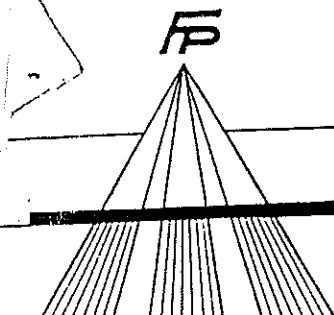




FILTRES PHILIPPE

SIÈGE SOCIAL : 111, BD HENRI BARBUSSE - 78800 HOUILLES FRANCE

B.P. 36 - 78800 HOUILLES
TELEPHONE : (11) 39.14.50.70 +
TELEX : 696332 F FILTRE HOUIL
TELEGR. : ALFILIPE HOUILLES

SOMMAIRE sur les facteurs susceptibles d'influencer le débit des filtres plans travaillant sous vide.

I) - FILTRES CONSIDERES

A. Filtres à bande de caoutchouc	(Filtres PHILIPPE)	- RB
B. Filtres à boîte à vide mobile	(Pannevis)	- RT
C. Filtres à boîte à vide fixe et toile à mouvement discontinu	(ADPEC-BHS)	- FBF
D. Filtres plans à table tournante	(UCEGO et similaires)	- FTT
E. Filtres rotatifs plans à cellules basculantes	(Prayon)	- FPCB

II) - RAPPEL THEORIQUE DES LOIS GENERALES DE LA FILTRATION

(Extrait de la filtration des liquides) voir Annexe A.

Ce rappel montre que pour une suspension donnée 3 paramètres principaux affectent la production d'un filtre.

- ΔP ou différence de pression appliquée sur le filtre.
- L'épaisseur du gâteau.
- Le temps de formation du gâteau ou le cycle total de filtration.

III) - INFLUENCE DE CHACUN DE CES FACTEURS SUR LES APPAREILS PRIS EN CONSIDERATION

III-1. ΔP

Nous admettons ici que les machines examinées ne présentent pas de vices de construction engendrant (pour une même bouillie et un matériau filtrant identique) des différences de pression notables et que les valeurs de vide requises pour assurer les performances désirées sont identiques.

Donc ΔP sans influence.

III-2. Epaisseur du gâteau

Ce paramètre influence directement la productivité d'un filtre.

Plus le gâteau est mince, plus un filtre débite.

(Un appareil fonctionnant avec un gâteau de 1 cm d'épaisseur débitera 2 fois plus qu'un appareil travaillant avec un gâteau de 2 cm).

III-3. Temps de formation du gâteau ou cycle de filtration

Plus le nombre de cycles accomplis par un filtre dans l'heure est grand et plus le débit du filtre est grand.

(Le débit est proportionnel à la racine carrée de la vitesse).

Ces 2 derniers paramètres nous démontrent que l'on doit rechercher l'appareil qui peut sans contraintes exceptionnelles nous permettre d'obtenir le plus grand nombre de cycles de filtration dans l'heure avec la possibilité de former à chaque cycle le gâteau offrant le moins de résistance à l'écoulement des fluides, donc le gâteau de la plus faible épaisseur compatible avec un enlèvement aisé.

IV) - PARTICULARITES DES FILTRES

IV-1. Filtres à bande de caoutchouc, RB

- Appareil travaillant sous n'importe quelle valeur de vide.
- Appareil à fonctionnement entièrement continu.
- Séparation aisée des filtrats dans la boîte à vide.
- Les fluides n'ont qu'une courte distance à parcourir dans les rainures de la bande pour atteindre la boîte à vide (4 à 2 m).
- Possibilité de travailler avec des cycles très courts (15 sec.) pour les filtres de petites dimensions, et courts, 60 sec. pour les filtres les plus grands jusqu'alors réalisés (120 m2).

- Déchargement aisé des gâteaux

Soit directement sur le tambour moteur pour les gâteaux épais (> à 50 mm) soit par l'intermédiaire d'un rouleau de rupture d'angle favorisant le décollement des gâteaux minces (3 mm).

L'usage de lames (PVC ou caoutchouc), fil, ou rouleau enleveur peut être envisagée selon les cas.

- Lavage de la toile filtrante

A convenance sur l'une ou l'autre face, ou les 2 en même temps.

Régénération par immersion dans un solvant également possible.

- Changement de toile filtrante

Le remplacement avec jonction par soudure ultrasonique ne nécessite qu'une paire d'heures même pour les filtres de grande dimension.

IV-2. Filtres à boîte à vide mobile, RT

- L'étanchéité rigoureuse des caissons permet de travailler aux vides les plus élevés possibles.
- Les opérations d'alimentation en pulpe, fluides laveurs de gâteau et déchargement du gâteau sont totalement continues.
- Séparation aisée des filtrats.
- Courte distance pour l'évacuation des fluides hors du filtre.
- De part l'inertie mécanique de l'ensemble mobile, les cycles de filtration très courts sont prohibés.
Vitesse de défilement maximum: 10 cm/sec.
Le cycle total de filtration doit être agrémenté du temps nécessaire (env. 4 sec.) aux caissons pour revenir en position de mise sous vide.
Taille des plus grands appareils: 60 m².
- Enlèvement du gâteau, lavage et remplacement de la toile identiques que pour le filtre RD.

IV-3. Filtres à boîte à vide fixe et à mouvement de toile discontinu - FBF

- Vide, idem que pour IV-2.
- Alimentation en pulpe et fluides laveurs de gâteau continue ou intermittente.
- Déchargement du gâteau discontinu.

- Séparation aisée des filtrats.
- Courte distance pour évacuation des fluides hors du filtre.
- Cycles courts prohibés.
L'avance de la toile est limitée à chaque fois à une longueur maximum de 75 cm et à une vitesse de 9 cm/sec., d'où nombre de cycles horaire plus faible que pour le filtre RT.
- Taille du plus grand filtre réalisé 20 m².
(à notre connaissance).
- Enlèvement du gâteau, lavage et remplacement de la toile comparables aux 2 filtres précédents.

IV-4. Filtre à table tournante - FTT

- Appareil travaillant sous n'importe quelle valeur de vide.
- Marche entièrement continue.
- Séparation aisée des filtrats pour les cycles lents et filtres de petites et moyennes dimensions.
- Séparation plus difficile sur les grands appareils car la distance d'évacuation des fluides s'accroît avec le rayon du filtre donc avec la dimension de la cellule, cet inconvénient est partiellement atténué par la mise en place de tuyauteries d'évacuation des fluides à forte pente (recherche de l'accroissement de vitesse des filtrats).
- Les cycles de filtration seront limités à des valeurs de l'ordre de 90 sec. pour les petits et moyennes dimensions (< à 50 m²) et à 120 sec. pour les grands appareils car ce type de filtre est limité en vitesse de rotation par plusieurs facteurs dont les principaux sont:
 - . Le risque de centrifuger la bouillie à traiter et les fluides de lavage gâteau.
 - . Le temps de parcours des filtrats entre les cellules et la boîte à vide.

Cette limitation de vitesse entraîne un allongement des phases de lavage et d'essorage de gâteau donc entraîne la mise en oeuvre d'une surface filtrante plus grande que le filtre RB par exemple.

- Enlèvement du gâteau

Se fait par vis d'Archimède. Cette vis (ou ces vis il y en a parfois 2) pouvant sans risque pour la toile filtrante être approchée à plus de 4 mm de cette dernière, il en résulte qu'un gâteau de l'équivalence de cette épaisseur reste sur la toile.

Conséquences:

- . Filtre inapplicable aux filtrations avec formation de gâteaux minces ($\leq$ à 10 mm).
- . Sans importance si l'épaisseur du gâteau est supérieure à 30 mm.
- . Nécessité selon les applications de compléter l'enlèvement par vis, par un dérochage à l'eau à l'aide de rampes munies de pulvérisateurs ce procédé entraîne une perte de productivité du filtre lorsque l'en doit recycler le produit en amont de l'unité.

- Lavage toile

Sur la face de filtration uniquement.

Dans certains cas ce mode de lavage est insuffisant et entraîne un colmatage de la toile donc une diminution de la productivité du filtre.

Ce dérochage laminaire a pour conséquence d'éroder rapidement les toiles filtrantes et l'immobilisation du filtre pour remplacement des toiles n'est pas à négliger dans le calcul de la productivité, car si l'opération est facilitée par l'existence de joints en caoutchouc elle n'en reste pas moins minutieuse car une toile mal fixée risque d'être arrachée par la ou les vis d'extraction gâteau.

IV-5. Filtres rotatifs plans à godets
(cellules) basculants - FPCB

- Appareil travaillant sous n'importe quelle valeur de vide.

- Marche entièrement continue.

- Séparation des filtrats

Mêmes observations que pour IV-4 mais aggravées par le fait qu'on ne peut mettre en place des tuyauteries d'évacuation des filtrats à forte pente à cause du basculement des cellules lors du déchargement du gâteau.

- Cycles de filtration

Mêmes observations que pour IV-4 mais le basculement des cellules ne pouvant être rapide (si non on impose à l'ensemble du filtre des contraintes mécaniques trop importante se traduisant par un accroissement des temps d'entretien) il s'ensuit une aggravation du temps de révolution du filtre.

Les limites inférieures de vitesse sont de l'ordre de 120 secondes pour les petits filtres ($S < 15 \text{ m}^2$) et de 450 secondes pour les tailles supérieures. Filtres jusqu'à 200 m^2 de surface.

- Enlèvement du gâteau

Par gravité (renversement de la cellule de filtration) complété quelques fois par un soufflage d'air à contre courant.

(Ces 2 moyens ne sont toutefois pas idéaux car il faut tenir compte de l'aptitude du gâteau à adhérer au médium filtrant.

- Lavage des toiles

Est possible sur les 2 faces mais l'arrosage sur le face interne nécessite l'emploi de cellules spéciales, équipées de rampes de pulvérisation et entraîne soit une réduction de la surface utile de filtration soit une augmentation de la surface totale à fournir.

- Changement de toile

Des améliorations récentes quant à la fixation des toiles ont été apportées par le constructeur, mais à ce jour nous n'en connaissons pas la teneur.

V) - PERFORMANCES DES FILTRES

Les particularités essentielles pouvant influencer sur la productivité des filtres ayant été énoncées précédemment nous allons tenter d'effectuer un choix.

V-1. Comparaison des 2 filtres rotatifs plans entre eux

De part sa vitesse de rotation plus lente, le FPGB est celui des deux qui produira le moins.

Une étude comparative entre ces 2 machines en production d'acide phosphorique a été faite par Mrs. Mouline et Alami Ha de l'O.C.P. (Maroc). Cette étude conclue que toute chose étant égale, la productivité de la table tournante par unité de surface est de 22% supérieure à celle du FPGB. Incontestablement le FTT l'emporte sur le FPGB.

V-2. Comparaison des 2 filtres à bande
RT et FBF entre eux

Liés aux temps morts occasionnés par, soit le retour des charriots dans un cas, soit l'avance de la toile dans l'autre cas, il résulte des études faites par les 2 constructeurs (voir Annexe B) qu'il faut installer une surface de 15 à 30% plus grande pour le filtre FBF pour filtrer à l'heure la même quantité de suspension. Ce qui revient à dire que la productivité par m² de S active FBF est moindre que celle du RT. Le faible développement des ventes du FBF ne peut que nous renforcer dans nos convictions.

V-3. Comparaison des 2 filtres RT et RB
entre eux

Pour toujours les mêmes raisons, vitesses de défilement de bande ou toile, temps morts, le filtre RT se trouve pénalisé par rapport au RB notamment lorsque les cycles de filtration sont courts.

La pénalité variant de 10 à 20%.

L'incidence est par contre négligeable pour les cycles longs et les 2 appareils rivalisent alors parfaitement.

Avantage au filtre RB.

V-4. Comparaison du filtre à table tournante
(FTT) avec le filtre à bande de
caoutchouc (RB)

Le filtre à bande qui est le plus rapide des deux et a fortiori de tous, nullement influencé par l'épaisseur de gâteau optimale à former, apte à décharger les gâteaux minces et, des deux appareils, celui qui encours le moins de risque de voir la toile se colmater dans le temps, est celui qui incontestablement offrira les meilleurs résultats du point de vue de la productivité.

De plus sa fiabilité n'étant plus à démontrer, il est l'appareil à marche continue qui ces dernières années a vu son volume de vente s'accroître considérablement et est de notre point de vue non seulement le filtre plan d'aujourd'hui mais également celui de demain.

...-O-...

CONFERENCE N° 15

**FILTRATION :
L'EXEMPLE INDUSTRIEL
DE LA THEORIE A LA PRATIQUE**

**Jean-Marie BLONDEL
Ingénieur ENSIC
Chef du Service Perfectionnement et Débouchés
au Centre d'Etude et de Recherche de la Société
SOLVAY - Dombasle**

1. INTRODUCTION

2. RAPPELS THEORIQUES

21. La filtration à pression constante

211. Loi générale

212. Regroupements de paramètres

2121. Pour l'exploitation de courbes de filtration en laboratoire

2122. Pour l'exploitation d'essais sur filtres pilotes

21221. Calcul du temps d'affleurement

21222. Regroupements de paramètres facilitant l'extrapolation des résultats - Notion de saturation

21223. Conclusions

22. Essorage du gâteau de filtration par drainage forcé à l'air

221. Notion de perméabilités relatives

2211. Position du problème

2212. Evolution des perméabilités relatives

222. Déshydratation du gâteau

2221. Temps de déshydratation

2222. Quantité d'air consommé pour atteindre une saturation donnée

223. Remarque

23. Le lavage des gâteaux de filtration

231. Les courbes de lavage

2311. Position du problème

2312. Modélisation des courbes de lavage

23121. Le lavage piston parfait

23122. Le lavage type réacteur parfaitement agité

23123. Autres modélisations des lavages

232. Temps nécessaire pour filtrer l'eau de lavage

2321. Position du problème

2322. Temps de filtration de l'eau de lavage

24. Conclusions

3. LES ESSAIS EN LABORATOIRE

31. But

32. Les essais de filtration

321. But

322. Mode opératoire

3221. Les cellules de filtration

3222. Installations expérimentales

32221. Filtration sous pression

32222. Filtration sous vide

3223. Mesures à réaliser

32231. Sur la suspension

32232. Sur le gâteau de filtration

32233. Sur le filtrat

32234. Sur l'installation

3224. Observations à réaliser

3225. Conseils de manipulation

323. Essais à réaliser

3231. Influence de la pression appliquée au gâteau

3232. Influence de l'alimentation du brouet

3233. Influence de la toile filtrante

3234. Influence d'une floculation préalable de la suspension à filtrer

324. Résultats

3241. Modélisation

3242. Quelques exemples

32421. Courbes de filtration

32422. Cas particulier : décantation du produit à filtrer

32423. Compressibilité du gâteau

33. Les essais de déshydratation par essorage à l'air

331. But

332. Mode opératoire

3321. Installation expérimentale

3322. Les mesures à réaliser

3323. Observations à réaliser

3324. Conseils de manipulation

333. Essais à réaliser

3331. Influence du temps d'essorage sur la teneur résiduelle en
liqueurs mères dans le gâteau

3332. Influence de la quantité d'air ayant traversé le gâteau sur la
teneur résiduelle en liqueurs mères dans le gâteau

3333. Influence de la pression appliquée au gâteau

3334. Influence de l'épaisseur du gâteau

3335. Influence du type d'alimentation du brouet

334. Résultats

3341. Modélisation

3342. Quelques exemples

34. Les essais de lavage

341. But

342. Mode opératoire

- 3421. Installation expérimentale
- 3422. Les mesures à réaliser
- 3423. Observations à réaliser
- 3424. Conseils de manipulation

343. Essais à réaliser

- 3431. Alimentation de l'eau de lavage sur vide ou hors vide
- 3432. Essorage du gâteau après lavage
- 3433. Etude du temps de filtration de l'eau de lavage
- 3434. Influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage
- 3435. Influence de la concentration en produit à filtrer dans l'eau de lavage
- 3436. Influence de l'épaisseur du gâteau
- 3437. Influence de la température de l'eau de lavage
- 3438. Influence de multiples lavages à la suite les uns des autres

344. Résultats

3441. Quelques exemples

- 34411. Courbes de lavage
- 34412. Influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage
- 34413. Etude de trois lavages en série

35. Extrapolation des résultats

351. Evaluation des différentes constantes Bl

- 3511. Caractéristiques du produit à filtrer
- 3512. Quantité d'eau de lavage nécessaire
- 3513. Détermination du paramètre Bl_a (point d'affleurement)
- 3514. Détermination du paramètre Bl_D^1 (essorage avant lavage)
- 3515. Détermination du paramètre Bl_L (lavage)
- 3516. Détermination du paramètre Bl_D^2 (essorage final)
- 3517. Détermination du paramètre Bl_G (fonctionnement global)

352. Calcul des filtres

- 3521. Répartitions relatives des différentes zones de fonctionnement
- 3522. Calcul de la durée des différentes opérations
- 3523. Productivité du filtre pilote
- 3524. Dimensionnement du filtre industriel

36. Conclusions

4. LES ESSAIS PILOTES

- 41. But
- 42. Les filtres pilotes

421. Installation pilote type

43. Les essais à réaliser

- 431. Les essais de filtration et d'essorage

3222. Installations expérimentales

- 32221. Filtration sous pression
- 32222. Filtration sous vide

3223. Mesures à réaliser

- 32231. Sur la suspension
- 32232. Sur le gâteau de filtration
- 32233. Sur le filtrat
- 32234. Sur l'installation

- 3224. Observations à réaliser
- 3225. Conseils de manipulation

323. Essais à réaliser

- 3231. Influence de la pression appliquée au gâteau
- 3232. Influence de l'alimentation du brouet
- 3233. Influence de la toile filtrante
- 3234. Influence d'une floculation préalable de la suspension à filtrer

324. Résultats

- 3241. Modélisation
- 3242. Quelques exemples

- 32421. Courbes de filtration
- 32422. Cas particulier : décantation du produit à filtrer
- 32423. Compressibilité du gâteau

33. Les essais de déshydratation par essorage à l'air

- 331. But
- 332. Mode opératoire

- 3321. Installation expérimentale
- 3322. Les mesures à réaliser
- 3323. Observations à réaliser
- 3324. Conseils de manipulation

333. Essais à réaliser

- 3331. Influence du temps d'essorage sur la teneur résiduelle en liqueurs mères dans le gâteau
- 3332. Influence de la quantité d'air ayant traversé le gâteau sur la teneur résiduelle en liqueurs mères dans le gâteau
- 3333. Influence de la pression appliquée au gâteau
- 3334. Influence de l'épaisseur du gâteau
- 3335. Influence du type d'alimentation du brouet

334. Résultats

- 3341. Modélisation
- 3342. Quelques exemples

34. Les essais de lavage

- 341. But
- 342. Mode opératoire

- 3421. Installation expérimentale
- 3422. Les mesures à réaliser
- 3423. Observations à réaliser
- 3424. Conseils de manipulation

343. Essais à réaliser

- 3431. Alimentation de l'eau de lavage sur vide ou hors vide
- 3432. Essorage du gâteau après lavage
- 3433. Etude du temps de filtration de l'eau de lavage
- 3434. Influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage
- 3435. Influence de la concentration en produit à filtrer dans l'eau de lavage
- 3436. Influence de l'épaisseur du gâteau
- 3437. Influence de la température de l'eau de lavage
- 3438. Influence de multiples lavages à la suite les uns des autres

344. Résultats

3441. Quelques exemples

- 34411. Courbes de lavage
- 34412. Influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage
- 34413. Etude de trois lavages en série

35. Extrapolation des résultats

351. Evaluation des différentes constantes Bl

- 3511. Caractéristiques du produit à filtrer
- 3512. Quantité d'eau de lavage nécessaire
- 3513. Détermination du paramètre Bl_a (point d'affleurement)
- 3514. Détermination du paramètre Bl_D^1 (essorage avant lavage)
- 3515. Détermination du paramètre Bl_L (lavage)
- 3516. Détermination du paramètre Bl_D^2 (essorage final)
- 3517. Détermination du paramètre Bl_G (fonctionnement global)

352. Calcul des filtres

- 3521. Répartitions relatives des différentes zones de fonctionnement
- 3522. Calcul de la durée des différentes opérations
- 3523. Productivité du filtre pilote
- 3524. Dimensionnement du filtre industriel

36. Conclusions

4. LES ESSAIS PILOTES

41. But

42. Les filtres pilotes

421. Installation pilote type

43. Les essais à réaliser

431. Les essais de filtration et d'essorage

- 4311. But
- 4312. Conduite des essais
- 4313. Essais à réaliser
- 4314. Conseils de manipulation

432. Les essais de lavage et d'essorage après lavage

- 4321. But
- 4322. Conduite des essais
- 4323. Essais à réaliser
- 4324. Conseils de manipulation

433. Les effets de bords

44. Les relevés à effectuer

- 441. Fonctionnement du filtre
- 442. Analyses à réaliser
- 443. Observations à réaliser

45. Résultats

- 451. Modélisations
- 452. Résultats

46. Extrapolation des résultats

47. Conclusions

5. LE FILTRE INDUSTRIEL

- 51. Choix du filtre
- 52. Mise au point du filtre industriel
- 53. Réglage du filtre

Nomenclature

1. INTRODUCTION

La filtration est certainement l'une des opérations unitaires du génie chimique qui demande le plus d'expérience et de savoir-faire. La Société SOLVAY et Cie a mis au point le filtre rotatif sous vide voici plus de 70 ans. C'est prouver que son savoir-faire est grand dans ce domaine. Malgré cela la filtration est toujours étudiée avec attention chez SOLVAY. Même des résultats acquis il y a longtemps sont remis en question. Faire refaire et comprendre sont les maîtres-mots employés pour mettre au point un filtre.

Bien que régie par des lois modélisant assez fidèlement les différentes phases qui la composent, la filtration doit être étudiée pratiquement le plus rapidement possible. Les essais sur cellule de laboratoire peuvent aider à une première modélisation du phénomène. Il est cependant fortement souhaitable de les compléter par des essais sur filtre pilote avant de chercher à extrapoler les résultats au dimensionnement d'un filtre industriel.

Cet exposé, basé sur une expérience de terrain de la filtration, tend à montrer comment un industriel peut être amené à lier théorie et pratique pour déboucher sur le dimensionnement d'un filtre industriel.

Plusieurs parties composent ce document :

- * Une première partie, théorique, visant à mettre en évidence des regroupements de paramètres aidant à l'extrapolation des résultats obtenus en laboratoire ou sur filtre pilote.
- * Une seconde partie abordant les essais en laboratoire. Elle est composée de nombreux conseils de manipulation, de listes de paramètres à relever, d'exemples de résultats obtenus et d'exemples d'extrapolations.
- * Une troisième partie basée sur le même schéma que la seconde partie mais concernant les essais sur filtre pilote.
- * Une quatrième partie donnant quelques conseils pour effectuer le suivi et la modélisation du fonctionnement d'un filtre industriel.

Ce document n'est pas exhaustif. Il est certainement perfectible mais il se veut une aide pour la personne qui envisage d'étudier pratiquement la filtration. Certaines questions posées, certains paramètres étudiés devraient éviter au futur filtreur des tâtonnements inutiles. Ainsi, par notre expérience, nous espérons l'aider à maîtriser une opération qui bien souvent s'avère être un art.

2. RAPPELS THEORIQUES

Le but de ce chapitre n'est pas de reprendre, dans son ensemble, la théorie de la filtration à pression constante, de l'essorage à l'air ou du lavage mais il vise à rappeler les relations les plus fondamentales et de mettre en évidence des regroupements de paramètres permettant de définir un dimensionnement de filtre industriel à partir de résultats expérimentaux.

21. LA FILTRATION A PRESSION CONSTANTE (D. LECLERC - P. LE LEC, 1981)

211. Loi générale

Lorsqu'on travaille avec une pression d'alimentation du brouet P_2 constante, l'équation générale de la filtration s'intègre sous la forme suivante :

$$t = \frac{\mu\alpha W}{2\Delta p A^2} V^2 + \frac{\mu R_m}{\Delta p A} V \quad (1)$$

avec t = temps de filtration
 μ = viscosité dynamique
 α = résistance spécifique du gâteau
 W = masse de gâteau déposée par unité de volume de filtrat
 V = volume de filtrat
 R_m = résistance de la membrane ou du support
 A = surface filtrante qui n'est pas toujours la surface du filtre
 $\Delta P = P_2 - P_0$ = perte de charge à travers le gâteau et le support
 P_0 = pression du liquide à la sortie de la membrane.

212. Regroupements de paramètres

2121. Pour l'exploitation de courbes de filtration

Une courbe de filtration est obtenue en mesurant le volume de filtrat écoulé en fonction du temps. C'est une opération facile à réaliser en laboratoire et qui peut déjà bien orienter le dimensionnement du filtre industriel ou éventuellement du filtre pilote (étape intermédiaire souvent judicieuse entre les essais de laboratoire et le dimensionnement du filtre industriel).

La relation (1) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\alpha W}{2\Delta p A^2} V + \frac{\mu R_m}{\Delta p A} \quad (2)$$

Ainsi, si l'on trace la courbe représentant $\frac{t}{V}$ en fonction de V , on obtient la droite représentée figure 1.

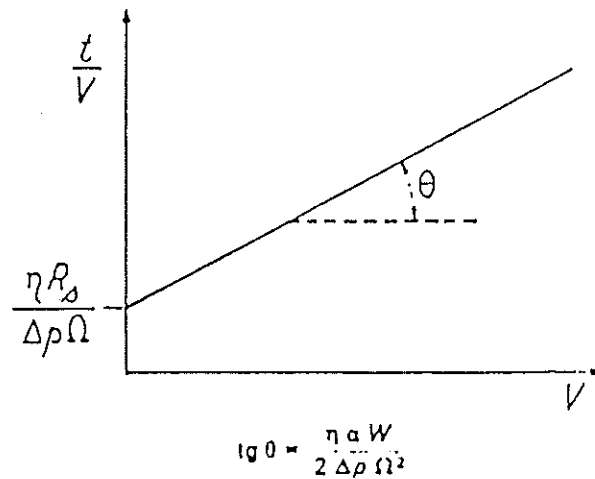


Figure 1. Filtration sous pression constante : expression des résultats par la relation (2).

La pente de cette droite est égale à :

$$\text{tg } \theta = \frac{\mu \alpha W}{2 \Delta p A^2} \quad (3)$$

Son origine est égale à :

$$- \frac{\mu R_m}{\Delta p A} \quad (4)$$

Le tracé expérimental de la courbe $\frac{t}{V}$ en fonction de V permet donc d'évaluer la résistance spécifique du gâteau α et la résistance du support R_s .

2122. Pour l'exploitation d'essais sur filtres pilotes

L'opération de filtration se termine au moment où les liqueurs mères affleurent la surface du gâteau de filtration. Passé cet instant, l'essorage à l'air intervient.

Quand les liqueurs mères affleurent le gâteau, on dit que l'on a atteint le point d'affleurement ou point de "pick up".

Le temps qui s'écoule entre le début de la filtration et le moment auquel les liqueurs mères affleurent la surface du gâteau sera appelé temps d'affleurement et sera noté: t_a . Il correspond à la durée effective de l'opération de filtration. Sa connaissance est fondamentale pour calculer un filtre.

Passé le point d'affleurement, l'essorage à l'air intervient.

L'approche théorique développée dans ce chapitre est basée sur le calcul du temps d'affleurement. Elle ne peut donc s'appliquer qu'à la modélisation de résultats expérimentaux provenant de filtres dont il est possible de connaître la valeur expérimentale de t_a (par mesure ou par calculs). Les filtres à bandes ou rotatifs sous vide sont ainsi plus particulièrement concernés pour cette étude.

Au point d'affleurement, le gâteau a tous ses pores remplis de liqueurs mères. Aucune suspension ne surnage à la surface du gâteau. Exprimons cette condition en posant les conditions suivantes :

* Hypothèse : le filtrat est exempt de matières en suspension.

* Notations :

- avant filtration, la suspension a les caractéristiques suivantes :

SU : masse de suspension

M_s : masse de solide dans la suspension

L_s : masse de liquide dans la suspension

s_i : teneur massique de la suspension en matières solides :

$$s_i = \frac{M_s}{M_s + L_s} \quad (5)$$

- le filtrat a les caractéristiques suivantes :

V : volume de filtrat

V_a : volume de filtrat au point d'affleurement

L_f : masse de liquide dans le filtrat

M_f : masse de solide dans le filtrat

- le gâteau a les caractéristiques suivantes :

M : masse de gâteau sec

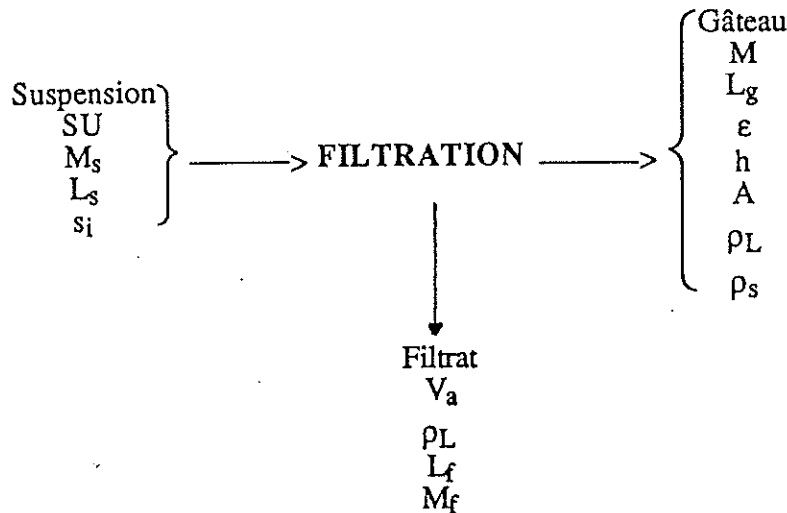
L_g : masse de liquide dans le gâteau

ϵ : porosité

h : épaisseur du gâteau

A : surface filtrante

* Bilans : l'opération de filtration peut se schématiser ainsi :



Masse de liquide dans la suspension :

$$L_s = M_s \left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) \quad (\text{tirée de (5)}) \quad (6)$$

Masse de liquide dans le filtrat :

$$L_f = V_a \rho_L \text{ au point d'affleurement} \quad (7)$$

Masse de solide dans le filtrat :

$$M_f = 0 \text{ (hypothèses)} \quad (8)$$

Masse de liquide dans le gâteau :

$$L_g = \varepsilon A h \rho_L \quad (9)$$

Masse de solide dans le gâteau :

$$M = (1-\varepsilon) A h \rho_s \quad (10)$$

Bilan sur le liquide :

$$L_f = L_s - L_g \quad (11)$$

Bilan sur le solide :

$$M = M_s \quad (12)$$

(6), (10) et (12) donnent :

$$L_s = (1-\varepsilon) A h \rho_s \left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) \quad (13)$$

(7), (9), (11) et (13) donnent :

$$V_a = A h \left[(1-\varepsilon) \left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) \rho_s - \varepsilon \right] \quad (14)$$

* Calcul du temps d'affleurement :

Pour cela revenons à l'équation (5) valable si la résistance spécifique du support est négligeable :

$$t \approx \frac{\mu \alpha W}{2 \Delta p A^2} V^2 \quad (5)$$

Dans cette relation : $W = \frac{M}{V_a}$ (15)

$$\alpha = \frac{36 h K (1-\varepsilon)}{d_g^2 \varepsilon^3 \rho_s} \quad (16)$$

avec hK = constante de Kozeny
 ε = porosité du gâteau
 d_g = diamètre de grain
 ρ_s = masse volumique du solide.

En associant (14), (15) et (16) à (5), nous obtenons finalement :

$$t_a = \frac{18\mu h K (1-\epsilon)^3 h^2}{\Delta p d_g^2 \epsilon^3} \left[\left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) \frac{\rho_s}{\rho_L} - \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon} \right) \right] \quad (17)$$

*21222. Regroupements de paramètres facilitant l'extrapolation
des résultats - Notion de saturation*

L'équation (17) peut également s'écrire :

$$\frac{t_a \Delta p d_g^2}{\mu h^2} = \frac{18 h K (1-\epsilon)^3}{\epsilon^3} \left[\left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) \frac{\rho_s}{\rho_L} - \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon} \right) \right] \quad (18)$$

Or le groupement de paramètres $\frac{t_a \Delta p d_g^2}{\mu h^2}$ est adimensionnel; nous l'appellerons :

$$Bl = \frac{t \Delta p d_g^2}{\mu h^2} \quad (19)$$

et plus particulièrement au point d'affleurement :

$$Bl_a = \frac{t_a \Delta p d_g^2}{\mu h^2} \quad (20)$$

Notion de saturation et d'humidité :

La saturation en un fluide est le rapport entre le volume de ce fluide contenu dans le milieu poreux et le volume des pores. Elle s'exprime par exemple dans le cas d'un liquide en écoulement dans un milieu poreux :

$$S = \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{\rho_s}{\rho_L} \frac{H}{1-H} \quad (21)$$

où ϵ est la porosité du lit, ρ_s la masse volumique du solide, ρ_l la masse volumique du liquide. L'humidité H est la masse d'eau retenue par rapport à la masse totale (masse de liquide + masse de solide sec).

$$H = \frac{L_g}{M + L_g} \quad (22)$$

Par définition, au temps t_a , S est égal à 1

$$t = t_a \iff S = 1 \quad (23)$$

d'où si nous posons H_a = humidité au point d'affleurement :

$$\frac{H_a}{1-H_a} = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \frac{\rho_L}{\rho_s} \quad (24)$$

qui introduit dans (18) donne :

$$Bl_a = \frac{t_a \Delta P_d^2}{\mu h^2} = \frac{18hK(1-H_a)^3 \rho_L^2}{H_a^3 \rho_s^2} \left[\left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) - \left(\frac{H_a}{1-H_a} \right) \right] \quad (25)$$

21223. Conclusions

Ce paragraphe a permis de mettre en évidence qu'au moment où les liqueurs mères affleurent la surface du gâteau :

- * l'opération de filtration s'arrête au profit de l'essorage du gâteau,
- * l'intervalle de temps t_a compris entre le début de la filtration et le moment où les liqueurs mères affleurent la surface du gâteau peut être considéré comme étant le temps effectif de filtration. Il est souvent facile à déterminer expérimentalement.
- * au temps de filtration t_a correspond un groupement adimensionnel de variables de mesures faciles Bl_a . Ce groupement dépend d'une relation faisant intervenir l'humidité du gâteau comme seule variable.
- * au temps t_a , la saturation du gâteau est égale à 1.

22. ESSORAGE DU GATEAU DE FILTRATION PAR DRAINAGE FORCE A L'AIR

Ce chapitre n'abordera pas en détail la théorie de la déshydratation de gâteaux de filtration par drainage forcé à l'air. La théorie développée ici est une théorie simplifiée qui a cependant donné des corrélations satisfaisantes avec des résultats expérimentaux.

Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter l'ouvrage de M. Baluais

221. Notion de perméabilités relatives

2211. Position du problème

Lors de la déshydratation du gâteau de filtration, le fluide non mouillant (n) constitué par l'air expulse une partie du fluide mouillant (m) qui imprègne le gâteau. Il se produit un écoulement diphasique de deux fluides non miscibles.

Au cours de l'opération de déshydratation, le gâteau voit ses perméabilités à l'air et au liquide d'imprégnation évoluer. Les vitesses superficielles u_m et u_n respectivement du fluide mouillant et du fluide non mouillant sont, d'après DARCY :

$$u_m = \frac{q_m}{A_D} = - \frac{K_m}{\mu_m} \frac{dP_m}{dh} \quad (26)$$

$$u_n = \frac{q_n}{A_D} = - \frac{K_n}{\mu_n} \frac{dP_n}{dh} \quad (27)$$

avec q_m = débit de fluide mouillant
 q_n = débit de fluide non mouillant
 A_D = surface du filtre employée à la déshydratation
 K_m = perméabilité effective au fluide mouillant
 K_n = perméabilité effective au fluide non mouillant
 μ_m = viscosité du fluide mouillant
 μ_n = viscosité du fluide non mouillant.

Lors de la déshydratation, K_m et K_n évoluent au cours du temps. On notera u_{m1} la vitesse du fluide mouillant à travers le gâteau à une saturation de 1 et u_{n0} la vitesse du fluide non mouillant à travers le gâteau à une saturation de 0.

Ainsi on peut définir les perméabilités relatives suivantes :

$$\text{Fluide mouillant : } k_m = \frac{u_m}{u_{m1}} \quad (28)$$

$$\text{Fluide non mouillant : } k_n = \frac{u_n}{u_{n0}} \quad (29)$$

Or la valeur de la perméabilité monophasique K ne dépend pas des caractéristiques du fluide. K_m et K_n peuvent alors s'écrire :

$$k_m = \frac{K_m}{K} \quad (30)$$

$$k_n = \frac{K_n}{K} \quad (31)$$

2212. Evolution des perméabilités relatives

L'expérience montre que les perméabilités relatives varient avec la saturation. Différents modèles ont été proposés pour représenter ces variations. Nous retiendrons les modèles simplifiés suivants

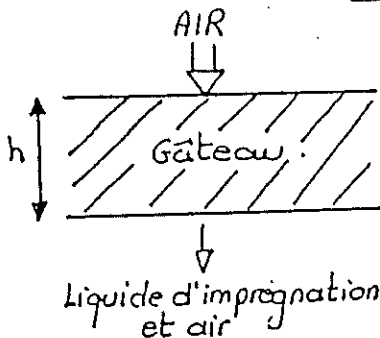
$$k_m = \left(\frac{S - S_\infty}{1 - S_\infty} \right)^n \quad (32)$$

$$k_n = \frac{1 - S}{1 - S_\infty} \quad (33)$$

avec S_∞ = saturation résiduelle après un essorage infini.

222. Déshydratation du gâteau

2221. Temps de déshydratation



Lors de la déshydratation, l'air pénètre dans le gâteau et ressort mélangé au liquide d'impregnation qu'il a chassé. La saturation S du gâteau (que l'on supposera uniformément répartie) évolue donc au cours du temps.

Si on considère que la perte de charge à travers le gâteau est uniforme, on peut écrire les bilans suivants :

Quantité de liquide retenu dans le gâteau :

$$V_{LG} = ehA_D S \quad (34)$$

Bilan de matière en cours de déshydratation : posons u_m = vitesse en fût vide du liquide mouillant sortant du gâteau. Comme aucun liquide n'est introduit dans le gâteau, le bilan s'écrit :

$$u_m A_D dt + d(\epsilon h A_D S) = 0 \quad (35)$$

$$\text{d'où} \quad u_m = - \epsilon h \frac{dS}{dt} \quad (36)$$

$$\text{or} \quad u_m = - \frac{K_m \Delta P}{\mu_m h} \quad (37)$$

car on suppose que $\Delta P = \text{cste}$; d'autre part :

$$K_m = K k_m \quad \text{tiré de (30)} \quad (38)$$

$$\text{et } k_m = \left(\frac{S - S_\infty}{1 - S_\infty} \right)^n \quad (32)$$

$$\text{On obtient alors : } u_m = \frac{K \Delta P}{h \mu_m} \left(\frac{S - S_\infty}{1 - S_\infty} \right)^n \quad (39)$$

qui, égalée à (36) donne :

$$dt = - \frac{\epsilon h^2 \mu_m}{K \Delta P} \left(\frac{1 - S_\infty}{S - S_\infty} \right)^n dS \quad (40)$$

$$\text{Or :} \quad k = \frac{d_g^2 \epsilon^3}{36 h k (1 - \epsilon)^2} \quad \text{loi de Kozeny-Carman} \quad (41)$$

$$\text{d'où :} \quad dt = \frac{36 h^2 \mu_m h k (1 - \epsilon)^2}{d_g^2 \epsilon^2 \Delta P} \left(\frac{1 - S_\infty}{S - S_\infty} \right)^n dS \quad (42)$$

Finalement, on peut écrire :

$$\text{temps de déshydratation : } t_D = \frac{36 h^2 \mu_m h k (1 - \epsilon)^2}{d_g^2 \epsilon^2 \Delta P} \int_{S=1}^{S=S_t} \left(\frac{1 - S_\infty}{S - S_\infty} \right)^n dS \quad (43)$$

avec S_t = saturation du gâteau au temps t_D .

Cette relation peut se mettre sous une forme identique à l'équation (25) démontrée en filtration :

$$\Rightarrow \frac{t_D d_g^2 \Delta P}{\mu_m h^2} = \frac{36 h k (1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \int_{S=1}^{S=S_t} \left(\frac{1 - S_\infty}{S - S_\infty} \right)^n dS \quad (44)$$

Comme lors de la filtration, le groupement de paramètres $\frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu_m h^2}$ est adimensionnel.

Nous l'appellerons :

$$Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu_m h^2} = \frac{36hk(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \int_{S=1}^{S=S_t} \left(\frac{1-S_\infty}{S-S_\infty} \right)^n dS \quad (45)$$

Après intégration, (45) donne :

$$n=1 : Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu_m h^2} = \frac{36hk(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} (1-S_\infty) \ln \left(\frac{S_t - S_\infty}{1 - S_\infty} \right) \quad (46)$$

$$n \neq 1 : Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu_m h^2} = \frac{36hk(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{(1-S_\infty)^n}{(n-1)} \left[\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-1}} \right] \quad (47)$$

Rappelons que S_t dépend directement de H (humidité dans le gâteau) suivant la relation :

$$S = \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{\rho_s}{\rho_L} \frac{H}{1-H} \quad (21)$$

et que
$$H = \frac{L_g}{M + L_g} \quad (22)$$

Commentaires

- Comme pour la filtration, nous venons de mettre en évidence le paramètre adimensionnel Bl_D dépendant des mêmes variables que Bl_a (relation (20)).

- Dans les modèles mathématiques (46) et (47) représentant l'opération d'essorage à l'air, Bl_D est, comme pour la filtration, fonction d'une seule variable : la saturation dans le gâteau, directement en lien avec l'humidité retenue dans le gâteau par la relation (21).

- Bl_D dépend des paramètres h , ΔP , d_g facilement mesurables. Bl_D est fonction de la saturation dans le gâteau, autre paramètre facilement mesurable. Possédant des résultats expérimentaux regroupant : h , ΔP , d_g , S , il est possible de les modéliser en optimisant la valeur de n dans la relation (47).

- Le paramètre n est fonction du produit étudié et plus particulièrement de sa granulométrie.

- Tous ces commentaires sont valables si la porosité n'évolue pas avec la pression ou le d_g du produit essoré. Dans le cas contraire, Bl_D est fonction de deux variables: ϵ et S qu'il faut déterminer à chaque essai. Le principe de la modélisation reste alors identique.

2222. Quantité d'air consommé pour atteindre une saturation donnée

La vitesse en fût vide de l'air traversant le gâteau s'écrit :

$$u_n = - \frac{K_n}{\mu_n} \frac{dP_n}{dh} \quad (27)$$

en supposant que $\frac{dP_n}{dh} = \frac{\Delta P}{h} = \text{cste}$ et en tenant compte des relations (27) et (33), on peut écrire :

$$u_n = K \frac{\Delta P}{h} \frac{1}{\mu_n} \frac{1-S}{1-S_\infty} \quad (48)$$

Le débit d'air traversant le gâteau Q_n peut s'écrire :

$$Q_n = \int_0^{t_D} u_n A_D dt \quad (49)$$

qui, associée à (40) et (48) devient :

$$Q_n = - A_D h \varepsilon \frac{\mu_m}{\mu_n} (1-S_\infty)^{n-1} \int_{S=1}^{S=S_t} \frac{(1-S)}{(S-S_\infty)^n} dS \quad (50)$$

Il est pratique d'exprimer le débit d'air traversant le gâteau en le rapportant à la quantité de matières sèches essorées.

Posons :
$$\overline{Q_n} = \frac{Q_n}{A_D L (1-\varepsilon) \rho_s} \quad (51)$$

En tenant compte de (51), l'équation (50) peut s'intégrer sous les formes :

$$n=1 \quad \overline{Q_n} = - \frac{\varepsilon \mu_m}{(1-\varepsilon) \mu_n \rho_s} \cdot \left[(1-S_\infty) \ln \left(\frac{S_t - S_\infty}{1-S_\infty} \right) - (S_t - 1) \right] \quad (52)$$

$$n=2 \quad \overline{Q_n} = \frac{\varepsilon \mu_m (1-S_\infty)}{(1-\varepsilon) \mu_n \rho_s} \left[\frac{1-S_t}{S_t - S_\infty} + \ln \left(\frac{S_t - S_\infty}{1-S_\infty} \right) \right] \quad (53)$$

$n \neq 1$ et $n \neq 2$:

$$\overline{Q_n} = \frac{\varepsilon \mu_m (1-S_\infty)^{n-1}}{(1-\varepsilon) \mu_n \rho_s} \left[\frac{1}{n-1} \left\{ \frac{1-S_t}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{n-2} \left(\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-2}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-2}} \right) \right\} \right] \quad (54)$$

Commentaires

- Il est important de noter que le débit d'air nécessaire pour atteindre une saturation donnée est indépendant de ΔP et de d_g . d_g est indirectement pris en compte dans la relation puisque n en dépend.

- Les relations (52) à (54) obtenues vont permettre de modéliser les résultats expérimentaux en optimisant le paramètre n .

223. Remarque

Les lois représentant l'évolution de la perméabilité relative du fluide non mouillant et du fluide mouillant en fonction de la saturation résiduelle (32) et (33) peuvent être contestées. D'autres relations plus ou moins sophistiquées pourront alors être proposées. Il est fort probable que toutes relieront ces perméabilités à la saturation résiduelle et donc à l'humidité contenue dans le gâteau. C'est cela le point important, car dans ce cas, il sera

toujours possible de lier directement le groupement de paramètres $Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu h^2}$ à

l'humidité du gâteau. Nous verrons par la suite que cela permettra d'extrapoler les résultats expérimentaux à un dimensionnement de filtre industriel.

23. LE LAVAGE DES GATEAUX DE FILTRATION

Le but du lavage sur filtre est d'extraire une fraction aussi importante que possible du soluté contenu dans les liqueurs mères qui imprègnent le gâteau, en fin de filtration.

L'essorage du gâteau, abordé au chapitre précédent, contribue de façon indirecte à l'élimination du soluté. Il est fréquent de rencontrer des cycles de filtration où l'essorage est pratiqué non seulement après mais également avant le lavage. Il est donc important, pour l'étude du lavage, de connaître l'état initial du gâteau.

La consommation de liquide de lavage a souvent une importance capitale.

Ce chapitre n'abordera pas la théorie de la filtration. Seules quelques exemples de courbes de lavage seront rappelés. Le but essentiel de ce chapitre est d'introduire les notations et les représentations graphiques utiles pour exploiter les résultats d'essais de lavage.

Le calcul du temps nécessaire pour filtrer l'eau de lavage sera également développé.

231. Les courbes de lavage

2311. Position du problème

Le lavage consiste à chasser une fraction importante du soluté contenu dans les liqueurs mères qui imprègnent le gâteau, à l'aide d'une eau de lavage de concentration en soluté plus réduite.

Cette opération peut se schématiser comme ci-dessous :

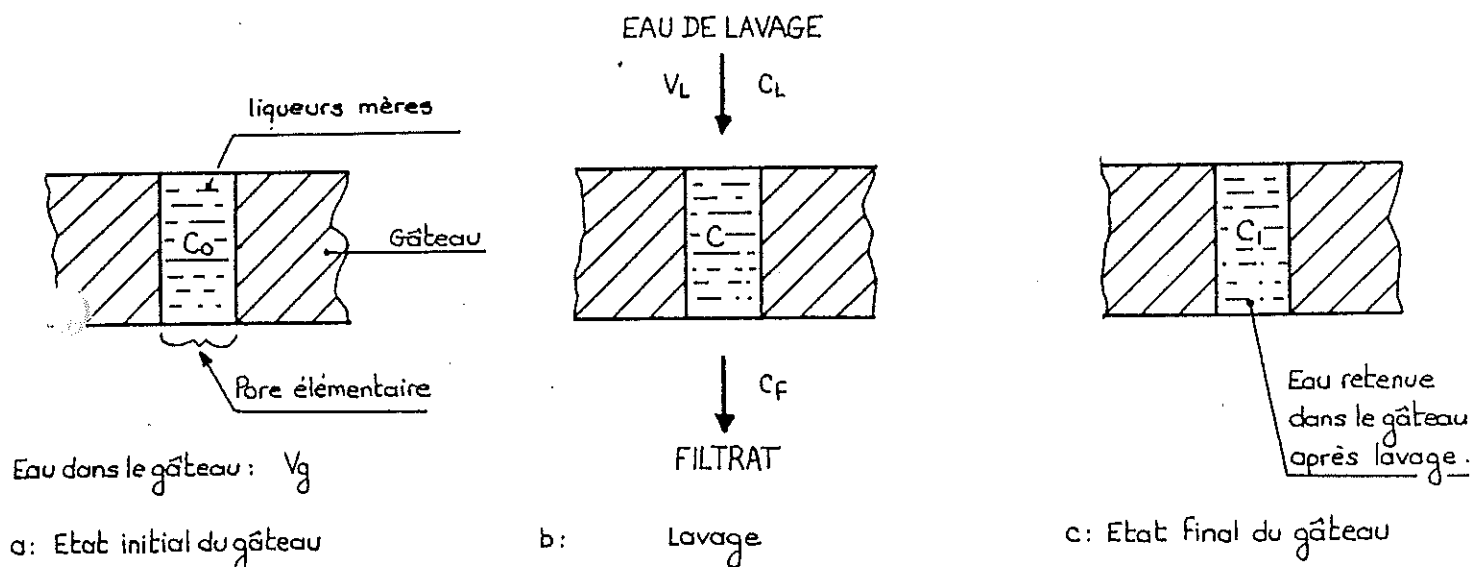


Figure 2 : Schéma de principe du lavage du gâteau.

Dans la suite de ce paragraphe, nous appellerons eau les liquides étudiés même si ce ne sont pas des solutions aqueuses.

Posons : C_0 = concentration en soluté dans les eaux retenues dans le gâteau avant lavage
 C_1 = concentration en soluté dans les eaux retenues dans le gâteau après lavage

C = concentration en soluté dans les eaux retenues dans le gâteau lors du lavage
 C_L = concentration en soluté dans l'eau de lavage
 C_f = concentration en soluté dans le filtrat
 V_g = volume d'eaux retenues dans le gâteau avant lavage
 V_L = volume d'eau de lavage
 $W_L = \frac{V_L}{V_g}$ = taux de lavage du gâteau

L'étude du lavage doit aboutir à la connaissance de la quantité d'eau de lavage nécessaire pour atteindre une concentration en soluté donnée (ou inversement).

Il est souvent pratique de présenter une courbe de lavage dans un diagramme ayant:

- pour abscisses : le taux de lavage : W_L
- pour ordonnées : le rapport $\frac{C_1 - C_L}{C_0 - C_L}$

2312. Modélisation des courbes de lavage

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour modéliser le lavage d'un gâteau de filtration. Ce paragraphe présente rapidement les deux plus simples d'entre eux et propose une liste non exhaustive d'autres modèles plus complexes.

Les ouvrages de M. Demilie, Hermia, et Wakeman devraient aider le lecteur à approfondir ce sujet.

23121. *Le lavage piston parfait*

Le modèle le plus simple consiste à supposer un écoulement piston dans un gâteau où le solide n'est pas poreux, où il n'y a pas de zone stagnante et où il n'y a pas de dispersion axiale.

L'opération de lavage peut alors se représenter par le schéma ci-dessous

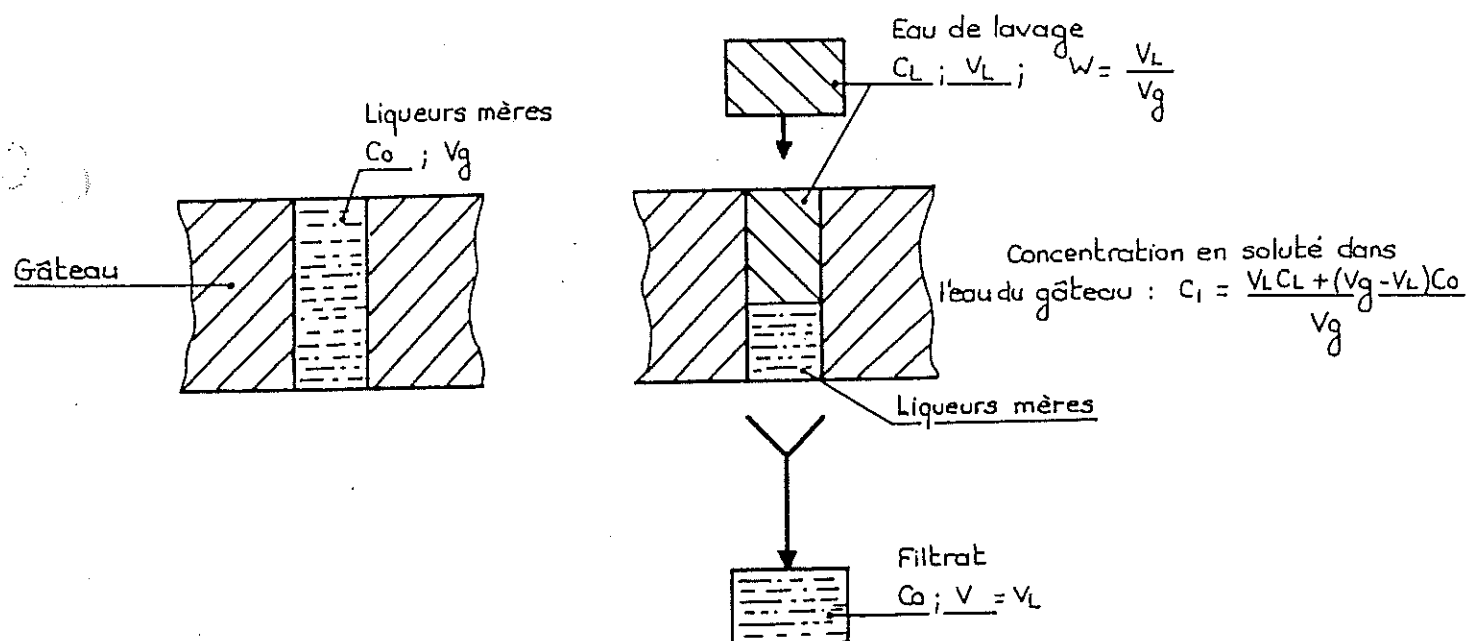


Figure 3 : Représentation du lavage piston parfait.

Dans ce cas, l'évolution de C_1 en fonction de W peut se calculer par bilan de matière, ce qui donne :

$$W_L \leq 1 \quad C_1 = W_L C_L + (1 - W_L) C_0 \quad (55)$$

$$\Rightarrow \frac{C_1 - C_L}{C_0 - C_L} = 1 - W_L \quad (56)$$

$$W_L \geq 1 \quad C_1 - C_L = 0 \quad (57)$$

La courbe de lavage se représente comme sur la figure 4 ci-dessous.

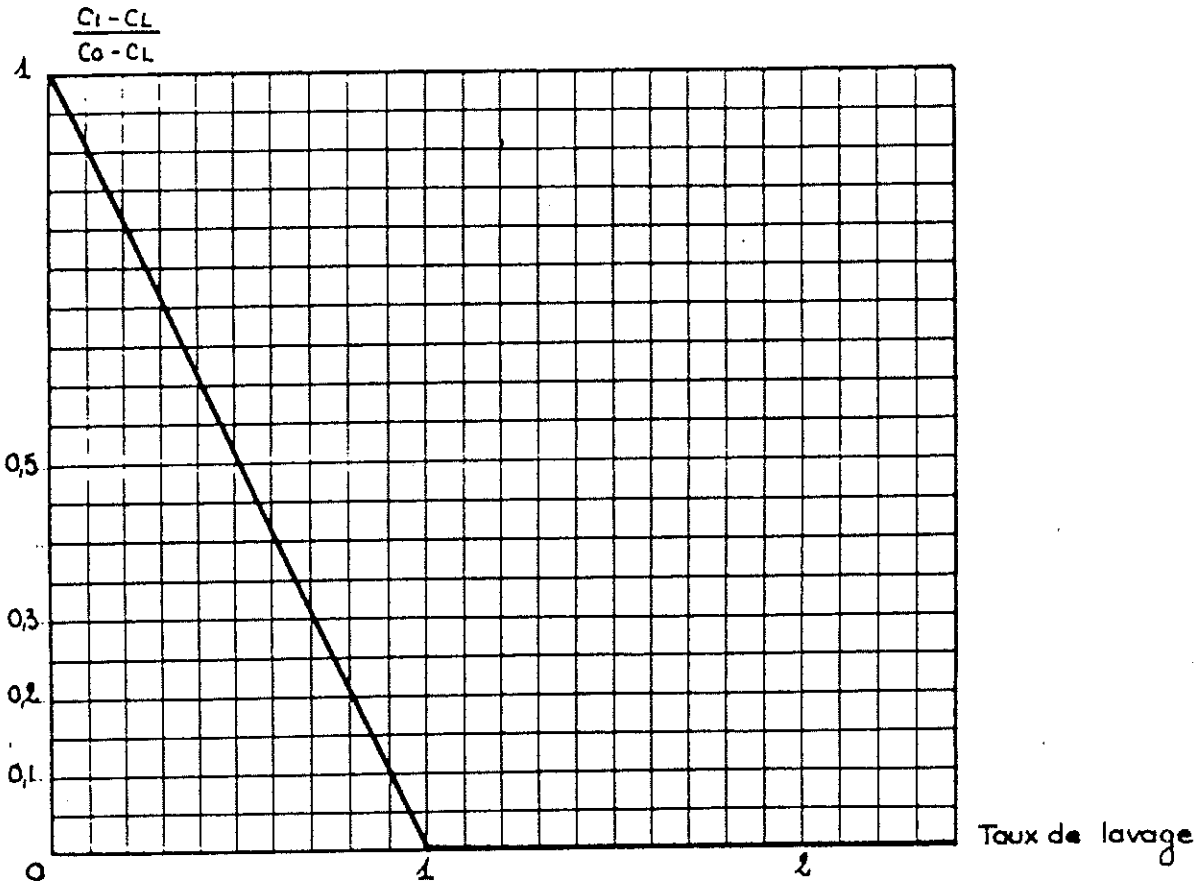


Figure 4 : Courbe de lavage piston parfait.

23122. Le lavage type réacteur parfaitement agité

Si l'on admet que l'écoulement dans les pores est tel que le mélangeage est parfait (gâteau mince et écoulement turbulent), la concentration C_1 n'évolue pas sur l'épaisseur du gâteau. Chaque pore peut être assimilé à un réservoir parfaitement agité contenant initialement du liquide de concentration C_0 et alimenté par le liquide de lavage de concentration C_L .

Le lavage peut alors se représenter par le schéma figure 5 ci-après.

Dans ce cas, l'évolution de C_1 en fonction de W peut se calculer par bilan de matière, ce qui donne :

$$\frac{dC_1}{dW} = C_L - C_1 \quad (58)$$

$$\Rightarrow \frac{C_1 - C_L}{C_0 - C_L} = e^{-W}$$

(59)

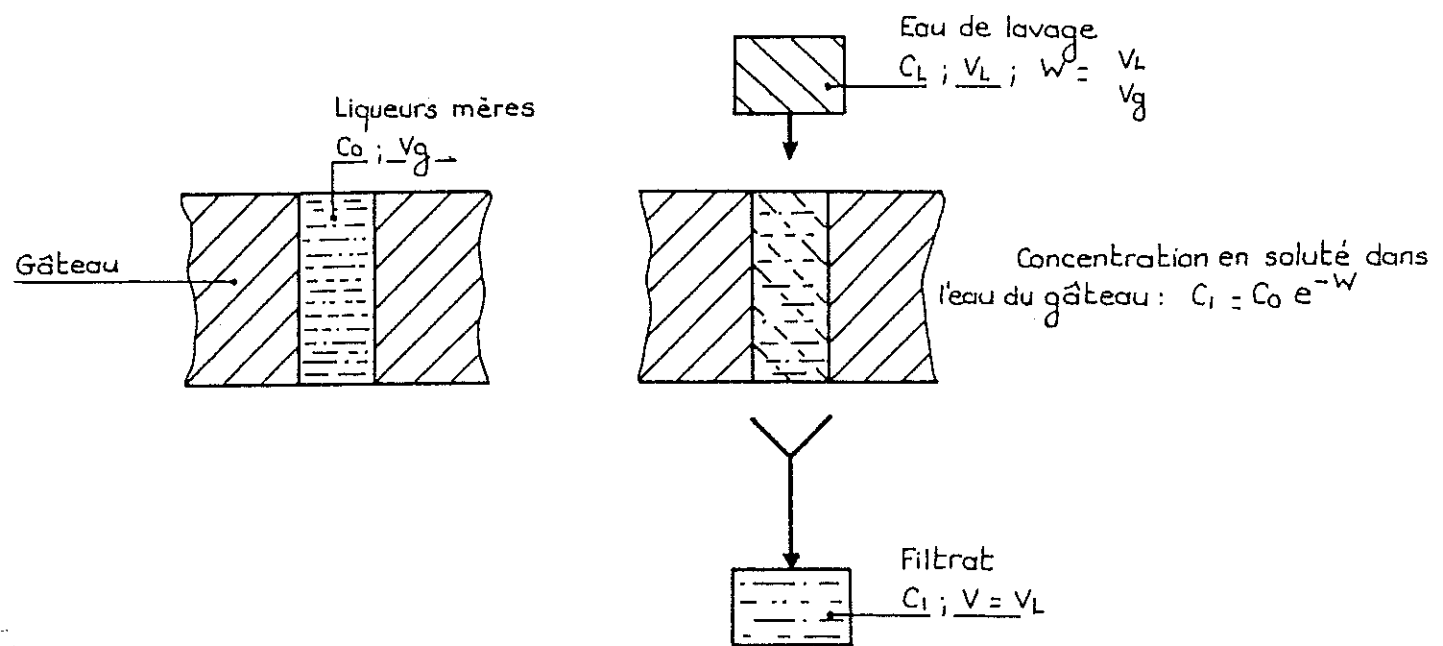


Figure 5 : Représentation du lavage type réacteur parfaitement agité.

La courbe de lavage peut se représenter comme sur la figure 6 ci-dessous.

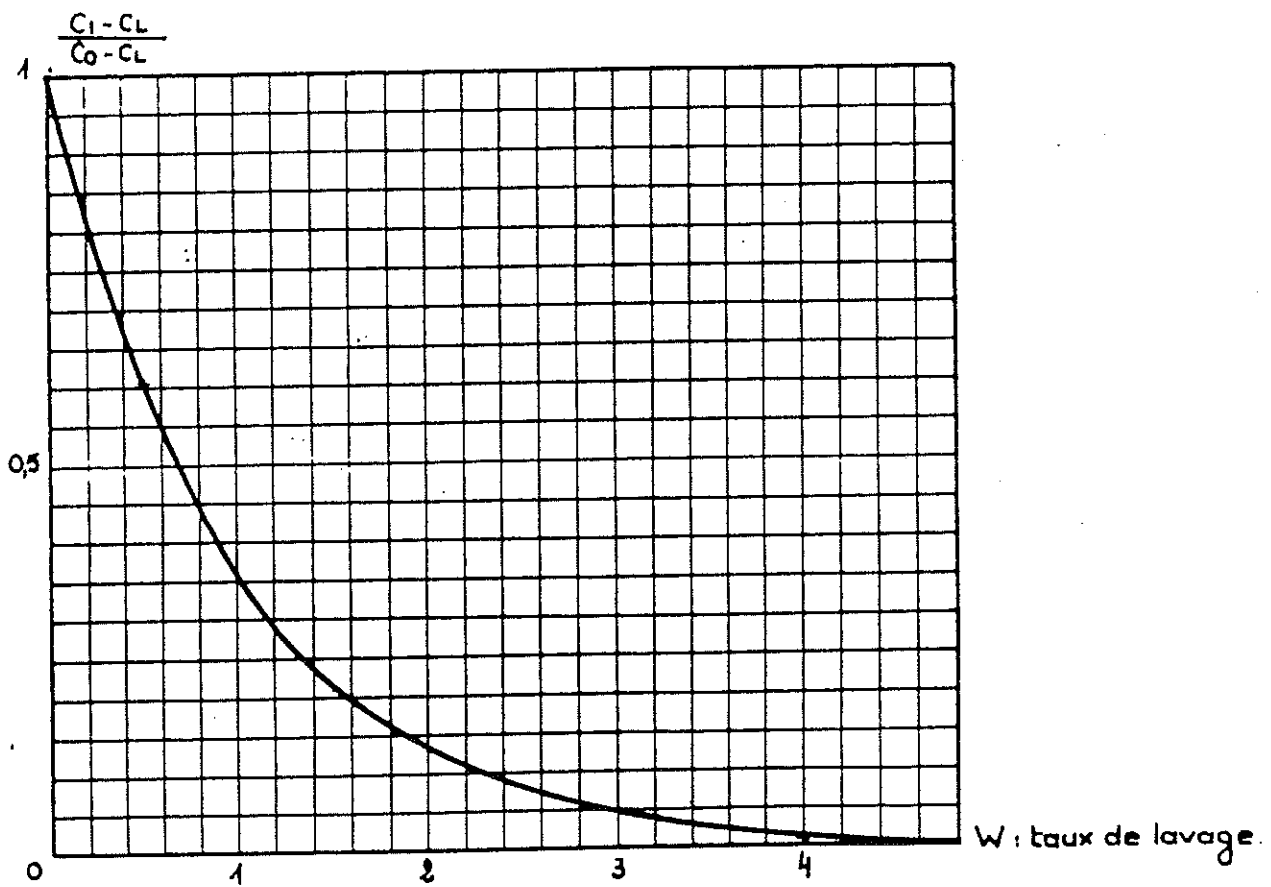


Figure 6 : Courbe de lavage type parfaitement agité.

2312. Autres modélisations des lavages

Elles tiennent compte d'un film stagnant dans les pores et de diffusions axiales des liquides. Voici une énumération succincte de modèles :

Lavage piston écoulement laminaire : l'écoulement laminaire dans les pores capillaires donne lieu à un profil de vitesse parabolique.

Film stagnant : lors du lavage, les pores sont tapissés d'un film quasi-stagnant d'épaisseur quasi-uniforme.

Dispersion axiale : en admettant qu'il n'y a pas de zone stagnante dans le solide.

Pores latéraux : le liquide stagnant n'est pas retenu sous forme d'un film tapissant les pores mais dans des pores perpendiculaires au sens d'écoulement du liquide et bouchés à une extrémité.

Tous ces modèles cherchent à représenter de la façon la plus correcte les courbes expérimentales de lavage afin d'extrapoler le comportement du lavage dans d'autres conditions.

232. Temps nécessaire pour filtrer l'eau de lavage

2321. Position du problème

En fonction des caractéristiques du gâteau, de son état initial avant lavage, la filtration de l'eau de lavage prendra plus ou moins de temps. Il est intéressant de pouvoir calculer ce paramètre et de chercher un groupement de paramètres aidant à l'extrapolation des résultats.

La filtration de l'eau de lavage peut se schématiser comme cela est fait figure 7 ci-dessous.

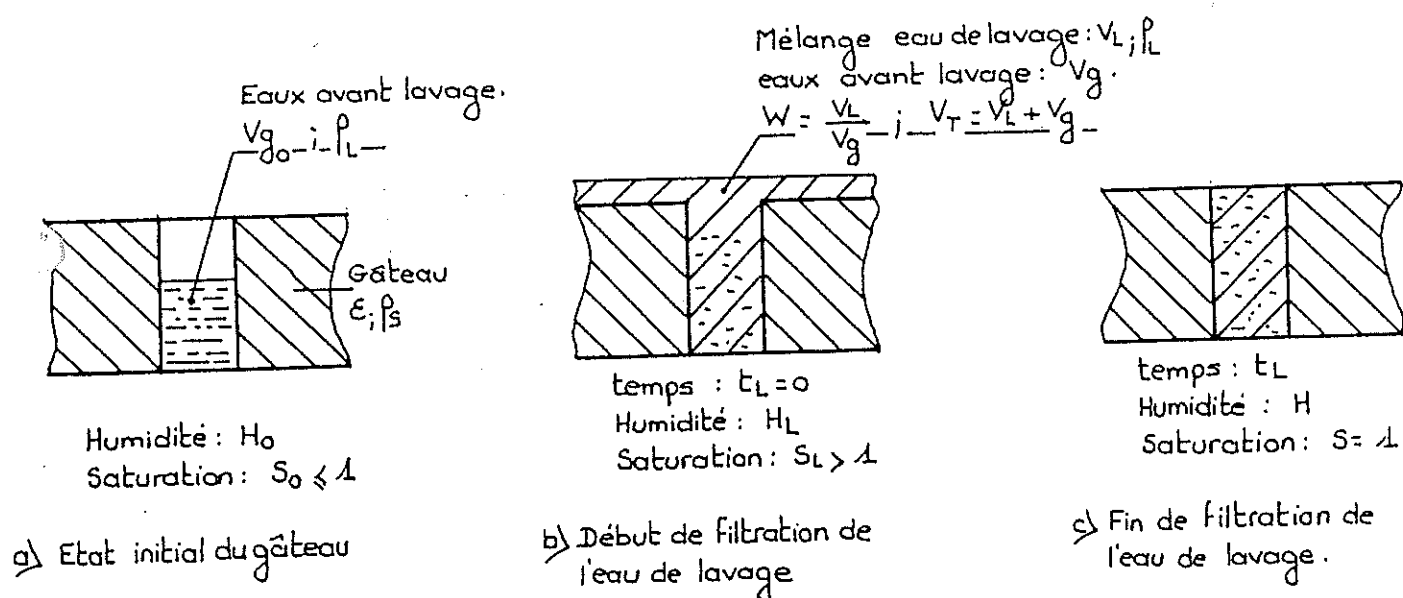


Figure 7 : Schéma de principe de la filtration de l'eau de lavage.

2322. Temps de filtration de l'eau de lavage

Le temps de filtration de l'eau de lavage est le temps compris entre le début du lavage et le moment où l'eau de lavage affleure la surface du gâteau.

Hypothèse : lors de la filtration de l'eau de lavage, le gâteau a les mêmes caractéristiques physiques qu'à la fin de l'opération de filtration. L'eau de lavage a la même vitesse d'écoulement que les liqueurs mères en fin de filtration.

L'équation de Darcy permet d'écrire :

$$u_L = \frac{K\Delta P}{\mu h} \quad u_L = \text{vitesse d'écoulement de l'eau de lavage} \quad (60)$$

$$\text{Or } K = \frac{d_g^2 \epsilon^3}{36hk(1-\epsilon)^2} \quad (61)$$

$$\text{donc } u_L = \frac{d_g^2 \epsilon^3 \Delta P}{36\mu hk(1-\epsilon)^2 h} \quad (62)$$

Avant lavage, le gâteau a une humidité de :

$$H_0 = \frac{V_{go}\rho_L}{V_{go}\rho_L + hA_L(1-\epsilon)\rho_s} \quad (63)$$

avec : V_{go} = volume d'eau retenu dans le gâteau avant lavage
 A_L = surface du gâteau soumise à la filtration de l'eau de lavage.

H_0 est supposé connu d'où :

$$V_{go} = \frac{H_0 h A_L (1-\epsilon) \rho_s}{\rho_L (1-H_0)} \quad (64)$$

Volume interne au gâteau disponible à l'eau de lavage :

$$V_{iL} = hA_L(1-\epsilon) \left[1 - \frac{H_0 \rho_s}{(1-H_0)\rho_L} \right] \quad (65)$$

Volume d'eau de lavage à filtrer jusqu'au point d'affleurement :

$$V_{aL} = V_L - hA_L(1-\epsilon) \left[1 - \frac{H_0 \rho_s}{(1-H_0)\rho_L} \right] \quad (66)$$

Il est souvent commode d'exprimer le débit d'eau de lavage par rapport aux matières sèches produites :

$$\frac{V_{aL}}{M} = \frac{V_L}{V_{aL}} = \frac{V_L}{hA_L(1-\epsilon)\rho_s} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_0}{(1-H_0)\rho_L} \quad (67)$$

$$\frac{V_L}{V_L} = \frac{V_L}{hA_L(1-\epsilon)\rho_s} \quad (68)$$

$$\text{d'où : } \overline{V_{aL}} = \overline{V_L} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_0}{(1-H_0)\rho_L} \quad (69)$$

En reprenant (62) il est possible d'exprimer t_L en fonction des paramètres précédents

$$Q_L = A_L U_L \quad (70)$$

avec Q_L = débit de filtration de l'eau de lavage.

$$\text{Or } t_L = \frac{V_{aL}}{u_L A_L} \quad (71)$$

$$\text{et } V_{aL} = \overline{V_{aL}} \times M = \overline{V_{aL}} \rho_s (1-\epsilon) A_L h \quad (72)$$

qui, associée à (62) et (69) donne :

$$t_L = \frac{36\mu h k (1-\epsilon)^3 h^2 \rho_s}{d_g^2 \epsilon^3 \Delta P} \left[\overline{V_L} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_0}{(1-H_0)\rho_L} \right] \quad (73)$$

Ici aussi, il est possible de mettre en évidence le nombre adimensionnel Bl :

$$Bl_L = \frac{t_L \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h k (1-\epsilon)^3 \rho_s}{\epsilon^3} \left[\overline{V_L} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_0}{(1-H_0)\rho_L} \right] \quad (74)$$

Comme pour la filtration et l'essorage, on constate que Bl_L est uniquement fonction de l'humidité du gâteau avant filtration de l'eau de lavage.

24. CONCLUSIONS

Ce chapitre a mis en évidence l'existence du paramètre adimensionnel :

$$Bl = \frac{t \Delta P d_g^2}{\mu h^2}$$

qui peut représenter :

* la filtration d'une suspension jusqu'au point d'affleurement. Dans ce cas :

$$Bl_a = \frac{t_a \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{18 h k (1-H_a)^3 \rho_L^2}{Ha^3 \rho_s^2} \left[\frac{1-s_i}{s_i} - \frac{Ha}{1-H_a} \right] \quad (25)$$

* l'essorage du gâteau par drainage forcé à l'air :

$$Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h k (1-\epsilon)^2 (1-S_\infty)^n}{\epsilon^3 (n-1)} \left(\frac{1}{(S_r S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-1}} \right) \quad (47)$$

* la filtration de l'eau de lavage jusqu'au point d'affleurement :

$$Bl_L = \frac{\tau_L \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h k (1-\epsilon)^3 \rho_s}{\epsilon^3} \left[\frac{V_L}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_o}{(1-H_o)\rho_L} \right] \quad (74)$$

Dans chacun des cas, Bl ne dépend que de la variable H : humidité dans le gâteau.

Pour des humidités intermédiaires fixées, il est possible d'additionner entre elles les constantes Bl propres à chaque opération unitaire et de définir ainsi une constante Bl_G globale pour l'ensemble de l'opération de filtration.

Par exemple, considérons l'opération de filtration constituée de :

- * une filtration de la suspension dont Bl_a est définie
- * n opérations de lavage dont Bl_L est définie pour chaque opération par Bl_Lⁱ
- * n+1 opérations d'essorage (dont n essorages avant lavage) dont Bl_D est définie pour chaque opération par Bl_D^j.

L'opération globale de filtration sera définie par :

$$Bl_G = Bl_a + \sum_{i=1}^n Bl_L^i + \sum_{j=1}^{n+1} Bl_D^j = \frac{\tau_c \Delta P d_g^2}{h^2} \quad (77)$$

Les essais en laboratoire ou sur filtre pilote auront pour but de déterminer les constantes Bl lors :

- * de la filtration, au point d'affleurement,
- * du lavage jusqu'au point d'affleurement,
- * des essorages en fonction de l'humidité dans le gâteau.

Ainsi pour un Bl_G déterminé à partir de résultats expérimentaux, il sera facile de prédire le comportement de la filtration dans des conditions de fonctionnement différentes (ΔP, d_g, n ou t différents).

Ceci sera très utile pour extrapoler les résultats expérimentaux.

3. LES ESSAIS DE LABORATOIRE

31. BUT

Comme nous venons de le voir, la filtration d'une suspension met en oeuvre d'autres opérations unitaires de génie chimique que la filtration elle-même.

Pour obtenir après filtration un produit convenable, il est souvent nécessaire de l'essorer, le laver, le comprimer. Malgré toutes les relations théoriques qu'il est possible de décrire sur ces opérations, il n'est pas possible de prévoir le comportement d'une suspension sans effectuer un minimum d'essais d'orientation en laboratoire.

Les essais en laboratoire peuvent donc concerner les opérations suivantes

- * la filtration
- * l'essorage ou la déshydratation
- * le lavage
- * la compression

mais ils peuvent aussi permettre d'étudier le type d'alimentation souhaitable pour le brouet, d'évaluer la porosité du gâteau de filtration ou d'étudier la répartition granulométrique dans le gâteau.

Les résultats collectés lors des essais en laboratoire doivent permettre de cerner le comportement moyen du produit étudié. Ils ne peuvent pas être une image parfaite de ce comportement car les essais s'effectuent en général sur de faibles quantités de produits difficilement représentatives.

Lors d'une méthodologie rigoureuse, il est souhaitable de compléter des essais en laboratoire par des essais sur filtre pilote. Dans ce cas les essais de laboratoire permettent d'orienter le dimensionnement du filtre pilote.

32. LES ESSAIS DE FILTRATION

321. But

Ils doivent viser à déterminer les caractéristiques essentielles du gâteau, à savoir :

- * la résistance spécifique du gâteau : α
- * la porosité du gâteau : ϵ
- * la compressibilité éventuelle du gâteau

322. Mode opératoire

3221. Les cellules de filtration

De nombreux types de cellules de filtration en laboratoire existent. Nous pouvons en dresser une liste, non exhaustive.

* Cellule de filtration type Büchner. Equipée d'un fritté, elle constitue l'appareil le plus fréquemment employé. Elle peut être équipée d'une membrane filtrante. Ce type de cellule ne permet pas d'étudier le comportement des toiles filtrantes.

* Cellule de filtration sous vide avec toile filtrante et alimentation par le dessus. Permet de simuler la filtration sur filtre à bande. Un schéma type d'une telle cellule est donné figure 8 ci-après.

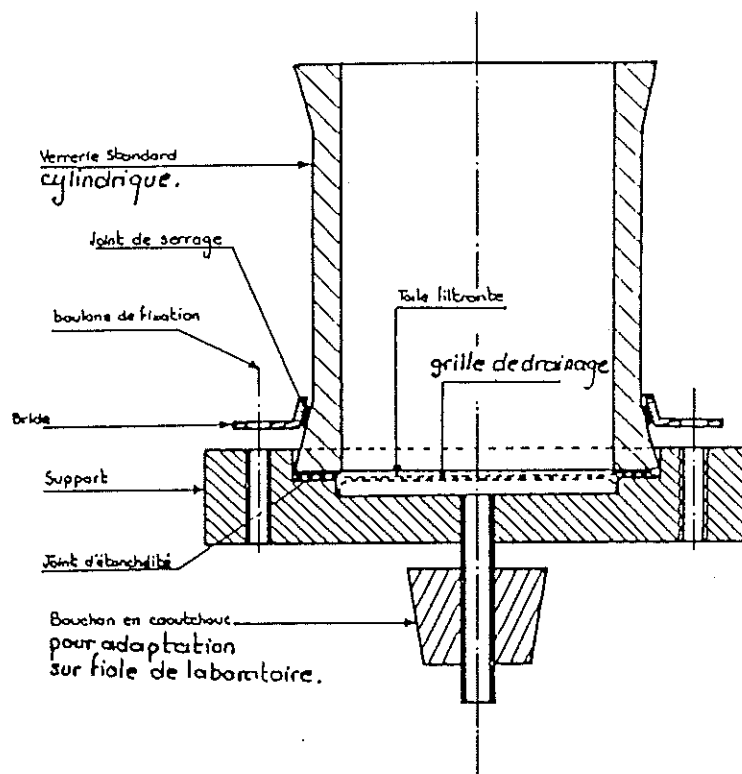


Figure 8 : Schéma de principe d'une cellule de filtration sous vide avec toile filtrante, utilisée plus particulièrement pour simuler une filtration sur filtre à bande.

* Cellule de filtration sous vide avec toile filtrante permettant la formation du gâteau dans le brouet et la simulation de la filtration avec un filtre rotatif.

Le schéma figure 9 présente une cellule de ce type.

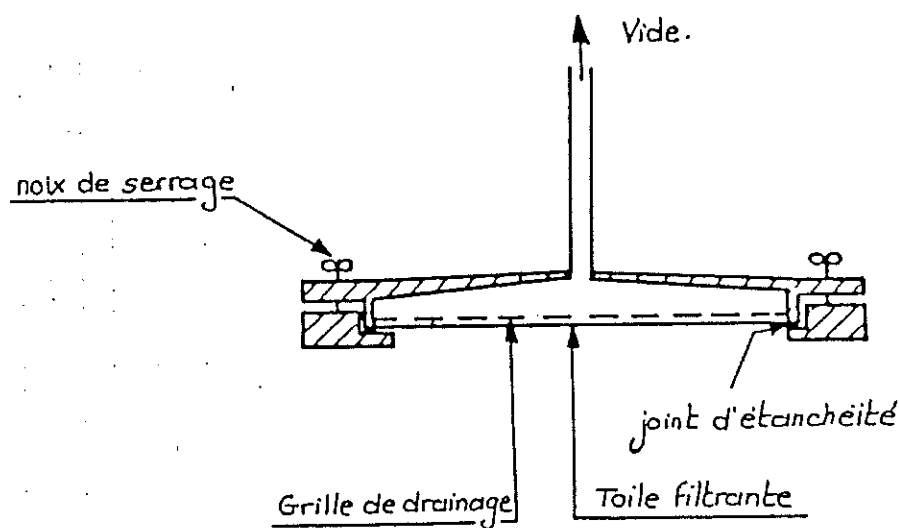


Figure 9 : Cellule de filtration sous vide pour simulation de filtre rotatif.

Après avoir formé le gâteau, la cellule est extraite de la suspension. L'essorage ou le lavage du gâteau est ensuite réalisé.

* Cellule de filtration sous pression avec toile filtrante. Elle est proche de la cellule décrite figure 8. Elle n'en diffère principalement que par la fermeture étanche du cylindre avec arrivée de l'air sous pression.

3222. Installations expérimentales

Deux grands types d'installations sont à envisager :

32221. Filtration sous pression

Le schéma ci-dessous représente l'installation qu'il est souhaitable de posséder pour mener une telle étude.

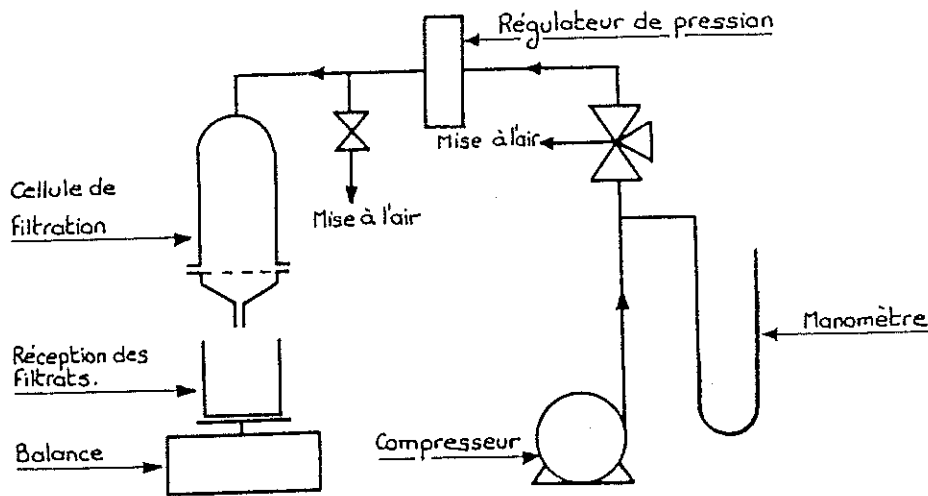


Figure 10 : Installation expérimentale de filtration sous pression.

Pour qu'une telle manipulation fonctionne, il faut :

- * une installation étanche
- * un compresseur suffisamment puissant
- * un manomètre précis
- * un régulateur de pression sensible.

Dans la mesure du possible, il est souhaitable d'enregistrer les indications de la balance en fonction du temps.

Dans certains cas, il peut être intéressant d'équiper la cellule de filtration d'un agitateur pour éviter toute décantation qui ne serait pas représentative du comportement réel de la suspension lors d'une filtration industrielle.

32222. Filtration sous vide

Le schéma ci-dessous représente l'installation qu'il est souhaitable de posséder pour mener une telle étude.

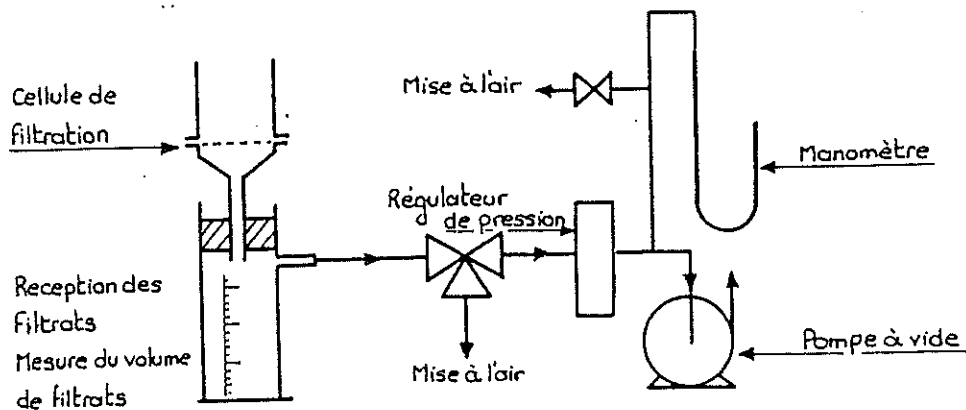


Figure 11 : Installation expérimentale de filtration sous vide.

Les mêmes qualités de l'installation sont requises que pour la filtration sous pression (paragraphe précédent).

Le problème le plus délicat que pose une telle manipulation est la mesure du volume de filtrat. Deux solutions sont possibles :

* mesure du volume de filtrat par une éprouvette graduée (c'est le cas de la fig. 11). La mesure est simple mais pas toujours précise. Il faut relever en même temps le volume de filtrat et la durée de l'essai. C'est une opération souvent périlleuse pour un seul opérateur.

* mesure du volume de filtrat par pesée comme pour la filtration sous pression. Cette mesure risque d'être plus précise et facile à conduire seul. Le problème essentiel est d'assurer une liaison souple entre le filtre et le flacon de réception des filtrats tout en ne perturbant pas la pesée des filtrats. La liaison souple doit également résister à la pression.

3223. Mesures à réaliser

Pour mener avec succès un essai de filtration en laboratoire, il est nécessaire de faire un certain nombre de mesures. La liste ci-dessous regroupe de façon non exhaustive les principaux paramètres à relever :

32231. *Sur la suspension*

- * Densité de suspension : permet d'accéder à la teneur massique de la suspension en matières solides : s
- * Température
- * pH : si nécessaire
- * Teneurs en solutés à éliminer : dans le cas où la liqueur mère contient des produits que l'on désire éliminer du gâteau de filtration
- * Viscosité de la liqueur mère
- * Masse volumique de la phase liquide
- * Masse volumique de la phase solide
- * Répartition granulométrique de la phase solide.

32232. *Sur le gâteau de filtration*

- * Epaisseur du gâteau
- * Porosité
- * Teneur en liqueur mère
- * Teneur en solutés à éliminer
- * Température lors de l'essai si nécessaire
- * Répartition granulométrique du solide constituant le gâteau
- * Poids du gâteau sec et humide
- * Temps d'affleurement : temps à partir duquel la liqueur mère disparaît de la surface du gâteau. C'est normalement le moment où on peut arrêter l'essai puisqu'ensuite le gâteau est essoré.
- * Il est parfois intéressant d'étudier l'évolution de la répartition granulométrique et des concentrations en solutés à travers le gâteau. Cela peut se réaliser en découpant le gâteau en tranches parallèles à la surface du filtre.
- * Les mêmes mesures que précédemment mais sur des parts de gâteaux concentriques peuvent être intéressantes pour étudier l'influence des effets de bords (dans le cas d'une cellule de filtration cylindrique).

32233. *Sur le filtrat*

- * Volume de filtrat écoulé en fonction du temps de filtration
- * Température si nécessaire
- * pH
- * Teneurs en solutés à éliminer
- * Teneurs en matières solides si nécessaire

- * Répartition granulométrique de la phase solide si nécessaire.

32234. Sur l'installation

- * ΔP à travers le gâteau
- * Pression dans le circuit de filtration
- * Débits d'air si l'on poursuit l'essai au-delà de la filtration.

3224. Observations à réaliser

Ici aussi, voici une liste non exhaustive des observations à réaliser lors des essais de filtration.

Sur la suspension

- * Comportement lors de la filtration (si possible) : décantation éventuelle, passages préférentiels à travers le gâteau...

Sur le gâteau de filtration

- * Régularité de la surface
- * Présence de fissures si la filtration a été poussée jusqu'à la déshydratation
- * Stratifications éventuelles ce qui nécessiterait alors des mesures granulométriques
- * Consistance du gâteau : solide, plastique, fragile, thixotrope...
- * Facilité à l'extraire du filtre.

Sur le filtrat

- * Turbidité : peut justifier une mesure des matières en suspension.

Lors de l'essai

- * Toute anomalie de fonctionnement
- * Régularité de la pression
- * Fuites éventuelles.

3225. Conseils de manipulation

Avant introduction de la suspension dans la cellule de filtration, il faut s'assurer qu'elle soit bien homogène et au besoin l'agiter avant de l'introduire dans la cellule ou de l'agiter dans la cellule dans le cas d'une filtration sous pression.

Avant filtration, il faut veiller à ce que la pression dans le circuit soit bien établie. Au besoin il faut régler la pression dans les premiers instants de la filtration.

En début d'essai, enclencher la mesure de temps et en même temps commencer la mesure de volume de filtrat.

La fin de l'essai de filtration a lieu quand le liquide affleure la surface du gâteau. A ce moment, arrêter la manipulation en coupant le vide ou la pression. Noter le temps de filtration.

323. Essais à réaliser

Les essais en laboratoire ont pour but essentiel de tracer une courbe de filtration représentant (t/V) en fonction de V (cf. partie théorique, paragraphe 211). Ce type de courbe permet essentiellement de déterminer la résistance spécifique du gâteau α . Cependant l'aptitude d'un produit à être filtré peut dépendre de divers paramètres qu'il est souhaitable d'étudier.

3231. Influence de la pression appliquée au gâteau

Certains gâteaux de filtration ont un comportement qui évolue en fonction de la pression de filtration. On dit que le gâteau est plus ou moins compressible. Dans ce cas, la résistance spécifique évolue en fonction de la pression suivant la loi simplifiée suivante :

$$\alpha = \alpha_0 \Delta P^n \quad (76)$$

avec n = coefficient de compressibilité de la résistance spécifique.

L'exposé de M. LECLERC (n° 8) développe ce point.

Il est donc prudent, lors d'essais en laboratoire, d'étudier si le gâteau est compressible. Cela impose de réaliser des courbes de filtration sous différentes pressions.

3232. Influence de l'alimentation du brouet

A la différence de la filtration sous pression, la filtration sous vide permet d'alimenter la suspension sur le filtre de deux façons différentes :

- * alimentation sur vide : le vide est déjà établi et on introduit ensuite le brouet
- * alimentation hors vide : le brouet est introduit dans la cellule et le vide est ensuite établi.

Selon le type d'alimentation, certaines suspensions peuvent se filtrer très différemment. Il est prudent d'étudier ce point qui fixera par la suite le type d'alimentation sur pilote ou sur filtre industriel. Cette étude doit s'accompagner de mesures de répartitions granulométriques dans l'épaisseur du gâteau.

L'alimentation sur vide doit être réalisée en alimentant le brouet de façon homogène afin d'avoir un gâteau d'épaisseur régulière.

3233. Influence de la toile filtrante

Dans le cas où l'on travaille avec une cellule de filtration équipée d'une toile filtrante, cette dernière peut avoir une influence sur l'aptitude d'une suspension à être filtrée. Si l'on possède plusieurs toiles filtrantes différentes, il est souhaitable de réaliser des courbes de filtration avec chacune d'elles.

Dans ce cas, observer l'évolution de la résistance du gâteau, de la répartition granulométrique du gâteau et de la teneur en fines dans le filtrat.

3234. Influence d'une floculation préalable de la suspension à filtrer

Dans le cas de produits difficiles à filtrer, il est recommandable de floculer ce produit avant filtration.

La floculation peut être naturelle après un séjour dans un réservoir tampon permettant une autofloculation du produit. Elle peut être aussi réalisée par addition de produits chimiques de formulations très diverses.

Il peut donc être souhaitable d'étudier l'influence de la floculation sur la résistance spécifique du gâteau.

324. Résultats

3241. Modélisation

Les essais de filtration doivent essentiellement permettre de mesurer la résistance spécifique du gâteau de filtration et de déterminer sa compressibilité.

Le chapitre 21 développe les lois de la filtration. Il aboutit entre autres à la relation suivante :

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\alpha W}{2\Delta P A^2} V + \frac{\mu R_m}{\Delta P A} \quad (2)$$

Les résultats de filtration seront exploités en traçant (t/V) en fonction de V . La pente de la droite ainsi obtenue permettra d'accéder à α et l'origine à R_m .

Si l'on étudie l'influence de la pression sur α , il sera tenu compte que α varie en fonction de ΔP suivant la relation :

$$\alpha = \alpha_0 \Delta P^n \quad (76)$$

qui peut également s'écrire :

$$\ln \alpha = \ln \alpha_0 + n \ln \Delta P \quad (77)$$

En traçant $\ln \alpha$ en fonction de $\ln \Delta P$, on pourra déterminer n et α_0 .

3242. Quelques exemples

32421. Courbes de filtration

Les deux courbes page suivante ont été réalisées sur un même produit mais avec des suspensions de concentrations différentes et sous des ΔP différents.

Elles sont caractéristiques des points expérimentaux que l'on peut obtenir.

Ces représentations mettent en évidence la bonne concordance entre la théorie et la pratique. Seuls les premiers points de la courbe s'en écartent. Ces points correspondant au début de l'essai ont été vraisemblablement relevés alors que le vide n'était pas stabilisé. Ils correspondent aussi aux plus forts débits de filtrat qui rendent difficile la mesure de V réalisée dans une éprouvette graduée. Il est donc souhaitable de ne pas tenir compte de ces points expérimentaux.

Cette remarque reste valable pour d'autres essais. Lors de l'exploitation des résultats expérimentaux, il semble qu'il vaille mieux laisser de côté les mesures effectuées dans les 10 premiers % de l'essai et leur préférer celles effectuées dans les 90 % restants.

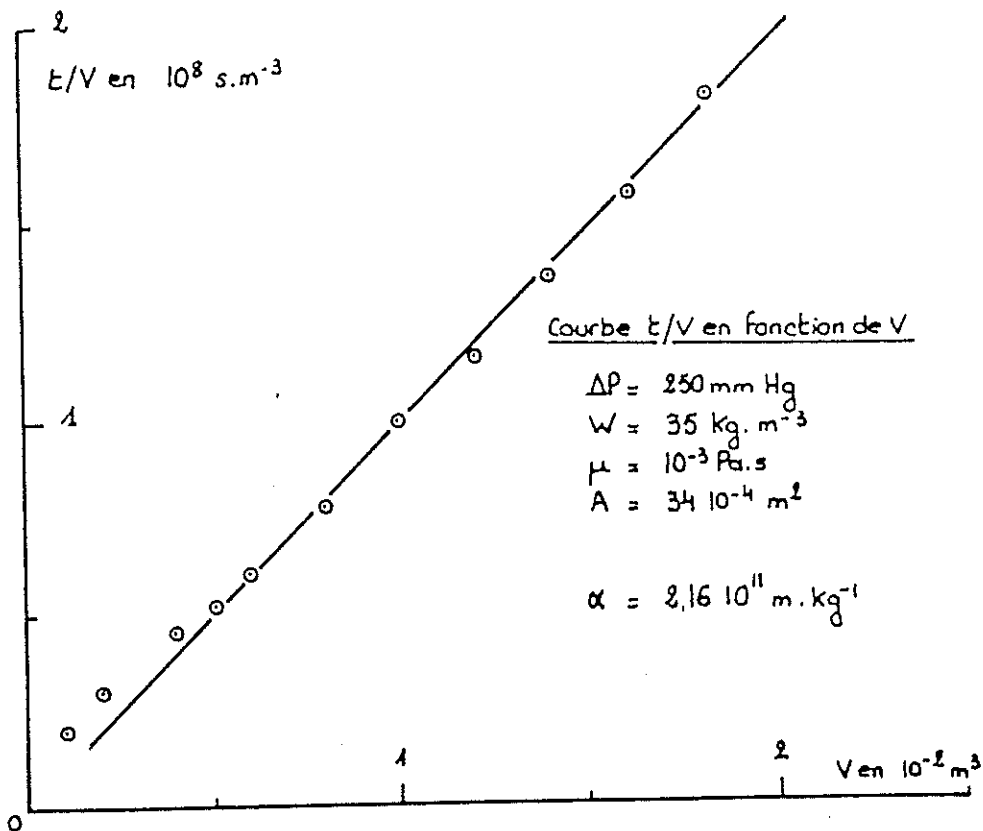


Figure 12 : Points expérimentaux et courbe moyenne de filtration. Suspension de faible concentration en matières sèches.

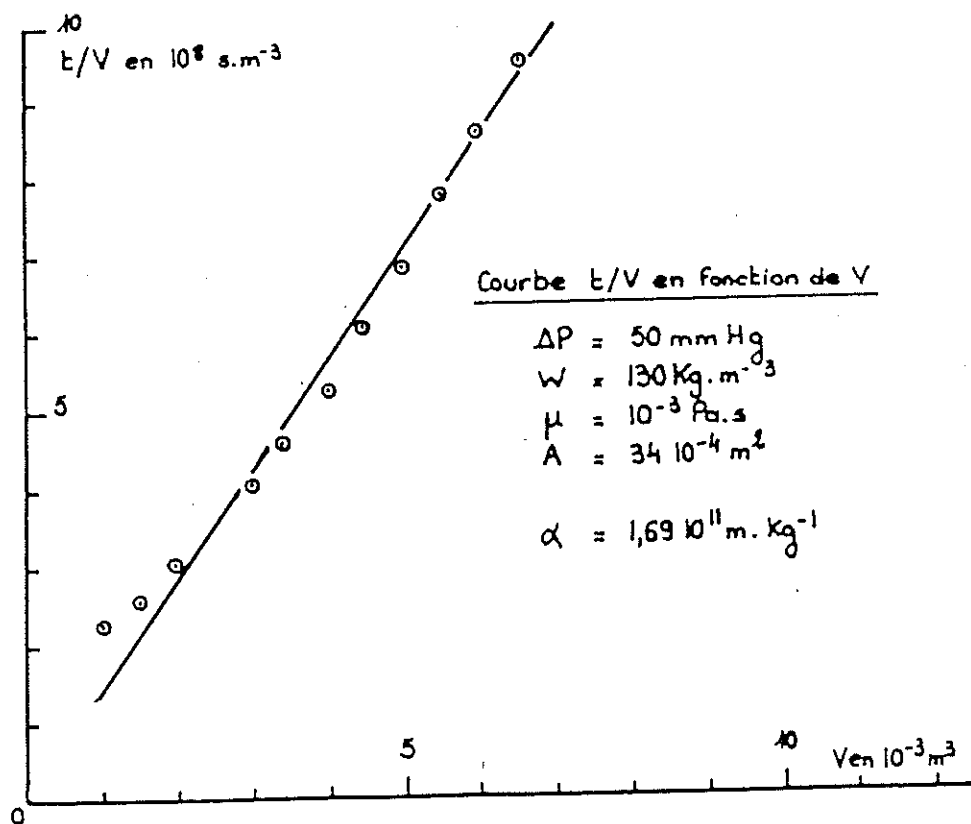


Figure 13 : Points expérimentaux et courbe de filtration. Suspension épaissie.

Il arrive que l'on ait des conditions opératoires telles qu'il n'est pas possible d'éviter la décantation de la suspension lors de la filtration.

La représentation graphique ci-dessous illustre ce problème.

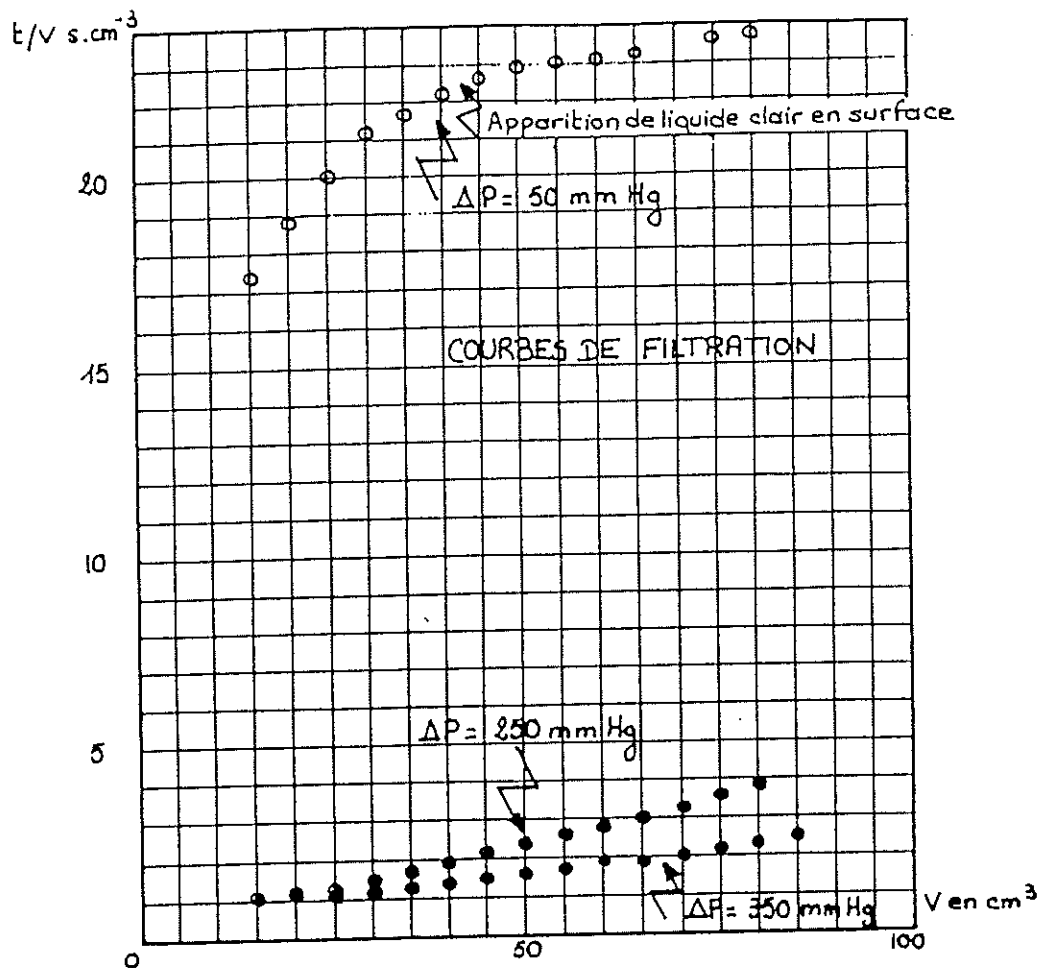


Figure 14 : Evolution de la filtration d'une suspension en fonction de la perte de charge appliquée. Produit décantable.

Le produit filtré lors de ces essais décantait rapidement. Ainsi s'est-on aperçu que la courbe de filtration (t/V) en fonction de V qui a été réalisée à 50 mmHg était loin d'être aussi parfaite que celles présentées figs. 12 et 13. En observant de plus près l'essai, on s'est rendu compte que le changement de pente de la courbe correspondait approximativement au moment où la suspension avait complètement décanté en laissant un liquide clair surnager à la surface du gâteau. Deux phases existaient donc lors de cette filtration : une première phase de filtration accompagnée de décantation, une seconde phase de filtration du liquide clair surnageant.

L'augmentation sensible de ΔP a nettement annulé ce phénomène. La vitesse de filtration était devenue telle que la décantation de la suspension ne pouvait pas intervenir.

32423. Compressibilité du gâteau de filtration

La représentation graphique ci-après donne un exemple de la détermination de l'indice "n" : coefficient de compressibilité de la résistance spécifique.

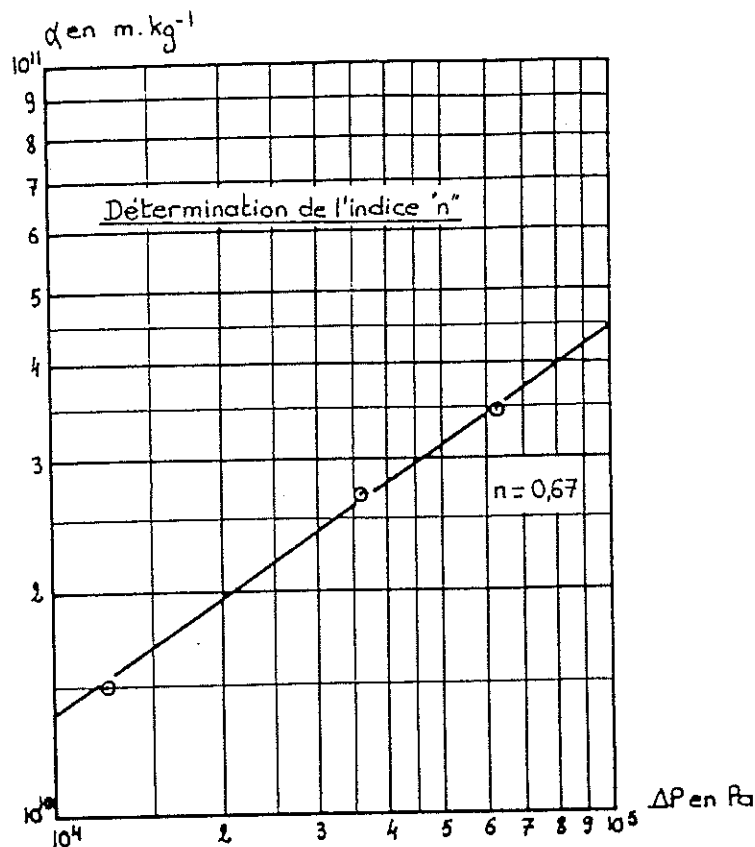


Figure 15 : Evolution de la résistance spécifique du gâteau : α en fonction de ΔP .
Détermination de l'indice "n".

Dans ce cas, $n = 0,67$; cela indique que le gâteau est compressible. D'une manière générale, on peut caractériser la compressibilité d'un gâteau de la façon suivante :

- $n = 0$: gâteau incompressible
- $0 < n \leq 0,1$: gâteau peu compressible
- $0,5 < n \leq 1$: gâteau compressible
- $n > 1$: gâteau très compressible.

33. LES ESSAIS DE DESHYDRATATION PAR ESSORAGE A L'AIR

Cette opération ne concerne que les essais de filtration sous vide.

331. But

Dans certains cas, la filtration d'un produit peut être suivie d'une opération de déshydratation par essorage du gâteau à l'air. Si le gâteau s'y prête, cette opération permet d'éliminer une partie des liqueurs mères contenues dans le gâteau à la fin de la filtration. Cela peut soit limiter la consommation de liquide de lavage dans le cas où cette opération est envisagée, soit permettre d'obtenir un gâteau de filtration de meilleure qualité ou de consistance acceptable.

Cependant, la déshydratation d'un gâteau de filtration n'est pas une opération qui peut être systématiquement réalisée. Certains gâteaux se craquent très rapidement ce qui rend la déshydratation par essorage à l'air inefficace.

La déshydratation par essorage à l'air ne peut pas se réaliser sur une durée infinie. Bien souvent, elle trouve une limitation rapide qui se traduit par une teneur en eaux mères qui n'évolue que très lentement alors que la consommation d'air augmente fortement.

Quand on doit étudier le comportement d'une suspension à la filtration, il est indispensable de compléter cette étude par la déshydratation du gâteau de filtration à l'air.

Les essais de déshydratation par essorage à l'air doivent permettre de déterminer :

- * le comportement mécanique du gâteau lors de cette opération : apparition de craquelages, consistance.
- * la relation existant entre la quantité d'air traversant le gâteau et la teneur résiduelle en liqueur mère.
- * la relation existant entre la durée de l'opération de déshydratation et la teneur résiduelle en liqueur mère.

332. Mode opératoire

Dans la déshydratation par essorage à l'air suivant l'opération de filtration, les mêmes cellules que lors de la filtration sont utilisées pour mener cette étude. Seule l'installation de laboratoire évolue légèrement.

3321. Installation expérimentale

Le schéma ci-dessous représente l'installation qu'il est souhaitable de posséder pour mener une telle étude.

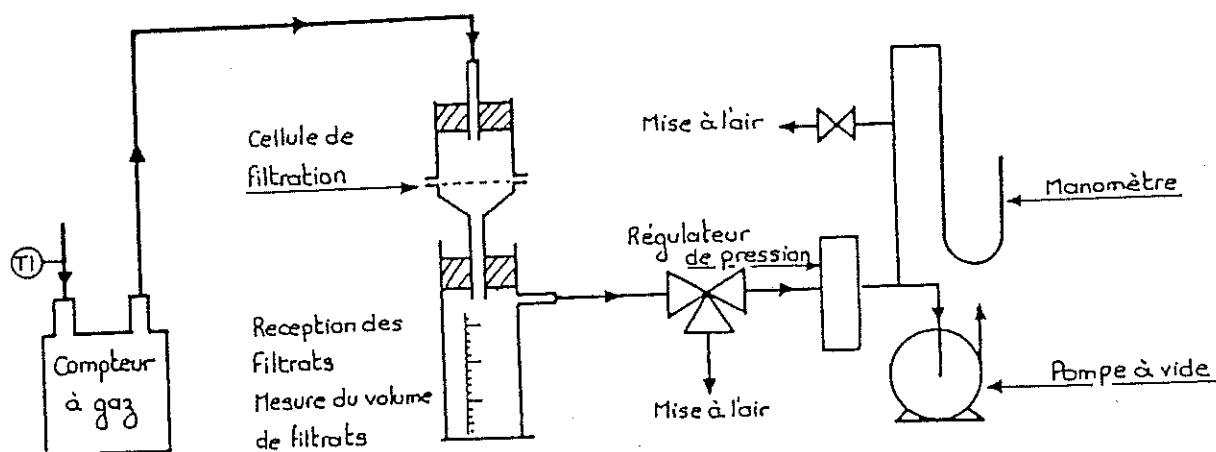


Figure 16 : Installation expérimentale d'étude de la déshydratation d'un gâteau de filtration par essorage à l'air.

Cette installation diffère de celle de filtration (fig. 11, page 26) par l'ajout d'une mesure du débit d'air traversant le gâteau. Cette mesure est permise grâce à un bouchon qui vient fermer la cellule de filtration et qui est traversé de part en part d'un tube relié à un compteur à gaz. La température du gaz à l'entrée du compteur est mesurée afin de donner des volumes d'air exprimés en Nm^3 .

La mesure du débit d'air traversant le gâteau s'effectue juste à partir du moment où la liqueur mère affleure la surface du gâteau : point d'affleurement. Avant cela la filtration est effectuée sans placer le bouchon sur la cellule d'essai. Au point d'affleurement, le vide est arrêté afin de pouvoir placer le bouchon sur la cellule de filtration. Il est ensuite remis en même temps que le chronomètre est déclenché pour mesurer le temps d'essorage. A la fin de l'essai, le vide est arrêté en même temps que le chronomètre. Le gâteau est débâti pour en mesurer la teneur résiduelle en liqueurs mères.

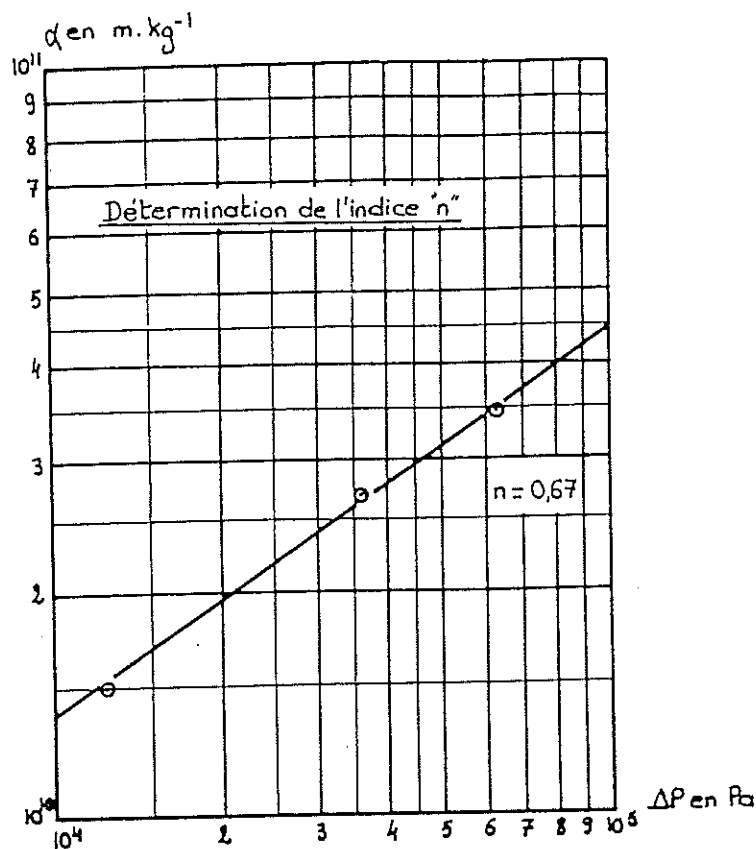


Figure 15 : Evolution de la résistance spécifique du gâteau : α en fonction de ΔP .
Détermination de l'indice "n".

Dans ce cas, $n = 0,67$; cela indique que le gâteau est compressible. D'une manière générale, on peut caractériser la compressibilité d'un gâteau de la façon suivante :

- $n = 0$: gâteau incompressible
- $0 < n \leq 0,1$: gâteau peu compressible
- $0,5 < n \leq 1$: gâteau compressible
- $n > 1$: gâteau très compressible.

33. LES ESSAIS DE DESHYDRATATION PAR ESSORAGE A L'AIR

Cette opération ne concerne que les essais de filtration sous vide.

331. But

Dans certains cas, la filtration d'un produit peut être suivie d'une opération de déshydratation par essorage du gâteau à l'air. Si le gâteau s'y prête, cette opération permet d'éliminer une partie des liqueurs mères contenues dans le gâteau à la fin de la filtration. Cela peut soit limiter la consommation de liquide de lavage dans le cas où cette opération est envisagée, soit permettre d'obtenir un gâteau de filtration de meilleure qualité ou de consistance acceptable.

Cependant, la déshydratation d'un gâteau de filtration n'est pas une opération qui peut être systématiquement réalisée. Certains gâteaux se craquent très rapidement ce qui rend la déshydratation par essorage à l'air inefficace.

La déshydratation par essorage à l'air ne peut pas se réaliser sur une durée infinie. Bien souvent, elle trouve une limitation rapide qui se traduit par une teneur en eaux mères qui n'évolue que très lentement alors que la consommation d'air augmente fortement.

Quand on doit étudier le comportement d'une suspension à la filtration, il est indispensable de compléter cette étude par la déshydratation du gâteau de filtration à l'air.

Les essais de déshydratation par essorage à l'air doivent permettre de déterminer :

- * le comportement mécanique du gâteau lors de cette opération : apparition de craquelages, consistance.
- * la relation existant entre la quantité d'air traversant le gâteau et la teneur résiduelle en liqueur mère.
- * la relation existant entre la durée de l'opération de déshydratation et la teneur résiduelle en liqueur mère.

332. Mode opératoire

Dans la déshydratation par essorage à l'air suivant l'opération de filtration, les mêmes cellules que lors de la filtration sont utilisées pour mener cette étude. Seule l'installation de laboratoire évolue légèrement.

3321. Installation expérimentale

Le schéma ci-dessous représente l'installation qu'il est souhaitable de posséder pour mener une telle étude.

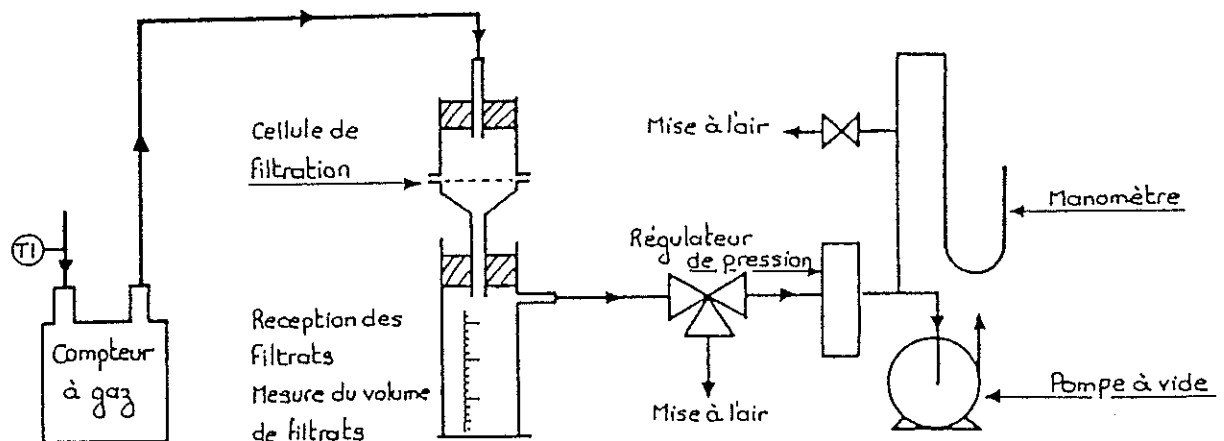


Figure 16 : Installation expérimentale d'étude de la déshydratation d'un gâteau de filtration par essorage à l'air.

Cette installation diffère de celle de filtration (fig. 11, page 26) par l'ajout d'une mesure du débit d'air traversant le gâteau. Cette mesure est permise grâce à un bouchon qui vient fermer la cellule de filtration et qui est traversé de part en part d'un tube relié à un compteur à gaz. La température du gaz à l'entrée du compteur est mesurée afin de donner des volumes d'air exprimés en Nm^3 .

La mesure du débit d'air traversant le gâteau s'effectue juste à partir du moment où la liqueur mère affleure la surface du gâteau : point d'affleurement. Avant cela la filtration est effectuée sans placer le bouchon sur la cellule d'essai. Au point d'affleurement, le vide est arrêté afin de pouvoir placer le bouchon sur la cellule de filtration. Il est ensuite remis en même temps que le chronomètre est déclenché pour mesurer le temps d'essorage. A la fin de l'essai, le vide est arrêté en même temps que le chronomètre. Le gâteau est débâti pour en mesurer la teneur résiduelle en liqueurs mères.

Une telle manipulation n'est pas très précise pour plusieurs raisons :

- * le vide n'est pas supprimé immédiatement sous le gâteau après filtration. L'essorage a déjà commencé.
- * le point d'affleurement est parfois délicat à visualiser.
- * le vide n'est pas supprimé immédiatement en fin d'essai.

Ces trois points ont une forte influence si le gâteau se déshydrate facilement ou lors d'essais de courtes durées. Si le gâteau se déshydrate lentement ou si l'on poursuit l'essai sur une longue période, ces incertitudes sont négligeables.

L'étude de l'essorage d'un gâteau de filtration impose de faire l'ensemble des opérations filtration-essorage pour chaque point expérimental. Le gâteau doit en effet être débâti à chaque fois pour analyse.

3322. Mesures à réaliser

Les mesures suggérées pour les essais de filtration (§ 3223) sont à reconduire pour les essais d'essorage.

Seules les mesures à effectuer sur le gâteau sont à reconduire à chaque point. Les caractéristiques de la suspension et du filtrat n'ont besoin de n'être mesurées qu'en début et en fin d'essai afin de contrôler si il n'y a pas eu de dérive dans la qualité des produits.

En plus de cela, il faut relever les paramètres suivants :

- * temps d'essorage : relevé à partir du point d'affleurement
- * volume d'air écoulé à travers le gâteau
- * température de l'air
- * volume de filtrat recueilli
- * teneur en liqueur mère dans le gâteau essoré.

3323. Observations à réaliser

Les essais d'essorage demandent les observations spécifiques suivantes :

* Présence de fissures à la surface du gâteau. Noter au bout de combien de temps ce phénomène apparaît. Dès que des fissures apparaissent, il est souvent inutile de poursuivre l'essai de déshydratation par essorage à l'air. L'air passe préférentiellement par les fissures ce qui fausse considérablement les mesures.

Dans ce cas, on peut essayer de comprimer le gâteau en cours d'essorage. Cette opération est toutefois très délicate à réaliser uniformément sans une installation adéquate.

* Décollement du gâteau des bords de la cellule de filtration. Les mêmes remarques que pour les fissures sont à formuler ici.

3324. Conseils de manipulation

Si l'on doit essorer un gâteau chaud, il est fort probable que l'essorage s'accompagnera d'un séchage par évaporation. Il faut en tenir compte lors de l'exploitation des résultats. Si les liqueurs mères contiennent un soluté facile à doser, ce produit peut servir de traceur pour mettre en évidence toute évaporation des liqueurs mères.

333. Essais à réaliser

Comme nous l'avons déjà vu les principaux essais à réaliser sont :

3331. Influence du temps d'essorage sur la teneur résiduelle en liqueur mère dans le gâteau

D'après les équations (54) et (55) (cf. partie théorique, § 2221), on doit pouvoir placer les points expérimentaux dans une représentation graphique ayant pour abscisses $(t_D \Delta P d g^2 / \mu h^2)$ et pour ordonnées un paramètre représentatif de l'humidité du gâteau (saturation ou humidité). Les points expérimentaux sont alors modélisables à l'aide d'équations de type (54) ou (55).

3332. Influence de la quantité d'air ayant traversé le gâteau sur la teneur résiduelle en liqueur mère dans le gâteau

D'après les équations (59), (60) et (61) (cf. partie théorique, § 2222), on doit pouvoir placer les points expérimentaux dans une représentation graphique ayant pour abscisses le débit d'air et en ordonnées un paramètre représentatif de l'humidité du gâteau (saturation, humidité). Les points expérimentaux sont alors modélisables à l'aide d'équations de type (59), (60) et (61).

D'autres essais peuvent être menés en plus des deux précédents.

3333. Influence de la pression appliquée au gâteau

L'exploitation vient rejoindre celle du paragraphe 3331.

3334. Influence de l'épaisseur du gâteau

L'exploitation vient rejoindre celle du paragraphe 3331.

3335. Influence du type d'alimentation du brouet

L'aptitude d'un gâteau à subir un essorage peut être totalement modifiée suivant le type d'alimentation de brouet qu'on réalise.

334. Résultats

3341. Modélisation

Nous ne possédons pas de résultats d'essais modélisés à l'aide des relations :

$$n \neq 1 \quad Bl_D = \frac{t_D \Delta P d g^2}{\mu_m h^2} = \frac{36 h k (1-\epsilon)^2 (1-S_\infty)^n}{\epsilon^3 (n-1)} \left[\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-1}} \right] \quad (47)$$

et

$$n \neq 1 \text{ et } 2 \quad \bar{Q}_n = \frac{\epsilon \mu_m (1-S_\infty)^{n-1}}{(1-\epsilon) \mu_n \rho_s} \left[\frac{1}{(n-1)} \cdot \left[\frac{1-S_t}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(n-2)} \left(\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-2}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-2}} \right) \right] \right] \quad (54)$$

La méthode à employer consiste à optimiser le paramètre n à partir des résultats expérimentaux. Une méthode d'optimisation par régression polynomiale de type Rosenbrock peut être employée.

Si la porosité évolue au cours des essais, il faudra en tenir compte lors de la modélisation. Dans ce cas, il peut être intéressant de faire passer ce paramètre dans le premier membre de l'équation. On obtiendra alors un Bl modifié.

S_{∞} peut être déterminé expérimentalement si cela est réalisable. Il est possible d'optimiser S_{∞} en même temps que n . Dans ce cas, il faut systématiquement tracer la courbe optimisée sur les points expérimentaux. Cela permet d'éviter de mauvaises surprises.

3342. Quelques exemples

33421. Courbe $Bl = f(H)$

La représentation graphique (fig. 17) regroupe trois essais réalisés sur deux produits très différents :

Produit A

- * Produit pulvérulent de même nature que § 32421
- * Gâteau thixotropique
- * $\varnothing_m = 10 \mu m$
- * $\alpha = 2.10^{11} m.kg^{-1}$
- * Gâteau très rapidement craquelé
- * Essorage sans compression

Produit B

- * Produit cristallisé
- * Gâteau résistant
- * $\varnothing_m = 100 \mu m$
- * Pas de craquelage
- * Essorage avec et sans compression

On remarque le comportement très différent des deux produits. Le craquelage du produit A explique en partie ses mauvaises performances à l'essorage.

Le produit B semble être sensible à la compression. Cette opération pourra être envisagée sur le filtre pilote ou le filtre industriel.

Pour l'ensemble des 3 courbes, on remarque qu'une augmentation importante de Bl_D n'apporte pas d'amélioration significative de l'humidité. Ainsi les valeurs optimales de Bl_D suivantes peuvent être proposées.

- * Produit A : $Bl_D = 10^4$
 $H = 0,68$

Commentaires : l'essorage atteint rapidement une asymptote. Dans les conditions retenues (proches de l'asymptote), seulement 16 % de l'humidité du gâteau ont été éliminés. Il serait certainement préférable de comprimer le gâteau de filtration puisque ce dernier se craquelle.

- * Produit B sans compression : $Bl_D = 9.10^3$
 $H = 0,45$

Commentaires : l'essorage semble plus efficace. Dans les conditions retenues, 26 % de l'humidité sont éliminés. Aucun craquelage n'a été observé à la surface du gâteau.

- * Produit B avec compression : $Bl_D = 9.10^3$
 $H = 0,41$

Commentaires : la compression n'améliore l'essorage que de 2 %. Pour ce produit, la compression n'est pas utile, à moins que l'installation de vide soit à la limite de ses performances.

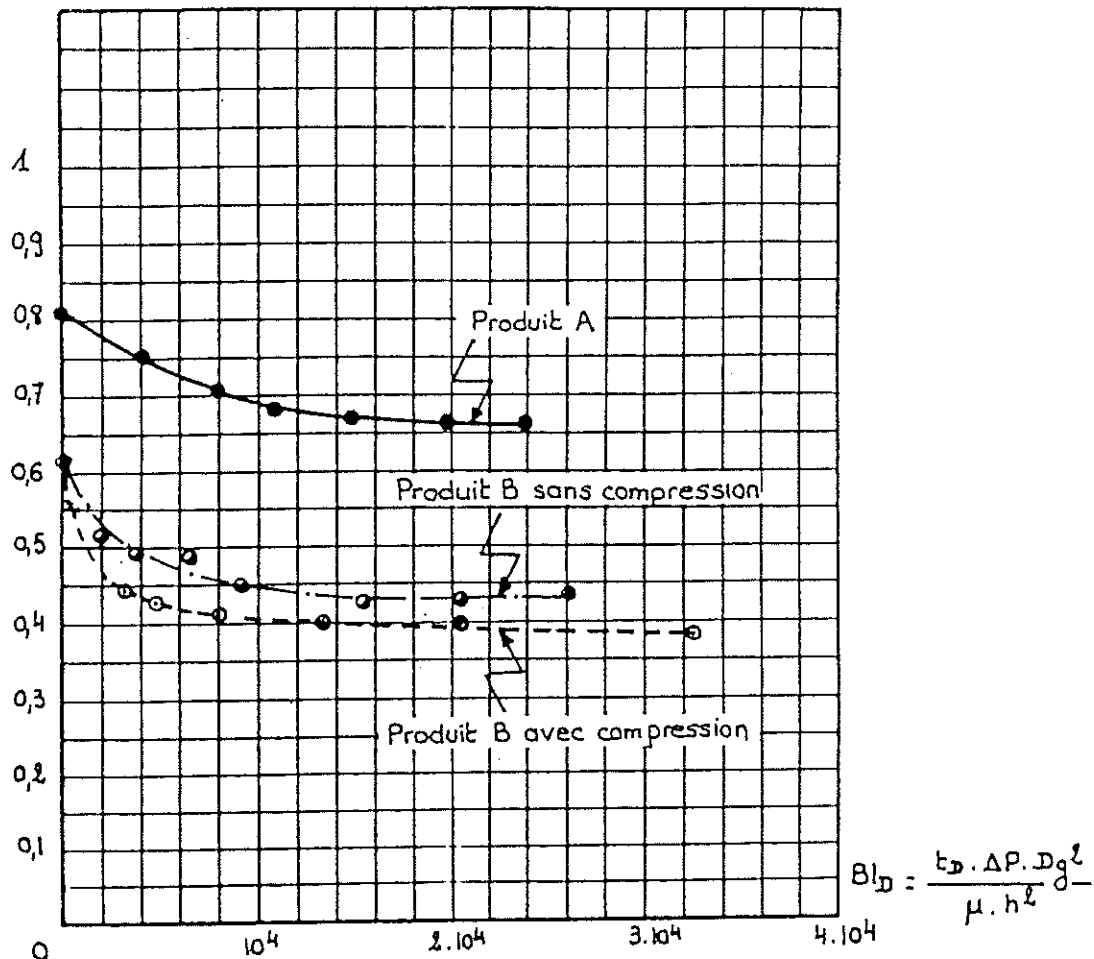


Figure 17 : Courbes humidité = $f(B_{ld})$

34. LES ESSAIS DE LAVAGE

341. But

Il est souvent intéressant de laver le gâteau de filtration pour réduire la teneur en soluté qu'il contient:

Les essais de lavage en laboratoire peuvent avoir pour but :

- * de tracer des courbes de lavage,
- * modéliser les courbes de lavage,
- * d'évaluer le temps nécessaire au lavage.

L'efficacité du lavage dépend en grande partie de l'humidité initiale du gâteau. De cette dernière dépend la quantité d'eau de lavage nécessaire pour obtenir une efficacité donnée.

Avant d'étudier le lavage d'un gâteau, il est donc nécessaire d'étudier son comportement à l'essorage avant lavage. Ultérieurement, il peut être souhaitable d'étudier le comportement à l'essorage d'un gâteau de filtration lavé.

Ce chapitre aborde le tracé des courbes de lavage et l'évaluation du temps nécessaire au lavage. La modélisation des courbes de lavage n'est pas abordée.

342. Mode opératoire

3421. Installation expérimentale

Elle est identique à l'installation de filtration sous vide. Il suffit d'y ajouter un dispositif de répartition de l'eau de lavage.

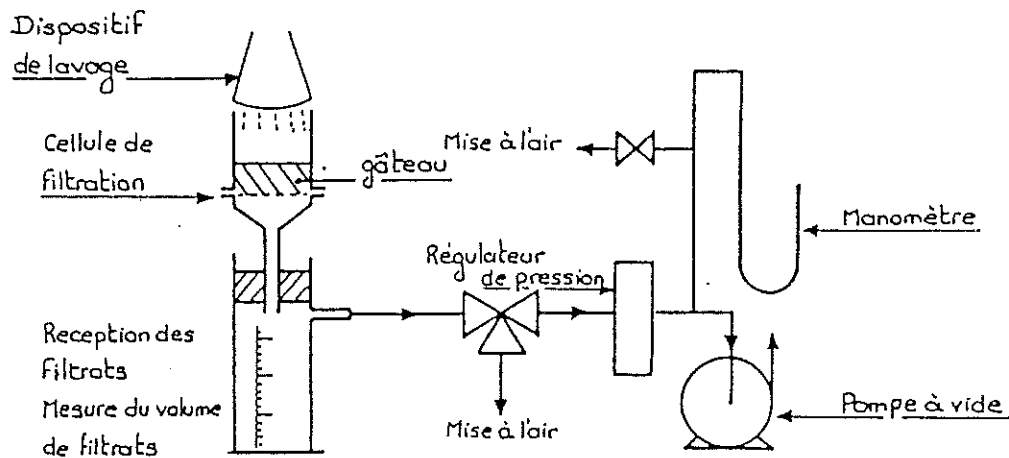


Figure 18 : Installation expérimentale de lavage de gâteaux de filtration.

Du dispositif de répartition de l'eau de lavage dépend la réussite de l'essai. Il doit répondre aux conditions suivantes :

- * répartir correctement l'eau de lavage
- * éviter de faire ruisseler l'eau sur les bords de la cellule de filtration
- * permettre un écoulement de faibles débits sous de faibles pressions
- * avoir un temps de réponse court.

Le dispositif à employer dépend de la cellule de filtration utilisée. Il est possible de conseiller les solutions suivantes :

- * pulvérisateur à jet rond plein de faible capacité
- * répartiteur type pomme d'arrosoir percée de micro-trous ($\varnothing < 1$ mm).

La mise au point du lavage doit être très satisfaisante avant de commencer les essais.

3422. Les mesures à réaliser

Sur la suspension avant filtration : les mêmes mesures que lors des essais de filtration (§ 32231).

Sur le gâteau de filtration : il est important de sacrifier un gâteau de filtration qui n'a pas été lavé afin de définir les conditions initiales :

- * temps d'affleurement de l'eau de lavage
- * épaisseur du gâteau avant et après lavage : permet de mettre en évidence des dissolutions éventuelles
- * porosité avant et après lavage
- * teneur en soluté dans l'eau retenue dans le gâteau après lavage
- * teneur en soluté dans le gâteau sec
- * température lors de l'essai
- * poids du gâteau sec et humide
- * évolution de la granulométrie du gâteau.

Sur l'eau de lavage :

- * teneur en soluté
- * volume
- * température
- * teneur en produit à laver si celui-ci est soluble
- * présence de fines éventuelles
- * pH

Sur le filtrat :

- * teneur en soluté
- * teneur en produit à laver si celui-ci est soluble
- * volume
- * température
- * pH
- * teneur en matières solides si nécessaire
- * répartition granulométrique de la phase solide si nécessaire.

Sur l'installation :

- * ΔP à travers le gâteau
- * pression dans le circuit de filtration
- * durées des différentes opérations.

3423. Observations à réaliser

En plus de celles conseillées lors de la filtration (§ 3224).

Sur le gâteau de filtration :

- * régularité de la surface avant et après lavage
- * présence de fissures avant et après lavage
- * dissolutions éventuelles du gâteau de filtration
- * bonne répartition de l'eau de lavage.

3424. Conseils de manipulation

Avant de se lancer dans des essais de lavage, il est nécessaire d'étudier le comportement du gâteau à l'essorage. Cela doit permettre de fixer l'essorage optimal du gâteau avant lavage.

Une fois le temps d'essorage fixé (à partir du point d'affleurement), il est recommandé de procéder ainsi :

- * Filtrer la suspension de façon à former un gâteau de même épaisseur pour chaque point d'une courbe de lavage.
- * Essorer le gâteau pendant une durée fixe pour tous les points et comptée à partir du point d'affleurement. Récupérer le filtrat pour ne pas le mélanger à celui du lavage.
- * Laver le gâteau en faisant varier la quantité d'eau de lavage à chaque point. Il est fortement recommandé de doubler les points de mesures.
- * Essorer le gâteau lavé sur une durée fixe pour tous les points et comptée à partir du point d'affleurement.
- * Débâter le gâteau pour l'analyser.
- * Récupérer le filtrat pour l'analyser.

343. Essais à réaliser

D'une manière générale, l'étude du lavage d'un gâteau de filtration s'effectue en faisant varier la quantité d'eau de lavage et en observant l'évolution de la concentration en soluté dans le gâteau. A partir de cela, plusieurs études sont souhaitables. En voici une liste non exhaustive :

3431. Alimentation de l'eau de lavage sur vide ou hors vide

Cette étude est très importante. L'alimentation du brouet hors vide peut améliorer significativement l'efficacité du lavage. Elle assure un meilleur contact entre les différents liquides en présence et peut permettre à l'eau de lavage d'accéder à des infractuosités difficiles du gâteau.

3432. Essorage du gâteau après lavage

Après lavage, l'essorage du gâteau peut être différent. Il est recommandé de faire cette étude. Dans ce cas, se reporter au chapitre précédent (§ 33).

3433. Etude du temps de filtration de l'eau de lavage

Dans le cas où l'eau de lavage submerge la surface du gâteau. Cette étude doit être menée en parallèle avec les courbes de lavage.

3434. Influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage

Cette étude peut être intéressante dans le cas où l'on envisage un lavage à contre-courant à plusieurs étages.

3435. Influence de la concentration en produit à laver dans l'eau de lavage

Dans le cas où le produit à laver est soluble, cette étude est très importante. Il est possible d'envisager de saturer l'eau de lavage dans le cas où toute dissolution pourrait être néfaste à l'efficacité du lavage.

3436. Influence de l'épaisseur du gâteau

Ce paramètre peut influencer sur l'efficacité du lavage. Souvent la méthodicit  du lavage croît avec l'épaisseur du gâteau.

3437. Influence de la température de l'eau de lavage

Ce paramètre peut avoir une influence sur l'efficacité du lavage. Si le gâteau est soluble, cette étude peut mettre en évidence divers problèmes d s au refroidissement du filtrat (précipitation de fines).

3438. Influence de multiples lavages à la suite les uns des autres

Peut permettre de mieux comprendre le comportement du gâteau dans le cas où celui-ci se lave mal.

344. Résultats

La modélisation des résultats expérimentaux n'est pas abordée dans ce paragraphe qui se veut très pratique.

3441. Quelques exemples

Les courbes qui vont être présentées concernent un même produit qui a pour caractéristiques :

- * de bien se filtrer et s'essorer
- * d'avoir une structure qui rend le lavage plus difficile
- * d'avoir un diamètre moyen de l'ordre de 100 μm .

34311. *Courbes de lavage*

Les deux représentations graphiques (figs. 19 et 20) ci-après sont deux façons de représenter une courbe de lavage.

* La première représente la courbe en coordonnées réelles. Elle a l'avantage de donner immédiatement une information concrète sur la teneur finale en soluté dans le gâteau. Par contre, il est difficile de comparer l'efficacité de différents lavages avec ce type de représentation.

Si entre deux courbes, l'humidité du gâteau avant lavage ou la teneur en soluté dans les eaux mères ou l'eau de lavage changent, il n'est plus possible de comparer deux courbes entre elles.

* La seconde représente la courbe de lavage en coordonnées réduites. Cela permet de s'affranchir des variations d'humidité du gâteau avant lavage ou des variations en soluté dans les eaux mères ou l'eau de lavage. Il est également possible de comparer différentes courbes entre elles, quelles que soient leurs conditions expérimentales.

Par contre, ce type de représentation ne permet pas d'accéder directement à la concentration finale en solutés dans le gâteau sec.

Commentaires : ce type de courbe (fig. 20) met en évidence un comportement très proche du lavage piston jusqu'à un taux de lavage de 0,8. Après cela, la courbe pratique s'écarte du lavage piston parfait (pointillés) pour amorcer une décroissance plus lente. Passé un taux de lavage de 1,6, il devient très difficile de réduire la concentration finale dans les eaux retenues dans le gâteau. Pour arriver à une valeur de $C_1 = C_L$, il faudrait des torrents d'eau, ce qui n'est plus rentable.

A la lueur de cette courbe, il est possible de fixer un taux de lavage optimum à 1,6. Passée cette valeur, une forte augmentation du débit d'eau de lavage n'est plus très efficace.

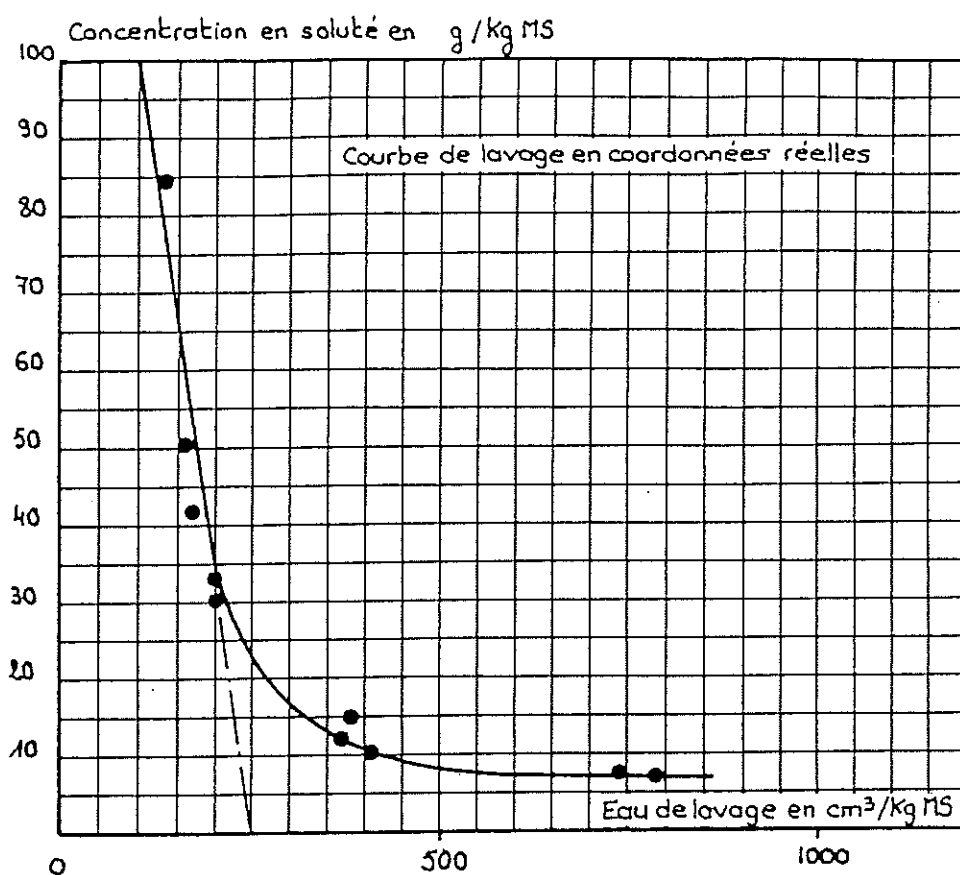


Figure 19 : Courbe de lavage représentée en coordonnées réelles.

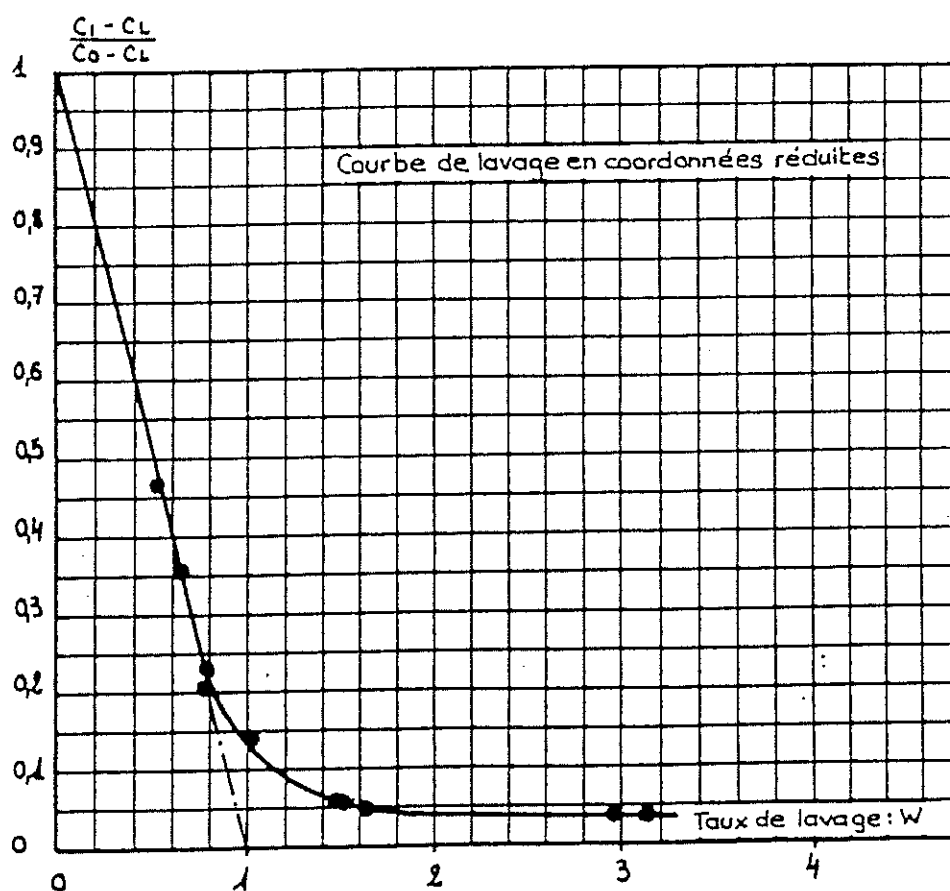


Figure 20 : Courbe de lavage représentée en coordonnées réduites.

34412. Influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage

La représentation graphique ci-dessous correspond à un essai de lavage réalisé avec trois teneurs en soluté différentes dans l'eau de lavage :

* 0 mole/litre * 1 mole/litre * 2 moles/litre

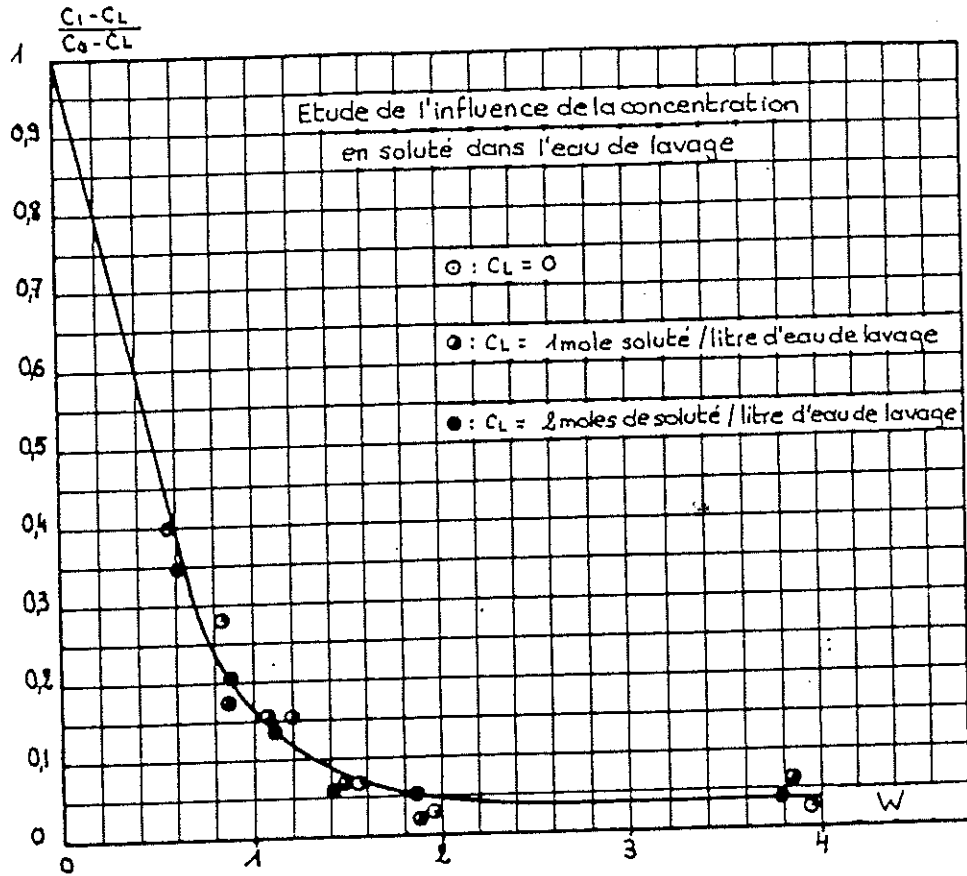


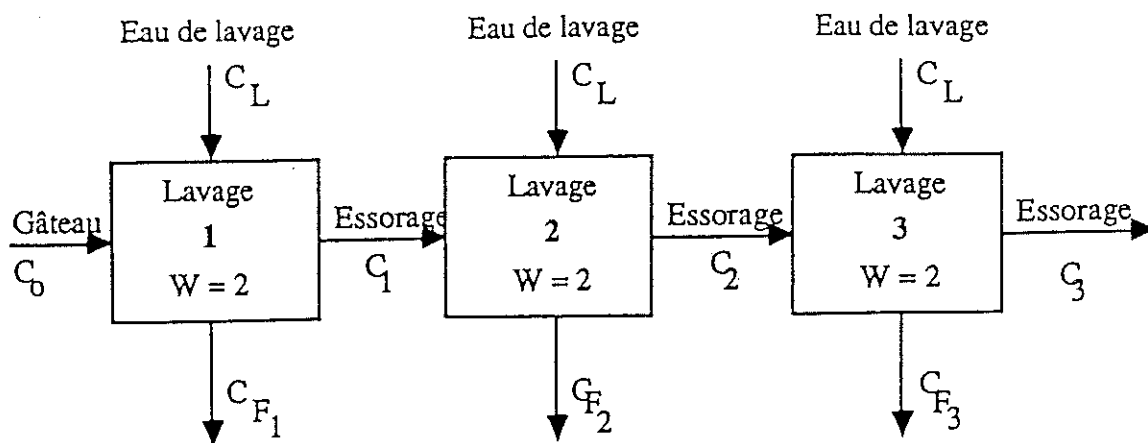
Figure 21 : Etude de l'influence de la concentration en soluté dans l'eau de lavage.

Commentaires : il est difficile de mettre en évidence des différences significatives entre les différentes conditions de lavage. Cela montre que la représentation en coordonnées réduites aide à s'affranchir des conditions opératoires pour comparer diverses courbes entre elles.

La courbe moyenne a une allure tout à fait identique à celle de la fig. 20.

34313. Etude de trois lavages en série

L'essai a été fait suivant le schéma :



La représentation graphique (fig. 22) regroupe les concentrations en soluté dans le gâteau en fonction des étapes de lavage.

La représentation graphique (fig. 23) regroupe l'évolution des concentrations en soluté dans l'eau retenue dans le gâteau en coordonnées réduites. Ces dernières ont été calculées de la façon suivante :

$$\text{Etape 1 : } \frac{C_1 - C_L}{C_0 - C_L}$$

$$\text{Etape 2 : } \frac{C_2 - C_L}{C_1 - C_L}$$

$$\text{Etape 3 : } \frac{C_3 - C_L}{C_2 - C_L}$$

Commentaires : dans cette étude, un taux de lavage de 2 correspond à une quantité d'eau de lavage de $500 \text{ cm}^3/\text{kg MS}$.

On peut alors comparer les résultats de cet essai aux courbes de lavage du paragraphe 34411.

* En coordonnées réelles (figs. 19 et 22), on constate que le multiple lavage en série semble être plus efficace que le simple lavage (à quantités totales d'eau de lavage égales) :

- à la première étape, les résultats sont identiques,
- dès la deuxième étape, le multiple lavage apporte une amélioration notable.

Il faut noter qu'entre chaque lavage, le gâteau est essoré pour être mis à une humidité constante avant lavage. Le fractionnement d'une quantité d'eau de lavage avec essorage entre deux lavages semble donc apporter une nette amélioration de l'efficacité du lavage dans ce cas de figure.

* En coordonnées réduites (figs. 20 et 23) le multiple lavage montre que l'efficacité des lavages diminue avec leur nombre. Ceci est dû à la réduction importante des concentrations en solutés dans l'eau retenue dans le gâteau après chaque lavage. A l'extrême limite, C_1 et C_0 tendant vers la même valeur, le rapport $(C_1 - C_L)/(C_0 - C_L)$ tendra vers 1.

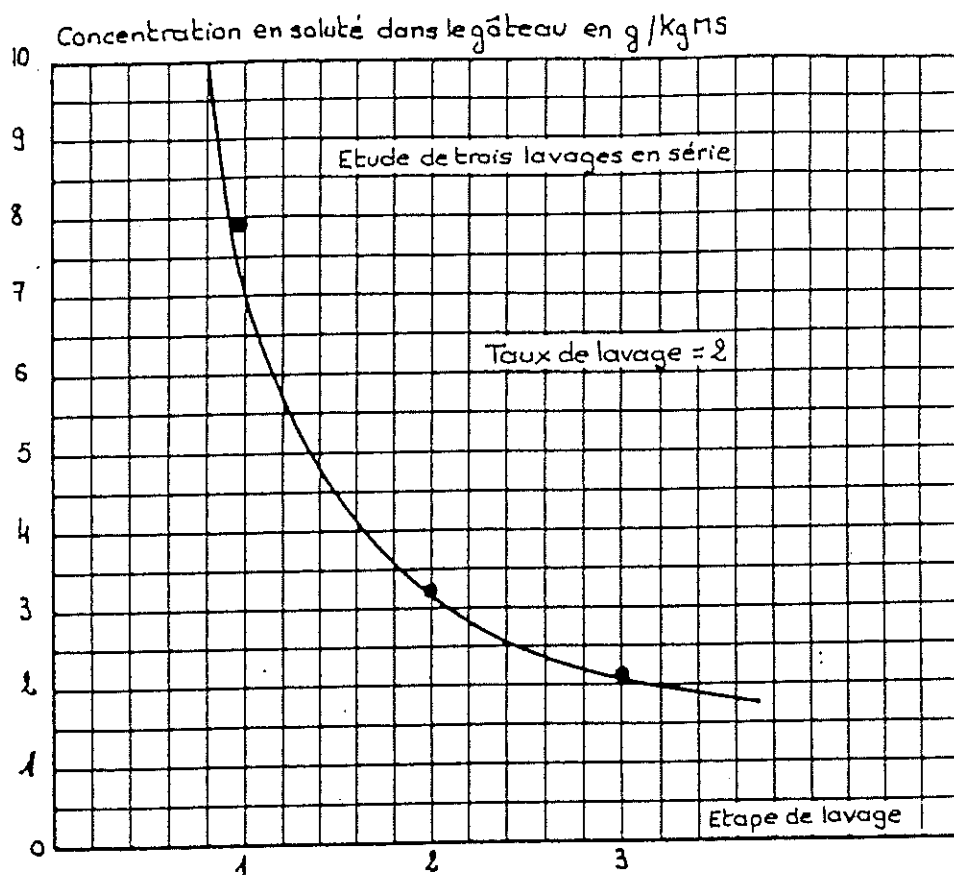


Figure 22 : Evolution de la concentration en soluté dans le gâteau en fonction du nombre d'étapes de lavage en série.

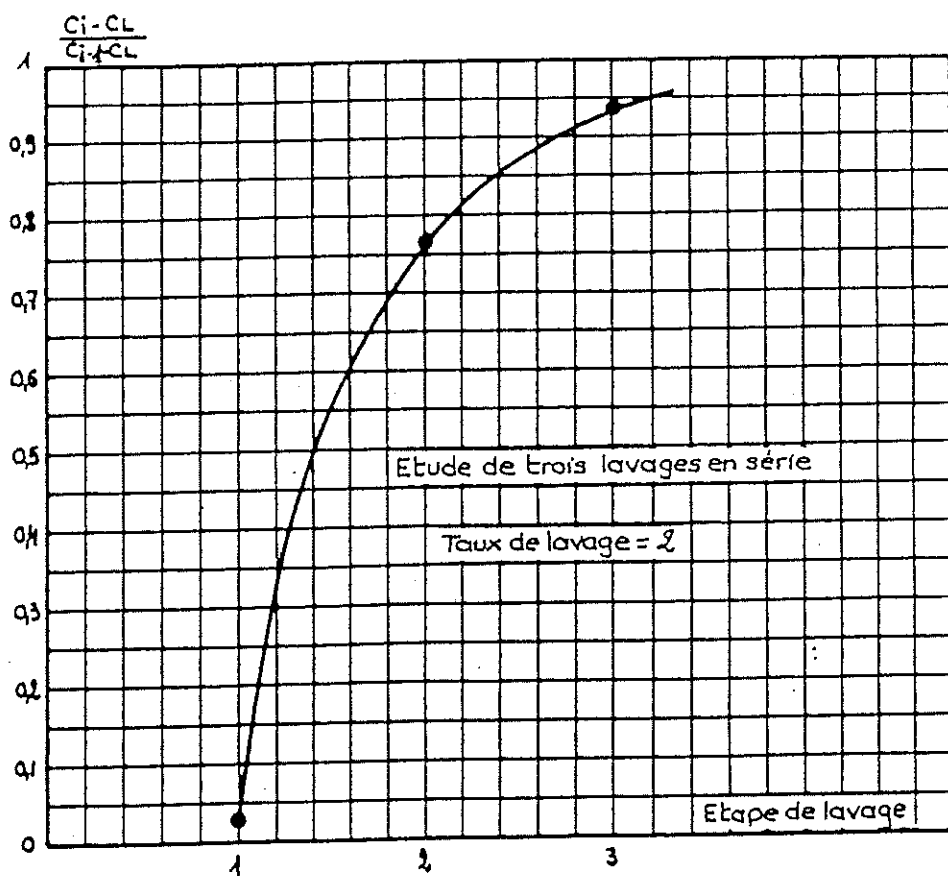


Figure 23 : Evolution des concentrations en coordonnées réduites en fonction du nombre d'étapes de lavage en série.

35. EXTRAPOLATION DES RESULTATS

Il est maintenant nécessaire d'extrapoler les résultats des essais proposés précédemment pour définir le filtre pilote ou le filtre industriel qu'il est envisagé d'employer par la suite.

Il est important de noter que l'extrapolation des résultats de laboratoire à un filtre pilote est plus précise que celle des résultats de laboratoire à un filtre industriel.

Ce chapitre permettra d'étudier deux types d'extrapolations possibles :

- * à un filtre de surface imposée (ce sera le calcul du filtre pilote)
- * à un filtre devant effectuer une production donnée (ce sera le calcul du filtre industriel).

351. Evaluation des différentes constantes BI

3511. Caractéristiques du produit à filtrer

Pour cet exemple de calcul, nous imaginerons devoir filtrer un produit fictif ayant les caractéristiques suivantes déterminées expérimentalement :

W	=	130 kg.m ⁻³
ρ _s	=	2.10 ³ kg.m ⁻³
ρ _L	=	1,1.10 ³ kg.m ⁻³
μ	=	10 ⁻³ Pa.s
α	=	1,64.10 ⁹ kg ⁻¹
D _g	=	10 μm
h _k	=	5,42
s _i	=	0,0935
n	=	0 (produit incompressible)

Porosité du gâteau de filtration : ε = 0,6

Humidité finale désirée dans le gâteau de filtration = 0,45

Teneur finale en soluté désirée = 3 kg/tMS

Teneur en soluté dans les eaux mères = 130 g/litre H₂O

Nombre de lavages envisagés = 1

Teneur en soluté dans l'eau de lavage = 0 gr/litre

Humidité dans le gâteau avant lavage = 0,5

Comportement du gâteau à la déshydratation : cf. courbe figure 17

Comportement du gâteau au lavage : cf. courbe figure 20.

3512. Quantité d'eau de lavage nécessaire

Une humidité finale de 0,45 se traduit par une quantité d'eau dans le gâteau de :

$$\overline{V_g} = \frac{H}{1-H} \cdot \frac{1}{\rho_L} \quad (78)$$

$$= \frac{0.45}{0.55} \cdot \frac{1}{1.1 \times 10^3} = 7.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg MS soit } 744 \text{ l/tMS}$$

Teneur en soluté dans l'eau retenue dans le gâteau après lavage :

$$C_1 = \frac{3}{744} \cong 4 \text{ g/litre H}_2\text{O}$$

Rapport C_1/C_0 : $\frac{C_1}{C_0} = \frac{4}{130} = 0,031$

Taux de lavage nécessaire : cf. courbe figure page

D'après cette courbe, le taux de lavage nécessaire est de : $W_L = 3$.

Quantité d'eau dans le gâteau avant lavage :

$$\begin{aligned}\overline{V_g} &= \frac{H}{1-H} \cdot \frac{1}{\rho_L} \\ &= \frac{0.5}{0.5} \cdot \frac{1}{1.1} = 9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg MS soit } 910 \text{ l/t MS}\end{aligned}\quad (78)$$

Quantité d'eau de lavage nécessaire :

$$\overline{V_L} = 9,1 \cdot 10^{-4} \times 3 \approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg MS soit } 2700 \text{ l/t MS}$$

3513. Détermination du paramètre Bl_a (point d'affleurement)

Rappelons la relation (18) développée dans la partie théorique :

$$Bl_a = \frac{t_a \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{18 h_k (1-\epsilon)^3}{\epsilon^3} \left[\left(\frac{1-s_i}{s_i} \right) \frac{\rho_s}{\rho_L} - \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon} \right) \right] \quad (18)$$

L'application numérique donne :

$$\underline{Bl_a \approx 430}$$

3514. Détermination de Bl_D^1 (Essorage avant lavage)

A partir de la modélisation des points expérimentaux et de la relation :

$$n \neq 1 \quad Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h_k (1-\epsilon)^2 (1-S_\infty)^n}{\epsilon^{3(n-1)}} \left[\frac{1}{(S_r - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-1}} \right] \quad (47)$$

Pour cet exemple, nous prendrons la courbe du produit B comprimé représentée figure page :

$$\underline{\text{Ainsi : } Bl_D^1 = 960 \text{ pour } H = 0.5}$$

3515. Détermination de Bl_L (lavage)

Dans ce cas :

$$Bl_L = \frac{\tau_L \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h_k (1-\epsilon)^3 \rho_s}{\epsilon^3} \left[\frac{V_L}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_o}{(1-H_o)\rho_L} \right] \quad (74)$$

L'application numérique donne :

$$\underline{Bl_L = 360}$$

3516. Détermination de Bl_D^2 (essorage final)

Même principe qu'au paragraphe 3514. On utilisera ici la même courbe de référence.

On obtient ainsi : $\underline{Bl_D^2 = 3000}$ pour $H = 0.4$

3517. Détermination du paramètre Bl_G (fonctionnement global)

$$Bl_G = Bl_a + Bl_D^1 + Bl_L + Bl_D^2 \quad (79)$$

Ici : $\underline{Bl_G = 4750}$

352. Calcul des filtres

3521. Répartitions relatives des différentes zones de fonctionnement

Connaissant les paramètres Bl propres à chaque opération, il est aisé de calculer les répartitions relatives de chaque zone de fonctionnement.

Ainsi si on suppose le ΔP constant à travers le filtre, on obtient pour notre exemple:

$$\% \text{ Filtration} = \frac{Bl_a}{Bl_G} \cdot 100 = \frac{430}{4750} \cdot 100 = 9,0 \%$$

$$\% \text{ Essorage (1)} = \frac{Bl_D^1}{Bl_G} \cdot 100 = \frac{960}{4750} \cdot 100 = 20,2 \%$$

$$\% \text{ Lavage} = \frac{Bl_L}{Bl_G} \cdot 100 = \frac{360}{4750} \cdot 100 = 7,6 \%$$

$$\% \text{ Essorage (2)} = \frac{Bl_D^2}{Bl_G} \cdot 100 = \frac{3000}{4750} \cdot 100 = 63,2 \%$$

3522. Calcul de la durée des différentes opérations

Nous supposons que les conditions optimales de fonctionnement sont réalisées pour :

$$\begin{aligned} h &= 10 \text{ mm} \\ \Delta P &= 3,10^4 \text{ Pa} \\ d_g &= 10 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

Le temps total du cycle sera :

$$t_G = \frac{B l_G \times \mu \times h^2}{\Delta P \times d_g^2} \quad (80)$$

L'application numérique donne : $t_G = 158 \text{ s}$

Temps de filtration :

$$t_a = 158 \times 0,09 = \underline{14 \text{ s}}$$

Temps d'essorage après lavage :

$$t_D^1 = 158 \times 0,202 = \underline{32 \text{ s}}$$

Temps de lavage :

$$t_L = 158 \times 0,076 = \underline{12 \text{ s}}$$

Temps d'essorage final :

$$t_D^2 = 158 \times 0,632 = \underline{100 \text{ s}}$$

3523. Productivité du filtre pilote

Imaginons que le filtre pilote ait les dimensions suivantes :

$$\begin{aligned} \text{longueur utile} &: \text{Long} = 2 \text{ m} \\ \text{largeur utile} &: \text{Larg} = 0,5 \text{ m} \\ \text{Surface filtrante} &: A = 1 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Connaissant la longueur utile du filtre et la durée globale du cycle de filtration, on peut en déduire la vitesse de défilement du filtre :

$$v = \frac{\text{Long.}}{t_G} \times 60 \text{ avec } v \text{ en m/min} \quad (81)$$

$$\text{Ici : } V = \underline{0,76 \text{ m/min}}$$

La production du filtre peut alors se calculer :

$$P = v \times \text{Larg} \times h \times (1-\epsilon) \times \rho_s \times 60 \quad \text{avec } P \text{ en kg MS/h} \quad (82)$$

$$\text{Ici : } P = \underline{182 \text{ kg MS/h}}$$

La productivité est alors égale à :

$$P' = \frac{P}{A} \quad \text{avec } P' \text{ en kg MS/h.m}^2 \quad (83)$$

$$\text{Ici : } P' = 182 \text{ kg MS/h.m}^2$$

3524. Dimensionnement du filtre industriel

Imaginons que la production à traiter soit de 10 t MS/h.

La production du filtre peut être calculée par la relation :

$$P = \frac{A \cdot h \cdot (1-\epsilon) \cdot \rho_s \cdot 3600}{t_G} \quad (84)$$

D'où la surface filtrante nécessaire :

$$A = \frac{P \cdot t_G}{h \cdot (1-\epsilon) \cdot \rho_s \cdot 3600} \quad (85)$$

1) Dans notre exemple : $A = 54,9 \text{ m}^2$

Productivité du filtre :

$$P' = \frac{P}{A} = 182 \text{ kg MS/h.m}^2 \quad (83)$$

c'est la même valeur que pour le filtre pilote ce qui est normal puisque les deux filtres travaillent dans les mêmes conditions.

Imaginons que le filtre industriel puisse avoir une largeur de 2 m. Dans ce cas, sa longueur est de :

$$\text{Long} = 27,45 \text{ m, valeur que nous arrondirons à } 27,5 \text{ m.}$$

La vitesse linéaire du filtre sera de : $v = 10,4 \text{ m/min}$

Les longueurs des différentes zones seront de :

$$\text{Longueur de filtration : } L_a = 2,48 \text{ m}$$

$$\text{Longueur d'essorage intermédiaire : } L_D^1 = 5,56 \text{ m}$$

$$\text{Longueur de lavage : } L_L = 2,1 \text{ m}$$

$$\text{Longueur d'essorage final : } L_D^2 = 17,38 \text{ m}$$

Remarque importante : un filtre de 55 m^2 peut paraître énorme pour une personne qui ne connaît pas l'opération. Les chiffres ci-dessous aideront à préciser des ordres de grandeurs pour le non initié.

Surfaces de filtres

Filtres rotatifs : un filtre de 2,5 m de diamètre et de 2 m de large n'est pas rare ; cela représente une surface filtrante totale de 15 m^2 .

Filtre à bande : actuellement, les plus gros filtres en fonctionnement dans le monde ont 120 à 150 m^2 de surface active ! La largeur d'un filtre à bande peut atteindre 4,5 m.

Vitesses linéaires des filtres

Certains filtres à bande peuvent atteindre une vitesse de bande de 40 m/min.

Epaisseur du gâteau

Elle peut varier de 1 à 150 mm. Dans le premier cas, il faut que le gâteau se décolle facilement. Ce cas reste très rare. 2 à 3 mm d'épaisseur sont plus fréquents.

Productivité

L'échelle de productivité suivante peut être établie :

Productivité $> 1 \text{ t/h.m}^2$:	forte productivité
$100 \text{ kg} < \text{Productivité} \leq 1 \text{ t/h.m}^2$:	productivité moyenne
$10 \text{ kg} < \text{Productivité} \leq 100 \text{ kg/h.m}^2$:	faible productivité
$\text{Productivité} \leq 10 \text{ kg/h.m}^2$:	très faible productivité

36. CONCLUSIONS

Comme nous venons de le voir, pour être menés sérieusement, les essais de filtration sur cellules de laboratoire demandent d'étudier beaucoup de paramètres.

Avant de décider de mener entièrement une étude de filtration en laboratoire, il est important de se rappeler les points critiques suivants :

Avantages :

- * Mise en oeuvre rapide
- * Installation simple
- * Investissement réduit
- * Faibles quantités d'échantillons de suspensions nécessaires (dans le cas où le produit à l'étude n'existe qu'en faibles quantités)
- * Réglages simples des différents paramètres à étudier
- * Possibilité d'étudier le comportement de toiles de filtration à partir de simples échantillons
- * Possibilité de vérifier rapidement un comportement industriel anormal.

Inconvénients :

- * Faibles dimensions des cellules qui rendent l'extrapolation des résultats incertaine
- * Effets de bords très marqués
- * Représentativité des échantillons filtrés parfois incertaine
- * Appréciation des durées des différentes opérations parfois délicate
- * Lavage souvent difficile à bien réaliser.

L'ensemble de ces points doit permettre de faire le choix entre :

* des essais en laboratoire poussés visant à dimensionner un filtre industriel au risque de le faire avec des facteurs d'extrapolation énormes (100 à plusieurs milliers) et des incertitudes non négligeables.

* des essais d'orientation en laboratoire visant à étudier succinctement le comportement du produit à la filtration et à voir si cette opération est intéressante ; puis des essais sur filtre pilote qui eux seront plus poussés et représentent une étape intermédiaire souhaitable avant de définir le filtre industriel.

Quoi qu'il en soit, il est certain que les essais en laboratoire sur cellules de filtration doivent être la première étape indispensable de l'étude d'une opération qui est souvent un art demandant beaucoup d'expérience.

4. LES ESSAIS PILOTES

41. BUT

Comme nous l'avons déjà laissé entendre à la fin du chapitre précédent, les essais de filtration sur filtre pilote semblent être une étape nécessaire entre les essais de laboratoire et le dimensionnement du filtre industriel.

Les essais sur filtre pilote permettent de travailler en continu et ainsi d'étudier les variations de comportement que peut avoir la suspension à filtrer. Ils permettent aussi de mettre en évidence l'aptitude qu'a le gâteau à se débâtir.

Le lavage à plusieurs étages à contre-courant peut être analysé sur les filtres pilotes alors que cela est très difficile en laboratoire.

Enfin le comportement de la toile filtrante peut être étudié à l'échelle industrielle.

42. LES FILTRES PILOTES

Ceux qui nous intéressent plus particulièrement dans cet exposé sont les filtres sous vide. Dans ce domaine, les deux principaux types sont :

- * les filtres rotatifs sous vide
- * les filtres à bandes.

D'autres filtres sous vide existent. Citons pour mémoire les filtres à disques.

Presque tous les fabricants de filtres possèdent des pilotes qu'ils louent pour permettre de réaliser des essais. La surface de ces filtres varie entre 0,1 et 1,5 m².

421. Installation pilote type

Le schéma figure 24, ci-dessous, représente une installation pilote filtre à bande type. Un filtre rotatif sous vide pilote nécessite une installation identique. Cet exemple représente un filtre équipé d'un double lavage à contre-courant.

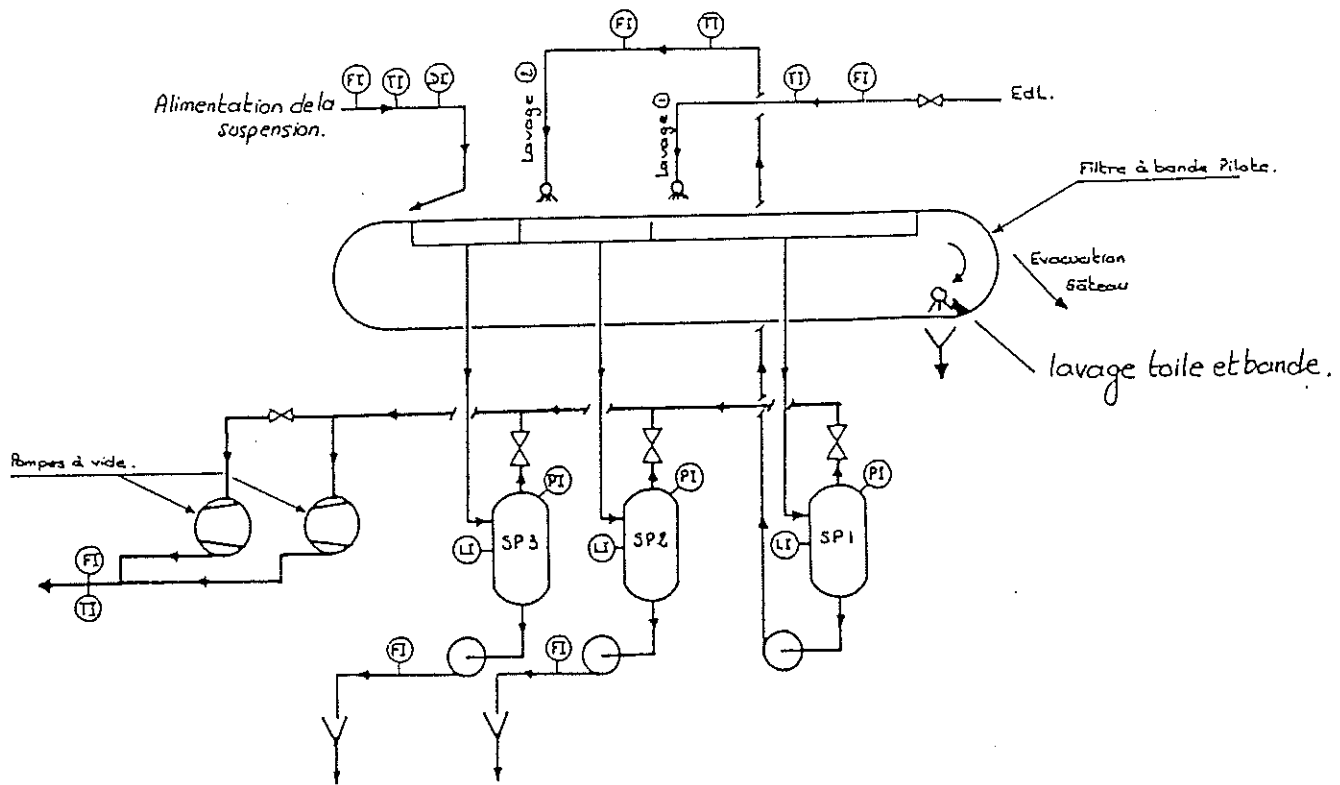


Figure 24 : Installation pilote type.

Il est recommandé qu'une installation pilote de filtration puisse être composée des éléments suivants :

- * le filtre pilote
- * le réseau de vide (vide usine ou pompe à vide)
- * une alimentation de la suspension en continu
- * des séparateurs permettant de recueillir les liqueurs mères et les filtrats des différents lavages (s'ils sont nécessaires)
- * une balance pour mesurer les débits de gâteau
- * des mesures de températures situées :
 - sur l'alimentation du brouet
 - sur les différentes alimentations en eaux de lavage
 - sur l'air au refoulement des pompes à vide ou sur le collecteur général de vide
- * des mesures de débits
 - de suspension alimentant le filtre
 - d'eaux de lavage à chaque étape de lavage
 - d'air au refoulement des pompes à vide ou sur le collecteur général de vide
 - de filtrats si ceux-ci ne sont pas utilisés pour le lavage
 - de l'eau de lavage de la toile et de la bande (pour un filtre à bande)
- * des mesures de pression
 - dans les séparateurs
 - dans le circuit d'air au refoulement des pompes à vide ou dans le collecteur général de vide
- * d'une mesure de la densité de la suspension (éventuellement).

43. LES ESSAIS A REALISER

Ils sont de plusieurs types :

- * les essais de filtration proprement dits
- * les essais d'essorage
- * les essais de lavage.

La conception des filtres ne permet pas d'étudier ces opérations séparément. Ainsi la filtration sera la plupart du temps suivie d'un essorage du gâteau, le lavage sera souvent placé entre deux essorages.

431. Les essais de filtration et d'essorage

4311. But

Ils doivent permettre de modéliser le comportement de la suspension lors de la filtration et le comportement du gâteau à l'essorage avant lavage (si cette opération est envisagée). Dans ce dernier cas, ils doivent permettre de déterminer un Bl_D optimal avant lavage.

4312. Conduite des essais

Les essais doivent viser à faire varier Bl_a et Bl_D et à regarder l'influence de ces paramètres sur l'humidité finale du gâteau et la consommation d'air.

La variation de Bl_a et Bl_D peut s'obtenir en faisant varier :

- * la vitesse linéaire du filtre
- * la pression appliquée au gâteau
- * l'épaisseur du gâteau
- * le d_g du gâteau (paramètre que l'on subit généralement)
- * le débit d'alimentation du brouet.

4313. Essais à réaliser

Dans le cadre de cette étude, les essais suivants peuvent être réalisés :

- * influence du type d'alimentation du brouet (sur vide ou hors vide) dans le cas d'un filtre à bande,
- * influence d'une compression du gâteau,
- * essais sur de longues durées (permettent de prendre en compte les anomalies de fonctionnement industriel).

4314. Conseils de manipulation

* Alimentation du brouet sur un filtre à bande : l'alimentation de la suspension peut avoir une grande importance surtout si elle est réalisée sur vide. Les schémas figure 25 présentent différents types d'alimentation possibles. De plus, il faut prêter attention à ce que la suspension soit répartie uniformément sur la largeur du filtre.

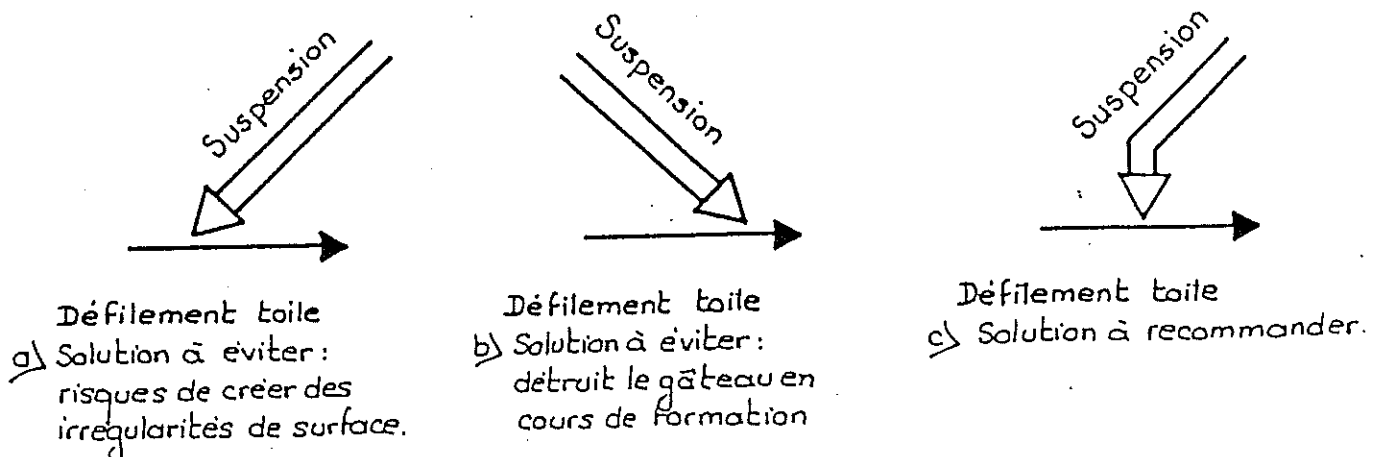


Figure 25 : Différents types d'alimentation de la suspension possibles.

* Compression du gâteau : pour que la compression du gâteau soit encore plus efficace, il est souhaitable d'assurer un glissement entre le rouleau et la surface du gâteau, le rouleau ayant une vitesse linéaire environ 5 % plus élevée que celle du gâteau. Malheureusement, ceci n'est pas toujours réalisable sur filtre pilote. On devra donc se contenter d'un simple rouleau presseur sans entraînement.

* Prélèvement d'échantillons de gâteau : ils doivent impérativement être réalisés sur toute la largeur du gâteau. Il est recommandé de prendre une grosse quantité de gâteau et de bien la mélanger avant d'en extraire l'échantillon à analyser. Ne pas hésiter à doubler les points de mesure.

432. Les essais de lavage et d'essorage après lavage

4321. But

Ils doivent d'une part étudier le comportement du gâteau au lavage (simple ou multiple à contre-courant), d'autre part, permettre de modéliser la filtration de l'Edl et l'essorage après lavage.

4322. Conduite des essais

Les essais de lavage proprement dits seront réalisés en fixant:

- * des temps d'essorage entre lavages
- * une épaisseur de gâteau
- * un ΔP de fonctionnement

et en faisant varier la quantité d'eau de lavage de 0 litre/t MS à un débit suffisamment important pour ne plus voir d'évolution de la concentration finale en soluté dans le gâteau.

Les essais d'essorage ne seront réalisés qu'après un seul lavage. Par hypothèse, on suppose que les essorages intermédiaires se comportent comme l'essorage final. Seul l'essorage entre la filtration et le 1er lavage est dans ce cas susceptible d'évoluer.

Dans la mesure du possible, le paramètre Bl_D^1 (entre filtration et lavage) sera gardé constant.

Les paramètres à faire varier sont les mêmes que pour la filtration (§ 4312).

4323. Essais à réaliser

Dans le cadre de cette étude, les essais suivants peuvent être réalisés :

- * établissement de courbes de simples et multiples lavages à contre-courant,
- * influence de l'épaisseur du gâteau,
- * influence de la température de l'eau de lavage,
- * influence d'une compression du gâteau,
- * essais de longues durées.

4324. Conseils de manipulation

En plus des conseils donnés au § 4314, les conseils suivants spécifiques au lavage, sont à noter :

* Répartition de l'Edl : elle doit être réalisée sur la longueur la plus courte possible et être parfaitement constante sur la largeur du gâteau. Ces deux conditions sont les éléments indispensables pour réussir les essais de lavage, surtout si l'eau se filtre facilement.

* Débits d'eau de lavage : dans le cas de lavages à contre-courant, il faut veiller à ce que les éventuelles régulations de niveaux dans les séparateurs permettent d'assurer des débits de lavage très stables. Eviter tout pompage qui peut être néfaste au lavage.

* Niveaux dans les séparateurs : dans le cas de lavages à contre-courant, il est recommandé de travailler avec les plus faibles niveaux possibles dans les séparateurs. Lorsqu'on change le débit de lavage, cela limite le temps pendant lequel il faut attendre que les concentrations en soluté dans les solutions recueillies dans les séparateurs soient constantes (condition nécessaire avant de prendre un nouvel échantillon de gâteau).

433. Les effets de bords

Les filtres pilotes étant souvent étroits, il est important de pouvoir évaluer l'influence des effets de bords sur les résultats finaux. Pour cela, il est nécessaire de découper le gâteau dans le sens de la longueur par exemple en tranches égales à 1/10 de la largeur. De proche en proche, il est ainsi possible de tracer l'évolution de l'humidité et de la teneur en soluté dans le gâteau sur la largeur du filtre.

Ces résultats peuvent aider à corriger les résultats globaux si nécessaire.

44. LES RELEVÉS A EFFECTUER

La liste de relevés qui va suivre n'est pas exhaustive. Elle représente un optimum qu'il est souhaitable de respecter.

Chaque prise d'échantillon doit être accompagnée des relevés des conditions de fonctionnement du filtre.

441. Fonctionnement du filtre

Vitesse de la bande,
Débit de suspension,
Epaisseur du gâteau,
Débit d'air,
Débit massique de gâteau,
Pertes de charge,
Nombre de lavages*,
Débits des différents lavages*,
Température des différentes eaux de lavage*,
Longueur d'affleurement des eaux mères,
Longueur totale de filtration,
Longueur des différentes zones d'essorage*,
Longueur d'affleurement des eaux de lavage*,
Pression dans les séparateurs.

* dans le cas où le lavage est étudié.

442. Analyses à effectuer

4421. Sur la suspension

Température
Densité de suspension
Granulométrie sur les matières sèches
Concentration en soluté dans les eaux mères
pH

4422. Sur les eaux de lavage (si cette opération est étudiée)

Température
Concentration en soluté
Concentration en produit à laver s'il est soluble
pH

4423. Sur le gâteau de filtration

Humidité
Granulométrie
Teneur en soluté
Porosité

4424. Sur l'eau de lavage de la toile et de la bande
(si cette opération existe)

Température
Teneur en soluté
pH

443. Observations à réaliser

4431. Sur les rampes de lavage

Propreté
Répartition correcte de l'EdL
Pompages éventuels

4432. Sur le gâteau

Craquelages du gâteau
Régularité de la surface
Allure de la ligne d'affleurement
Débâtissage
Stratifications éventuelles (si elles existent, une étude granulométrique est souhaitable).

4433. Anomalies de fonctionnement

Relever toute anomalie de fonctionnement même minime.

45. RESULTATS

451. Essais de filtration et essorage

4511. Modélisation

Rappelons les modèles représentant les opérations de filtration et d'essorage.

* Filtration

$$Bl_a = \frac{t_a \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{18 h_k (1-H_a)^3 p_L^2}{H_a^3 p_s^2} \left(\frac{1-s_i}{s_i} - \frac{H_a}{1-H_a} \right) \quad (25)$$

où
$$H_a = \frac{\varepsilon \rho_L}{\varepsilon \rho_L + (1-\varepsilon) \rho_s} \quad (86)$$

Bl_a est donc uniquement fonction de s_i et ε seuls paramètres susceptibles de varier.

* Essorage à l'air

$n \neq 1$
$$Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h_k (1-\varepsilon)^2 (1-S_\infty)^n}{\varepsilon^3 (n-1)} \left(\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-1}} \right) \quad (47)$$

et

$n \neq 1 \text{ et } 2$
$$\overline{Q_n} = \frac{\varepsilon \mu_m (1-S_\infty)^{n-1}}{(1-\varepsilon) \mu_m \rho_s} \cdot \frac{1}{(n-1)} \left[\frac{1-S_t}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{n-2} \left(\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-2}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-2}} \right) \right] \quad (54)$$

La modélisation des résultats expérimentaux va se réaliser de la façon suivante:

* Filtration : les équations (25) et (86) montrent que Bl_a ne dépend que de deux paramètres susceptibles de varier : s_i et ε .

- s_i varie si la densité de suspension évolue (ce qui n'est pas recommandé),
- ε varie si le gâteau est compressible.

Dans l'hypothèse où s_i ou (et) ε varient, la modélisation sera réalisée en affectant à chaque point le Bl_a , le ε et le s_i qui le caractérise et en optimisant la constante h_k de Kozeny afin d'obtenir la meilleure corrélation possible.

On obtient ainsi la constante h_k caractéristique de la filtration et de la résistance spécifique du gâteau.

* Essorage : les équations (47) et (54) montrent que Bl_D ne dépend que de deux paramètres susceptibles de varier : ε et s .

- ε varie si le gâteau est compressible
- s est directement relié à H par :

$$S = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\rho_s}{\rho_L} \frac{H}{1-H} \quad (21)$$

Ainsi, connaissant ε , H et Bl_D , il est possible de modéliser les relations (47) et (54) en optimisant l'indice "n" qui figure dans chacune d'elles. Une régression polynomiale de Rosenbrock peut être utilisée à cet effet. S_∞ peut être soit terminée expérimentalement, soit optimisée avec "n".

Théoriquement, "n" devrait être le même dans les deux équations. Il arrive qu'il soit différent. Cela n'est pas inquiétant en soi puisque l'important est de modéliser au mieux les résultats expérimentaux.

4521. Résultats

* Courbes $H = f(BI_D)$ et $S = f(BI_D)$

Les figures ci-dessous sont caractéristiques des résultats qu'il est possible d'obtenir. Les deux modélisations possibles sont présentées.

Dans ce cas particulier : $n = 3,6$
 $S_{\infty} = 0$

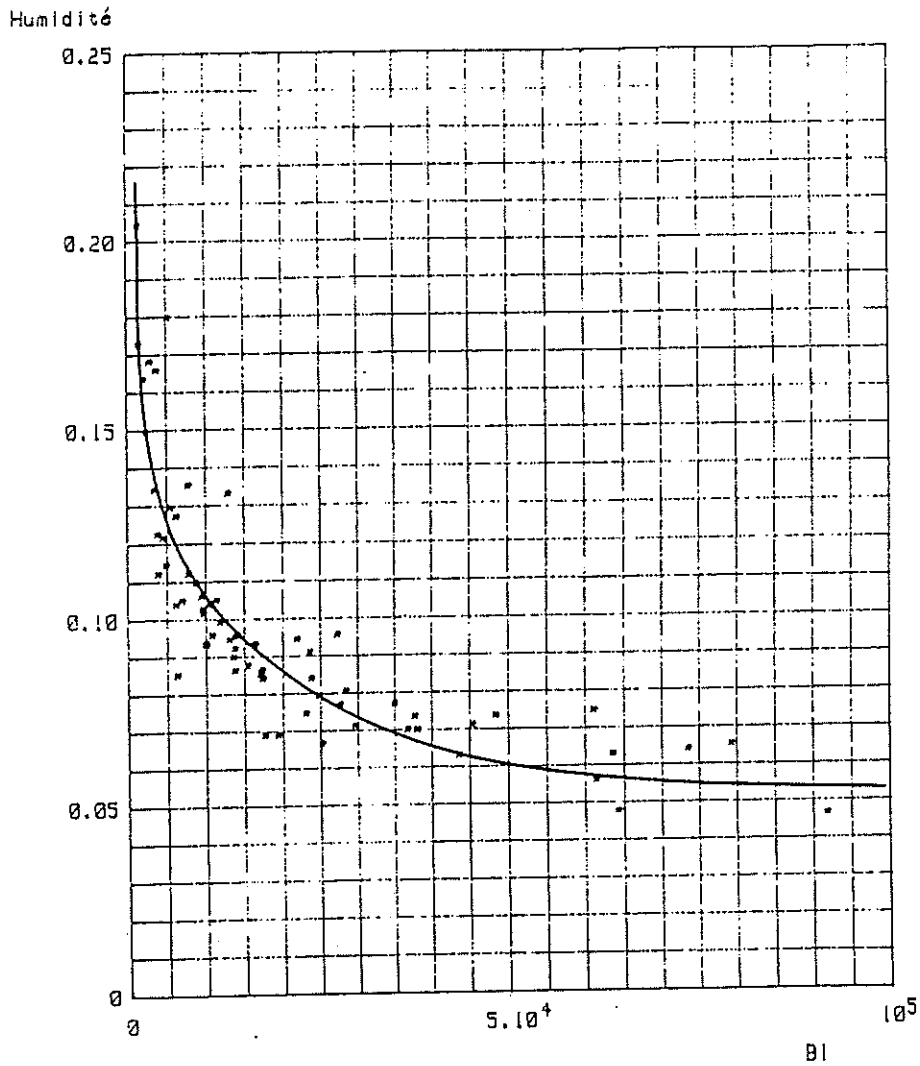


Figure 26 : Exemple de résultats expérimentaux d'essais de déshydratation sur filtre pilote. Courbe optimisée $H = f(BI)$.

$$\text{où} \quad H_a = \frac{\varepsilon \rho_L}{\varepsilon \rho_L + (1-\varepsilon) \rho_s} \quad (8)$$

Bl_a est donc uniquement fonction de s_i et ε seuls paramètres susceptibles de

* Essorage à l'air

$$n \neq 1 \quad Bl_D = \frac{t_D \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h_k (1-\varepsilon)^2 (1-S_\infty)^n}{\varepsilon^3 (n-1)} \left(\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-1}} \right) \quad (47)$$

et

$$n \neq 1 \text{ et } 2 \quad \overline{Q_n} = \frac{\varepsilon \mu_m (1-S_\infty)^{n-1}}{(1-\varepsilon) \mu_m \rho_s} \cdot \frac{1}{(n-1)} \left[\frac{1-S_t}{(S_t - S_\infty)^{n-1}} - \frac{1}{n-2} \left(\frac{1}{(S_t - S_\infty)^{n-2}} - \frac{1}{(1-S_\infty)^{n-2}} \right) \right] \quad (5)$$

La modélisation des résultats expérimentaux va se réaliser de la façon suivante

* Filtration : les équations (25) et (86) montrent que Bl_a ne dépend que de paramètres susceptibles de varier : s_i et ε .

- s_i varie si la densité de suspension évolue (ce qui n'est pas recommandé),
- ε varie si le gâteau est compressible.

Dans l'hypothèse où s_i ou (et) ε varient, la modélisation sera réalisée en affectant à chaque point le Bl_a , le ε et le s_i qui le caractérise et en optimisant la constante Kozeny afin d'obtenir la meilleure corrélation possible.

On obtient ainsi la constante h_k caractéristique de la filtration et de la résistivité spécifique du gâteau.

* Essorage : les équations (47) et (54) montrent que Bl_D ne dépend que de paramètres susceptibles de varier : ε et s .

- ε varie si le gâteau est compressible
- s est directement relié à H par :

$$S = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\rho_s}{\rho_L} \frac{H}{1-H}$$

Ainsi, connaissant ε , H et Bl_D , il est possible de modéliser les relations (54) en optimisant l'indice "n" qui figure dans chacune d'elles. Une relation polynomiale de Rosenbrock peut être utilisée à cet effet. S_∞ peut être soit déterminée expérimentalement, soit optimisée avec "n".

Théoriquement, "n" devrait être le même dans les deux équations. Il arrive souvent qu'il soit différent. Cela n'est pas inquiétant en soi puisque l'important est de modéliser mieux les résultats expérimentaux.

4521. Résultats

* Courbes $H = f(BI_D)$ et $S = f(BI_D)$

Les figures ci-dessous sont caractéristiques des résultats qu'il est possible d'obtenir. Les deux modélisations possibles sont présentées.

Dans ce cas particulier : $n = 3,6$
 $S_{\infty} = 0$

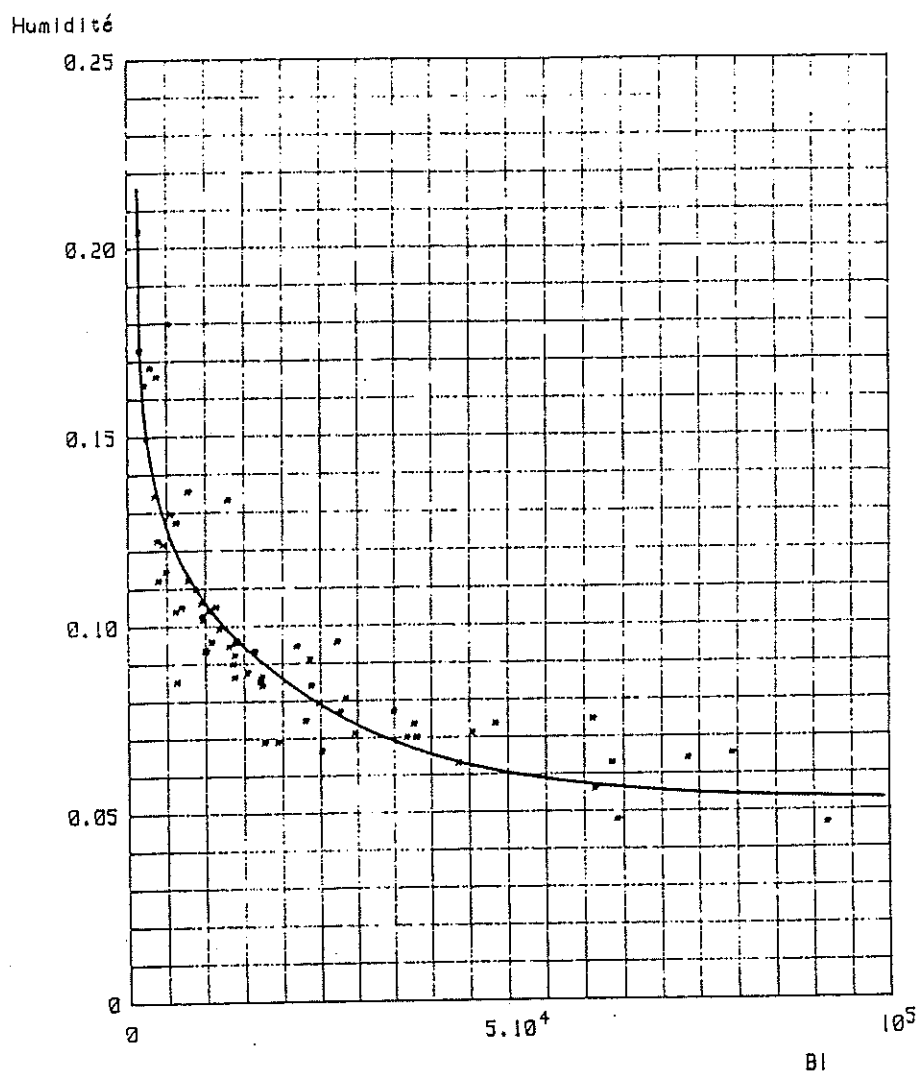


Figure 26 : Exemple de résultats expérimentaux d'essais de déshydratation sur filtre pilote. Courbe optimisée $H = f(BI)$.

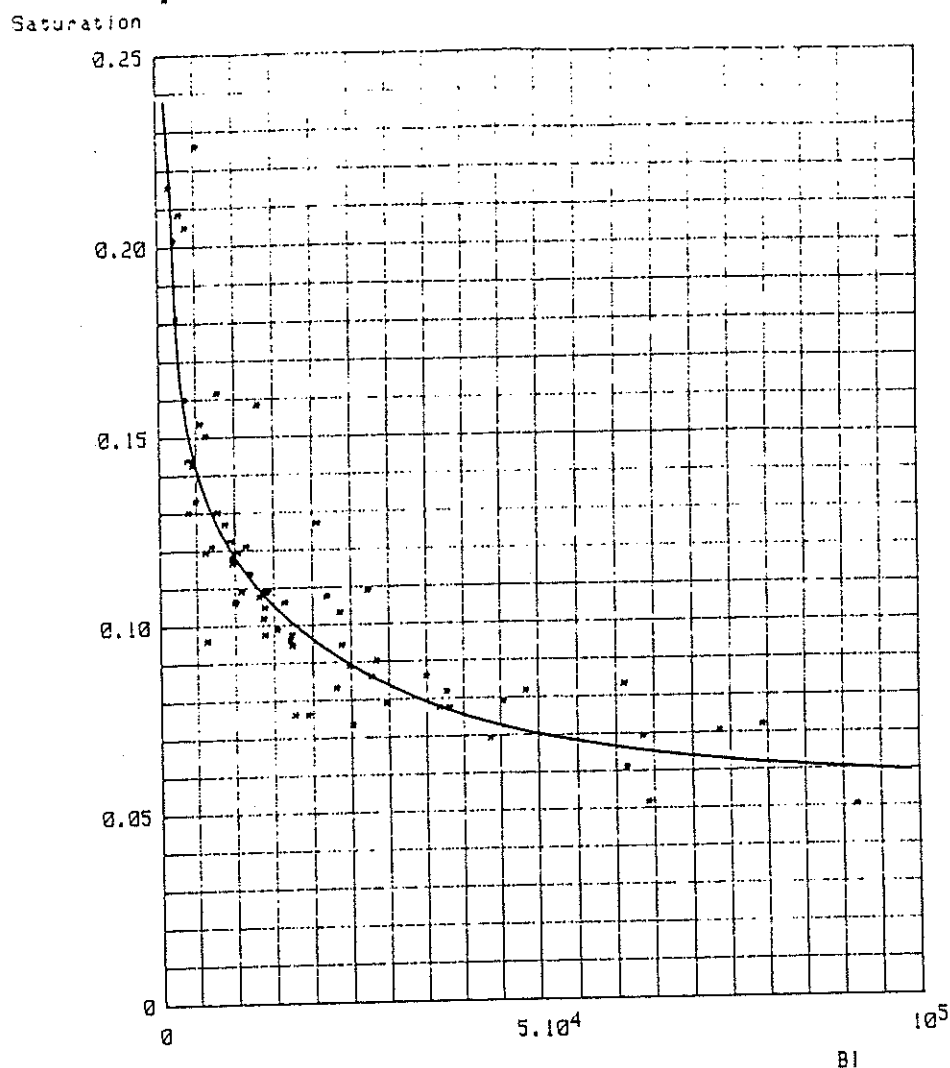


Figure 27 : Exemple de résultats expérimentaux d'essais de déshydratation sur filtre pilote. Courbe optimisée $S = f(BI)$.

* Courbes $H = f(Q_n)$ et $S = f(Q_n)$:

Les représentations ci-dessous sont caractéristiques des résultats qu'il est possible d'obtenir. Les deux modélisations possibles sont présentées.

Dans ce cas particulier : $n = 2,49$
 $S_{\infty} = 0$

Le produit étudié dans ce cas est différent du précédent.

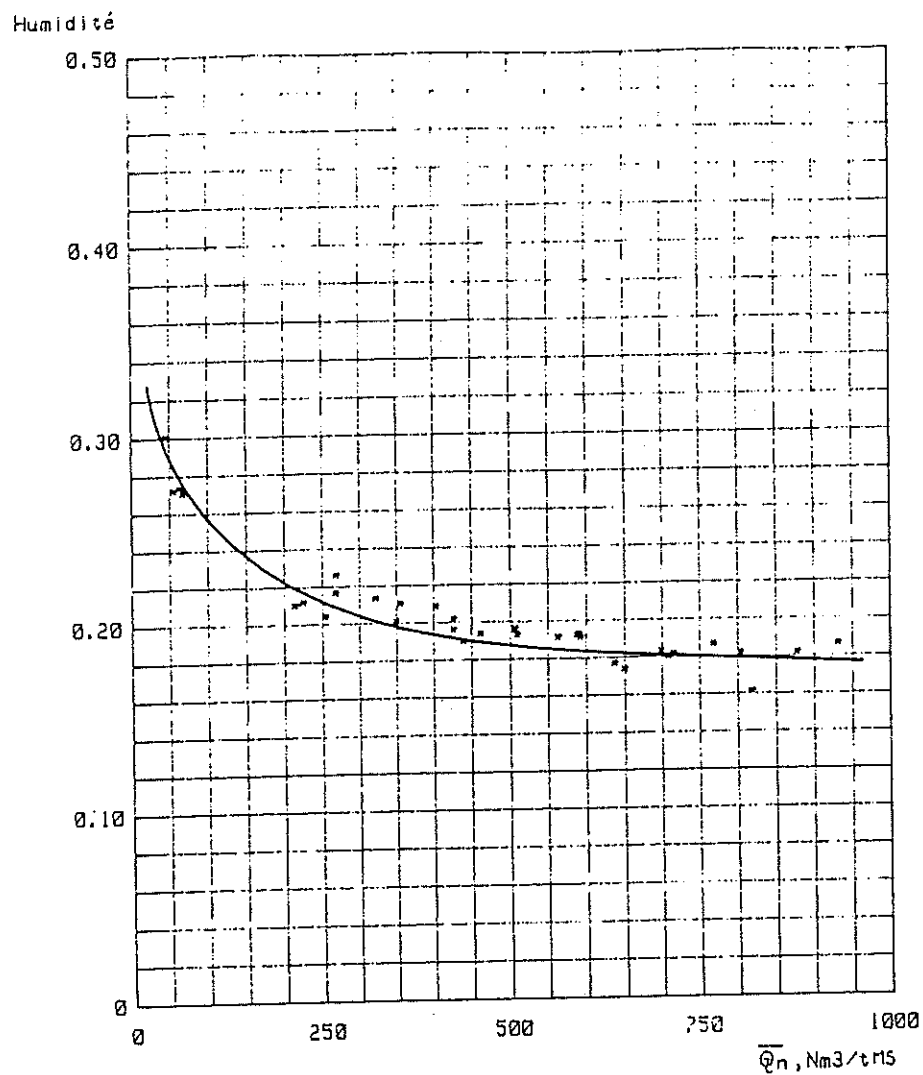


Figure 28 : Exemple de résultats expérimentaux d'essais de déshydratation sur filtre pilote. Courbe optimisée $H = f(\overline{Q}_n)$.

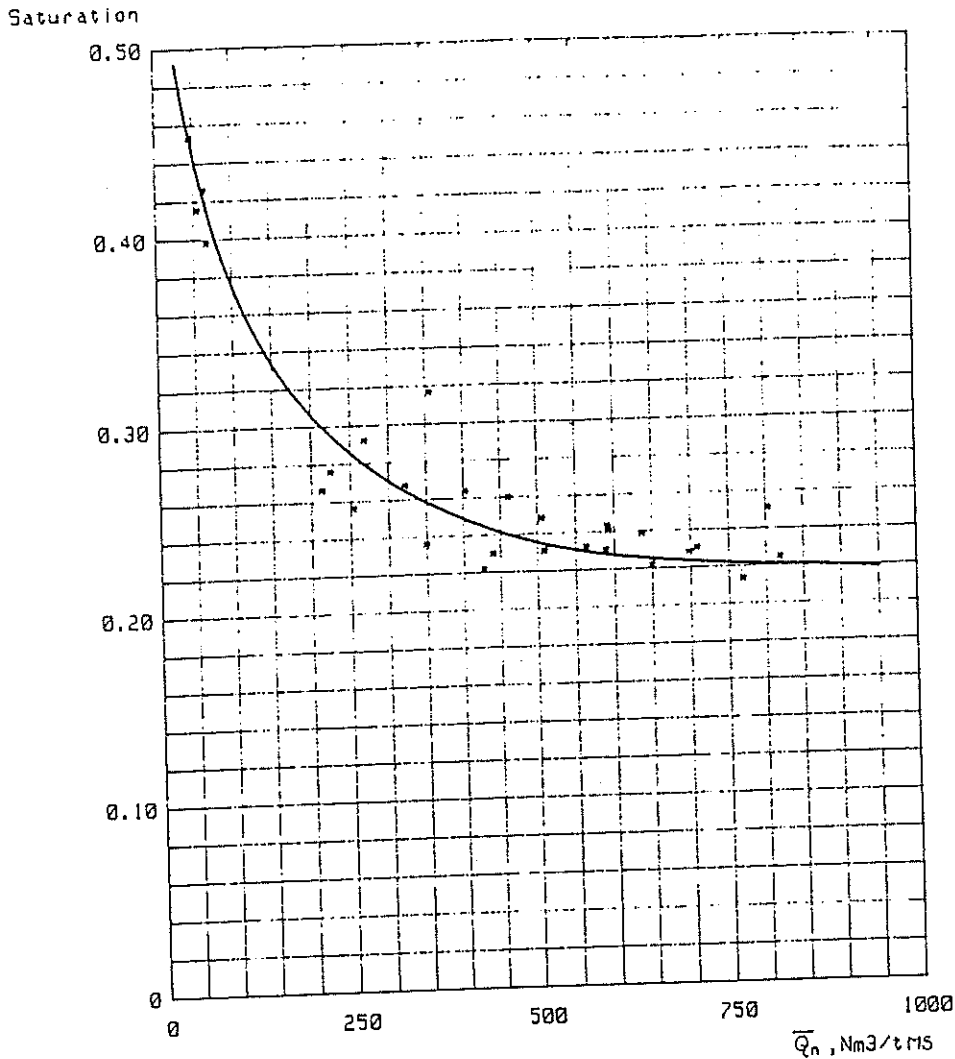


Figure 29 : Exemple de résultats expérimentaux d'essais de déshydratation sur filtre pilote. Courbe optimisée $S = f(\overline{Q_n})$.

452. Essais de lavage et d'essorage après lavage

4521. Modélisation

Il est seulement utile de rappeler ici le modèle représentant la filtration de l'eau de lavage :

$$Bl_L = \frac{\tau_L \Delta P d_g^2}{\mu h^2} = \frac{36 h_k (1-\epsilon)^3 p_s}{\epsilon^3} \left(\overline{V_L} - \frac{1}{\rho_s} + \frac{H_0}{(1-H_0)\rho_L} \right) \quad (74)$$

La modélisation des résultats expérimentaux va se réaliser de la façon suivante:

* Filtration de l'eau de lavage : il est possible de modéliser cette opération à l'aide de la relation (74) ; dans ce cas, le paramètre à optimiser sera h_k comme lors de la filtration de la suspension.

h_k étant déjà déterminé lors de la filtration, ce travail paraît inutile à moins que cette valeur n'évolue ce qui est peu probable. Dans ce dernier cas, une optimisation sera

nécessaire. Elle s'effectuera de la même façon que lors de la filtration du brouet mais en tenant en plus compte des paramètres H_0 et V_L .

* Essorage après lavage : le problème que pose cette modélisation est dû à la mesure du débit d'air. Généralement, il n'est pas possible de mesurer séparément les débits d'air dûs à chaque déshydratation. Seul une mesure globale existe.

La consommation d'air spécifique à l'essorage après lavage est donc la différence entre le débit d'air total et le débit d'air consommé par l'essorage avant lavage. Ce dernier peut être calculé en utilisant le modèle optimisé sans lavage. Cela nécessite la connaissance de H_0 . Ainsi pour chaque mesure, il est possible de déterminer la consommation d'air spécifique à l'essorage après lavage. La modélisation est alors identique à celle employée lors de l'essorage sans lavage.

4522. Résultats

Les résultats de modélisation des essorages étant identiques à ceux présentés au § 4521, il n'a pas été jugé utile de présenter d'autres courbes dans ce chapitre. Seuls quelques résultats de lavages seront présentés.

* Allure de courbes de lavage

Les deux courbes suivantes correspondent à des produits différents n'ayant pas le même comportement au lavage.

La courbe figure 30 représente un lavage très proche d'un lavage méthodique parfait. On remarque que passé un taux de lavage de 1,2, on ne gagne plus beaucoup en efficacité de lavage.

La courbe figure 31 représente un lavage intermédiaire entre le lavage type réacteur parfaitement agité et le lavage piston. Dans ce cas, il semble intéressant d'atteindre un taux de lavage de 2 (produit sec pratiquement exempt de soluté).

* Influence d'un double lavage à contre-courant

Les deux courbes représentées figure 32 mettent en évidence l'influence d'un double lavage à contre-courant.

Dans ce cas, la courbe de simple lavage étant déjà fortement méthodique, le double lavage à contre-courant n'apporte pas une amélioration considérable. Le double lavage accentue la méthodicité du lavage en faisant gagner environ 20 % du débit d'eau dans la zone sensible comprise entre les taux de lavage de 0,8 à 1,5.

Dans d'autres cas, le double lavage à contre-courant peut être plus efficace.

* Influence des effets de bords

La représentation graphique figure 33 met en évidence l'importance que peuvent avoir les effets de bords sur un filtre pilote. Dans ce cas particulier, les bords du filtre étaient mal drainés ce qui a eu pour effet:

- d'avoir une forte teneur en soluté sur les bords,
- d'avoir une forte humidité sur les bords.

Ici, il est recommandé d'éviter de prendre les bords du gâteau lors des prélèvements d'échantillons.

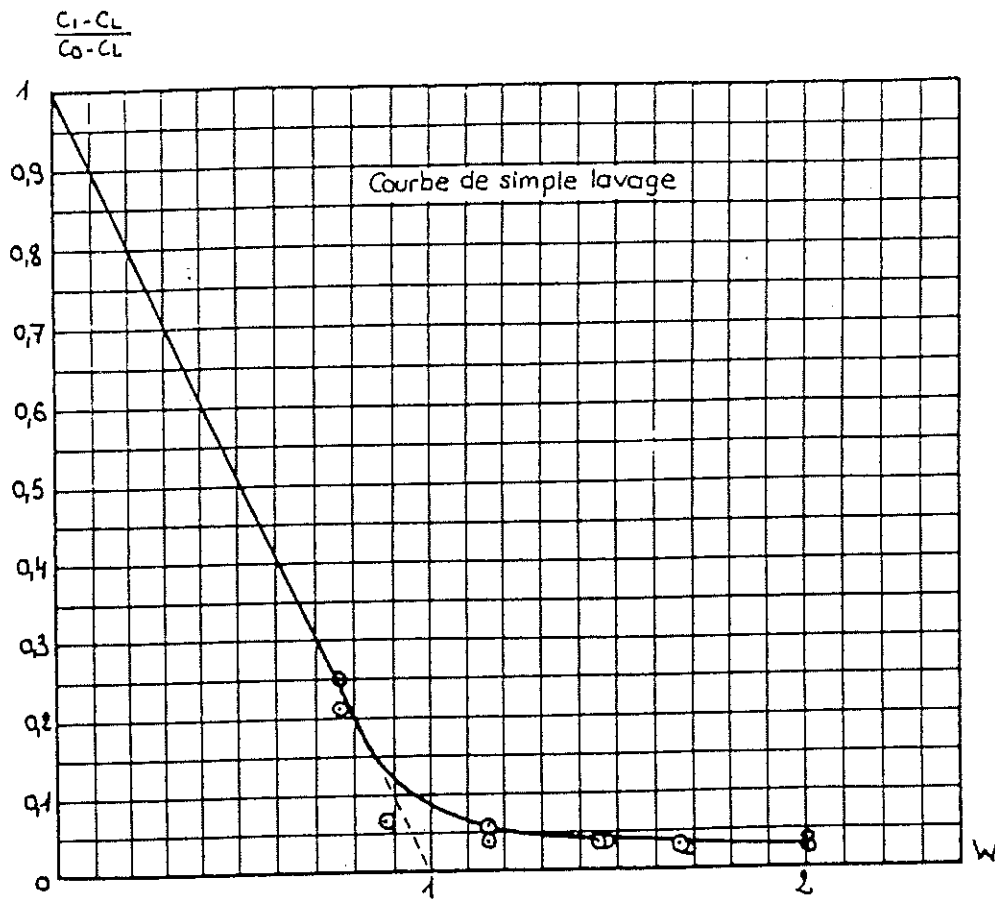


Figure 30 : Courbe de simple lavage proche d'un lavage piston.

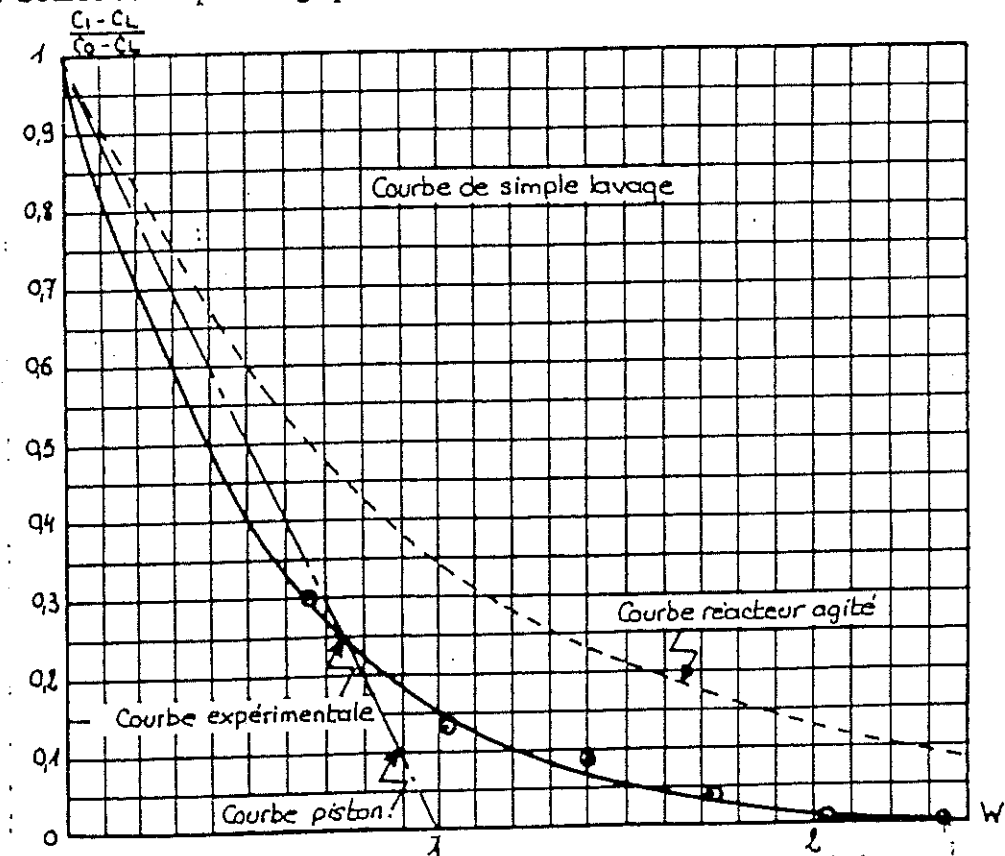


Figure 31 : Courbe de simple lavage intermédiaire entre le lavage piston et le lavage type réacteur parfaitement agité.

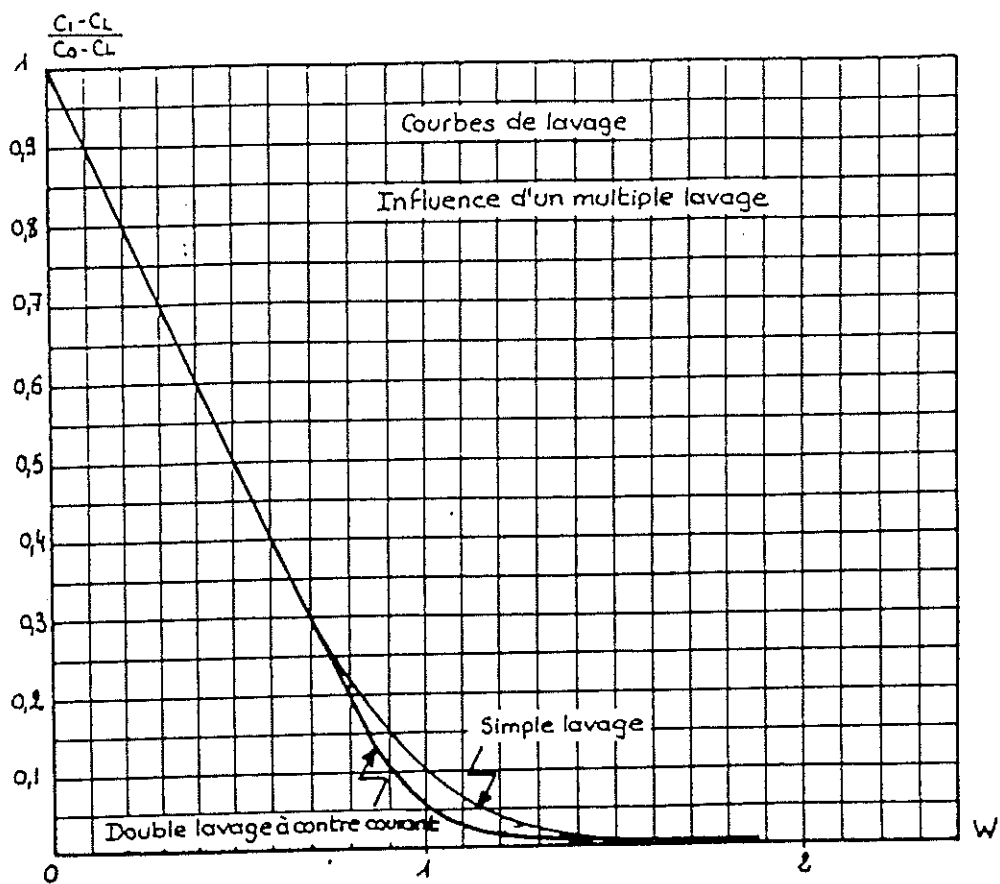


Figure 32 : Etude de l'influence d'un double lavage à contre-courant.

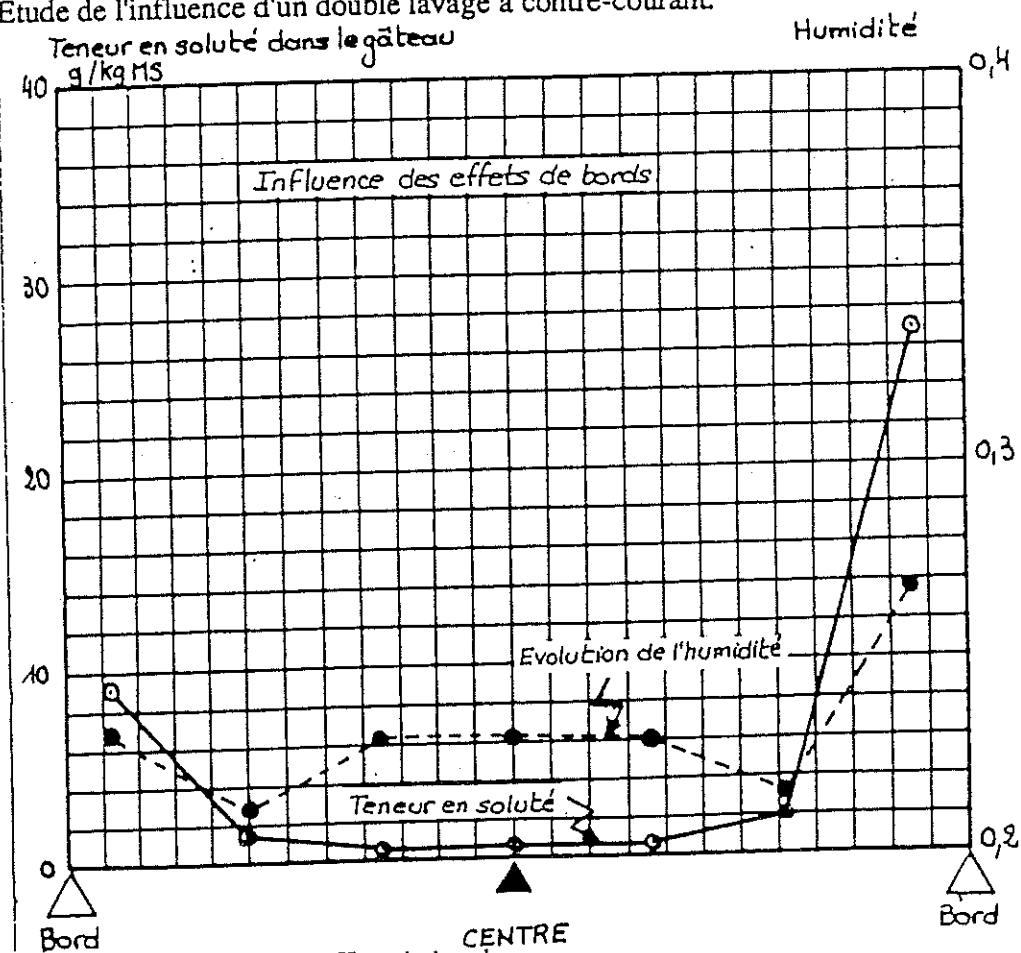


Figure 33 : Etude de l'influence des effets de bords.

46. EXTRAPOLATION DES RESULTATS

Connaissant:

- h_k : à partir des résultats de filtration,
- la courbe $H = f(BI_D^1)$ à partir de la modélisation des essais d'essorage sans lavage,
- la courbe $H = f(BI_D^2)$ à partir de la modélisation des essais d'essorage après lavage,

il est possible d'extrapoler les résultats au calcul du filtre industriel qui sera nécessaire pour l'atelier de fabrication.

La méthode d'extrapolation est absolument identique à celle employée lors des essais de laboratoire (§ 35). La seule petite variante consiste à employer la courbe $H=f(BI_D^1)$ pour calculer l'essorage sans lavage ou avant lavage (si ce dernier est nécessaire) et à utiliser la courbe $H=f(BI_D^2)$ pour calculer les essorages entre les lavages et après le dernier lavage.

Il n'est donc pas nécessaire de revenir sur ces calculs.

Le débit d'air nécessaire sera obtenu en fixant les humidités intermédiaires et finale et en définissant pour chacune d'elles un débit d'air à partir des modèles optimisés. La consommation globale sera la somme de toutes ces consommations spécifiques.

47. CONCLUSIONS

Les essais sur filtre pilote demandent beaucoup de travail pour être menés sérieusement. Ils nécessitent une somme de mesures et d'analyses importante et qu'il ne faut pas négliger avant de décider de faire une telle étude. Contrairement aux essais sur cellule de laboratoire, les essais sur filtre optique demandent souvent plus d'une personne pour les réaliser correctement.

Ces difficultés doivent être associées aux points critiques suivants avant de se décider de lancer une étude sur filtre pilote.

Avantages:

- Etape de confirmation des résultats de laboratoire avant de définir le filtre industriel.
- Facteur d'extrapolation au filtre industriel limité, d'où une meilleure précision des calculs.
- Possibilité d'étudier plusieurs lavages à contre-courant.
- Possibilité de fonctionner sur une longue période et ainsi d'étudier la tenue du filtre dans le temps et l'influence d'anomalies de fonctionnement sur le comportement du filtre et du lavage.

Inconvénients:

- Nécessite une installation complexe et volumineuse.
- Demande souvent un temps de mise au point non négligeable.
- Demande une alimentation constante et régulière en suspension.
- Coût de location parfois élevé pour une petite entreprise.
- Investissement global de l'étude élevé.

Si, à la lumière de ces remarques, les essais sur filtre pilote sont envisagés, il faut les mener en profondeur et ne pas hésiter à confirmer des points litigieux.

L'investissement que nécessite une telle étude ne permet pas de rester sur des impressions.

Mieux seront menés les essais, meilleure sera la définition du filtre industriel et plus facile seront son démarrage et sa mise au point.

Rappelons enfin que si l'ensemble de ces essais semble trop important et trop difficile pour être mené par une entreprise seule, il existe de nombreux fabricants qui conduisent eux-mêmes tous ces essais et proposent une analyse finale des résultats. Si ce choix est fait, cet exposé devrait permettre à l'industriel de poser les bonnes questions, d'exiger les essais essentiels et d'analyser les résultats avec un oeil critique.

5. LE FILTRE INDUSTRIEL

Ce chapitre, très réduit, va aborder quelques conseils utiles pour le choix et la mise au point du filtre industriel qui sera acheté après les essais précédemment décrits.

51. CHOIX DU FILTRE

Lors de l'acquisition de son premier filtre, l'industriel devra être attentif à commander un appareil d'utilisation souple et de réglage facile.

C'est ainsi qu'il veillera à ce que le filtre puisse avoir les qualités suivantes :

- modulation aisée des différentes zones de fonctionnement (filtration - essorages - lavages).
- vitesse de défilement de la toile réglable dans une large gamme.
- variation possible du débit d'eau de lavage sans en altérer la répartition.
- modulation possible du nombre de lavages.
- répartition uniforme de l'eau de lavage.
- répartition uniforme du brouet avec impact réduit du brouet sur la toile (cas du filtre à bande).
- possibilité d'adapter un rouleau presseur.

Tous ces éléments devraient permettre de mettre au point le filtre industriel dans les meilleures conditions et de définir une configuration de fonctionnement satisfaisante et définitive.

52. MISE AU POINT DU FILTRE INDUSTRIEL

Elle peut se faire aussi systématiquement que lors des essais pilotes. Cependant, si ces derniers ont été bien menés, un nombre d'essais nettement moindre est à réaliser.

Il n'est d'ailleurs pas rentable de pousser à l'infini des essais sur filtre industriel. Cela coûte cher et demande beaucoup de personnel.

Les mêmes essais que sur pilote peuvent être envisagés. Les mêmes recommandations sont à formuler.

53. REGLAGE DU FILTRE

La partie théorique a mis en évidence :

- un paramètre adimensionnel $Bl = \frac{t\Delta P d_g^2}{\mu h^2}$ susceptible de modéliser, avec l'humidité du gâteau, toutes les opérations unitaires qui sont nécessaires à la filtration.

- que les paramètres Bl spécifiques de chaque opération sont sommables et qu'ainsi ils définissent un paramètre Bl_G représentant l'opération globale de filtration.

- qu'à Bl_G fixe correspondent des caractéristiques constantes du gâteau (teneur en soluté, humidité). Ceci si les Bl individuels sont également constants.

Ainsi pour assurer une qualité constante au gâteau de filtration, il suffit de garder Bl_G constant ce qui laisse au moins trois latitudes de réglage:

- le temps de cycle global fonction de la vitesse de la toile
- ΔP appliqué au gâteau
- h , épaisseur du gâteau.

Par exemple: * si d_g varie accidentellement, Bl_G restera constant si :

- h varie dans les mêmes proportions
- ΔP varie comme $1/d_g^2$
- t varie comme $1/d_g^2$

* si ΔP varie, Bl_G restera constant si :

- h varie comme $\sqrt{\Delta P}$
- t varie comme $1/\Delta P$

* etc...

NOMENCLATURE

A	surface filtrante
Bl	paramètre d'extrapolation
C	concentration en soluté dans les eaux
d_g	paramètre de grain
h	épaisseur du gâteau
H	humidité
h_k	constante de Kozeny
k	perméabilité relative
K	perméabilité effective du fluide
L	masse de liquide
M	masse de solide
n	coefficient de compressibilité de la résistance spécifique
ΔP	perte de charge à travers le gâteau
p_o	pression du liquide à la sortie de la membrane
P	production du filtre
P'	productivité du filtre
q	débit de fluide
Q_L	débit de filtrat de l'eau de lavage
Q_n	débit d'air traversant le gâteau
$\frac{Q_n}{Q_n}$	débit d'air spécifique
R_m	résistance de la membrane ou du support
s	teneur massique de la suspension en matières solides
S	saturation
SU	masse de suspension
t	temps de filtration
u	vitesse du fluide en fût vide
v	vitesse de la bande
V	volume de filtrat
$\frac{V}{V}$	volume rapporté à la masse de gâteau sec
W	masse de gâteau déposée par unité de volume de filtrat
W_L	taux de lavage du gâteau
α	résistance spécifique du gâteau
ϵ	porosité
μ	viscosité dynamique
ρ	masse volumique

Indices

a	au point d'affleurement
c	cycle
D	à la déshydratation
f	filtrat ou filtration
g	gâteau
G	global
i	initial
L	liquide ou lavage
m	liquide mouillant
n	liquide non mouillant
s	suspension
S	solide
o	avant lavage
l	après lavage
∞	après un temps infini