J.J.**  
Les procédés de séparation par les membranes : électrodialyse , osmose inverse, ultrafiltration.
- 2 **AIT MOHAMED K.**  
étude des performances de l'ultrafiltration lors de la concentration des eaux de lavage de poissonnerie  
P.F.E école Nationale Polytechnique d'Alger 1991
- 3 **CHERGUI .A**  
Amélioration des performances de l'ultrafiltration par application des promoteurs de turbulence  
Thèse de Magister école Nationale Polytechnique d'Alger 1992
- 4 **POYEN S. , QUEMENEUR F. BARIOU B.**  
Amélioration du flux de perméat en UF par promoteur de turbulence  
Entropie 12.50 1984
- 5 **SCHLUMPF J.P. , SBBANE O. et QUEMENEUR ,F**  
Utilisation des promoteurs de turbulence en Ultrafiltration d'émulsions huileuses
- 6 **BEN AIMAR R. , BOUZAZA A.K. JAFFRIN M.Y. GUPTA B.B.**  
Augmentation du flux de perméat en Ultrafiltration et microfiltration tangentielle par l'emploi de débit pulsé  
Ed. Techniques et Documentations LAVOISIER Vol 1 ; N 2 58-67 (1987).
- 7 **JAFFRIN M.Y. BOUZAZA A.K , BEN AIMAR R. GUPTA B.B.**  
Filtration tangentielle par débit pulsé bilan énergétique.  
Filtration (1988).
- 8 **YUKAWA H. , SHIMURA K. DUDA A. MANIMA A.**  
Cross flow electro-ultrafiltration for colloidal , Solution of protein
- 9 **RADOVITCH J.SPARKS R.E.**  
Electrophoretic techniques controlling concentration polarisation in UF.
- 10 **JAOUEN .P , QUEMENEUR F**  
Deux exemples d'applications des membranes pour la valorisation des produits de la mer.  
Filtra. 1988.
- 11 **LEMOUSSEKH Y. , BOULANCHICHE S.**  
Amélioration du procédé d'UF par application d'un champs électrique  
PFE école Nationale Polytechnique d'Alger 1989.
- 12 **HALET .F YEDDOU A.R.**  
Conception et réalisation d'une cellule d'UF . Application aux effluents d'abattoirs et de poissonnerie.  
PFE école Nationale Polytechnique d'Alger 1991.

13

**DANIN M.**

Interactions soluté-membranes en ultrafiltration , influence d'un champ électrique  
DEA 1988 1989

14

**VISVANATHAN C.**

RÔle de fraction colloïdale et influence d'un champ électrique sur les phénomènes de colmatage en microfiltration tangentielle  
Thèse , INP Toulouse 1988

# CHAPITRE TROIS

ELECTRO-MICROFILTRATION

TANGENTIELLE [EMT]

### III.1 INTRODUCTION [1-3]

L'E.M.F.T est une technique qui combine l'électro-ultrafiltration et la microfiltration tangentielle .

Trois mécanismes de transfert sont mis en jeu pour diminuer le dépôt formé sur la membrane qui sont :

- L'écoulement tangentiel (cisaillement) ;
- la diffusion , due à la formation de gradient de concentration à l'interface membrane -suspension (transfert diffusionnel).
- l'effet électrophorétique provoqué par le champs électrique .

Le principe de l'électrofiltration consiste à créer un champ électrique entre deux électrodes placées de telle façon qu'apparaisse une force de nature électrique qui s'oppose à la force due à l'écoulement transmembranaire .

Quand on applique le champs électrique dans un système contenant des particules en suspension , les particules chargées se déplacent : c'est le phénomène d'électrophorèse

$$J_{ep} = U_{em} E$$

### III.2 APPLICATIONS ET MODELE D'ELECTRO-MICROFILTRATION TANGENTIELLE

#### III.2.1 MODELE DU FILM [6]

A l'état stationnaire le flux convectif est équilibré par le flux diffusionnel et électrophorétique

$$J_v C_o = J_v C + D \frac{dc}{dy} \pm UE(C - C_o) \quad (III.a)$$

L'intégration ce cette équation sur l'épaisseur  $\delta$  du film diffusionnel en supposant que  $E, D, U$  sont constantes , conduit à l'expression de la densité de flux de solvant.

$$J_v = K \cdot \ln \frac{(C_m - C_o)}{(C_o - C_p)} \pm UE \quad (III.b)$$

Suivant la valeur et le sens du champ appliqué deux (02) cas peuvent se présenter :

1<sup>er</sup> cas : La direction du champ est telle qu'il tend à éloigner les solutés de la membrane : la relation (III.a) devient :

$$J_v = K \cdot \ln \frac{(C_m - C_o)}{(C_o - C_p)} + UE \quad (\text{III.c})$$

2<sup>ème</sup> cas : La direction du champ est telle qu'il tend à provoquer une accumulation de solutés vers la membrane . Dans ces conditions , le phénomène de polarisation de concentration et colmatage sont accrus et le flux de pénétration diminue jusqu'à atteindre une valeur limite . Le flux sera égal à :

$$J_v = K \cdot \ln \frac{(C_m - C_o)}{(C_o - C_p)} - UE \quad (\text{III.d})$$

Autre que le modèle du film , il y a un modèle établi par HENRY et repris par RADOVICH faisant intervenir le champ électrique et appliqué à une solution colloïdale de peinture .

L'expression du flux est fonction des résistances respectivement de la membrane , de la couche limite et de la couche de gel (ou gâteau).

L'influence de ces résistance varie avec le champ électrique et peuvent être plus ou moins négligés suivant la valeur de E .

Le flux de filtration  $J_v$  , peut être exprimé par l'équation suivante :

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (\text{III.e})$$

où  $R_t$  est exprimée comme étant une fonction de la résistance du film  $R_f$ , de celle de la membrane  $R_m$  et celle du gâteau (due au colmatage)

$R_c$

d'où

$$R_t = R_m + R_f + R_c \quad (\text{III.f})$$

A partir de l'équation (III.k) , on peut définir une résistance hydraulique apparente à partir de :

$$J = \frac{\Delta P}{U \cdot R_m^*} \quad (III.l)$$

et en combinant (III.j) et (III.k) et (III.l) , on obtiendra la résistance apparente de la membrane :  $R_m^*$

$$R_m^* = \frac{R_m}{1 + \mu \left( \frac{K_m \cdot E \cdot R_m}{\Delta P} \right)} \quad (III.m)$$

### 3 ) Résistance du gâteau : $R_c$ :

De la même façon et dans les mêmes conditions , on peut obtenir une expression de  $R_c$  , lors d'une filtration de suspension de particules en présence d'un champ électrique ( à  $E < E_{cr}$  ).

$$R_c^* = \frac{R_c}{1 + \mu \left( \frac{K_c \cdot E \cdot R_c}{\Delta P} \right)} \quad (III.n)$$

$$R_c^* = R_c \quad \text{Pour } E = 0 \text{ v/m}$$

$K_c =$  : Coefficient électro-osmotique du gâteau supposé constant .

D'une manière générale , le flux de perméat est obtenu en combinant les équations ( III.l) (III.m) et ( III.n).

$$J = \frac{\Delta P}{\left[ \mu \left( \frac{\Delta P}{\left[ (K_m \ln \left( \frac{C_m}{C_0} \right) + U \cdot E \right]} \right) \right] + \left[ \frac{R_m}{1 + \mu \left( \frac{K_m \cdot E \cdot R_m}{\Delta P} \right)} \right] + \left[ \frac{R_c}{1 + \mu \left( K_c \cdot E \cdot \frac{R_c}{\Delta P} \right)} \right]} \quad (III.o)$$

Il faut cependant noter que dans le cas présent , la résistance du gâteau "  $R_c$  " n'est pas constante , elle est en fonction de l'épaisseur du gâteau qui peut être influencé par l'intensité du champs électrique.

Pour une valeur élevée du champs électrique , on aura une diminution de la résistance  $R_c$  [2] .

Lorsque la valeur  $E_{cr}$  est atteinte, il n'y a pas de formation du gâteau à la surface de la membrane [2].

Donc, pour  $R_c = 0$  et  $E > E_{cr}$ , l'équation (III.o) deviendra :

$$J = \frac{\Delta P}{\left[ \frac{\Delta P}{\mu (K_m \ln(\frac{C_m}{C_o}) + U \cdot E)} \right] + \left[ \frac{R_m}{1 + \mu \frac{K_m \cdot E \cdot R_m}{\Delta P}} \right]} \quad (III.p)$$

Si  $UE \gg K_m \ln C_m / C_o$  et  $K_m \cdot E \gg \Delta P / R_m$

l'équation (III.p) devient :

$$J = \mu \left( \frac{U \cdot K_m}{U + K_m} \right) \cdot E + \left( \frac{\mu \cdot K_m \cdot K_m \ln(\frac{C_m}{C_o}) + U \cdot \frac{\Delta P}{R_m}}{U + K_m} \right) \quad (III.q)$$

d'où

$$J = M \cdot E + M_o \quad (III.r)$$

Pour  $E > E_{cr}$ , l'équation montre que le flux du filtrat varie linéairement avec le potentiel électrique [2].

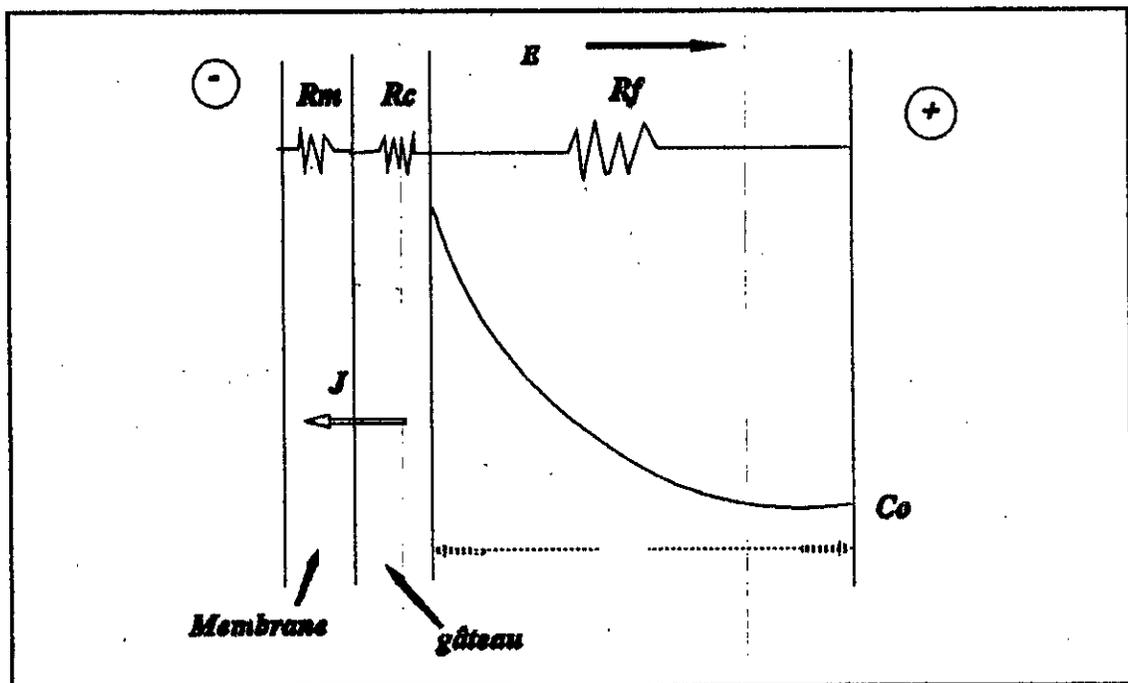


Figure III.1 Résistances en série dans une électrofiltration (EMF)

### III.3 INFLUENCE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES SUR LES PERFORMANCES D'UNE EMFT (2,6,7)

#### III.3.1 INFLUENCE DE LA TENSION APPLIQUEE ET LA VITESSE D'ÉCOULEMENT

Soit la tension critique  $E_{cr}$ , pour laquelle, la vitesse nette de migration des particules vers la membrane est nulle.

A cette tension  $E_{cr}$ , le flux de transfert des particules vers la membrane ( par transfert convectif) est égal au flux de transfert des particules en sens inverse, par diffusion et migration électrophorétique<sup>[2]</sup>

*a) Régime I :  $E < E_{cr}$  :*

Dans ce régime, il y aura formation d'un dépôt à la surface membranaire, c à d que la concentration en colloïdes est supérieure à proximité de la membrane que dans la suspension.

L'augmentation de la vitesse tangentielle provoquera un accroissement de la vitesse de filtration.

*b) Régime II  $E = E_{cr}$*

Pas de migration globale des particules, pas de gradient ou de concentration à l'interface membrane- suspension d'où l'augmentation de la vitesse tangentielle n'influe pas sur la vitesse de filtration.

*c) Régime III :  $E > E_{cr}$  :*

Dans ce régime, la vitesse de migration électrophorétique est supérieure à la vitesse de transfert convectif à travers la membrane. La concentration des particules est minimale à proximité de la membrane.

Le gradient de concentration à l'interface membrane-suspension est l'opposée de celui observé au régime I.

En augmentant la vitesse tangentielle, on favorise la migration des particules vers la surface de la membrane. par conséquent, l'augmentation de la vitesse d'écoulement réduit la vitesse de filtration.

La figure (III.2) illustre les différents régimes d'opérations pour une EMFT en fonction de la valeur de la tension appliquée  $E$  par rapport à  $E_{cr}$ , et aux différentes forces qui agissent sur une particule dans chaque régime.

### III.3.2. INFLUENCE DE LA PRESSION APPLIQUEE

Dans une EMFT, le débit de filtrat augmente, proportionnellement à la pression jusqu'à une valeur limite en dépassant cette valeur limite le débit de perméat est contrôlé par la résistance due à la concentration de polarisation des colloïdes ; Ainsi l'augmentation de la pression n'a plus d'influence sur le débit.

Le débit de filtrat deviendra donc indépendant de la pression limite appliquée [2].

### III.3.3 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE LA SUSPENSION

Pour  $E > E_{cr}$ , il n'y a pas de couche de polarisation à la surface de la membrane, l'effet de concentration en particules ou colloïdes est donc négligeable [2].

Pour  $E = 0$  OU  $E < E_{cr}$ , une augmentation de concentration induit une diminution assez importante de la vitesse de filtration car il y a présence de couche de polarisation.

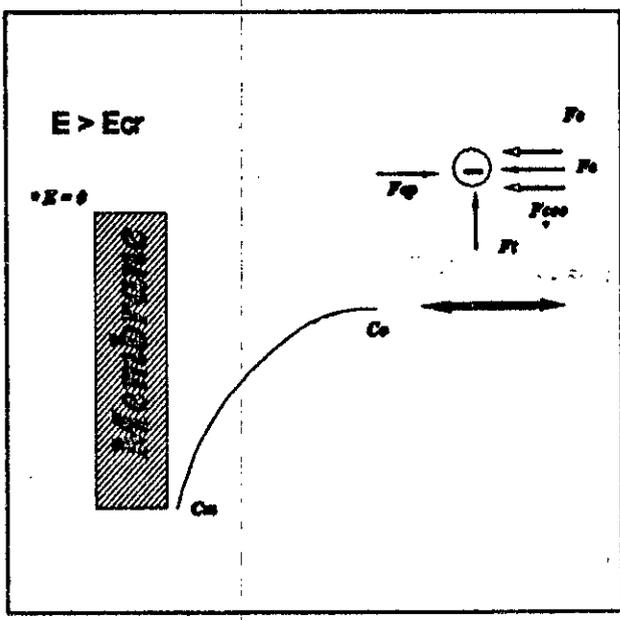
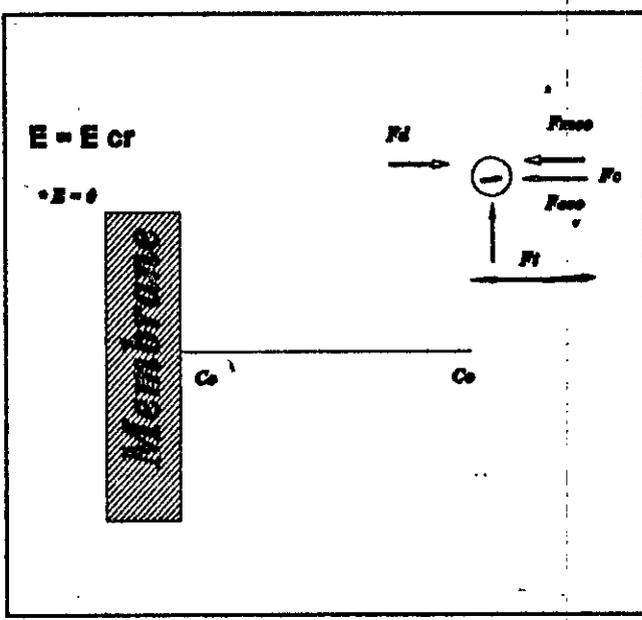
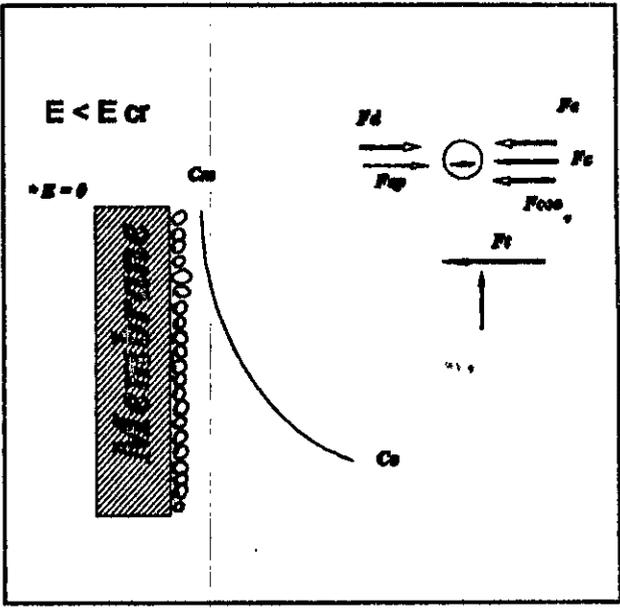
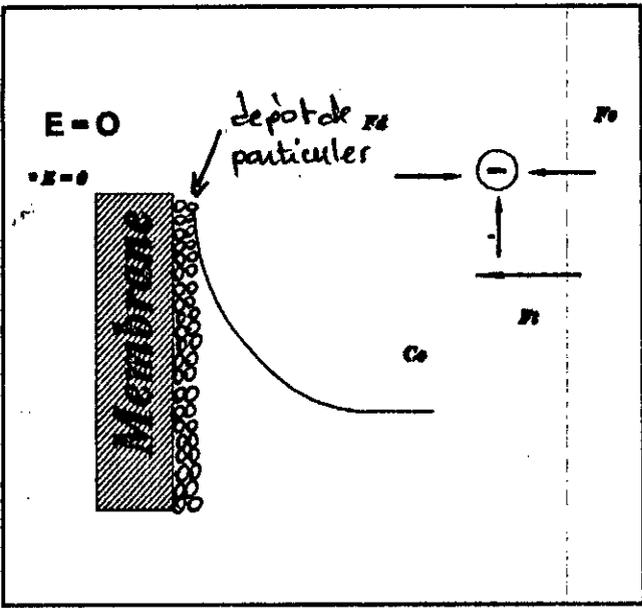
### III.3.4. INFLUENCE DE PH DE LA SUSPENSION

Une variation du pH de suspension affecte la charge de surface de la particule et donc modifie sa mobilité.

Cette variation influe sur la vitesse de filtration.

### III.3.5. INFLUENCE DE LA CONDUCTIVITE DE LA SUSPENSION

La conductivité de la suspension joue un rôle important dans une EMFT. Elle dépend de la concentration et de la température de la suspension [2].



- $F_c$  force de cisaillement
- $F_d$  force due la diffusion
- $F_p$  force de pression convectif
- $F_{mem}$  force electroosmotique due à la membrane
- $F_{gate}$  force electroosmotique due au gâteau

Figure III.2 Les différents regimes d'opérations pour une EMFT en fonction de la valeur de la tension appliquée  $E$  par rapport à  $E_{cr}$ , et aux différentes forces qui agissent sur une particule dans chaque régime.

# BIBLIOGRAPHIE

- 1 **HACHE J. ,**  
Microfiltration tangentielle  
Société BERTIN et Cie
- 2 **VISVANATHAN C.**  
Rôle de la fraction colloïdale et influence d'un champ électrique sur les phénomènes de colmatage en microfiltration tangentielle.  
Thèse INP Toulouse 1988.
- 3 **VISVANATHAN C. , BEN AIN R.**  
L'application d'un champ électrique en MF pour éviter le colmatage interne des MS de la membrane  
Laboratoire de Génie Chimique. ENSIGC Toulouse
- 4 **What , when and why of membrane  
MF UF and RO  
N 171 Vol 73.**
- 5 **RADOVITH J.M BAHMAN B. , MULLON C.**  
Steady state modeling electroultrafiltration at constants concentration  
Sep. Sci. and Tech. 1985
- 6 **CHERGUI.A**  
Amélioration des performances de l'ultrafiltration de turbulence  
thèse de Magister Génie de l'Environnement Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 1991.
- 7 **BALMANN HALINE DE ...**  
Utilisation de l'ultrafiltration pour le traitement des eaux  
thèse 1988 Université de Paul SABATIER (FRANCE)
- 8 **RIOS G.H. RAKOTADAROSOA and TARODO D.F.**  
Basic transport mechanisms of filtration in the presence of electric Field  
J. of Membrane Sci. 1988
- 9 **RADOVITH J.M. and NEEN CHAO I.**  
Electroultrafiltration of cationic electroposition paint  
Journal of coating technology vol; 54 , N°695 pp33-40 . Dec(1982)

## CHAPITRE QUATRE

### MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le dispositif expérimental schématisé sur la figure (IV.1) comprend les éléments suivants :

- Une cellule tubulaire d'ultrafiltration ou de microfiltration.
- Un système de recirculation de la solution comprenant une pompe centrifuge , un échangeur thermique constitué par un serpentín dans un bain thermostaté permettant de maintenir une température constante dans la cellule pendant toute la durée de la manipulation et un débitmètre pour fixer le débit de recirculation.
- Deux manomètres à mercure sont placés en aval et en amont de la cellule pour mesurer la pression transmembranaire ainsi que les pertes de charge.
- La pression est créée à l'aide d'une bouteille d'Azote est régularisé par un système de vanne.
- Une pompe de recirculation.

Dans le cas de l'utilisation de la cellule d'électromicrofiltration on utilise en plus

- Un générateur à courant stabilisé (0-30 V) et ( 0-2A) pour mesurer la différence de potentiel appliqué.
- Un multimètre digital (MICA, ME2) de contrôler l'intensité du courant dans la cellule.

## **IV.2 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES CELLULES UTILISÉES:**

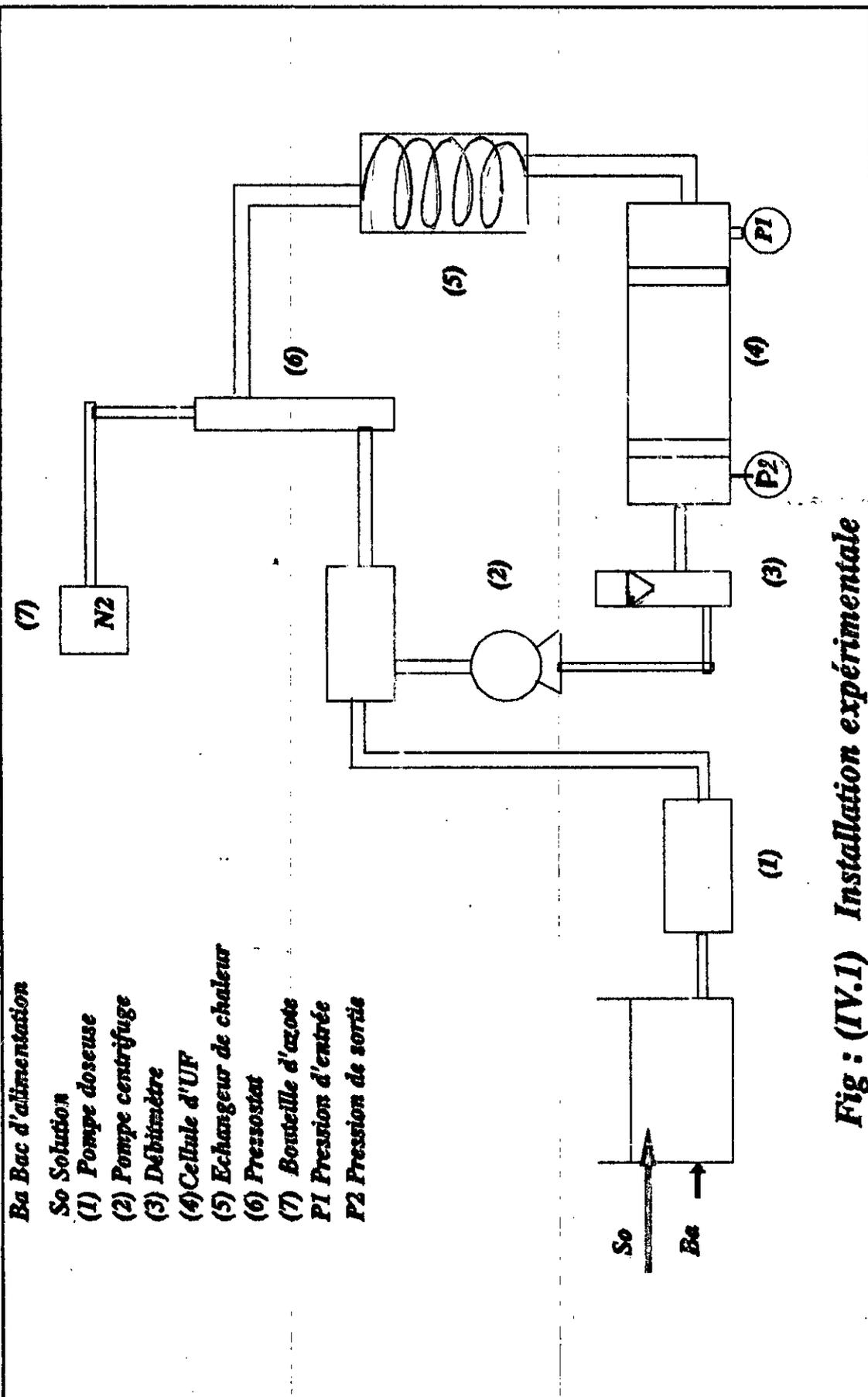
### **IV.2.1 CELLULE TUBULAIRE D'ULTRAFILTRATION:**

La cellule d'ultrafiltration a été réalisée lors d'un projet de fin d'études 1991 à l'ENP d'Alger .

Elle est constituée d'un tube de diamètre intérieur  $d = 6\text{mm}$  et de longueur  $L = 31\text{ cm}$  est placée selon le schéma de la fig (IV.2).

### **IV.2.2 CELLULE TUBULAIRE DE MICROFILTRATION :**

Constituée d'un tube en PVC dans laquelle la membrane minérale est placée , elle est de diamètre  $d = 7\text{ mm}$  et de longueur  $L = 21\text{ cm}$



**Fig : (IV.1) Installation expérimentale**

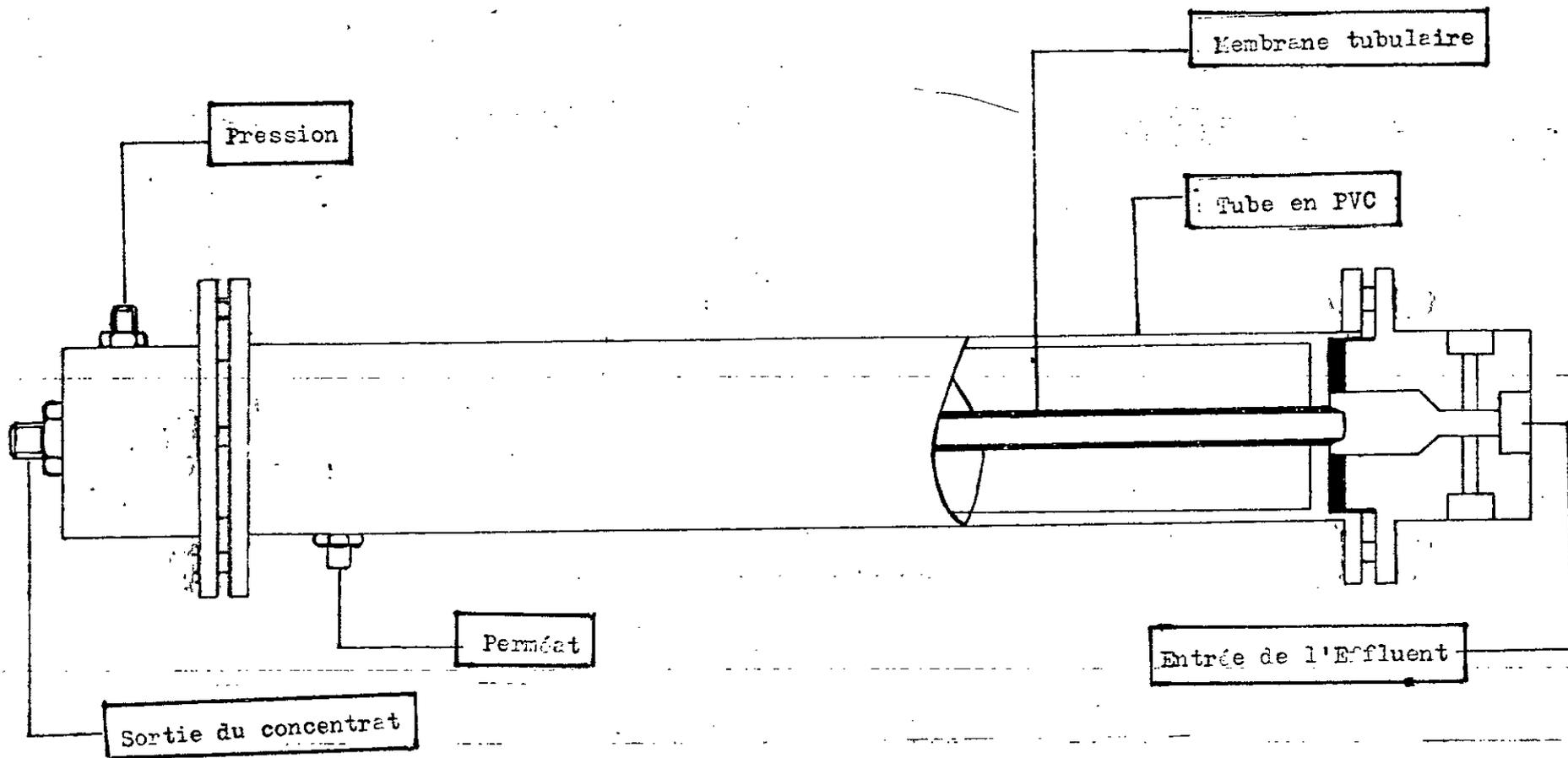


figure II.2 - schéma d'une cellule d'ultrafiltration tubulaire

#### IV.4.1 PRÉPARATION DE LA SOLUTION DE BENTONITE .

Une suspension concentrée de bentonite est préparée préalablement puis filtrée sur du papier filtre , afin d'enlever les grains de sable.

#### IV.4.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUE DE LA BENTONITE :

La bentonite est un silicoaluminate qui présente une structure feuilletée . Ce produit a des propriétés thixotropiques à forte concentration et est susceptible de gonfler suivant la pression osmotique de la solution extérieure : le gonflement des feuilles dépend de la nature des ions fixés à cet argile.

- Les argiles humides ou en suspension aqueuse concentrée ont en effet un aspect gluant lié à leur plasticité , une bonne colloïdalité donne une suspension d'argile stable cād l'argile est défloculée.

- Dans le cas contraire . les particules d'argiles s'attirent et forment des agrégats , il y a floculation .

- Le pH de la bentonite est de l'ordre de 7.9 C'est un pH basique. cette basicité est due à une forte teneur en sels solubles basiques .

- Sa composition chimique d'après A. DJABHAOUI (1988) (thèse d'état Montpellier)

Tableau IV.1 Composition chimique de la bentonite

COMPOSE CHIMIQUE	% AGE
SiO <sub>2</sub>	61
AlO <sub>3</sub>	22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5
MgO	2.5
CaO	0.4
Na <sub>2</sub> O	2.5
H <sub>2</sub> O	4.5

# CHAPITRE CINQ

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

## V.1 ULTRAFILTRATION ET MICROFILTRATION DES SOLUTIONS DE BENTONITE

### V.1.1 FILTRATION TANGENTIELLE D'EAU

Toute étude portant sur la filtration des solutions colloïdales doit être menée dans des conditions bien définies à savoir le maintien de la perméabilité de la membrane  $L_p$  à une valeur relativement constante tout au long des opérations d'ultrafiltration et de microfiltration.

Différents phénomènes influent sur la perméabilité de la membrane, en l'occurrence le phénomène d'adsorption et de colmatage . Ces deux phénomènes sont la cause essentielle d'une diminution de  $L_p$  au cours du temps de filtration .

Afin d'obtenir des résultats reproductibles au cours de filtration, nous avons étudié l'influence des conditions opératoires sur la perméabilité de la membrane.

#### V.1.1.1 ESSAI DE PERMÉABILITÉ :

Avec des membranes propres de microfiltration et d'ultrafiltration , une série d'essais a été effectuée au cours de laquelle , ont été relevées différentes valeurs de la pression transmembranaire , avec un débit de recirculation  $Q_v = 50$  l/h et une température de la solution constante à  $24^\circ \text{C}$ .

En portant sur la figure (V.1.1) , le débit de l'eau  $J_v$  en fonction de la pression transmembranaire  $\Delta P$  , on obtient une droite passant par l'origine. La variation de  $J_v$  en fonction de  $\Delta P$  obéit donc à l'équation de DARCY donnée par l'expression :

$$J_v = L_p \Delta P$$

La pente de cette droite correspond à la perméabilité de la membrane et , est égale respectivement pour la membrane TECHSEP et CERAVER à  $0.09 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$  et  $0.48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$  .

### V.1.1.2 ESSAI D'ADSORPTION :

La quantification des phénomènes d'adsorption a été réalisée à une température de 24 °C en remplissant la cellule de microfiltration par une solution de bentonite de turbidité égale à 26 NTU. , le temps de contact de la solution à la membrane est de 24 heures.

Après ce temps , on vide la cellule , et on détermine la nouvelle perméabilité avec de l'eau . à différents pressions transmembranaires fixées par empotage.

La perméabilité de la membrane CERAVER adsorbée est de  $0.385 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h.bar}$  voir figure (V.1.2).

On observe ainsi que le phénomène d'adsorption réduit de 20 % la perméabilité de la membrane.

### V.1.1.3 ÉVOLUTION DE LA PERMÉABILITÉ EN FONCTION DU TEMPS D'ULTRAFILTRATION

Les phénomènes responsables de la diminution du flux de perméat ne peuvent être dissociés , et coexistent en même temps au cours de la filtration.

Afin de connaître l'ampleur de ces phénomènes sur l'état des conditions hydrodynamiques fixes , l'influence du temps d'ultrafiltration sur la perméabilité de la membrane a été étudié et est représenté sur la figure (V.1.3) ,

On observe pendant les 60 premières minutes une décroissance rapide de la perméabilité atteignant 55 % de la perméabilité initiale , puis elle tend à se stabiliser limite égale à  $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h bar}$ .

Evolution du flux de permeat en fonction de la pression transmembranaire pour  
la membrane CERAVER

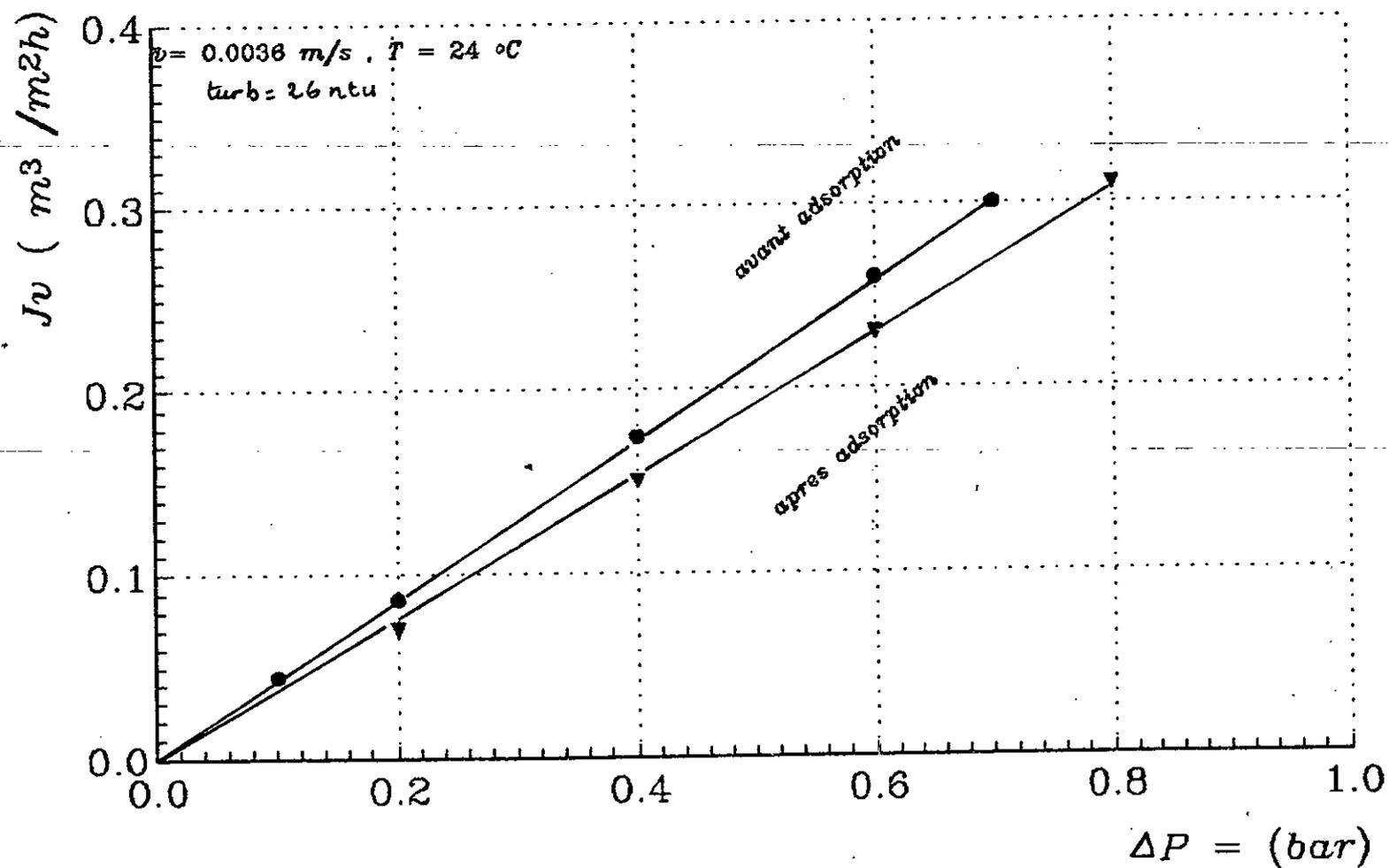


figure I.2

Evolution de la permeabilite de la membrane  
en fonction du temps d'ultrafiltration

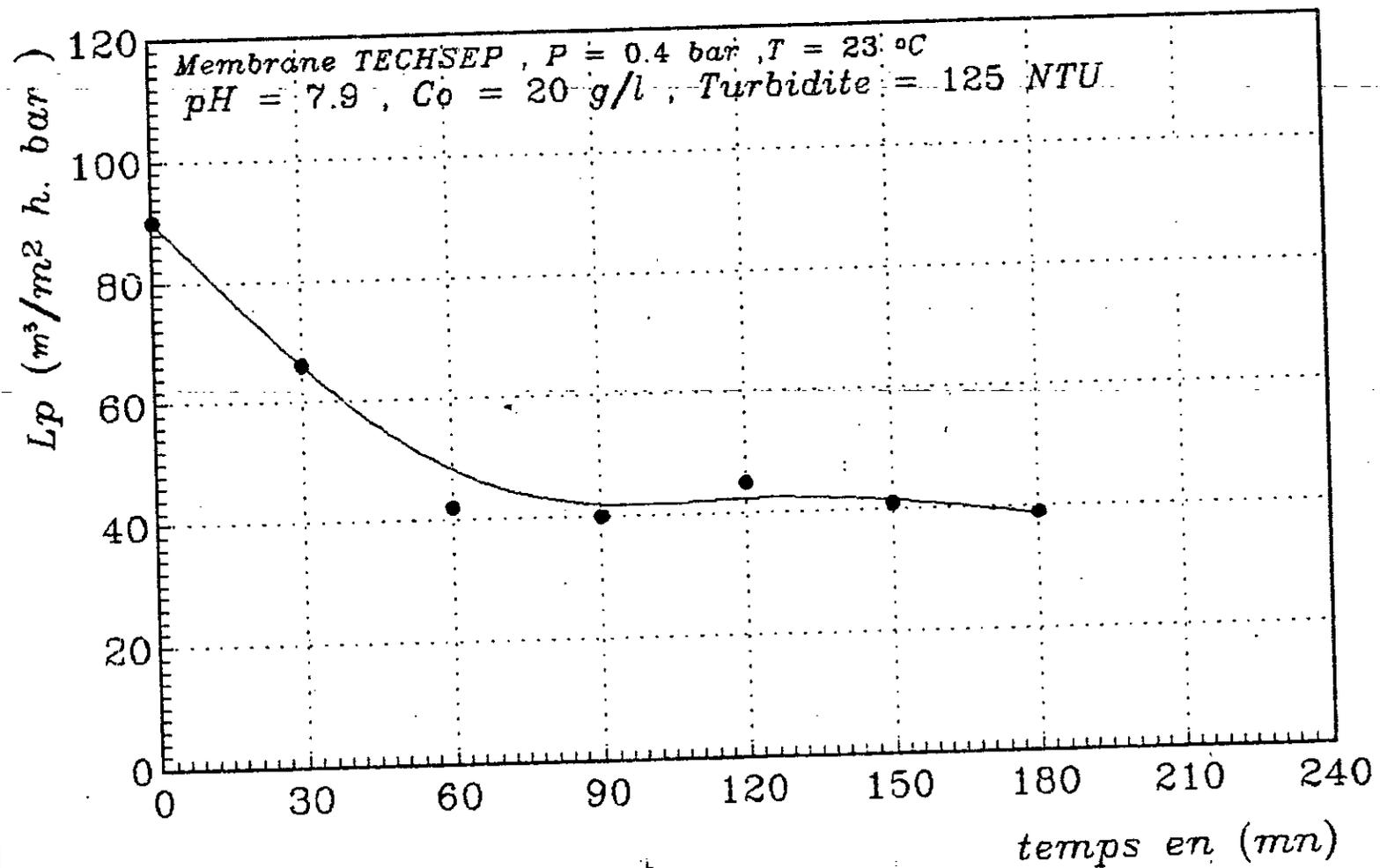


Fig V .1.3

## V.1.2. ULTRAFILTRATION DE LA SOLUTION DE LA BENTONITE

### V.1.2.1. VARIATION DU FLUX DE PERMEAT EN FONCTION DU TEMPS D'UF :

Sous une concentration constante de la solution de bentonite à traiter , nous avons étudié l'évolution du flux de perméat en fonction du temps Figure ( V.1.4)

Cette étude est réalisée sous les conditions suivantes :

$\Delta P$	=	0.8	bars
Turbidité	=	200	NTU
T	=	21	°C
$Q_v$	=	20	l/h
pH	=	7.9	

On constate que le flux de perméat diminue dans le temps jusqu'à atteindre un état stationnaire , et on peut distinguer trois domaines de décroissance .

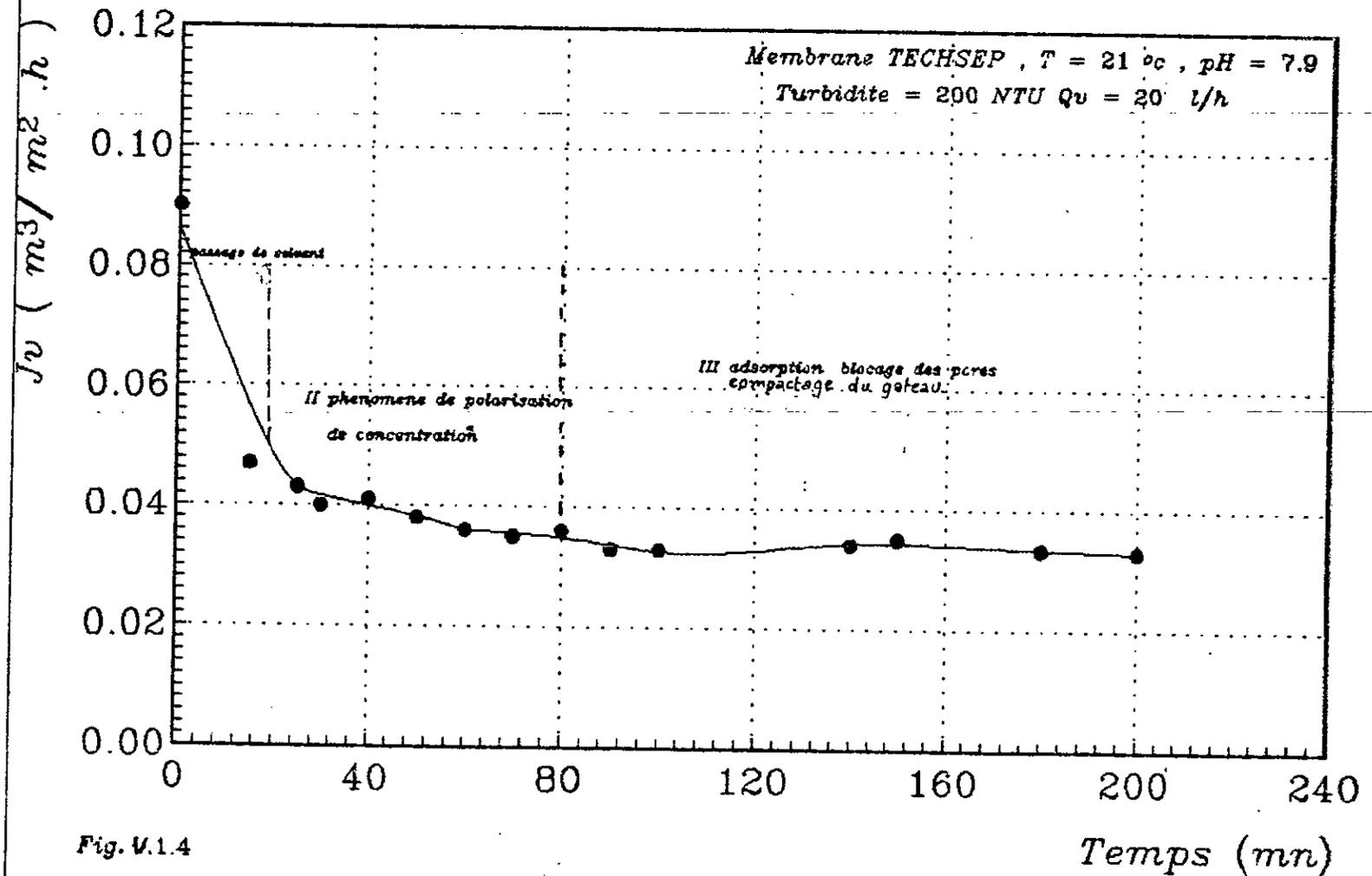
- a) Passage de solvant ( 0-30 mn )
- b) Phénomène de polarisation ( 30 -80 mn)
- c) Colmatage ( > 80 mn )

Dans le premier domaine , le passage de solvant à travers la membrane entraîne une diminution du flux de perméat . Cette diminution peut être due au blocage des pores par trace des colloïdes .

Trente minutes après , apparait le phénomène de polarisation de concentration qui est fortement influencé par les conditions hydrodynamiques et la concentration du soluté.

Finalement la troisième phase est due au colmatage ; c'est la plus difficile à interpréter ; On peut imaginer un blocage des pores , une adsorption à la surface de la membrane ou à l'intérieur des pores , une

# Evolution du flux de permeat en fonction du temps d'UF



augmentation de l'épaisseur du gâteau , ou bien tous les phénomènes simultanément .

Dans la suite de notre travail , toutes les mesures du débit de perméat seront prises sous différentes conditions opératoires ; cela après 20 mn de filtration en s'assurant que les résultats obtenus sont reproductibles .

#### V.1.2.2 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LE FLUX DE PERMÉAT

L'évolution de flux de perméat  $J_v$  en fonction de la pression transmembranaire pour les différentes vitesses de recirculation est représentée sur la figure (V.1.5)

On constate à partir de cette figure qu'au delà de 0.7 bar , le flux devient indépendant de  $\Delta P$  , il y a donc formation d'une couche de gel sur la surface membranaire .

A noter l'effet bénéfique de la vitesse sur le flux de perméat .

En passant de 10 l/h à 30 l/h le flux augmente sur le flux de perméat de 30 % .

Cette augmentation est accompagnée d'une augmentation des pertes de charges dans la cellule , d'où une augmentation des dépenses énergétiques .

Une étude économique est donc nécessaire pour se situer dans des conditions opératoires optimales permettant ainsi d'améliorer les performances du procédé .

Le taux de rejet observé au cours de notre manipulation reste relativement constant et proche de l'unité.

### V.1.3. MICROFILTRATION DE LA SOLUTION DE BENTONITE

#### V.1.3.1 VARIATION DU FLUX DE PERMÉAT EN FONCTION DU TEMPS DE MICROFILTRATION

L'étude est réalisée sous les conditions suivantes

$\Delta P$	=	0,4 bar
T	=	24 °C
pH	=	8.1
Turbidité	=	67 NTU
$Q_v$	=	40 l/h

On constate que le flux de perméat diminue dans le temps jusqu'à atteindre un état stationnaire après 20 mn figure (V.1.6).

#### V.1.3.2 INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LE FLUX DE PERMÉAT :

L'évolution du flux de perméat en fonction de la pression transmembranaire à différentes concentrations conduit aux résultats regroupés et illustrés par les figures (V.1.7, V.1.8, V.1.9) .

On observe que l'augmentation du débit de recirculation entraîne une augmentation du flux de perméat .

Pour les faibles valeurs de la turbidité , cette augmentation reste linéaire dans la gamme de pression de travail , par contre la polarisation est observée pour les fortes valeurs de turbidité.

La turbidité du perméat reste constante et voisine de 1.5 NTU et qui est trois supérieure à celle obtenue en ultrafiltration (0.5 NTU).

#### V.1.3.3 INFLUENCE DE LA VITESSE SUR LES PERTES DE CHARGE

Les pentes de charge varient avec le débit de recirculation  $Q_v$  , selon l'expression suivante :  $\Delta P_f = A Q_v^2$

Variation du flux de permeat en fonction du temps de microfiltration

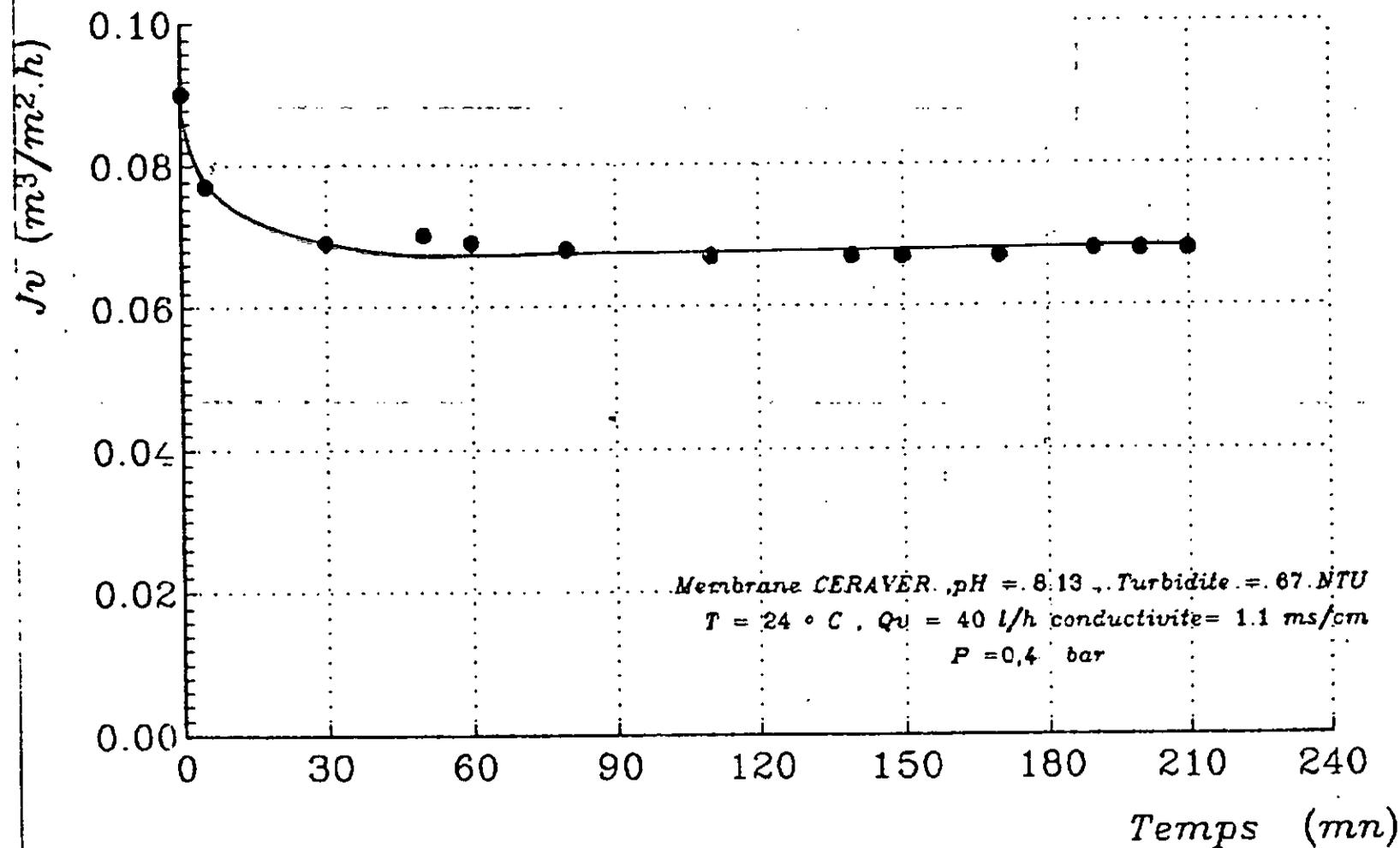


Figure V.1.6

où

$$\ln \Delta P_r = \ln \alpha + n \ln Q_v$$

En portant  $\ln \Delta P_r$  en fonction de  $\ln Q_v$ , nous obtenons un segment de droite correspondant au régime d'écoulement laminaire fig. ( V.1.10) le nombre de Reynolds  $Re$  est inférieur à 2100 pour les débits inférieurs à 40 l/h, figure (V.1.11)

## V.2. APPLICATION D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE EN MFT

### V.2.1. ÉVOLUTION DE L'INTENSITÉ I EN FONCTION DE LA TENSION APPLIQUÉE SOUS DIFFÉRENTES CONDITIONS OPÉRATOIRES

Nous avons suivi l'évaluation du courant  $I$  en fonction du champ électrique à différentes pressions et débit de recirculation ( Fig V.2.1, V.2.2. ).

On constate à partir de ces courbes que l'accroissement de la pression est d'autant élevé que la turbidité est grande par contre l'augmentation de  $Q_v$  entraîne une augmentation de l'intensité  $I$ .

Ceci s'explique que pour une turbidité de 200 NTU, la polarisation de concentration est plus intense que pour une turbidité de 67 NTU. et l'effet des conditions opératoires devient plus important sur la couche de polarisation et par conséquent sur les différentes résistance au transfert de matière .

RADOVITCH et ses Coll. ont pu mettre en évidence l'effet des conditions opératoires sur la nature de la solution à traiter, la nature des matériaux séparant les électrodes ( y compris la membrane ), sur le courant électrique et le champ électrique critique . Ce dernier correspond à la limite de la linéarité entre le champ électrique appliqué et l'intensité du courant .

Selon l'allure de nos courbes, cette valeur optimale est proche de 2000 V/M .

Influence de la vitesse sur les pertes de charge en microfiltration

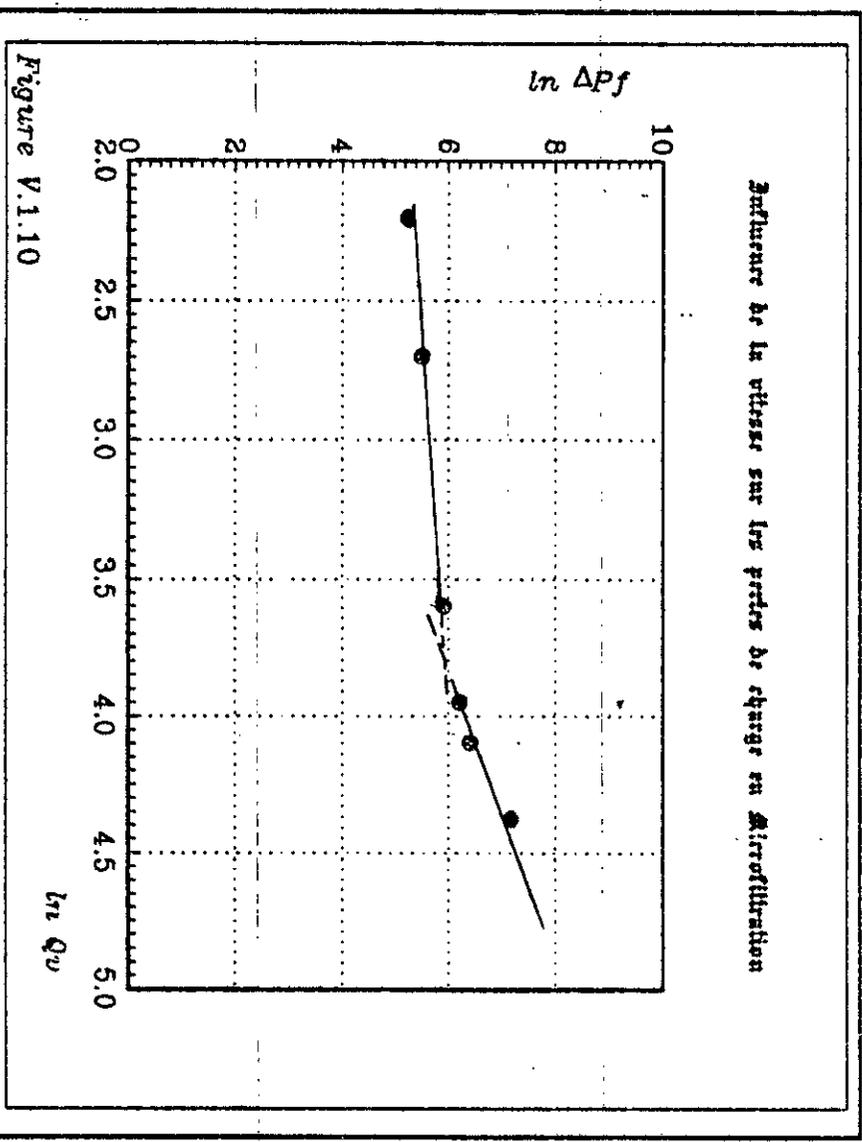


Figure V.1.10

# Évolution de l'intensité de courant appliqué

à différentes pressions transmembranaïres

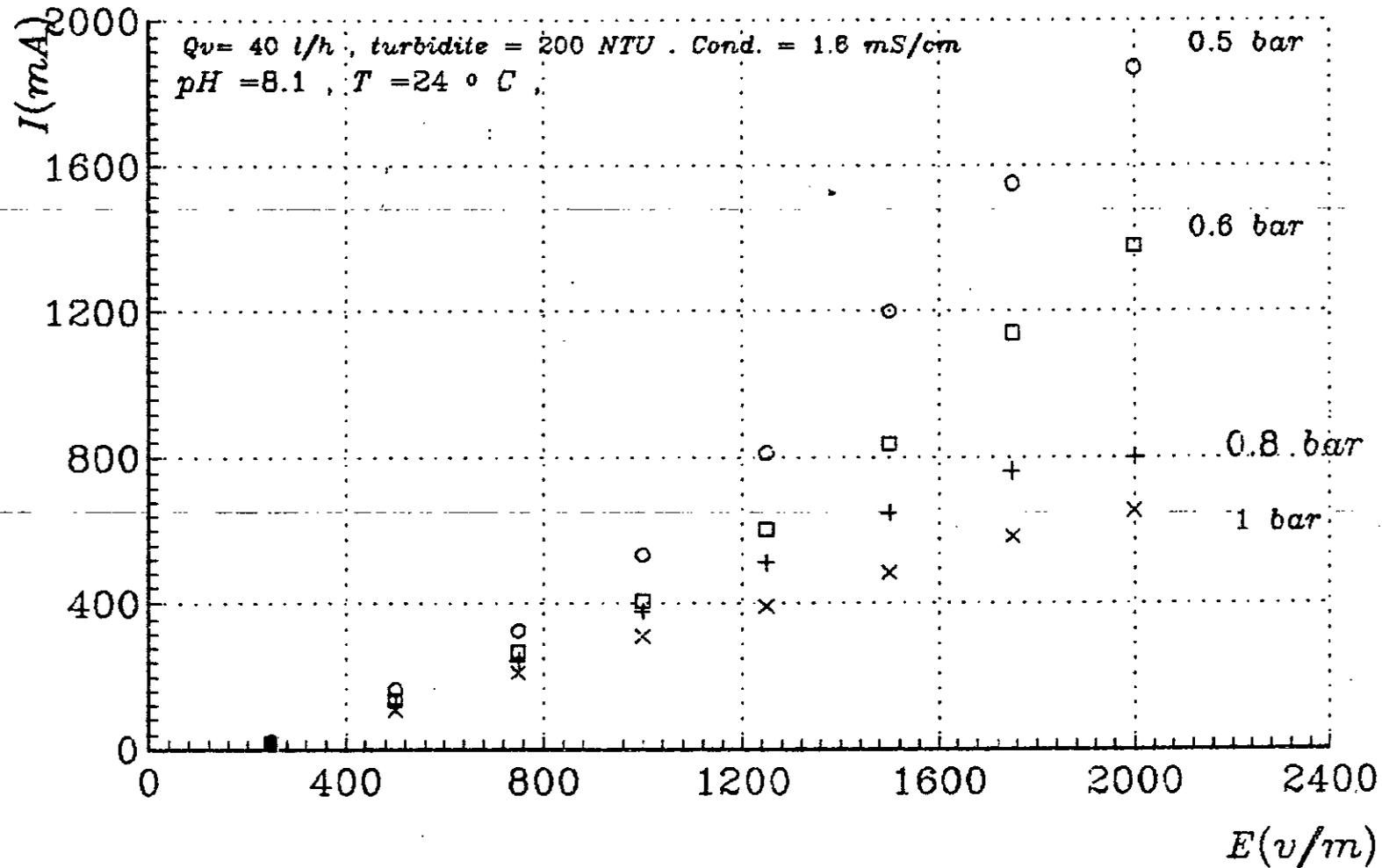
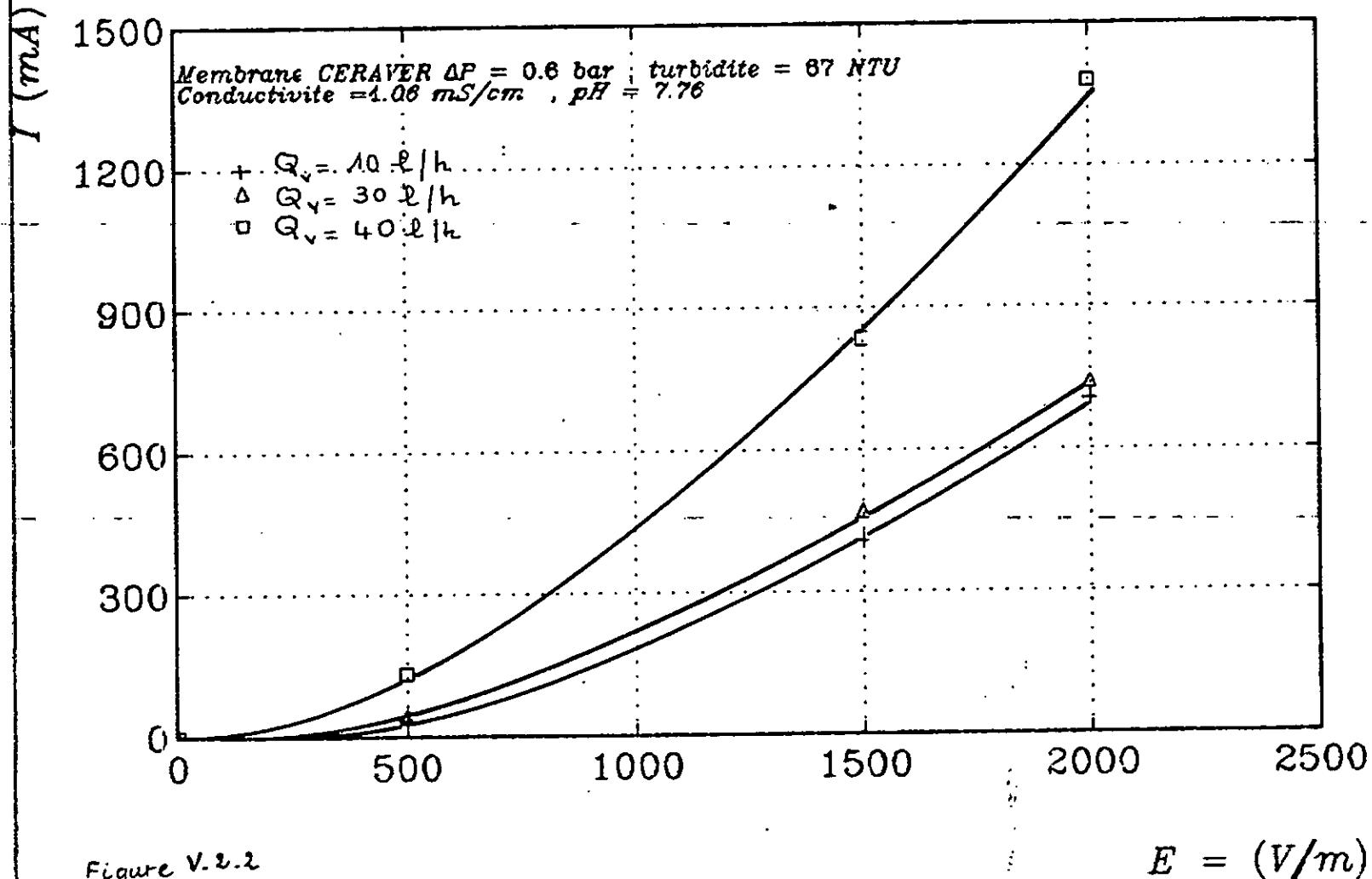


figure V.2.1

Evolution de l'intensite  $I$  en fonction du champ electrique  
a. differents debits de recirculation



## Influence du champ électrique sur le flux de permeat

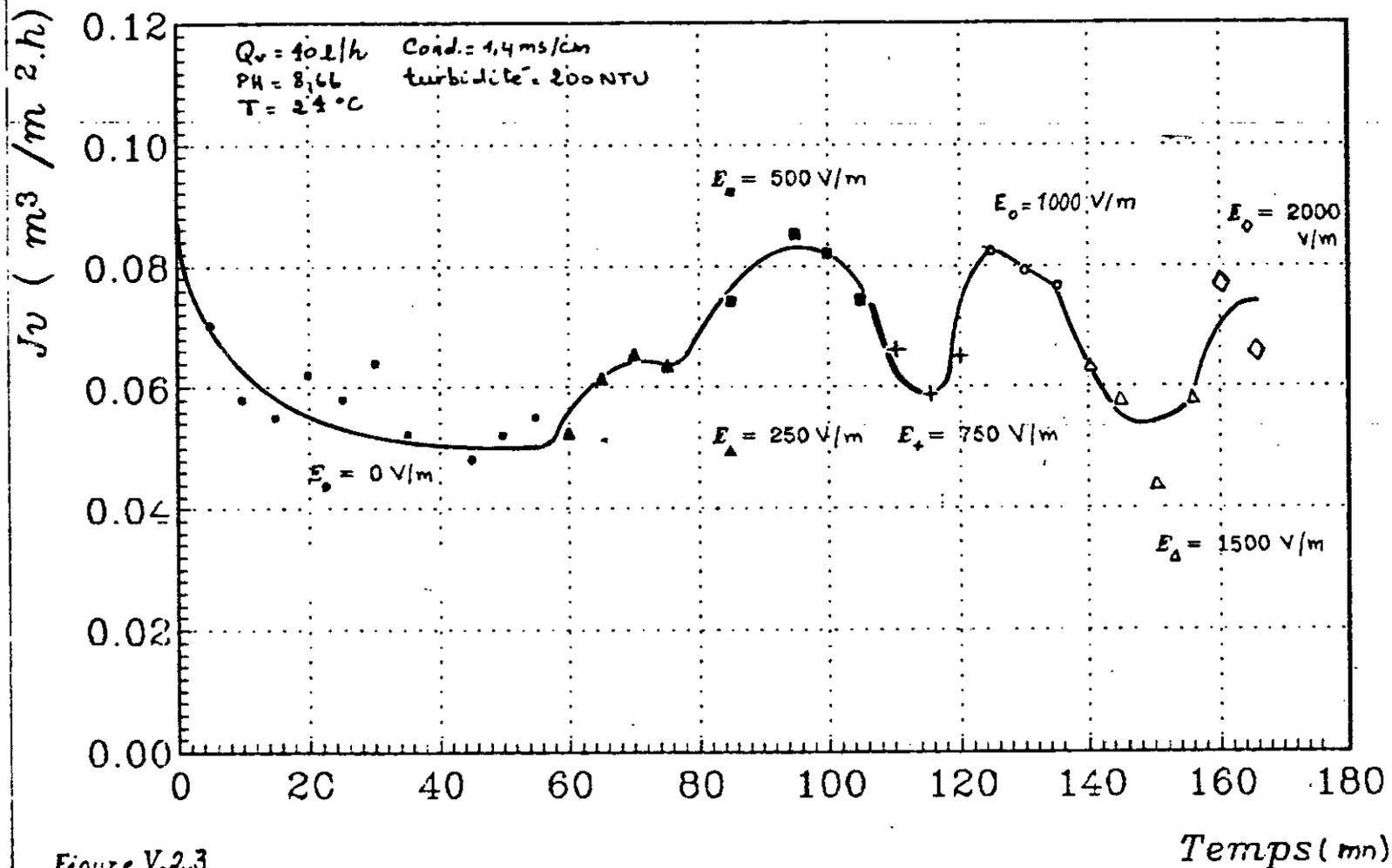


Figure V.2.3

Variation du champ électrique avec le PH de perméat

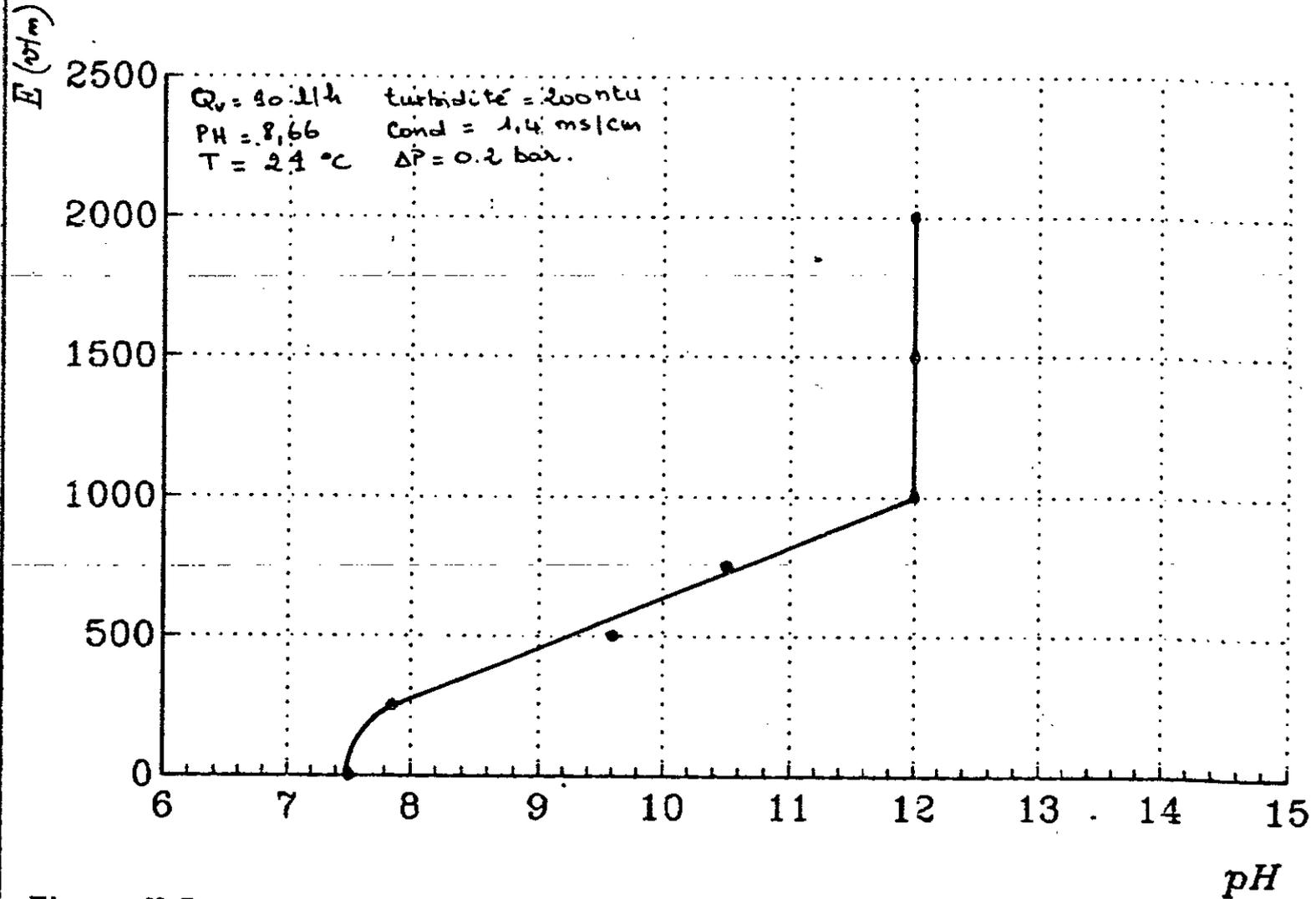


Figure V 2.4

Aussi , en passant de 0 V/m à 1000 V/m , le pH du perméat passe de 7.5 à 12. Une fois encore , cette valeur élevée de pH entraine la formation des hydroxydes métalliques qui peuvent être la formation des hydroxydes métalliques qui peuvent être la cause d'une obstruction des pores de flux de perméat .

Si par contre , on n'impose le champ électrique , une fois le régime stationnaire est établi , c'est à dire qu'à chaque champ électrique, on retrouve le régime stationnaire , on obtient les résultats rapportées sur la figure ( V.2.5) .

Les enregistrements de  $J_v$  en fonction du temps obtenus pour un champ électrique nul avant chaque application du champ présentent les mêmes allures et donne une même valeur de  $J_v$  correspondant au régime permanent .

On constate pour chaque valeur du champ valeur du champ électrique un établissement d'un nouvel état d'équilibre caractérisé par des valeurs accrues au débit et de rétention .

Il convient de noter l'influence favorable du champ électrique sur le flux de perméat , en passant de 0 V/m à 2000 V/m . le flux est accrue de plus de 80 % [ de 0.050 ( $m^3/m^2 h$ ) à 0.092 ( $m^3/m^2 h$ ).

En traçant le flux de  $J_v$  , en fonction du champ électrique figure (V.2.6) ,on remarque que  $J_v$  varie linéairement avec E pour des valeurs inférieures à 1000 V/m , par contre pour des fortes valeurs du champ électrique , la droite s'incurve et  $J_v$  tend vers un flux limite de perméation .

La valeur de flux limite de perméation est obtenue pour un champ électrique dit " champ électrique " dit " champ critique " où le transfert de matière n,est limité que pour la résistance à la membrane et au colmatage .

Le champ électrique permet ainsi d'accroître le flux de concentrat (pH = 2.6 ) , et une alcalinisation du perméat .

Variation du champ électrique sur le flux de permeat

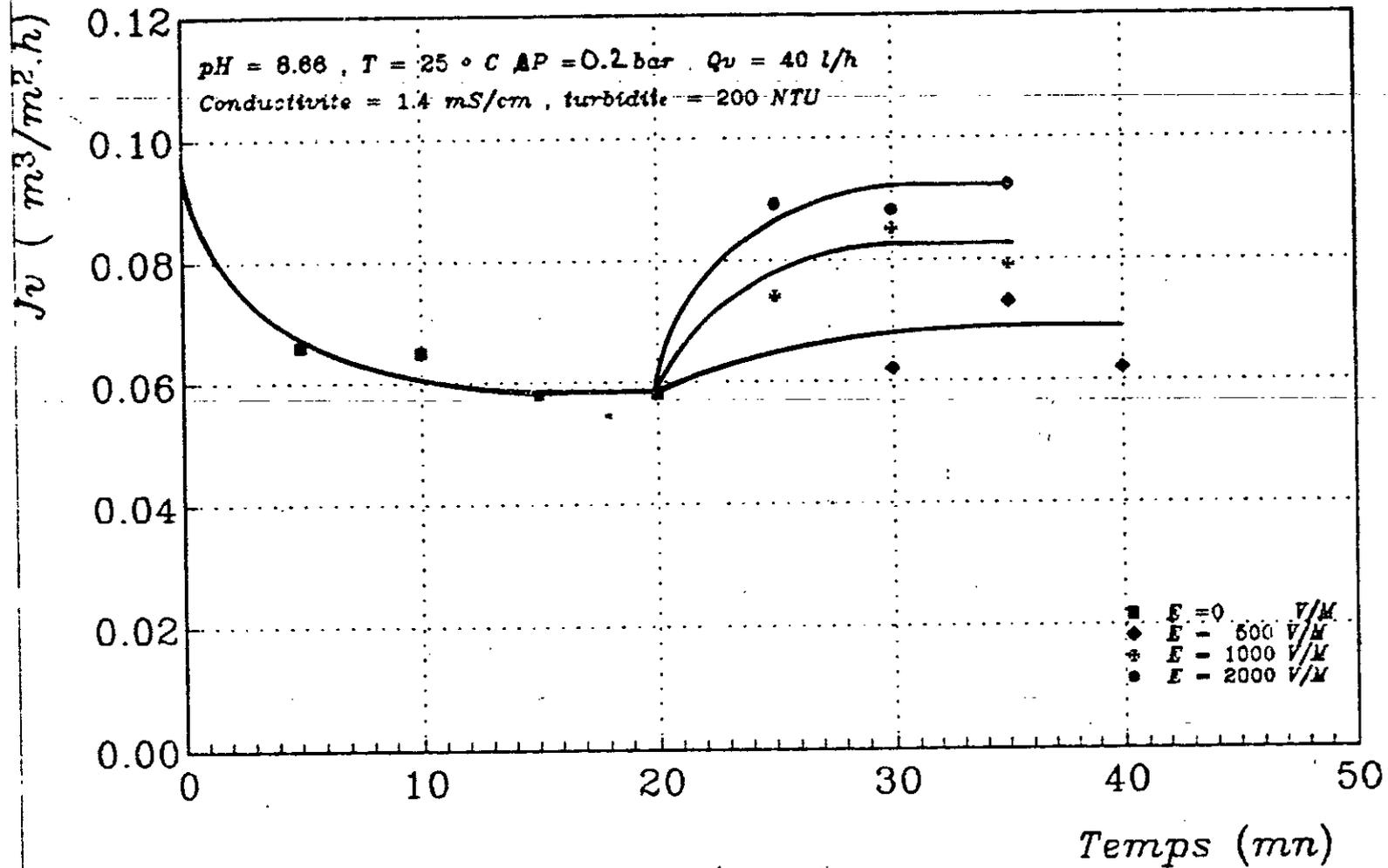


figure H 25

*Evolution du flux de permeat en fonction du champ electrique*  
*Membrane CERAVER*

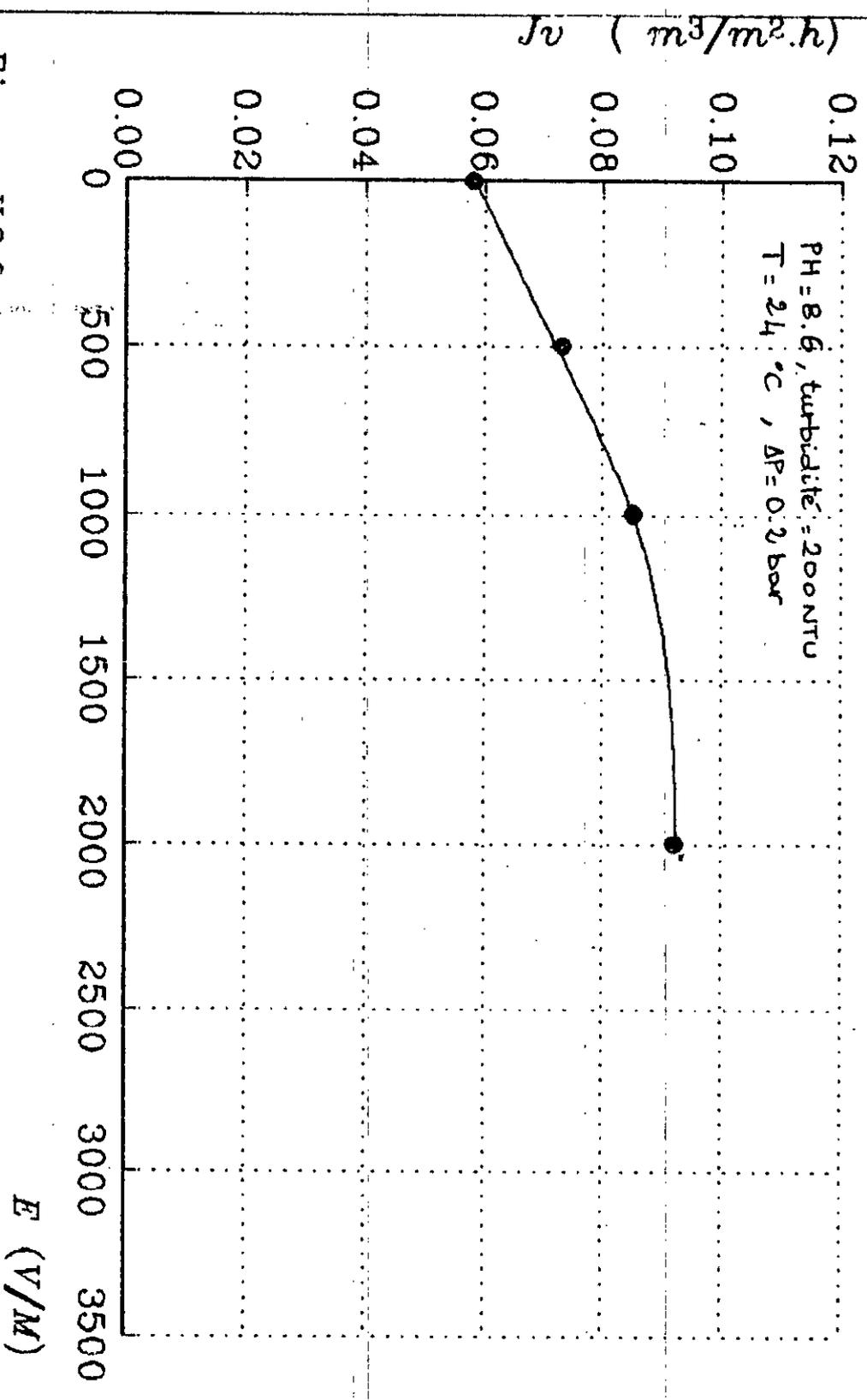


Figure V.2.6

Cette acidification est alcalinisation est plus intense pour des champs plus élevés , cela s'explique par une forte migration des ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{H}_3\text{O}^+$  respectivement avers les compartiments de perméat et de concentrat figure ( V.2.7).

On remarque aussi que la conductivité du perméat augmente avec l'augmentation du champ électrique fig. tandis que celle du concentrat reste presque la même à différents champs ( V.2.8) .

### V.2.3 INFLUENCE DU PH DE LA SOLUTION SUR LE FLUX DE PERMEAT EN ABSENCE DU CHAMP ELECTRIQUE.

L'étude de l'influence du pH de la solution sur le flux de perméat à été entreprise, les expériences ont été effectués à l'aide d'une membrane de microfiltration (CERAVER ) de seuil de coupure 1.4  $\mu\text{m}$ .

Sous les conditions opératoires bien définies , le PH est ajusté à 7.2 par une solution de phosphate 0.1 M ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) et 4,8 par une solution d'acétate 0.1 M (  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{CH}_3\text{COONa}$  ) .

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (V.2.9) , on constate une évolution du débit de pH dans les temps pour les deux valeurs de pH malgré la constance des différents paramètres agissants sur la perméation .

En effet au bout de sept minutes d'opérations , le flux de perméat chute de 47 % à 42 % pour des pH respectifs de 4.8 et 7.2 .

On note ainsi une variation de 5 % entre les flux obtenus aux conditions expérimentales fixées.

### V.2.4. EVOLUTION DU FLUX DE PERMEAT EN FONCTION DE LA PRESSION TRANSMEMBRANAIRE À DIFFERENTS CHAMP ELECTRIQUE

l'étude de l'influence du champ électrique , de la vitesse de recirculation de la pression  $\Delta P$  sur les figures représentées (V.2.10) et ( V.2.11) .

EVOLUTION DU PH EN FONCTION DU TEMPS A DIFFERENTES  
VALEURS DE CHAMP ELECTRIQUE

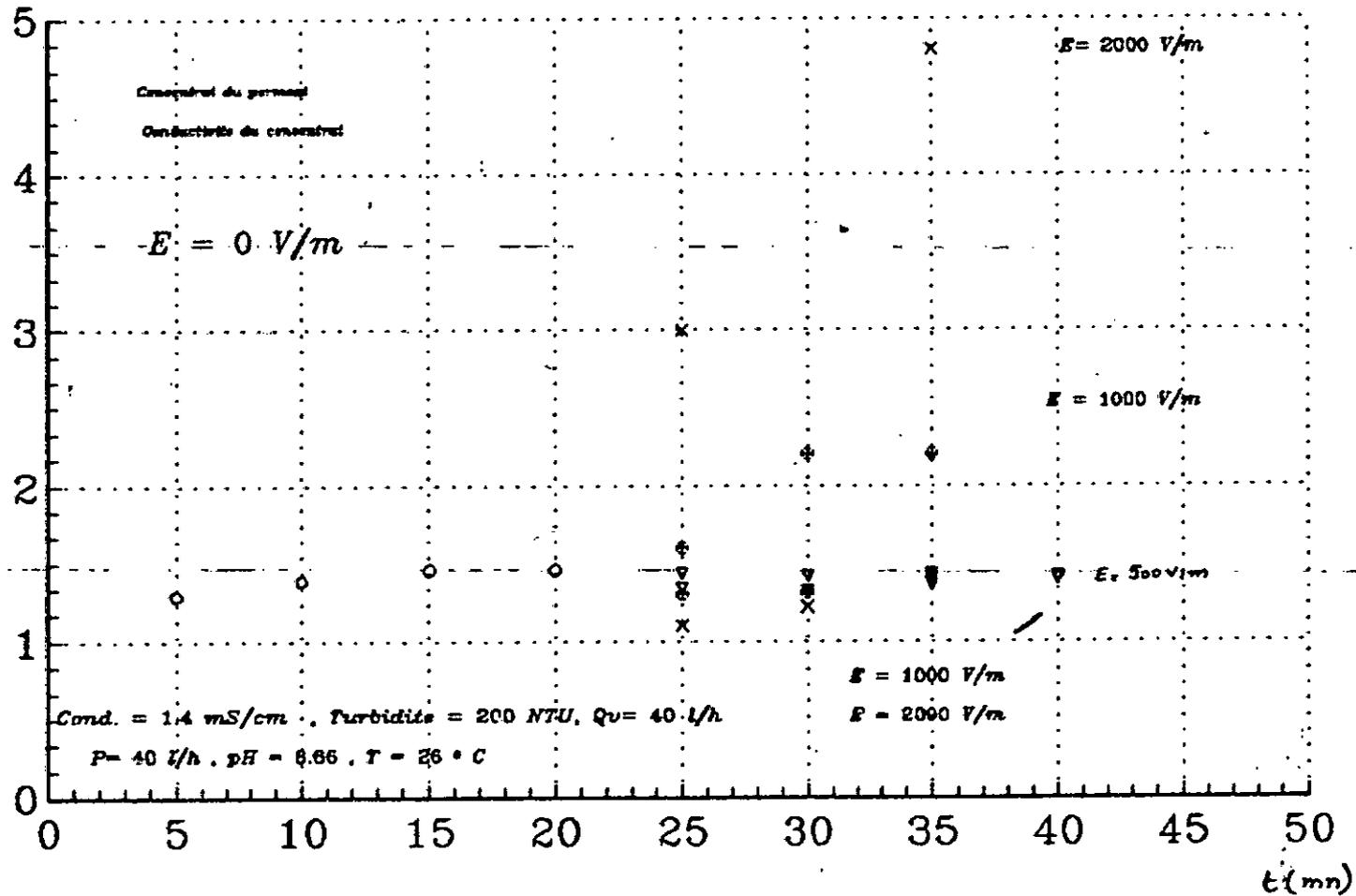


FIGURE II.8

Evolution du flux de permeat en fonction de la pression transmembranaire  
 a differents valeurs de champ electrique

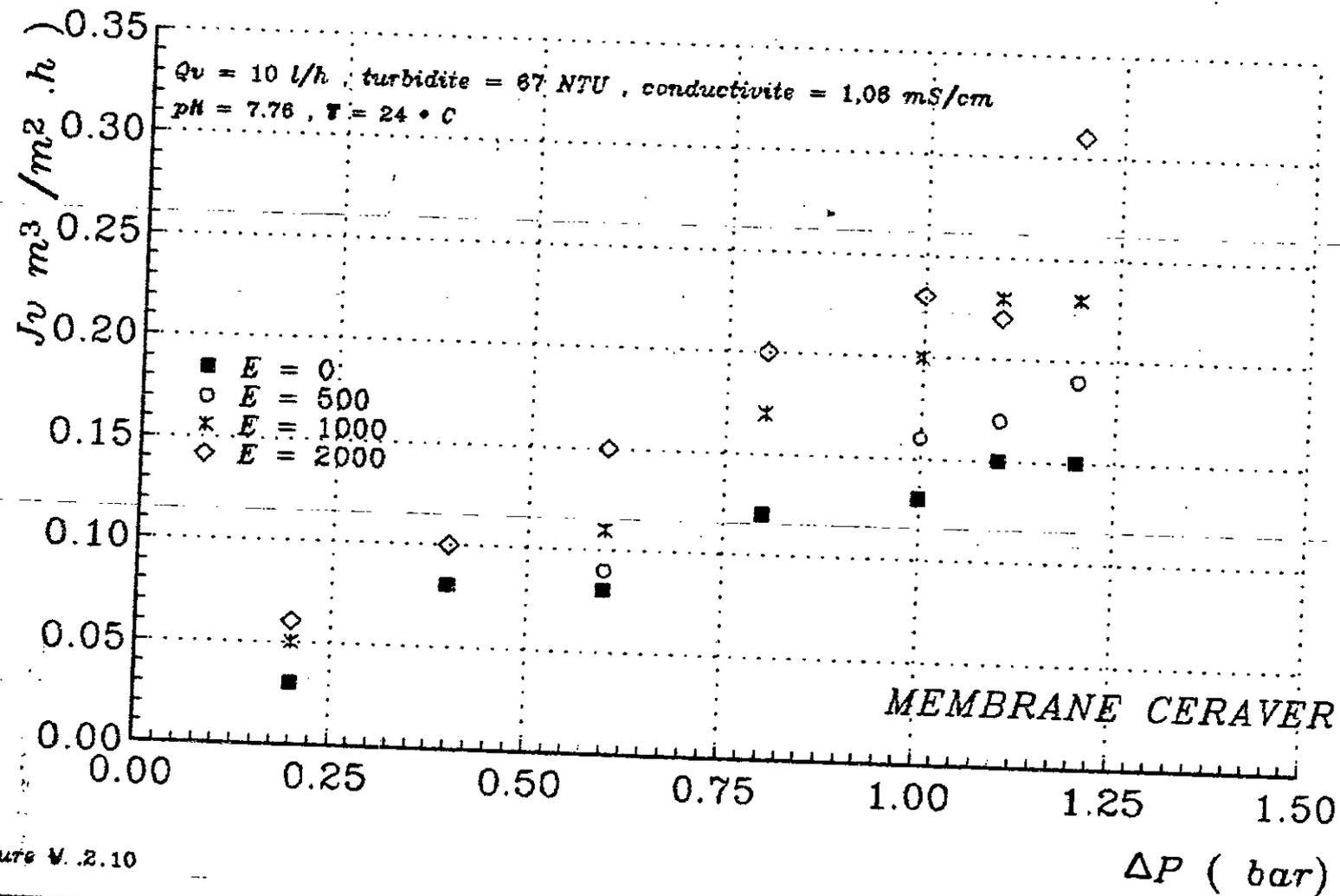


Figure V. 2.10

# Evolution du flux de permeat en fonction de la pression

pour des differentes valeurs de champ electrique

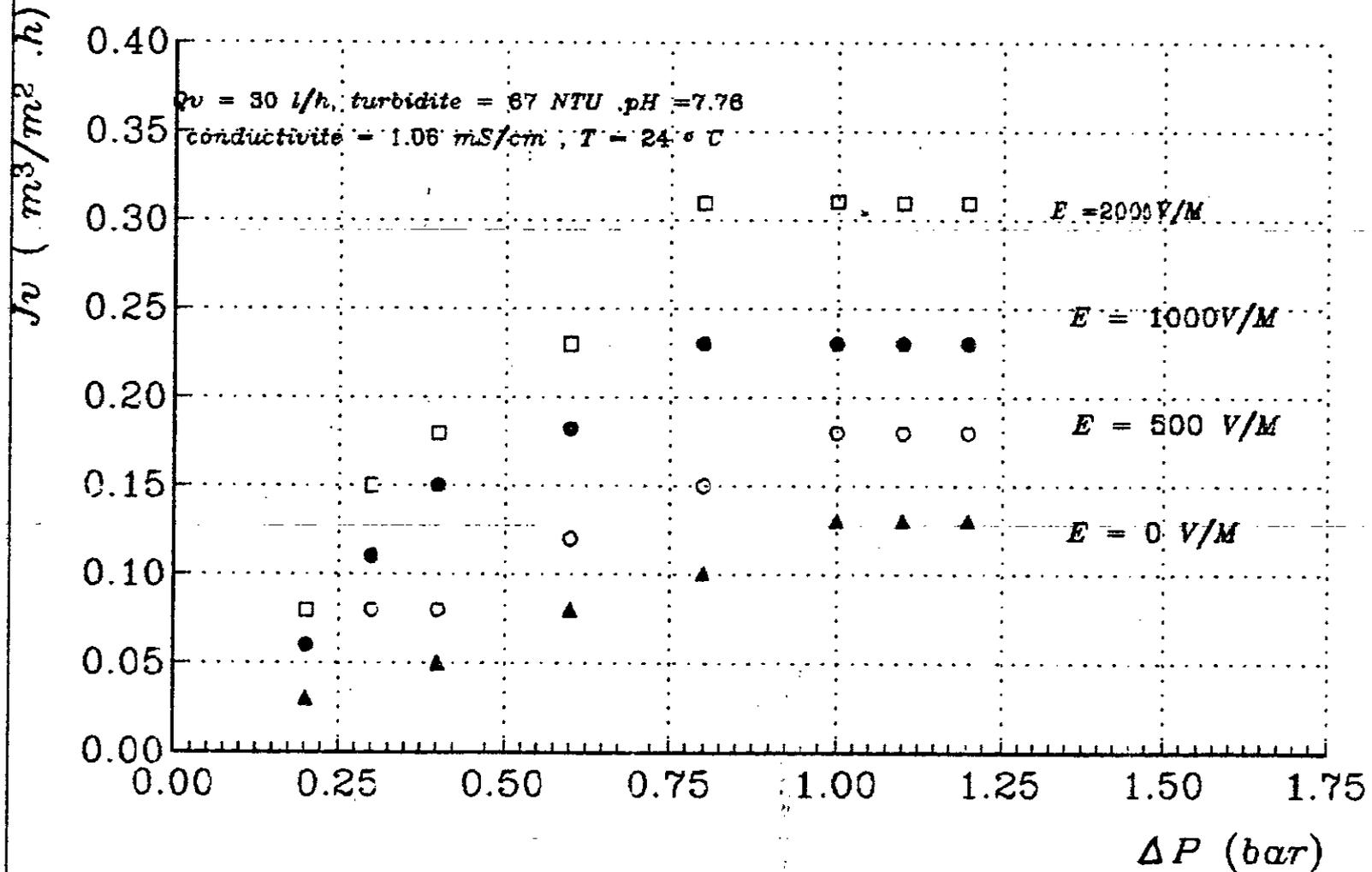


FIGURE V.2.11

On remarque que ces courbes présentent la même allure , elles sont linéaires jusqu'à une pression de 1 bar , au dessus de laquelle  $J_v$  devient pratiquement constant.

A noter que le taux d'amélioration de flux de perméat dépend de la vitesse de recirculation.

Ainsi en passant de  $E = 0$  V/m à 2000 V/m pour un débit  $Q_v = 10$  l/h, le flux augmente de 100 % par contre pour  $Q_v = 30$  l/h. , l'augmentation est de 133 % .

### Conclusion :

L'étude expérimentale menée en électromicrofiltration , sur des solutions de bentonite a montré que ce procédé pouvait conduire à des améliorations des vitesses de filtration.

Nous avons observé une augmentation de ~~100~~ 133 % en travaillant à un champ égal à 2000 V/m .

Toutefois , cette augmentation s'accompagne d'une acidification de concentrat et d'une alcalinisation du perméat.

Ainsi , l'étude de l'influence de pH sur  $J_v$  est donc nécessaire pour mieux juger de l'influence du champ électrique .

Cette étude a montré qu'en ABSENCE du champ électrique , le flux diminue de 5 % en passant de pH 7.2 à 4.8 , nous constatons que l'acidification a pour effet de diminuer le flux de perméat .

# CHAPITRE SIX

ÉTUDE ÉCONOMIQUE

## VI.1 CRITERES D'OPTIMISATION

SHEN ET PROBSTEIN ont repris la méthode proposée , par SONIN et ISAACSON , il calculent la dépense globale par unité de temps K en prenant en compte

- l'investissement en capital , supposé en première approximation proportionnelle à la surface de la membrane A.

- Le coût du pompage pour compenser la chute de pression  $\Delta P$  subie par le perméat à travers la membrane et la pente de charge  $\Delta P_r$  dans le circuit soit :

$$K = K_c A + K_p (Q_v \Delta P_r + Q_p \Delta P) \quad (1)$$

avec  $K_c$  = le coût en capital par unité de temps et de surface ( $DA/m^2s$ ).

$K_p$  = le coût de l'énergie ( $DA/Joule$ )

$Q_p$  = débit de perméat

$Q_v$  = débit de recirculation

L'équation (1) devient :

$$\frac{K}{Q_p} = K_p + \frac{K_c}{J_v} \left( \frac{k_p}{k_c} Q_v \Delta P_r + 1 \right) \quad (2)$$

Cette relation (2) n'est valable que pour une concentration constante .

Pour le calcul de  $K_c$  , nous avons admis que la durée de vie des membranes CERAVER et TECHSEP est de 5 ans et que ces durées de vie ne changent pas par l'utilisation de promoteurs

ainsi  $K_c = 2.66 \cdot 10^{-4} DA/m^2s$

$K_p$  est proportionnel au coût de KWH électrique est estimé à

$K_p = 1.36 \cdot 10^{-7} DA/Joule.$

Le fonctionnement optimum est obtenu à partir de l'équation (2) en traçant  $K/Q_p$  en fonction de  $Q_v$  pour différentes pressions transmembranaires.

L'amélioration du flux de perméat par le champ électrique s'accompagne d'une augmentation du coût de procédé en faisant intervenir en plus des dépenses citées ci-dessus.

- le coût de l'énergie dépensée suite à l'application du champs électrique  $K_p UI$ ,

on a l'équation suivante :

$$K = aK_c A + K_p Q_p \Delta P + K_p Q_v \Delta P_f + K_p UI$$

Par analogie à l'équation (2) on a

$$\frac{K}{Q_p} = K_p \Delta P + \frac{K_c}{J_v} \left[ a + \frac{K_p}{K_c A} (Q_v \Delta P_f + UI) \right] \quad (4)$$

et on cherchera la valeur minimale de  $K/Q_p$  en traçant  $K/Q_p = F(Q_v)$  pour  $a = 1$  et  $a = 1.1$

## VI.2 ASPECT ÉCONOMIQUE

### VI 2.1.1 INFLUENCE DES CONDITIONS OPÉRATOIRES sur $K/Q_p$

Pour déterminer le coût optimal du procédé d'UF et de MF traitant de la bentonite avec une membrane TECH-SEP et une membrane CERAVÉR, nous avons tracé les courbes du coût  $K/Q_p$  en fonction de  $Q_v$  pour différentes pressions transmembranaires (fig (VI.1 et VI.2)

Il faut noter que toutes les courbes ne passent pas par un minimum quelle que soit la pression appliquée, mais d'après l'allure de ces courbes, le minimum ne doit pas se situer loin de 50 l/h.

Le minimum n'est pas observé pour les deux membranes utilisées puisque la variation des flux de perméat reste linéaire avec la pression.

Il faudrait donc effectuer des mesures jusqu'à une pression de 1.2 bars pour le CERAVÉR et supérieur à 1 bar pour la TECH-SEP, et ceci pour pouvoir faire une comparaison entre les optimums des courbes correspondant à chaque membrane, malheureusement l'installation utilisée ne permet pas, pour l'instant de l'envisager.

Influence du débit de recirculation sur le cout global de l'operation de l'ultrafiltration pour differents pressions transmembranaire

Membrane TECHSEP, Turbidite 26 NTU  
 pH=8, T = 24 °C

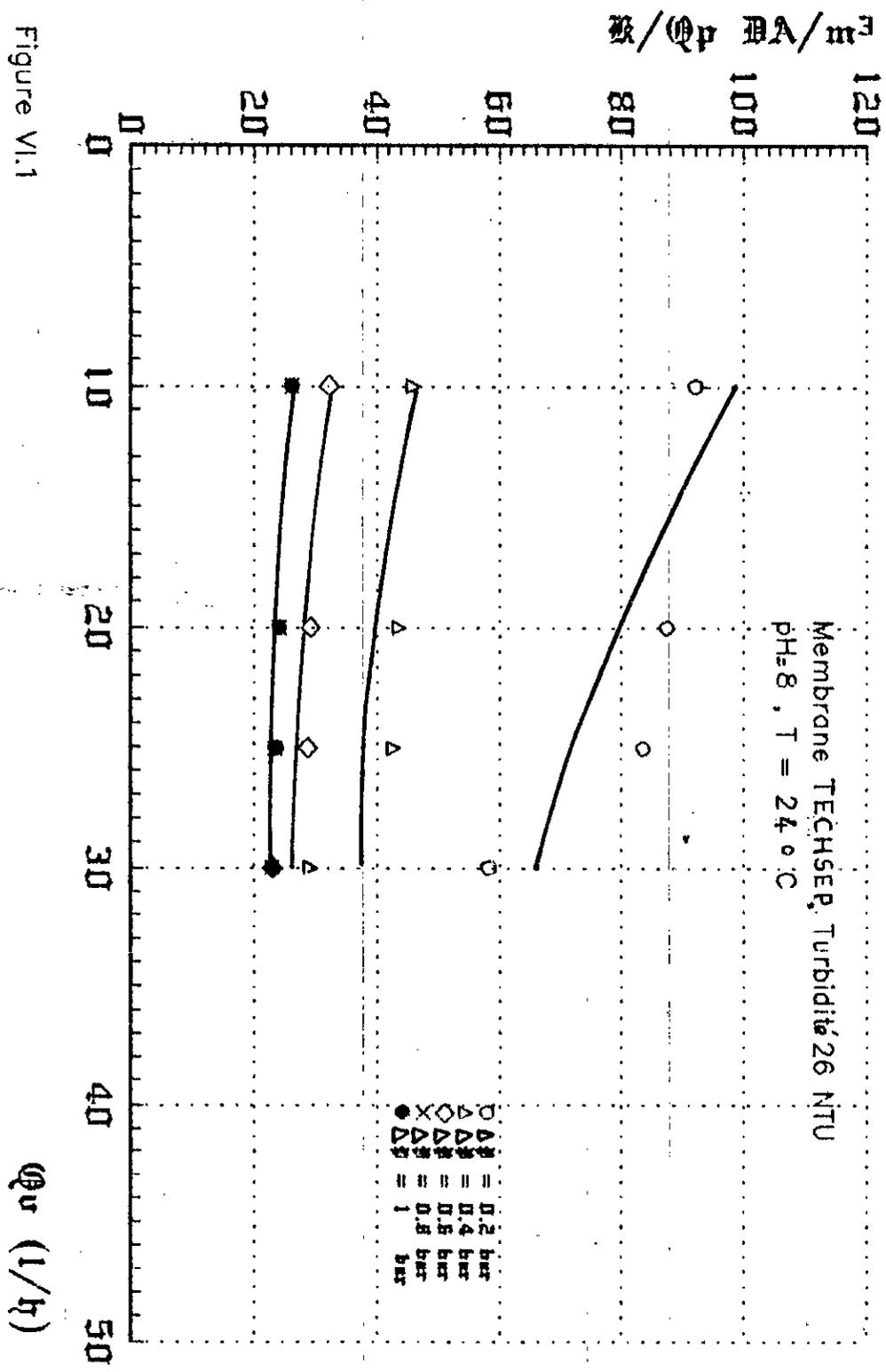


Figure VI.1

Influence du débit de recirculation sur le cout global de l'operation  
de microfiltration pour differentes pressions transmembranaires

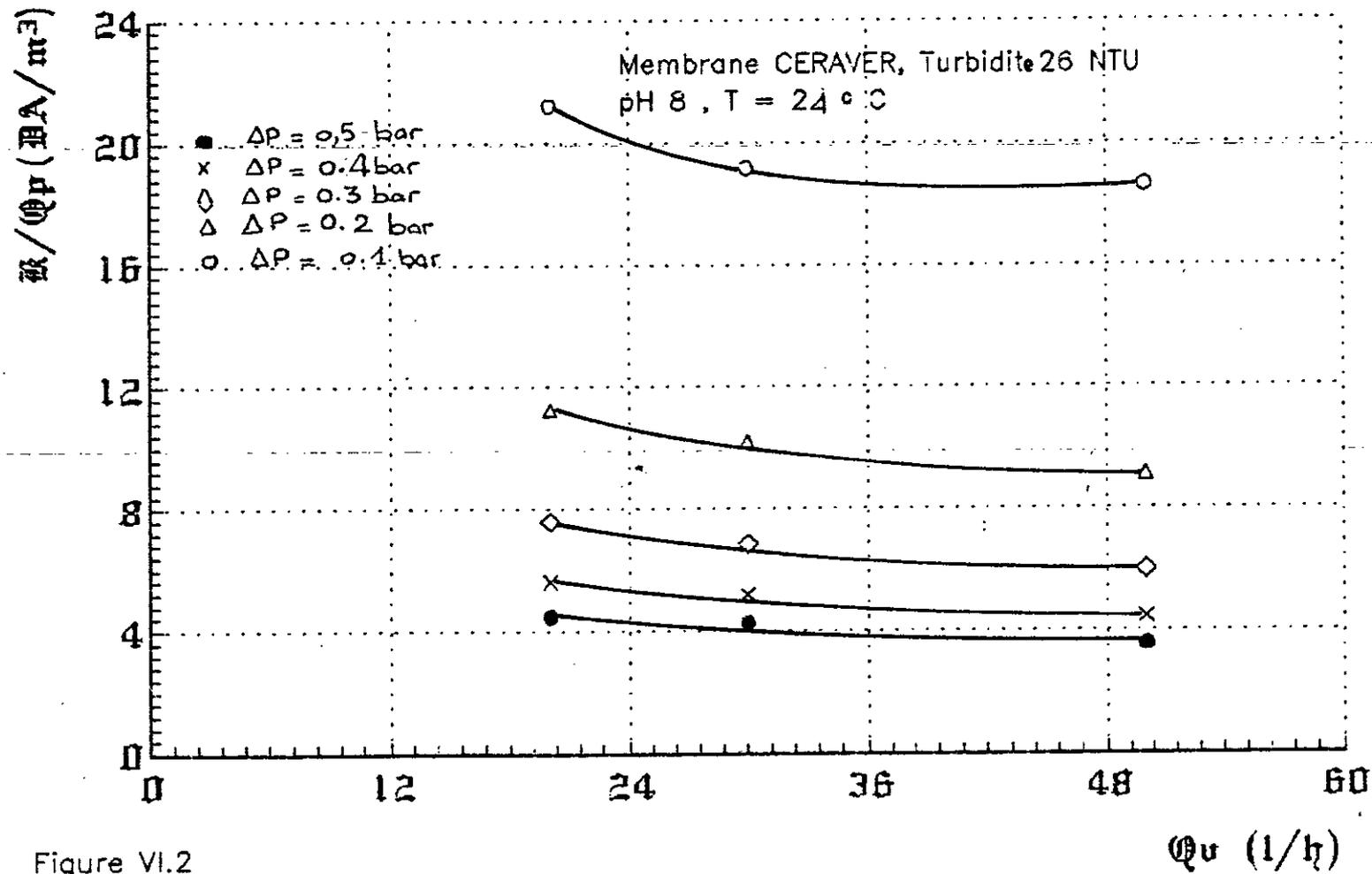


Figure VI.2

En faisant une comparaison sous une pression de 0.4 bar nous observons un écart important entre les valeurs de  $K/Q_p$  obtenues avec des membranes TECH-SEP et CERAVÉR fig (VI.3) . Cette différence est due au forte valeur de débit de perméat en microfiltration.

A titre d'exemple , le coût est plus faible obtenu sous les conditions opératoires en ultrafiltration  $\Delta P = 0.4$  bar ,  $Q_v = 30$  l/h est 5 fois plus élevée que celui obtenu en microfiltration (  $\Delta P = 0.6$  bar.  $Q_v = 30$  l/h).

On serait tenté donc de dire qu'il vaut mieux utiliser la membrane CERAVÉR que la membrane TECH-SEP pour filtration de solution de bentonite.

En fait , la comparaison s'effectue avec deux membranes de résistances différentes , et le problème sera donc posé différemment dans le cas où la comparaison s'effectuera selon les caractéristiques du perméat obtenu.

En plus , le coefficient  $K_c$  et le même pour les 2 membranes , alors aucune variation de  $K_c$  aura des conséquences significatives sur le coût du procédé.

#### VI.2.1.2 INFLUENCE DES COEFFICIENTS DU COUT SUR $K/Q_p$

Nous étudierons l'influence du  $K_c$  et de  $K_p$  sur  $K/Q_p$  sous des conditions hydrodynamiques fixes.

Nous fixons  $K_p$  à  $1.36 \cdot 10^{-7}$  Da/J et faisons varier  $K_c$  de (2.66 à  $3.5 \text{ DA/m}^2\text{s}) \cdot 10^{-4} \text{ DA/m}^2\text{s}$  pour les deux membranes fig (VI.4).

Nous voyons que le coût  $K/Q_p$  pour une membrane TECH-SEP reste toujours supérieure à celui d'une membrane CERAVÉR pour  $K_c > 0,5 \cdot 10^{-4}$

Nous fixons  $K_c$  à  $2.66 \cdot 10^{-4} \text{ DA/J}$  et faisons varier  $K_p$  de (1.36 à  $2) \cdot 10^{-7}$  fig ( VI.5)  
 $\text{DA/m}^2\text{s}$

Influence du débit de recirculation sur le rend global de l'opération  
de l'OS et AB pour  $\Delta P = 0.4$  bar

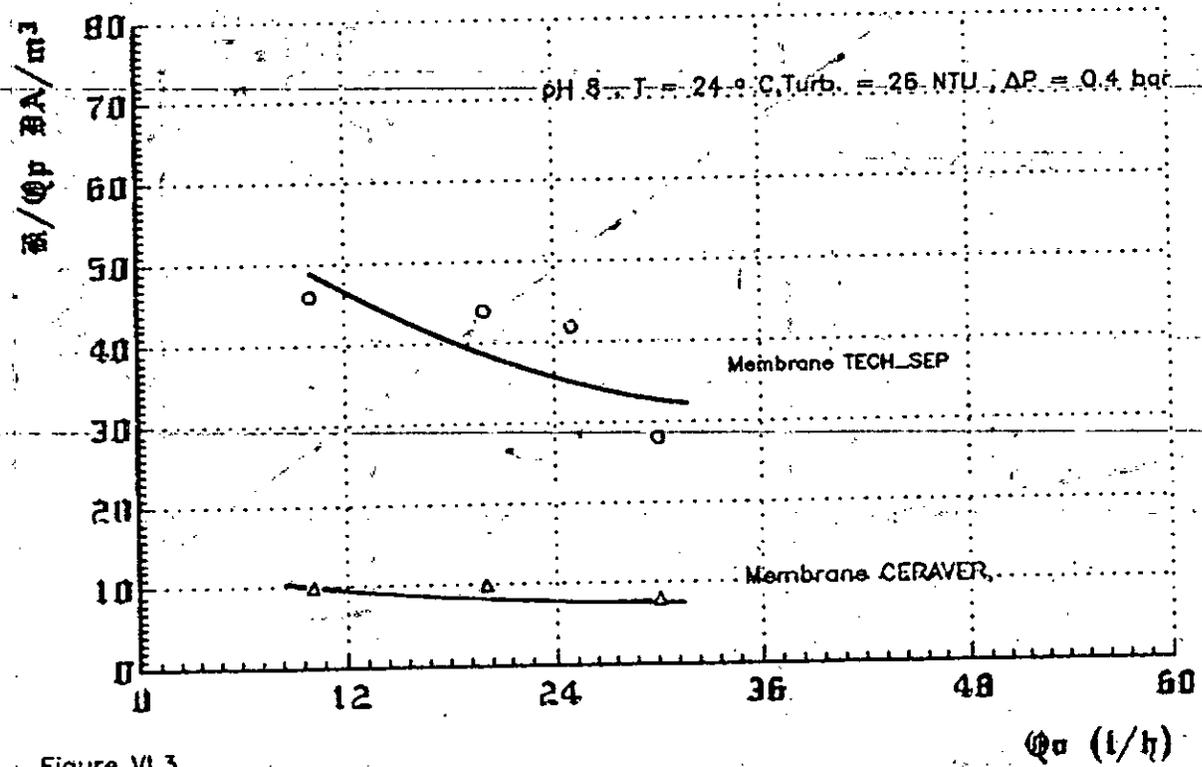


Figure VI.3

Les résultats des figures (VI.4 et VI.5) montrent bien que c'est l'influence du Coefficient  $K_s$  est prépondérante.

## VI.2.2 CAS D'UNE ELECTROMICROFILTRATION

### VI.2.2.1 INFLUENCE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR $K/Q_p$

Nous avons porté sur la figure (VI.6) le coût  $k/Q_p$  en fonction de débit de recirculation pour différentes valeurs du champ électrique. Les courbes présentés sur cette figure correspond au coût minimum obtenu à différentes pressions et pour chaque valeur du champ du champ électrique fig (VI.7) (VI.8)(VI.9)

Avec les valeurs de  $K_s$  et  $K_p$  retenues et pour  $a = 1$ , les coûts minima sont plus faibles avec des champs électrique  $E = 1000$  V/m.

Il faut cependant noter que l'écart entre le coût minima avec ou sans champ électrique augmentation avec le temps de microfiltration.

En effet le champ électrique peut permettre de limiter la couche de polarisation et donc de colmatage interne c'ad à l'intérieur du milieu poreux.

### VI.2.2. INFLUENCE DU COEFFICIENT " a " SUR $K/Q_p$

L'intérêt économique de l'utilisation du champ électrique dépendra du facteur "a".

La figure VI.10 montre une variation linéaire de  $K/Q_p$  en fonction de  $a$ , on constate aussi que le champ électrique  $E = 1000$  V/m est rentable pour la valeur de  $a < 1,2$ .

## VI.3. ETUDE COMPARATIVE DES EFFETS DE LA VITESSE ET DU CHAMP ELECTRIQUE:

Les résultats présentés dans le chapitre V, ont fait apparaître, qu'un champ électrique peut accroître la densité de flux de perméation au travers d'une membrane.

Variation du cout global en fonction du debit de recirculation  
a differents champs electriques

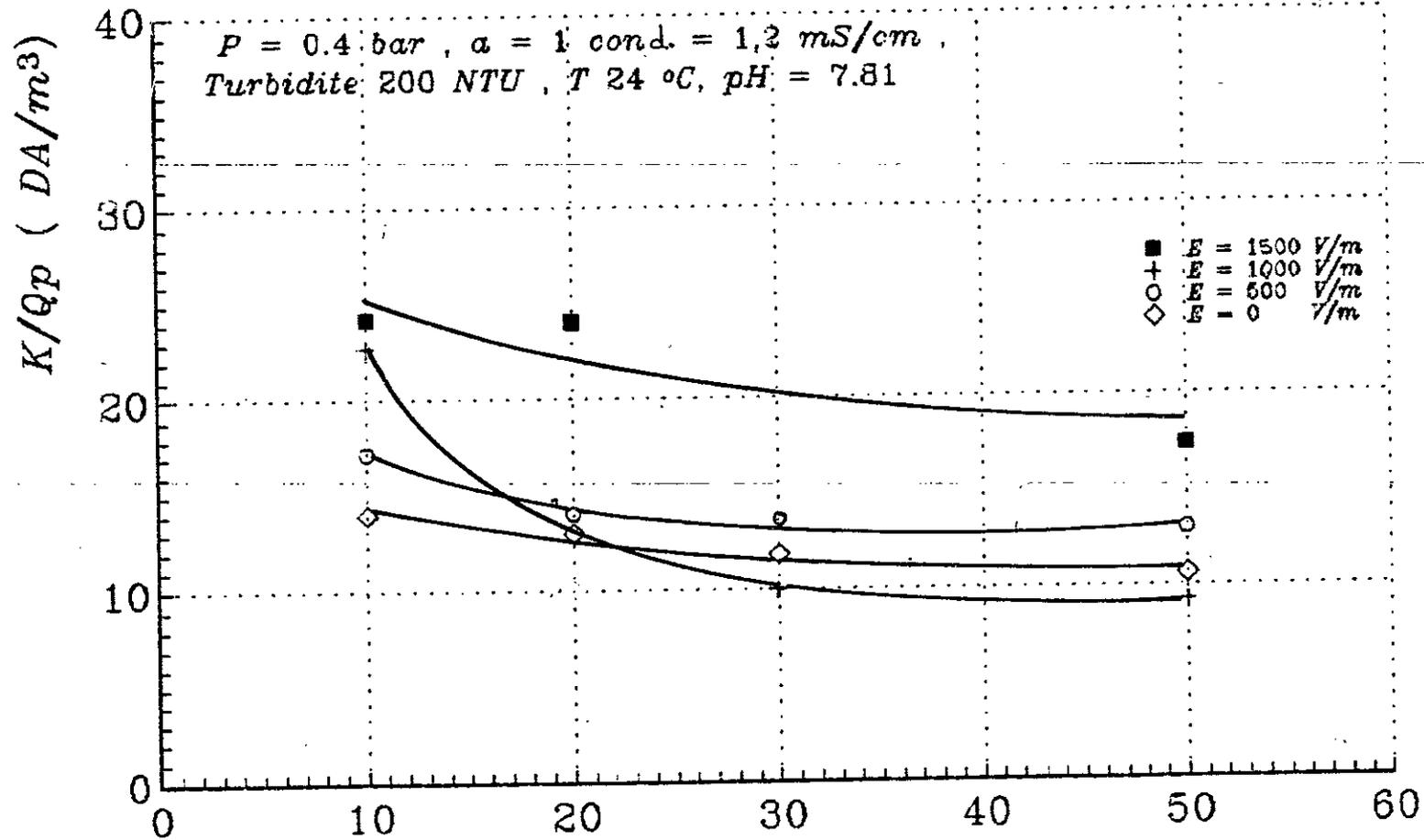


Figure VI.6

$Q_v$  (l/h)

Influence du debit de recirculation sur le cout global de l'operation de l'EMF  
 a differentes pressions transmembranaires a "a" = 1

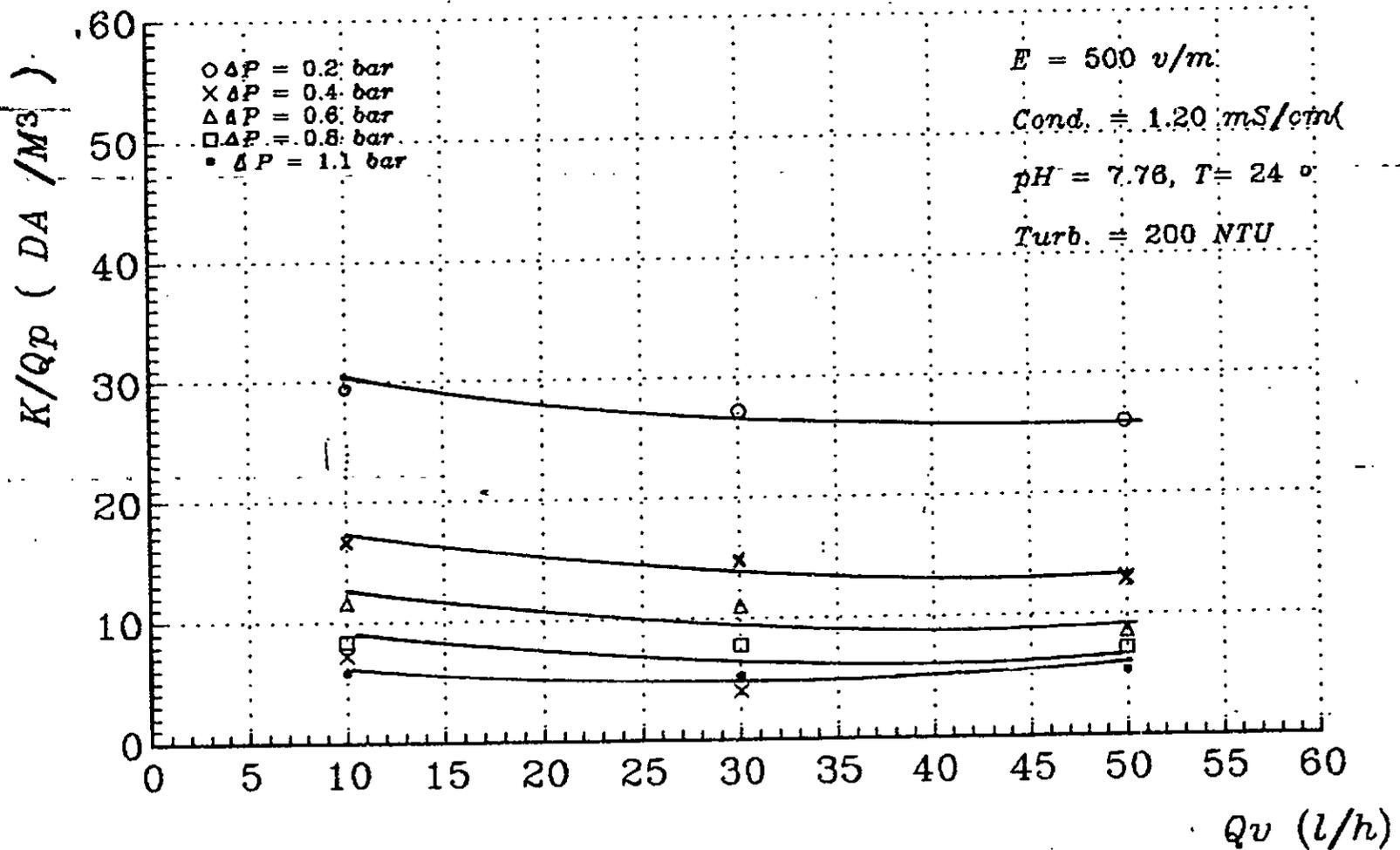


Figure VI. 7

Influence du debit de recirculation sur le cout global de l'operation de l'EMF

a differentes pressions transmembranaires a "α" = 1

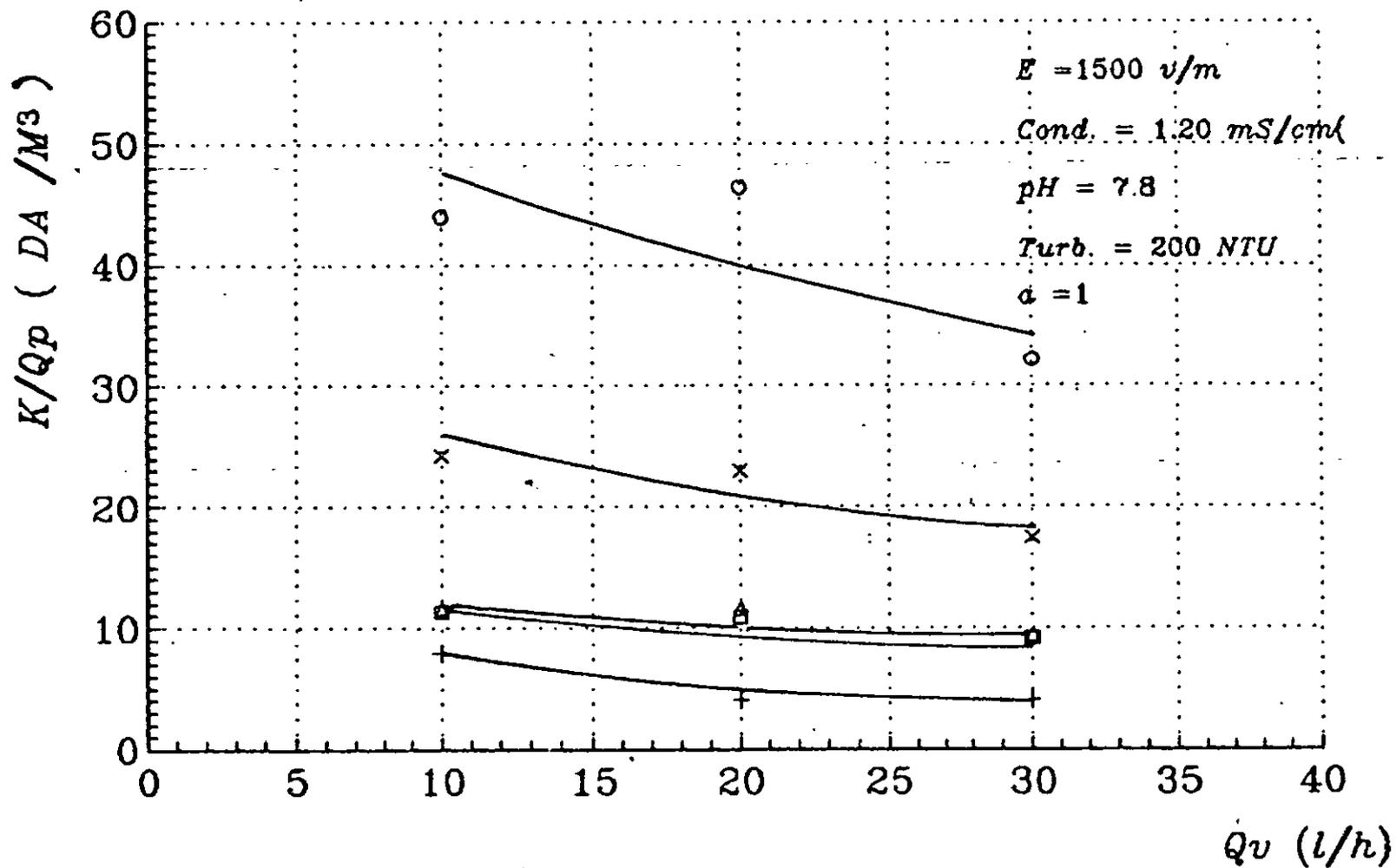


Figure VI. 9

Dans des conditions de forte polarisation , cette potentialité est accrue et l'utilisation d'un champ électrique peut venir suppléer l'emploi d'une vitesse élevée .

Dans le cas des solutés fragiles , il est difficile de concilier la présentation de la structure de ces solutés et l'obtention d'une densité de flux de perméation élevée .

Les deux critères pourront être respectés si l'on utilise un champ électrique plutôt qu'une vitesse de circulation élevée . Dans un cas général ,il est intéressant de pouvoir justifier du point de vue énergétique de l'utilisation d'un champ électrique.

#### Problématique :

Soit  $J_v$  , le débit de filtration que l'on souhaite atteindre. d'après ce qui précède , le débit peut être obtenu soit en augmentant la vitesse de circulation , soit en imposant un champ électrique continu lors de la microfiltration.

Soit  $\Delta P$  la pression choisie pour atteindre le but. Pour obtenir le débit de filtration  $J_{v0}$  , étant donné les conditions opératoire choisies, il est nécessaire en microfiltration d'imposer une vitesse tangentielle de circulation  $V$  telle que  $J_{vMF} = J_{v0}$

Ce même débit peut être obtenu en électro-microfiltration on surimposant un champ électrique  $E$ .

La vitesse tangentielle de circulation peut alors être ramenée à vitesse  $V'$  plus faible puisqu'une partie de polarisation est éliminée par migration.

Pour une même différence de pression transmembranaire en MF et EMF, on a :

\* puissance dissipée en MF  $P_{MF} = Q_v + \Delta P_r$

\* puissance dissipée en EMF

$$P_{EMF} = Q_v' DP_r' + UI$$

$$P_{EMF} = P_{mec} + P_{el}$$

ou  $P_{méc}$  est la puissance mécanique nécessaire pour assurer la circulation du fluide sous une pression  $\Delta P$ .

$P_{el}$  est la puissance électrique qui dépend des conductivités de la solution (concentrat plus perméat) de la mobilité des ions et de la distance séparant les deux électrodes.

$$P_{el} = \sum R_i \lambda^2 S^2 E^2 \quad (III.3)$$

## 2) APPLICATION AU CAS D'UNE MF D'UNE SOLUTION DE BENTONITE

Nous supposons que ce débit  $J_{vo}$  est obtenu dans les conditions optimales du champ électrique et de la pression transmembranaire de 1000 V/m et  $\Delta P = 1.1$  bar., avec une vitesse de recirculation  $V' = 0.36$  m/s.

A cette vitesse correspond une perte de charge de 526.84 Pa avec un débit de perméat  $J_{vo} = 0.31$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h.

Pour obtenir de débit de perméat  $J_{vo}$ , étant donné les conditions opératoires choisies, il est nécessaire en MF d'imposer une vitesse tangentielle  $V$  qui correspond au flux d'EMF. Cette vitesse pour ce débit de perméation est égale à 1.20 m/s et entraîne une perte de charge de 1998 Pa.

Nous trouvons  $P_{MF} = 0.09$  J/S (Watt)

$$P_{EMF} = 2 \quad \text{J/S (Watt)}$$

l'énergie requise par kg de perméat est

$$Q_{MF} = P_{MF} / (J_{vo} \cdot A) = 0.27 \text{ J/kg de perméat ( III.4)}$$

$$Q_{EMF} = P_{EMF} / (J_{vo} \cdot A) = 6.01 \text{ J/kg de perméat (III.5)}$$

Nous voyons que l'énergie dépensée en EMF est supérieure à celle dépensée en MF, malgré l'augmentation des pertes de charges.

## CONCLUSION

Une étude plus approfondie consistera à déterminer avec précision la valeur des coefficients de coût en capital et énergétique en présence et en absence de champ électrique.

Comme le champ électrique influe sur la couche de polarisation et par conséquent sur l'encrassement de la membrane, il serait souhaitable de faire fonctionner l'appareillage, pendant un temps assez important pour tester la durée de vie des membranes et de voir dans quelle mesure il est possible d'introduire de façon simple les électrodes dans la cellule de microfiltration.

Mais cette étude a permis de montrer que le champ électrique permet d'augmenter le flux de perméat et de diminuer ainsi de façon intéressante le coût du procédé à condition que la valeur de "a" soit raisonnable.

# Conclusion générale

Le travail effectué porte sur l'optimisation du procédé de microfiltration par application d'un champ électrique pour une solution de bentonite

Dans le chapitre (I), nous avons développé une synthèse bibliographique des différents modèles concernant les mécanismes de rétention des particules colloïdales dans le procédé de microfiltration et de ultrafiltration. Nous avons constaté qu'il n'existe pas de modèle général pour décrire le transfert de masse à travers la membrane du fait de la complexité des phénomènes intervenant au cours de l'ultrafiltration et de microfiltration.

Différents moyens ont été utilisés pour diminuer l'ampleur des phénomènes responsables de la diminution du flux tel que l'utilisation des promoteurs de turbulence.

Les avantages et les inconvénients de ces promoteurs de turbulence qui en découlent ont été présentés dans le chapitre (II)

Dans le chapitre (III), deux modèles d'électromicrofiltration ont été présentés, nous citons le mode des résistances et le mode de film.

La description de l'installation expérimentale, les conditions opératoires adaptées et les différentes cellules ont été présentées dans le chapitre (IV)

Dans le chapitre (V) et (VI), nous avons montré que le champ électrique améliore de façon significative le flux de perméat.

Toutefois cette amélioration s'accompagne d'une élévation des dépenses en énergie. L'étude économique a révélé que le champ optimum est atteint selon nos conditions opératoires, pour une valeur de 1000 V/m

L'énergie dépensée en MF est nettement inférieure en EMF pour une même vitesse de débit de perméat. La vitesse pourra donc venir concurrencer l'application du champ électrique dans le procédé de microfiltration "des solutions de Bentonite".

## ERRATUM

Page 47, 15 ~~ème~~ ligne

A la place de " sur l'état des conditions hydrodynamiques fixes " , il faut lire " sur l'état des membranes sous des conditions hydrodynamiques fixes" .

Page 52 14 ~~ème~~ ligne

Au lieu de lire " En passant de 10 l/h à 30 l/h le flux augmente sur le flux de perméat de 30 % " . il faut lire " En passant de 10 l/h à 30 l/h , le flux de perméat augmente de 30 % " .

Page 71 :

A la place de " Influence du pH en fonction du temps" il faut lire " Influence de la concentration en fonction du temps..."

Page 90 4 ~~ème~~ ligne

A la place de " Dans le cas de solutés fragiles , il est difficile de concilier la présentation de la structure..."

Il faut lire " Dans le cas des solutés fragiles , il est difficile de concilier la préservation de la structure".

Page 66 Les deux dernières lignes :

Il faut lire " Le champ électrique permet ainsi d'acidifier le concentrat ( pH 2 = pH 2.6 ) et une alcalinisation