

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par

Stéphane COUTURIER
INGENIEUR ENSGTI

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : MECANIQUE

**ETUDE DE LA DESHYDRATATION MECANIQUE
ASSISTEE THERMIQUEMENT**

Soutenue le 27 Septembre 2002

Après avis de :

MM. L.Tadrist, Directeur de Recherche CNRS, IUSTI Marseille
E. Vorobiev, Professeur des Universités, UTC Compiègne

Rapporteurs

Devant la commission d'examen formée de :

Mme. M. Mietton-Peuchot, Professeur des Universités, Bordeaux II
MM. J. Vaxelaire, Maître de Conférence, LGPP-ENSGTI, Pau
J.R. Puiggali, Professeur des Universités, Bordeaux I
D. Anglerot, Docteur Ingénieur, TotalFinaElf, Lacq
L.Tadrist, Directeur de Recherche CNRS, IUSTI Marseille
E. Vorobiev, Professeur des Universités, UTC Compiègne

**Présidente
Rapporteur
Examineurs**

A Beatriz et mes parents

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur Jean-Rodolphe Puiggali, professeur des Universités et Directeur du LEPT, pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire et m'avoir fait l'honneur de diriger ma thèse. La confiance qu'il m'a accordée durant ces trois années me touche profondément.

J'exprime ici toute ma gratitude à Messieurs Lounes TADRIST, directeur de recherches CNRS à l'IUSTI Marseille, et Eugène VOROBIEV, professeur des Universités à l'Université Technologique de Compiègne, pour avoir examiné mon travail.

Je remercie Monsieur Didier ANGLEROT, Docteur – Ingénieur au GRL (Lacq) pour avoir participé au jury.

Je remercie également Madame Martine MIETTON-PEUCHOT, Professeur des Universités, d'avoir présidé le jury de thèse.

Pour Marc VALAT, maître de conférence à l'Université Bordeaux 1, et Jean VAXELAIRE, maître de conférence à l'Ecole Nationale Supérieure en Génie des Techniques Industrielles à Pau, les mots me manquent pour exprimer toute ma gratitude. Leur soutien permanent et sans faille m'a permis de réaliser ce travail de thèse dans des conditions plus qu'agréables. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus grande reconnaissance et affection.

Je veux également remercier certaines personnes qui m'ont beaucoup aidé pendant ces trois années :

D'abord, Michel SAHUN, phototypiste au LEPT, sans qui la réalisation des dispositifs expérimentaux n'aurait pas été possible,

Sylviane BOYA et Muriel BORE, secrétaires, ainsi que Marian ANTOS, Ingénieur Informaticien (ah, cela me rappelle une chanson...), pour leur gentillesse,

Cédric ARRABIE, Assistant Ingénieur, et Jean-Marc LEGROS-ADRIAN, tous deux au LGPP, qui ne cessent de m'étonner par leurs compétences.

Bien évidemment, je tiens à remercier chaleureusement certains personnages qui sont ou qui sont passés au Laboratoire :

Beatriz, qui m'accompagne depuis fort longtemps et qui me supporte au quotidien,

Christophe, mon collègue de bureau, avec qui j'ai passé ces trois ans dans la bonne humeur,

Benoît, mon plus grand complice, qui m'a fait découvrir certains quartiers « touristiques et animés » de Bordeaux,

Ludivine, ma catalane préférée,

Martine, qui nous manque,

David, notre Bill Gates local,

Cyril et Fabrice, les bourricots juniors, qui se chargeront de « chaperonner » les nouveaux...

Un petit clin d'œil à Lucinda et Yasmine, mes fidèles guitares, qui m'ont permis d'évacuer le surplus de pression, mais aussi à Mylène, Cai et Foster's, reines de nos nuits folles.

Enfin, je remercie tous les autres membres du Laboratoire pour ces trois années (trop courtes) passées à leurs côtés.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	17
I. CADRE GENERAL	21
I.1. Contexte de l'étude	23
I.1.1 Déshydratation mécanique.....	23
I.1.2 Mise en œuvre.....	23
I.1.2.1 La filtration centrifuge.....	23
I.1.2.2 Filtration sous pression.....	24
I.1.3 Limites de la déshydratation mécanique.....	27
I.1.4 Procédés hybrides	28
I.1.4.1 Déshydratation mécanique couplée à un champ électrique et/ou acoustique	29
I.1.4.2 Déshydratation mécanique couplée à une aide thermique.....	30
I.2. Objectifs	31
I.3. Références bibliographiques	32
II. FILTRATION – COMPRESSION A PRESSION CONSTANTE	35
II.1. Description phénoménologique d'une opération de déshydratation mécanique	37
II.1.1 Cellule de filtration – compression normalisée.....	37
II.1.2 Déroulement de l'opération de déshydratation mécanique.....	38
II.1.2.1 Filtration.....	38
II.1.2.2 Compression.....	40
II.2. Loi générale de la filtration (équation de Ruth)	42
II.2.1 Comportement parabolique.....	42
II.2.2 Analyse de Ruth : analogie électrique – loi d'Ohm	43
II.2.3 Domaine de validité de l'équation de Ruth.....	45
II.2.3.1 Résistance du media filtrant : colmatage et aide thermique	45
II.2.3.2 Sédimentation des particules solides en suspension.....	51
II.2.3.3 Gâteaux compressibles	52

II.3. Cas des gâteaux compressibles	52
II.3.1 Concept de pression solide.....	52
II.3.2 Equation de Ruth appliquée aux matériaux compressibles.....	58
II.3.3 Données de compression.....	60
II.3.3.1 Influence de la pression de fonctionnement.....	60
II.3.3.2 Cellule de Compression – Perméabilité (CCP).....	61
II.3.3.3 Interface gâteau / media : couche dense.....	66
II.4. Modèles avancés de la filtration sur gâteau	69
II.5. Etape de consolidation	75
II.6. Conclusion	80
II.7. Références bibliographiques	82
III. ETAPES DE CONCEPTION DU DISPOSITIF DE FILTRATION – COMPRESSION ASSISTE THERMIQUEMENT	89
III.1. Caractérisation des matériaux	91
III.2. Cellule de filtration – compression	93
III.2.1 Dispositif expérimental.....	93
III.2.2 Protocole expérimental.....	96
III.3. Influence du pseudo-piston	98
III.3.1 Filtration – compression à pression constante.....	99
III.3.2 Mesures de pression liquide à la surface du gâteau.....	101
III.3.3 Pseudo-piston : alternative technologique.....	102
III.4. Cellule de filtration - compression assistée thermiquement	103
III.4.1 Description du dispositif expérimental.....	103
III.4.2 Protocole expérimental.....	107
III.4.3 Influence de la canne pyrométrique.....	108
III.5. Conclusion	110
III.6. Références bibliographiques	11
IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION	113
IV.1. Introduction	115
IV.1.1. Projet expérimental.....	115
IV.1.2. Protocoles expérimentaux et mesures.....	116
IV.2. Aide thermique au niveau du media filtrant	118
IV.2.1. Etude d'un matériau peu compressible.....	119
IV.2.1.1. Aide thermique à basse température (T< 100 °C).....	119
IV.2.1.2. Aide thermique à haute température (> 100 °C) - effondrement.....	124
IV.2.1.3. Caractérisation de l'effondrement.....	131
IV.2.1.3.1. Influence de la température du media filtrant.....	132
IV.2.1.3.2. Influence de la pression de filtration - compression.....	133
IV.2.1.3.3. Influence du moment de la mise en œuvre de l'aide thermique.....	135

IV.2.1.3.4.	Influence de la concentration des suspensions.....	137
IV.2.1.3.5.	Influence du couplage mécanique / thermique	138
IV.2.1.4.	Synthèse des résultats	139
IV.2.2.	Etude d'un matériau très compressible	139
IV.2.2.1.	Aide thermique à basse température (< 100 °C).....	139
IV.2.2.2.	Aspect énergétique.....	149
IV.2.2.3.	Aide thermique à haute température (> 100 °C).....	150
IV.2.2.4.	Synthèse des résultats	155
IV.3.	Aide thermique au niveau du pseudo piston.....	156
IV.3.1.	Aide thermique à basse température (< 100 °C).....	156
IV.3.2.	Aide thermique à haute température (> 100 °C).....	159
IV.4.	Conclusion et discussion	159
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		163
NOMENCLATURE		167
ANNEXES		171

INTRODUCTION

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse BDI CNRS cofinancée par la région Aquitaine. Le travail a été effectué au Laboratoire Energétique et Phénomènes de Transfert (LEPT) à l'ENSAM de Talence. Les différentes thématiques développées au LEPT-ENSAM s'articulent autour des transferts en milieu poreux, aussi bien d'un point de vue expérimental que théorique et numérique. L'étude a été réalisée en collaboration avec le Laboratoire de Génie des Procédés de Pau (LGPP). L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'intérêt de l'association en parallèle d'un procédé de déshydratation mécanique par filtration compression et d'une aide thermique.

Ce travail s'inscrit dans une thématique globale d'optimisation du traitement des déchets abordée à différentes échelles de réflexion. La consommation d'énergie dans les filtres conventionnels varie de 0,5 à 10 kWh par mètre cube de suspension à traiter. La limite haute de cet intervalle correspond au traitement de suspensions dont les particules sont de petite taille et qui forment des gâteaux très compressibles (comme les boues de station par exemple). Une séparation mécanique est 100 à 1000 fois moins coûteuse en terme d'énergie qu'un séchage thermique. Ainsi, il est énergétiquement plus favorable de poursuivre au maximum la

déshydratation mécanique. Néanmoins, comme, en général, la résistance à l'écoulement augmente lorsque la taille des particules diminue, la déshydratation mécanique par filtration compression peut s'avérer très consommatrice en temps. Il paraît donc intéressant d'assister cette étape du traitement afin de diminuer au maximum les coûts énergétiques des traitements postérieurs. Dans ce travail, l'efficacité de l'étape de déshydratation mécanique par filtration compression est accrue par apport thermique localisé à des endroits appropriés et des instants définis de la cinétique de séparation.

Déroulement du manuscrit

Le chapitre 1 replace le travail de thèse dans le contexte général en présentant les différents procédés de déshydratation mécanique hybrides.

Le chapitre 2 décrit physiquement une opération de déshydratation mécanique par filtration – compression à pression constante. Une revue bibliographique assez exhaustive présentée dans ce chapitre permet de dégager les aspects essentiels de la séparation et de mettre en évidence l'intérêt d'assister thermiquement l'opération.

Le chapitre 3 est consacré à la description des dispositifs expérimentaux développés au laboratoire et à la caractérisation des suspensions utilisées. La démarche suivie consiste à faire évoluer une cellule classique de filtration compression, en ajoutant notamment en avant du piston un appendice (appelé pseudo piston) destiné à :

- ✓ protéger le capteur de pression à membrane affleurante placé à la surface du piston afin de suivre effectivement

l'évolution de la pression liquide à la surface des gâteaux en phase de filtration et de compression,

- ✓ *accueillir une résistance chauffante pouvant dissiper une puissance de 280 W,*
- ✓ *limiter le flux thermique vers le haut de la cellule afin d'éviter l'endommagement des différents capteurs situés dans la partie supérieure du dispositif.*

Cette étape a permis la réalisation d'un dispositif de filtration compression assistée thermiquement capable :

- ✓ *d'effectuer une aide thermique régulée en température au niveau du pseudo piston et du support du media filtrant,*
- ✓ *de faire l'acquisition de la température (tous les 3 millimètres) au cœur du gâteau par le biais d'une canne pyrométrique,*
- ✓ *de mesurer en continu la position du piston et donc la taille des gâteaux en compression.*

Le chapitre 4 présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus en filtration – compression assistée thermiquement. A l'issue de l'analyse des résultats qui met en évidence un phénomène d'effondrement du gâteau en phase de compression, une discussion sur les mécanismes mis en jeu est proposée.

Enfin, les conclusions de cette étude et les perspectives prévues pour l'avenir viennent clore ce document.

CHAPITRE I

CADRE GENERAL

Ce chapitre situe le sujet de recherche dans un contexte général. Après avoir rappelé les différentes techniques relatives aux procédés mécaniques de séparation liquide – solide, nous introduirons les procédés hybrides. Enfin, les objectifs du projet de recherche seront explicités.

I. CADRE GENERAL	21
I.1. Contexte de l'étude.....	23
I.1.1 Déshydratation mécanique.....	23
I.1.2 Mise en œuvre.....	23
I.1.2.1 La filtration centrifuge.....	23
I.1.2.2 Filtration sous pression.....	24
I.1.3 Limites de la déshydratation mécanique.....	27
I.1.4 Procédés hybrides	28
I.1.4.1 Déshydratation mécanique couplée à un champ électrique et/ou acoustique	29
I.1.4.2 Déshydratation mécanique couplée à une aide thermique.....	30
I.2. Objectifs	31
I.3. Références bibliographiques	32

I.1. Contexte de l'étude

I.1.1. Déshydratation mécanique : filtration – compression

La déshydratation mécanique permet, de façon générale, de séparer mécaniquement les particules solides d'une suspension du fluide porteur, en excluant tout apport annexe (thermique, électrique / électromagnétique ou chimique). Le faible coût énergétique induit, contrairement au séchage thermique par exemple, rend attractif ce type de technique dans de nombreux domaines d'application : l'industrie pharmaceutique et chimique, l'oenologie, le traitement de boues urbaines ou industrielles, etc...

Parmi les techniques de séparation liquide – solide (SLS), la filtration – compression consiste à concentrer et déshydrater une suspension à traiter. Elle se compose de deux étapes : la filtration, gouvernée par les pressions hydrauliques, et la compression qui résulte d'un mouvement de parois ou de membranes provoquant un écrasement du gâteau de filtration et l'évacuation du liquide.

I.1.2. Mise en œuvre

La séparation par filtration frontale peut être mise en œuvre en utilisant deux techniques différentes :

- ✓ la filtration centrifuge,
- ✓ la filtration sous pression.

I.1.2.1. La filtration centrifuge

La filtration centrifuge consiste à placer la suspension dans un champ d'accélération centrifuge. Le gradient de pression qui apparaît dans le liquide permet à celui-ci de traverser le media filtrant et le gâteau formé.

La suspension est introduite dans un bol cylindrique à parois perforées, équipé d'une toile filtrante ou d'un sac amovible de filtration qui retient les particules solides et autorise le passage du liquide. Le bol est entraîné à très grande vitesse de rotation (variable suivant le diamètre du bol) qui provoque, sous l'effet de la force centrifuge, la séparation des phases liquide et solide (Fig. I.1).

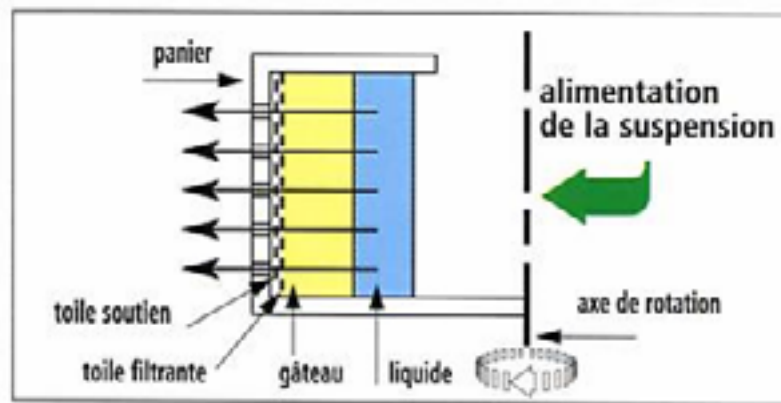


Fig. I.1. Essoreuse industrielle d'après documentation Robatel.

Certaines de ces machines peuvent atteindre 2000 G.

I.1.2.2. Filtration sous pression

Ici, la séparation liquide - solide est assurée grâce à la pression qui dirige la suspension à traiter vers la surface filtrante. Cette technique est utilisée dans plusieurs types de filtres (filtre presse, filtre à bandes presseuses). Classiquement, les pressions de filtration sont de l'ordre de 16 bar.

✓ Le filtre presse

Un filtre presse est constitué de plateaux verticaux, évidés et recouverts d'une toile filtrante. Ces plateaux sont disposés en batterie et serrés les uns contre les autres par des vérins hydrauliques (Fig. I.2). Les chambres ainsi aménagées entre chaque plateau sont ensuite alimentées avec la suspension prétraitée, par l'intermédiaire d'une pompe haute pression.

Une fois ces chambres remplies, l'introduction continue de la suspension à déshydrater provoque la montée en pression (jusqu'à 15 bar) à l'intérieur du filtre.

En fin de cycle, lorsque la pression est maximale, les plateaux sont séparés afin d'évacuer un à un les gâteaux formés (phase de débatissage).

L'ensemble de ces phases (serrage, remplissage, filtration, débatissage) constitue la pressée. Le fonctionnement du filtre-presse est donc discontinu. Après un certain nombre de pressées, les toiles filtrantes sont encrassées. On procède alors à une séquence de lavage simultanément au débatissage.

Cette technologie peut être améliorée en ajoutant une membrane, généralement en plastique, sur une des faces de chaque plateau. Il s'agit ici d'un filtre presse à membrane (Fig. I.3). Dans ce cas, la pression de fonctionnement est généralement de 9 bar (ce qui évite d'utiliser une pompe d'alimentation haute pression) pendant la phase de remplissage. Puis, par injection d'air ou d'eau, on comprime la membrane pour aller jusqu'à 16 bar et le gâteau est comprimé.

L'efficacité de la déshydratation par filtre presse est essentiellement dépendante :

- de l'efficacité du conditionnement préliminaire,
- de la pression atteinte en fin de pressée,
- du degré d'encrassement des toiles,
- du type de suspension pressée.

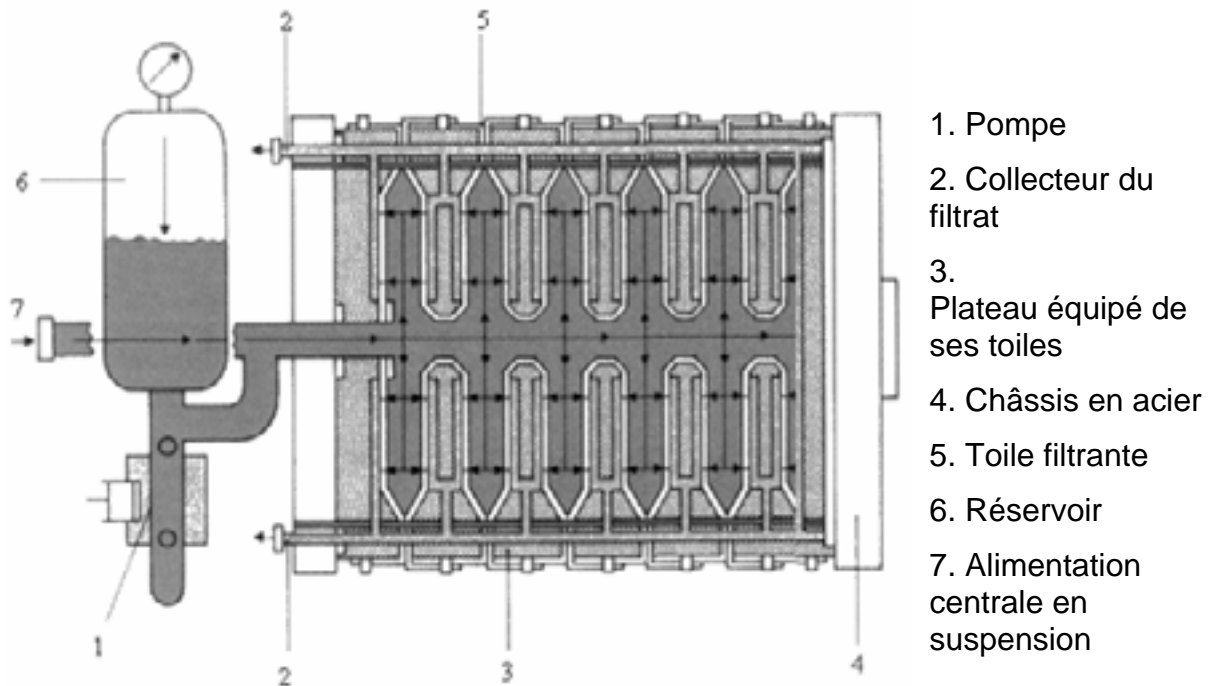


Fig. I.2. Filtre presse à plateaux traditionnel d'après documentation US Filter.

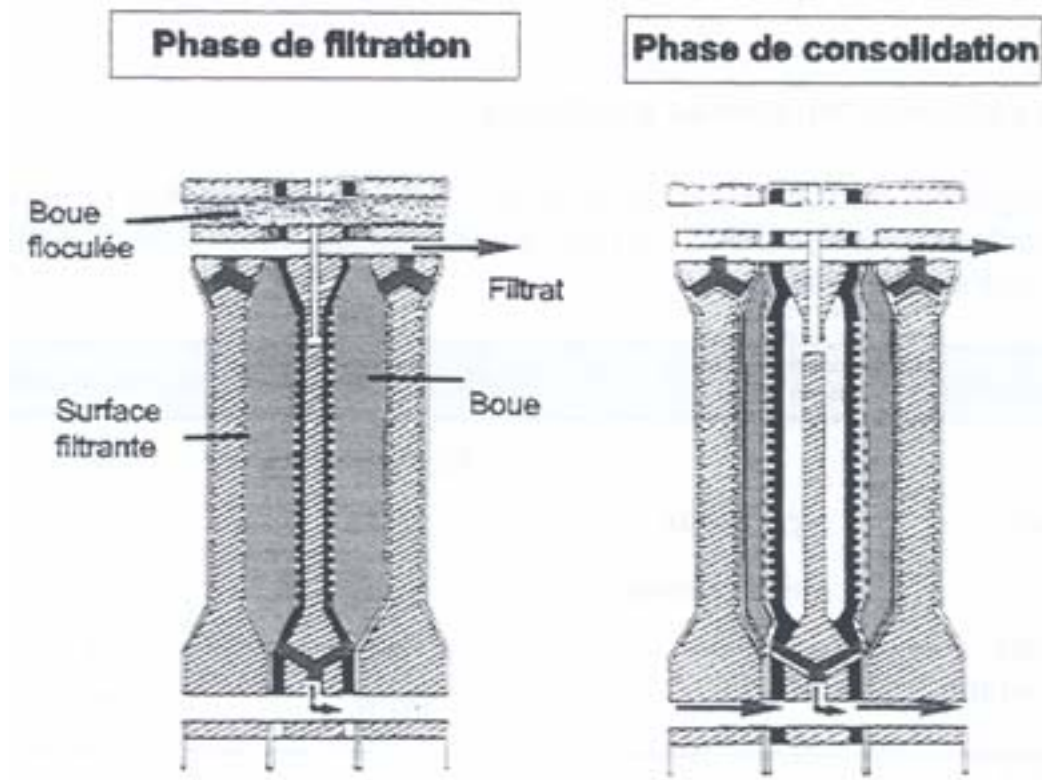


Fig. I.3. Filtre presse à membrane.

✓ Le filtre à bandes presseuses

La suspension et le polymère sont soit introduits dans en premier temps dans un flocculateur (à agitation réglable), soit directement dans la conduite d'alimentation. L'étape de floculation permet d'obtenir un floc bien formé et résistant.

La suspension ainsi floculée est prise en compression progressive (inférieure à 2 bar) sous une deuxième toile (Fig. I.4) (une étape préliminaire d'égouttage sur une première toile par drainage libre, favorisé par l'action de rouleaux et de herses est parfois envisagée).

L'essorage obtenu semble être amélioré par un effet de cisaillement produit par le cheminement des toiles sur des rouleaux très rapprochés, mais cet effet n'a pas encore été démontré.

Enfin, un module de pressage supplémentaire (jusqu'à 7 bar) est parfois adopté afin d'optimiser la siccité finale du gâteau (rapport de la masse sèche du produit sur sa masse totale). En fin de traitement, des couteaux permettent de décoller le gâteau des toiles qui seront nettoyées par lavage à l'eau claire sous pression (6 à 8 bar). Les toiles tendent parfois à

" dérailler ". A cet effet, un dispositif de recentrage est prévu, mettant en oeuvre des détecteurs de déraillement et des vérins (hydrauliques ou pneumatiques) de recentrage.

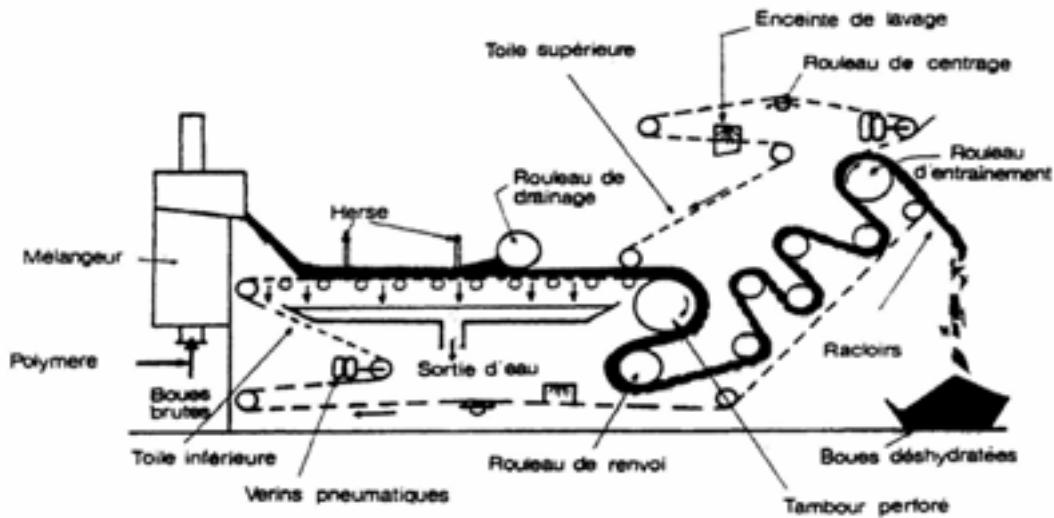


Fig. I.4. Filtre à bandes presseuses

L'efficacité de la déshydratation par filtre à bandes presseuses dépend :

- de la qualité des suspensions, plus ou moins homogènes,
- du réglage de l'alimentation en suspension floculée : débit de la pompe à suspension, débit de la pompe doseuse, débit de l'eau de dilution, vitesse du flocculateur (ces paramètres sont liés à la qualité de la suspension floculée),
- du réglage de la machine : vitesse d'entraînement des toiles, tension des toiles, nombre et taille des rouleaux, type de toile, pression d'eau de lavage.

I.1.3. Limites de la déshydratation mécanique

La déshydratation mécanique s'insère fréquemment dans une série d'étapes de traitement (Fig. I.5), notamment pour les boues de stations d'épuration.

Les niveaux de siccité atteints par déshydratation mécanique sont relativement peu élevés. Pour des boues de stations par exemple, un filtre presse à membranes génère des déchets pouvant atteindre 36 % de siccité (OTV, 1997). Ce niveau est souvent insuffisant pour envisager un épandage ou une incinération (nous n'évoquons pas la filière mise en décharge, en cours d'abandon). Une étape de séchage thermique complémentaire doit alors être envisagée.

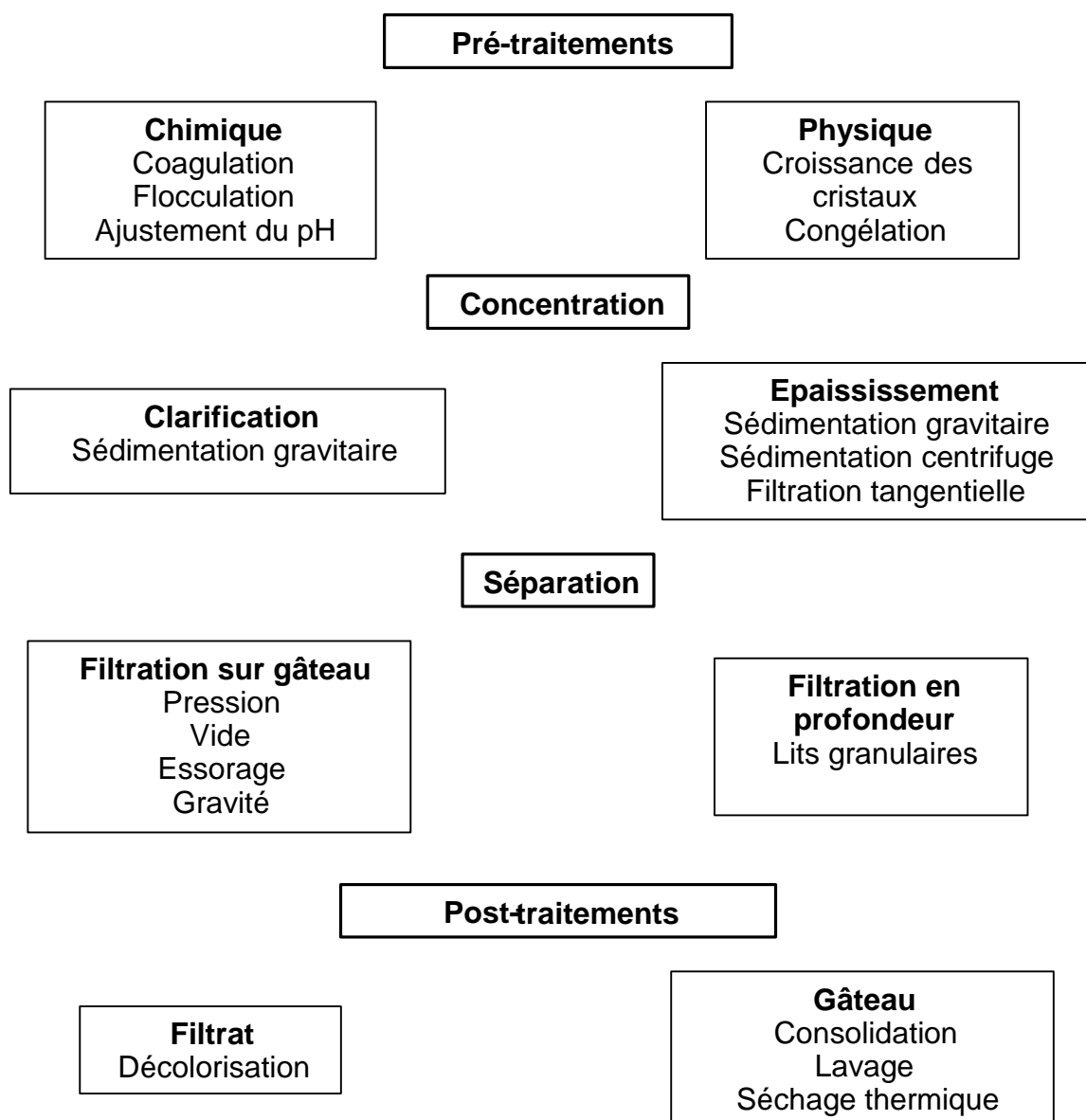


Fig. I.5. Composantes des procédés de séparation liquide - solide (Wakeman et Tarleton, 1999).

I.1.4. Procédés hybrides

L'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique semble être la solution à adopter pour assurer une forte siccité finale du produit, notamment pour les boues de stations d'épuration (Vaxelaire *et al.*, 1999). Néanmoins, la quantité de chaleur fournie lors du séchage thermique est considérable comparée à l'énergie requise pour expulser l'eau d'un gâteau par compression. De plus, cette association nécessite la mise en place dans la chaîne de traitement de plusieurs appareils volumineux. Enfin, les gâteaux déshydratés mécaniquement sont convoyés à travers un réseau de pompes et canalisations vers l'unité de

séchage thermique, ce qui, pour certains produits délicats (produits pharmaceutiques) peut compromettre leur qualité.

Il est donc intéressant d'extraire le maximum de solvant pendant l'opération de déshydratation mécanique afin de réduire les coûts des traitements annexes. Cependant, le procédé de filtration se caractérise par l'apparition d'une résistance à l'écoulement (gâteau de filtration) qui augmente de façon considérable lorsque la taille des particules solides est faible (Reichmann et Tomas, 2001, Besra *et al.*, 2000). Ainsi, même si l'opération est peu coûteuse en terme d'énergie, les temps de filtration deviennent vite très longs. Les opérations assistées, combinant déshydratation mécanique et apports énergétiques (champ électrique, magnétique ou acoustique, flux thermique) ont émergé comme alternatives possibles aux procédés de filtration traditionnels (Bongiovanni, 1998).

I.1.4.1. Déshydratation mécanique couplée à un champ électrique et/ou acoustique

La littérature récente (Wakeman et Tarleton, 1991, Tarleton, 1992) décrit l'utilisation d'un champ électrique ou acoustique pour assister le procédé de séparation mécanique. L'addition de ces champs se caractérise par le phénomène d'électro-osmose (mouvement du liquide sous l'action d'un champ électrique). Les gâteaux formés sont ainsi plus ouverts et moins résistifs, même pour des suspensions difficiles à traiter comme les boues activées (Laursen et Jensen, 1992). Les temps de filtration sont alors largement réduits (Weber et Stahl, 2002). Ces procédés hybrides seraient très utiles car ils permettraient d'avoir accès à de l'eau qui ne peut être expulsée par une opération de filtration (ou compression) classique (eau liée piégée dans les cellules organiques, Bouzrara et Vorobiev, 2002). Smythe et Wakeman (2000) montrent que le couplage d'un champ électrique et d'un champ acoustique améliore de façon considérable les cinétiques de filtration par rapport à l'utilisation du seul champ électrique. Si l'addition d'un champ électrique pendant l'étape de filtration s'avère efficace pour réduire les durées de traitement, Weber et Stahl (2002) ne décrivent pourtant aucune influence significative sur la teneur en eau et la porosité des gâteaux après compression.

Les effets observés en laboratoire, et plus particulièrement la réduction des temps de traitement, sur des matériaux spécifiques (oxyde de titane, particules de quartz) sont très souvent de moindre amplitude en environnement industriel avec des matériaux différents. Ceci couplé à un coût non négligeable des générateurs des différents champs justifie difficilement un effort économique.

I.1.4.2. Déshydratation mécanique couplée à une aide thermique

La littérature fournit peu d'information sur un couplage en parallèle d'une déshydratation mécanique et d'une aide thermique dans le domaine de la séparation solide-liquide. Les essais réalisés en température (généralement 80 °C) ont généralement pour but de réduire la viscosité du liquide contenu dans la suspension (pour de l'eau, la viscosité est réduite de 70 %). Il s'agit ici de diminuer la durée des essais. Mais cette technique impose une mise en température globale du système suspension/dispositif expérimental, entraînant ainsi un coût énergétique conséquent. Dans les procédés de séparation gaz-solide, les températures peuvent atteindre 600 °C (Peukert, 1997).

Schlünder (1996) puis Peuker et Stahl (1999, 2001) proposent de laver les gâteaux de filtration (cf. Fig. I.5) avec de la vapeur surchauffée plutôt qu'avec de l'air comprimé habituellement utilisé. Cette technique nommée par les auteurs *déshydratation thermomécanique* permet d'obtenir des gâteaux de faible teneur en eau par rapport à celle obtenue par un lavage classique. Cependant, il ne s'agit pas ici d'une association en parallèle (ou procédé hybride). En effet, les gâteaux sont d'abord consolidés par une opération de déshydratation mécanique classique puis soumis au traitement décrit par les auteurs.

On peut également citer la mise au point de pilote industriel (procédé Rollfit) commercialisé depuis 2001 par Reisser Eilers & Partners (Fig. I.6). Il s'agit d'un filtre presse à plateaux où circule dans les plateaux de l'eau chaude (65 à 80 °C) ou de l'huile (jusqu'à 140 °C, Reisser, 1999).

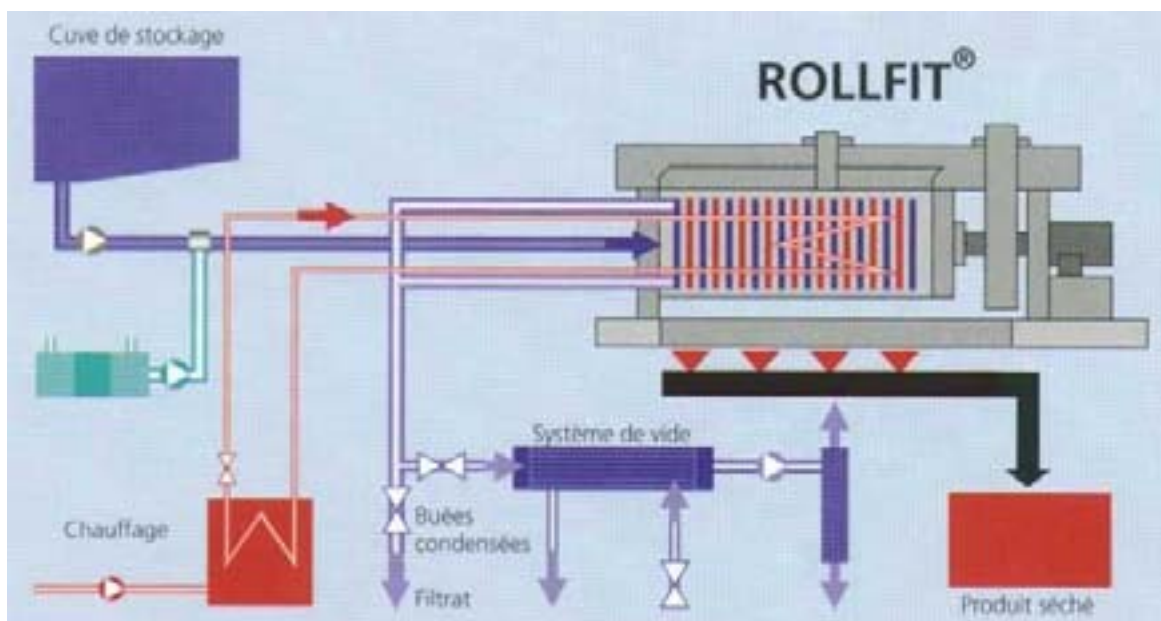


Fig. I.6. Procédé Rollfit d'après documentation Reisser Eilers & Partners.

L'aide thermique est appliquée par l'intermédiaire des plateaux en fin de phase de compression. Une pompe crée le vide au niveau de la sortie du filtrat et le changement de phase liquide vapeur s'effectue. Les teneurs en eau obtenues sont alors plus faibles que dans le cas d'un filtre presse traditionnel ($\approx 5\%$, Trautmann, 1999).

I.2. Objectifs

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est de mettre en place un **dispositif expérimental** capable d'associer en **parallèle** une déshydratation mécanique et un séchage thermique par contact. L'aide thermique est utilisée pour améliorer les opérations de filtration et de compression (impact sur les cinétiques et les teneurs en eau finales). Nous nous attacherons à étudier l'effet d'une aide thermique localisée tant **au niveau du media filtrant** où la résistance à l'écoulement est la plus importante, qu'à la **surface du gâteau** sur une opération complète de déshydratation mécanique. Les températures de fonctionnement seront choisies en fonction des pressions utilisées.

Une augmentation de la température du media filtrant réduira la viscosité du filtrat, diminuant ainsi de façon significative la **résistance hydraulique du media** (réduction des effets de colmatage) mais aussi celle de l'interface gâteau/media, fortement résistive (Willis et Tosun, 1980).

En phase de compression, l'aide thermique sera capable de provoquer une évaporation mais aussi une vaporisation du liquide. La charge alors appliquée au gâteau grâce au piston réduira la porosité de l'échantillon.

I.3. Références bibliographiques

Besra, L., Sengupta, D.K., Roy, S.K., 2000, Particle characteristics and their influence on dewatering of kaolin, calcite and quartz suspensions, *International Journal of Mineral Processing*, 59, pp. 89-112.

Bongiovanni, J.M., 1998, Traitement des boues résiduares par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique, Thèse de doctorat, UPPA, Pau.

Bouzzara, H., Vorobiev, E., 2002, Solid-liquid expression of cellular materials enhanced by pulsed electric field, *Chemical engineering and processing*, sous presse.

Laursen, S., Jensen, J.B., 1992, Electroosmosis in filter cakes of activated sludge, *Water research*, 27, 5, pp. 777-783.

OTV, 1997, Traiter et valoriser les boues, collection OTV, ed. Lavoisier.

Peuker, U.A., Stahl, W., 1999, Scale-up of steam pressure filtration, *Chemical engineering and processing*, 38, pp. 611-619.

Peuker, U.A., Stahl, W., 2001, Steam pressure filtration : mechanical-thermal dewatering process, *Drying technology*, 19, 5, pp. 807-848.

Peukert, W., 1997, High temperature filtration in the process industry, *Filtech Europa*, Düsseldorf, Allemagne.

Reichmann, B., Tomas, J., 2001, Expression behaviour of fine particle suspensions and the consolidated cake strength, *Powder technology*, 121, pp. 181-189.

Reisser, A., 1999, Industrial experiences with hot filter presses, *Advances in filtration and separation technology*, 13a, pp. 335-338.

Schlünder, E.U., 1996, Thermomechanical dewatering, *International drying symposium*, Krakow, Pologne.

Smythe, M.C., Wakeman, R.J., 2000, The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid, *Ultrasonics*, 38, pp. 657-661.

Tarleton, E.S., 1992, The role of field assisted techniques in solid/liquid separation, *Filtration and separation*, 29, pp. 246-252.

Trautmann, J.A., 1999, One step dewatering and drying, *Advances in filtration and separation technology*, 13a, p. 315.

Vaxelaire, J., Bongiovanni, J.M., Puiggali, J.R., 1999, Mechanical dewatering and thermal drying of residual sludge, *Environmental Technology*, 20, pp. 29-36.

Wakeman, R.J., Tarleton, E.S., 1991, An experimental study of electroacoustic crossflow microfiltration, *Transaction of the Institution of chemical Engineers*, 69, pp. 386-397.

Wakeman, R.J., Tarleton, E.S., 1999, Filtration. Equipment Selection Modelling and Process Simulation, Elsevier Editions.

Weber, K., Stahl, W., 2002, Improvement of filtration kinetics by pressure electrofiltration, Separation and purification technology, 26, pp. 69-80.

Willis, M.S., Tosun, I., 1980, A rigorous cake filtration theory, Chemical engineering journal, 35, pp. 2427-2438.

CHAPITRE II

FILTRATION – COMPRESSION A PRESSION CONSTANTE

L'objectif de ce chapitre est de décrire physiquement l'opération de déshydratation mécanique à pression constante, en précisant les implications liées au comportement singulier des matériaux très compressibles. A partir de cette étude, l'intérêt d'une aide thermique et les choix relatifs à un dispositif expérimental approprié seront justifiés.

II. FILTRATION – COMPRESSION A PRESSION CONSTANTE	35
II.1. Description phénoménologique d’une opération de déshydratation mécanique	37
II.1.1 Cellule de filtration – compression normalisée.....	37
II.1.2 Déroulement de l’opération de déshydratation mécanique.....	38
II.1.2.1 Filtration.....	38
II.1.2.2 Compression.....	40
II.2. Loi générale de la filtration (équation de Ruth)	42
II.2.1 Comportement parabolique.....	42
II.2.2 Analyse de Ruth : analogie électrique – loi d’Ohm	43
II.2.3 Domaine de validité de l’équation de Ruth.....	45
II.2.3.1 Résistance du media filtrant : colmatage et aide thermique	45
II.2.3.2 Sédimentation des particules solides en suspension.....	51
II.2.3.3 Gâteaux compressibles	52
II.3. Cas des gâteaux compressibles	52
II.3.1 Concept de pression solide.....	52
II.3.2 Equation de Ruth appliquée aux matériaux compressibles.....	58
II.3.3 Données de compression.....	60
II.3.3.1 Influence de la pression de fonctionnement	60
II.3.3.2 Cellule de Compression – Perméabilité (CCP)	61
II.3.3.3 Interface gâteau / media : couche dense.....	66
II.4. Modèles avancés de la filtration sur gâteau	69
II.5. Etape de consolidation	75
II.6. Conclusion	80
II.7. Références bibliographiques	82

II.1. Description phénoménologique d'une opération de déshydratation mécanique

II.1.1. Cellule de filtration – compression normalisée

A l'échelle du laboratoire, les opérations de déshydratation mécanique sont effectuées dans une cellule de filtration – compression normalisée (Norme AFNOR T97.001, 1979, Fig. II.1). Ce dispositif permettant d'obtenir les paramètres caractérisant la « filtrabilité » d'une suspension est composé de quatre éléments :

- le corps de la cellule,
- le piston amovible,
- le couvercle hermétique,
- l'ensemble support de filtre et toile filtrante.

Ce type de cellule permet de traiter jusqu'à 450 mL de suspension sous une pression comprise entre 0 et 10 bar.

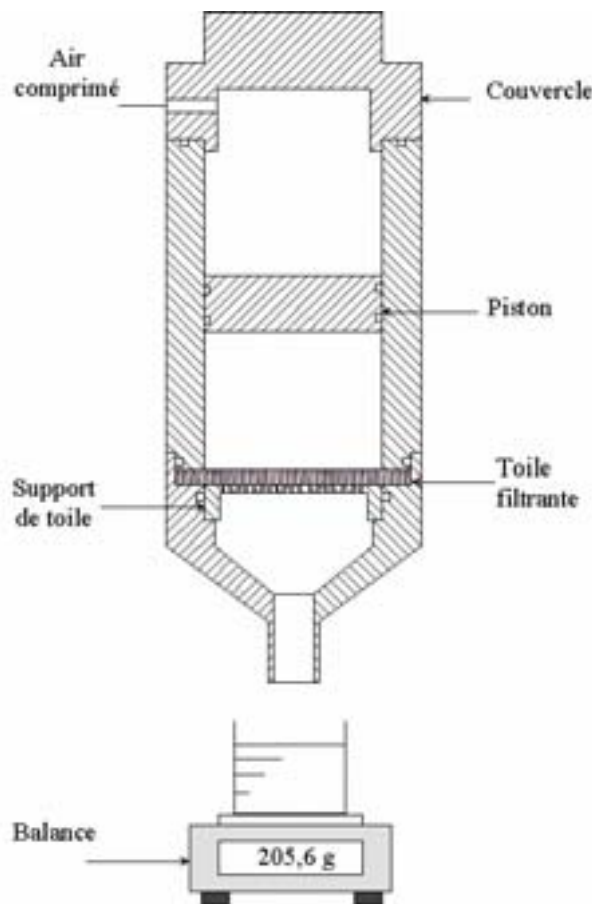


Fig. II.1. Cellule de filtration – compression normalisée.

II.1.2. Déroulement de l'opération de déshydratation mécanique

II.1.2.1. Filtration

La suspension à traiter est introduite dans la cellule, en bas de laquelle se trouve une barrière filtrante (media filtrant) qui autorise le passage du liquide et stoppe en partie les premières particules solides. Le media filtrant est généralement réalisé par tissage (Fig. II.2) de fibre métalliques ou synthétiques. Il est plus ou moins « fermé » suivant les applications et la taille des particules en suspension.

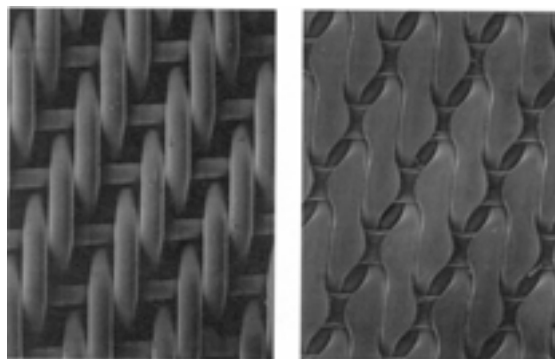


Fig. II.2. Toiles filtrantes synthétiques d'après documentation Sefar Fyltis.

A l'instant initial, la suspension est au repos (si la sédimentation est négligée) et chaque particule solide est entourée de liquide (Tiller et Cooper, 1962). L'opération de séparation débute lorsque l'on force la suspension à se diriger vers la toile filtrante. Dès les premiers instants, des particules solides se déposent à la surface du media filtrant. Quelques-unes pénètrent dans les interstices de la toile et sont susceptibles de boucher en partie certains des pores du media filtrant (Tiller *et al.*, 1981, Granger *et al.*, 1985, Hosten et San, 1999). Ainsi, le media filtrant, au départ propre, voit sa résistance hydraulique augmenter instantanément dès les premiers instants de la séparation (Willis *et al.*, 1983). Ce phénomène de colmatage initial peut être plus ou moins important suivant le type de tissage employé et la concentration de la suspension (Lu *et al.*, 1997a).

Si la concentration de la suspension dépasse une valeur critique, les particules solides s'accumulent au niveau du media filtrant (Smith, 1951), en formant un gâteau de filtration (Fig. II.3). Ce milieu poreux en constitution va lui-même progressivement effectuer la filtration (Wakeman et Tarleton, 1999).

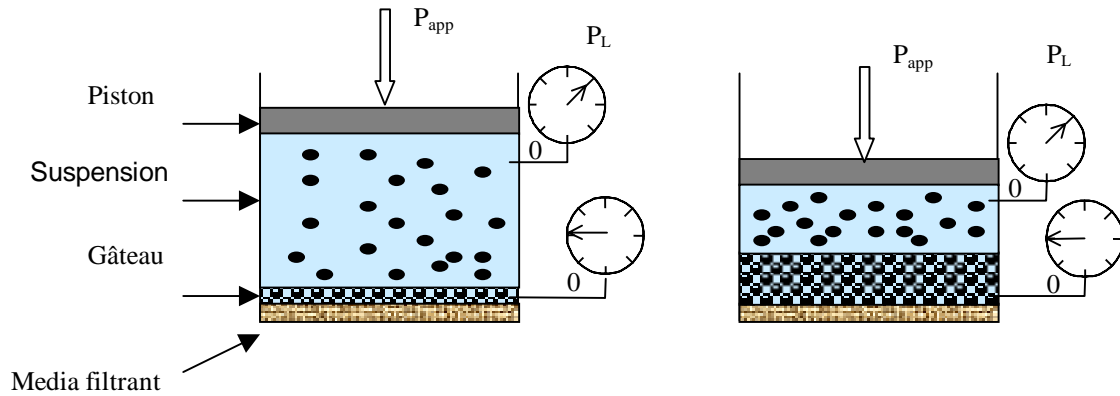


Fig. II.3. Formation du gâteau de filtration.

Dans le gâteau, les particules solides sont en contact les unes avec les autres (Sorensen *et al.*, 1996) et subissent non seulement les frottements dus à l'écoulement du fluide mais aussi les efforts transmis par les particules avoisinantes (Tiller et Leu, 1980). Les efforts se transmettent de particule à particule et s'accumulent tout au long du gâteau (Tosun et Willis, 1983). Maximaux au niveau du media filtrant, ils sont nuls à la surface du gâteau (Tiller et Shirato, 1964).

Une première classification peut être alors effectuée en fonction du comportement du gâteau. Si une variation de pression ne modifie pas les propriétés internes du gâteau, celui-ci est dit « incompressible ». Si, au contraire, une modification de la pression de fonctionnement entraîne une modification de la porosité et de la résistance spécifique, on dit qu'il est « compressible » (Willis *et al.*, 1974). Il s'agit là de la majorité des gâteaux rencontrés en déshydratation mécanique (Willis et Tosun, 1980). Ce type de gâteau est généralement constitué de fines particules (minérales, organiques ou biologiques).

Pour le cas des gâteaux compressibles, les efforts sur la matrice solide provoquent des compressions internes qui modifient la porosité du gâteau (Tiller et Cooper, 1962, Wakeman, 1981). Ces variations de porosité entraînent une variation de la résistance à l'écoulement et modifient la vitesse locale du liquide (Tiller et Cooper, 1960). Les compressions internes se manifestent par une restructuration de la matrice solide. Il ne s'agit pas d'une déformation des grains solides, supposés indéformables, mais d'un réarrangement des particules (Fig. II.4).

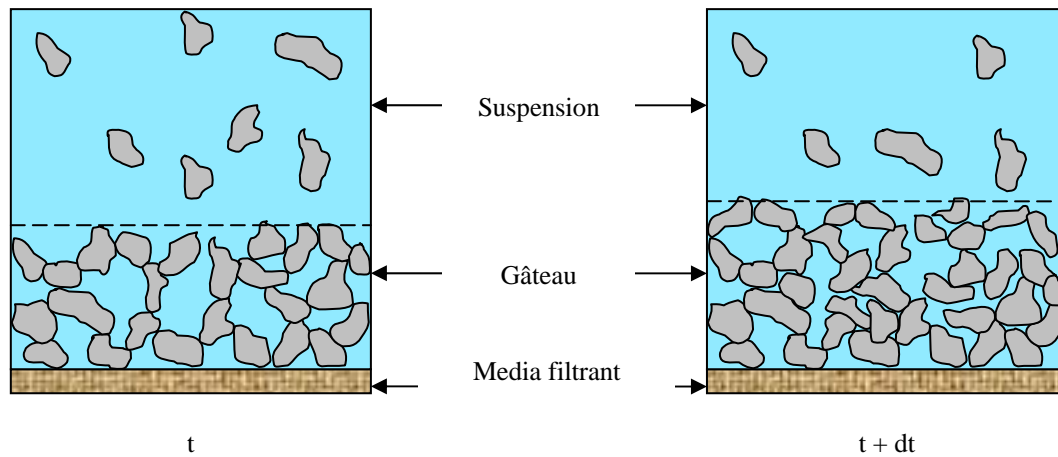


Fig. II.4. Compressibilité du gâteau.

Ainsi, tout au long du procédé, le gâteau de filtration et le media filtrant sont susceptibles de voir leur structure interne (porosité et perméabilité) se modifier du fait des compressions internes mais aussi à cause d'une migration éventuelle de fines (Tien *et al.*, 1997, Civan, 1998).

L'opération de filtration se poursuit jusqu'à ce que toutes les particules solides soient intégrées au gâteau.

Divers travaux ont montré que certains gâteaux (boues biologiques floculées par exemple), ont un comportement singulier en filtration. On observe en effet que, pour ces gâteaux, une peau (ou talon) très peu perméable et qui supporte 80 à 90% de la perte de charge à travers le gâteau se forme au niveau du media filtrant (Tiller et Green, 1973, Sorensen et Hansen, 1993). Ceci explique que, pour des boues biologiques, il est difficile d'obtenir des siccités supérieures à 30 % en fin de filtration. Ainsi, à partir d'une valeur limite de la pression de filtration, ni la porosité du gâteau ni le débit de filtrat ne sont modifiés par un incrément de pression (La Heij *et al.*, 1996a, Sorensen et Sorensen, 1997, Tiller et Kwon, 1998, Tiller *et al.*, 2001). Il s'est alors révélé nécessaire dans le cas de matériaux très compressibles de poursuivre la déshydratation par une opération de compression.

II.1.2.2. Compression

L'opération de compression suit généralement l'étape de filtration (Tiller et Yeh, 1987). Ici, le liquide est expulsé par réduction du volume du gâteau (Fig. II.5).

Par action d'un piston ou d'une membrane, on comprime le gâteau qui voit sa taille diminuer. Le gradient de porosité apparu pendant l'étape de filtration disparaît

progressivement. La compression se termine lorsque toute la charge transmise par le piston est soutenue par la matrice solide (la pression liquide de pore se réduit à la pression atmosphérique, La Heij *et al.*, 1996b).

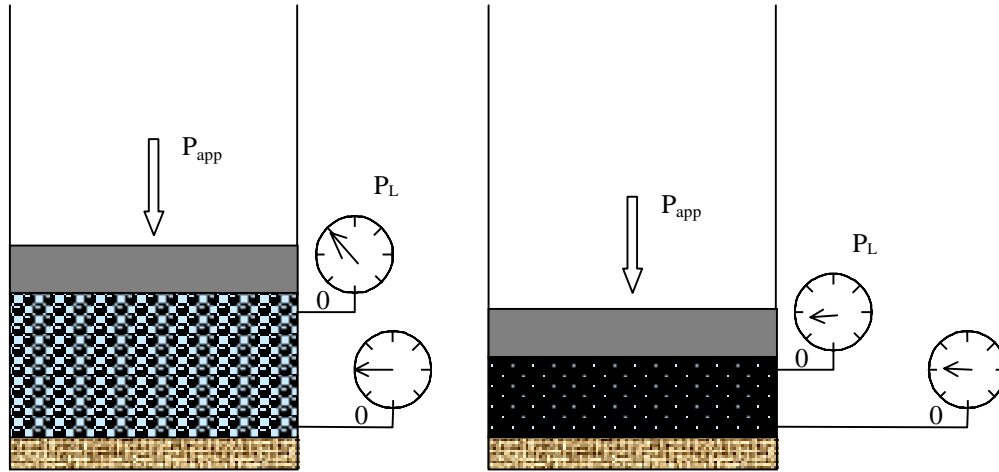


Fig. II.5. Etape de consolidation.

En fin d'opération, le gâteau a atteint un état d'équilibre à la pression de fonctionnement considérée. Cependant, la structure du gâteau n'est pas totalement figée, elle peut être modifiée par une augmentation de la pression de fonctionnement (comme le montrent les graphes de la figure II.6 reportant l'évolution en fonction du temps de la porosité moyenne d'un gâteau de Talc et la pression appliquée en phase de compression) ou tout autre phénomène susceptible d'évacuer du liquide (vaporisation, cisaillement ...).

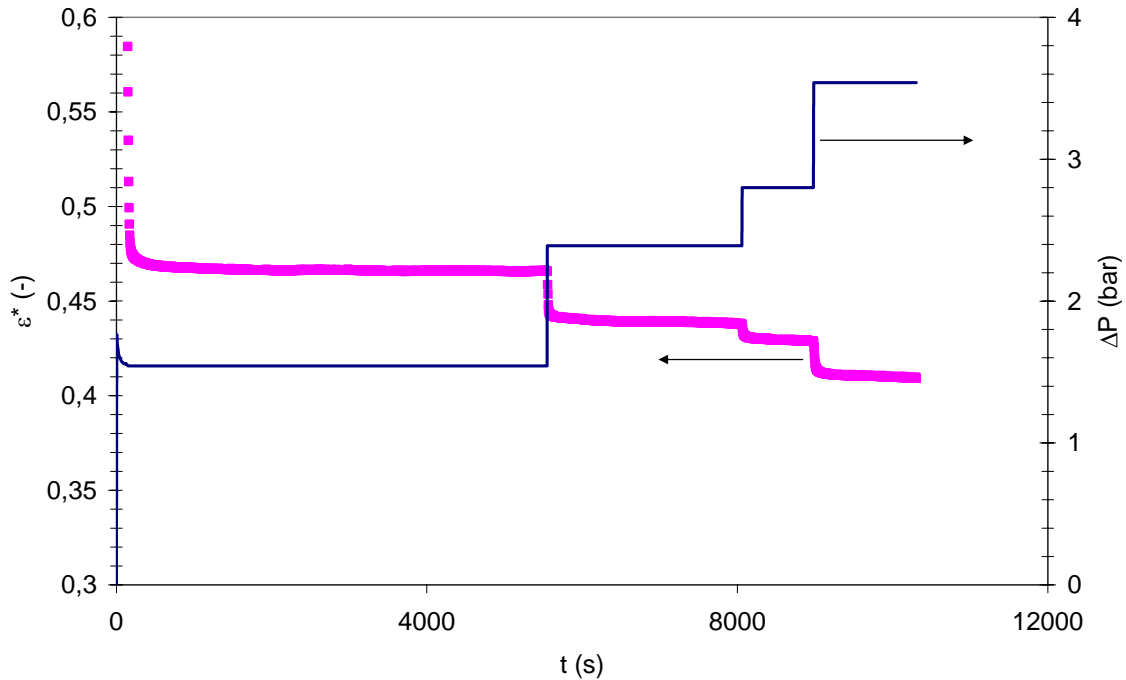


Fig. II.6. Evolution de la porosité moyenne d'un gâteau de Talc pendant la phase de compression avec des créneaux de pression ($s = 0,23$).

II.2. Loi générale de la filtration (équation de Ruth)

II.2.1. Comportement parabolique

Les premiers travaux d'analyse de l'opération de filtration à pression constante ont débuté par une constatation expérimentale : le volume de filtrat recueilli et le temps sont liés par une relation parabolique (Sperry, 1916). En effectuant un grand nombre d'essais expérimentaux, Ruth *et al.* (1933) corrèlent leurs données avec la relation :

$$(V + V_0)^2 = C(t + t_0) \quad (\text{II.1})$$

où V_0 , C et t_0 sont des paramètres associés à la suspension à traiter et à la pression de fonctionnement.

Une approche expérimentale conséquente a montré que l'équation (II.1) : « était capable de décrire le comportement en filtration à pression constante d'un grand nombre de matériaux, indépendamment de leur degré de compressibilité. » (Ruth, 1935). Cette équation devait servir d'axiome pour toutes les études en filtration. Selon Ruth, les irrégularités sur les courbes $V^2 = f(t)$ au début de la filtration sont dues à la résistance du media filtrant et, si celle-ci est correctement déterminée, toutes les filtrations ont un comportement parabolique. Tiller (1953) montre le premier que les courbes d'évolution du volume de filtrat ne sont pas

parfaitement paraboliques. Ces déviations sont attribuées à une variation de la résistance spécifique moyenne au cours de l'opération.

II.2.2. Analyse de Ruth : analogie électrique – loi d'Ohm

Dans la suite de ce chapitre 2 nous nous placerons dans le cas de d'un fluide Newtonien incompressible s'écoulant de façon isotherme dans un milieu poreux où les particules solides sont supposées indéformables. L'accélération de la pesanteur est négligée et il n'y a aucun transfert de masse entre les phases fluide et solide.

L'analyse de Ruth est basée sur une analogie électrique. La forme de l'équation de Darcy qui décrit l'écoulement dans le gâteau étant analogue à celle de la loi d'Ohm, on peut considérer la résistance hydraulique totale comme l'association en série de deux résistances : la résistance du gâteau, R_g , et celle du media filtrant, R_m (Fig. II.7).

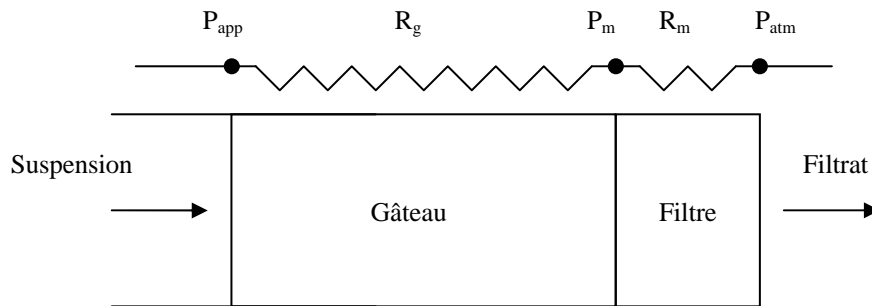


Fig. II.7. Analogie électrique.

Ruth (1935) déduit alors la relation suivante entre le débit de filtrat et la différence de pression aux bornes du gâteau :

$$\frac{\mu}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{R_g + R_m} \quad (\text{II.2})$$

avec μ la viscosité du liquide, V le volume de filtrat recueilli, A l'aire de la surface de filtration et ΔP la différence de pression totale aux bornes du système gâteau – media filtrant.

On remarque que, dans ce modèle, Ruth suppose que le « débit spécifique » du liquide (débit de liquide par unité de surface filtrante) est constant dans le gâteau et le media filtrant (eq.(II.2)) (Tiller et Cooper, 1960), ce qui suppose que la porosité locale du gâteau ne varie pas au cours du temps. Cette hypothèse sera discutée dans les paragraphes suivants.

La résistance hydraulique du gâteau est généralement exprimée sous la forme :

$$R_g = \alpha \frac{m_s}{A} \quad (\text{II.3})$$

avec m_s la masse totale de solide dans le gâteau et α la résistance spécifique (ramenée à la masse de solide) du gâteau. La résistance spécifique est alors équivalente à une résistivité électrique.

En combinant (II.2) et (II.3), on obtient :

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\mu} \frac{A\Delta P}{(\alpha m_s + AR_m)} \quad (\text{II.4})$$

Lors d'un essai de filtration, il est plus aisé de mesurer le volume de filtrat plutôt que la masse de solide dans le gâteau. Ruth (1935) introduit le bilan macroscopique suivant :

$$[\text{masse de boue filtrée}] = [\text{masse de gâteau humide}] + [\text{masse de filtrat}] \quad (\text{II.5})$$

En désignant par s la fraction massique de solide dans la suspension et par W le rapport de la masse de gâteau humide sur la masse de gâteau sec, l'équation (II.5) permet de définir une nouvelle variable ω_c , masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat, qui est :

$$\omega_c = \frac{s\rho_1}{1 - W_s} = \frac{m_s}{V} \quad (\text{II.6})$$

où ρ_1 est la masse volumique du filtrat.

En remplaçant m_s par son expression en fonction de ω_c et V (i.e. $\omega_c V$), il vient :

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\mu} \frac{A\Delta P}{(\alpha\omega_c V + AR_m)} \quad (\text{II.7})$$

En considérant les grandeurs α , ω_c et R_m constantes tout au long de l'opération, Ruth (1935) intègre l'équation (II.7) et obtient pour une opération à pression constante l'expression de l'inverse du débit moyen de filtrat (t/V) sous la forme suivante :

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\alpha\omega_c}{2A^2\Delta P} V + \frac{\mu R_m}{A\Delta P} \quad (\text{II.8})$$

L'équation (II.8) est appelée équation de Ruth. Depuis 1935, cette équation est largement utilisée pour l'analyse de l'opération de filtration à pression constante. Elle suggère que α et R_m peuvent être déterminées respectivement par la pente et par l'ordonnée à l'origine de la courbe t/V en fonction de V (Fig. II.8).

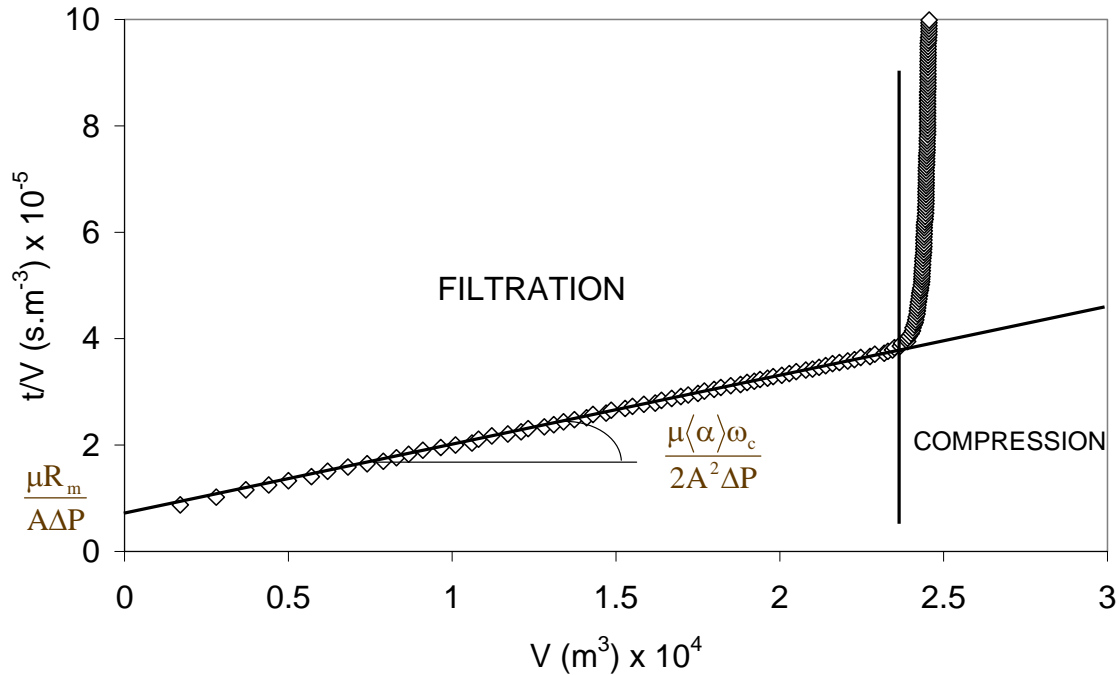


Fig. II.8. Filtration d'une suspension de Talc ($s=0,23$) à 3,5 bar (Essai 2).

II.2.3. Domaine de validité de l'équation de Ruth

En toute rigueur, le modèle de Ruth a un domaine de validité limité puisque les hypothèses dont il découle sont relatives à des matériaux incompressibles et à un media filtrant de résistance hydraulique constante (Tiller, 1975 dans Meeten, 2000). L'utilisation de l'équation de Ruth à des cas où ces conditions ne sont pas remplies peut conduire à des erreurs importantes (Tosun *et al.*, 1993). L'occurrence de matériaux rigoureusement incompressibles est cependant assez rare. En effet, la plupart (si ce n'est la totalité) des suspensions rencontrées conduisent à des gâteaux compressibles (Willis et Tosun, 1980). De plus, différents auteurs (Hosten et San, 1999, Tiller et Leu, 1983a) ont montré que la résistance du media filtrant peut évoluer par colmatage au cours de la filtration et que, dans ces conditions, l'exploitation de la courbe t/V en fonction de V conduisait à des valeurs de R_m erronées. Cependant l'expérience montre que ce modèle reste largement utilisé (même avec des matériaux très compressibles) par les ingénieurs et qu'il est encore à la base d'un grand nombre de dimensionnements industriels.

II.2.3.1. Résistance du media filtrant : colmatage et aide thermique

L'analyse de Ruth suggère que la résistance du media filtrant est constante pendant toute la durée de la filtration. Pour déterminer la valeur de R_m , on utilise l'ordonnée à l'origine des

courbes expérimentales $t/V = f(V)$ (cf. Fig. II.8). Cependant, la résistance hydraulique du media étant définie par :

$$R_m = \frac{L_m}{k_m} \quad (\text{II.9})$$

où L_m et k_m désignent respectivement l'épaisseur et la perméabilité du media. Cette valeur est susceptible d'évoluer au cours de l'opération de séparation. Divers facteurs peuvent en effet modifier la perméabilité du media. Des fines peuvent pénétrer dans la structure interne du filtre ce qui donne lieu à un colmatage dont l'amplitude évolue au cours du temps (Tiller et Leu, 1983b). La charge exercée par le gâteau peut comprimer les fibres constituant le media, réduisant ainsi la surface disponible à l'écoulement du fluide (Chase *et al.*, 1994). De plus, différentes valeurs de R_m sont fréquemment mesurées pour un même matériau et une même pression, en ne changeant que la concentration de la suspension (Yim *et al.*, 2001). Ainsi, il apparaît que la résistance hydraulique n'est pas constante et que la valeur donnée par la méthode analytique (Eq. (II.8)) est à considérer avec précaution. Cette méthode donne parfois des valeurs de R_m négatives lors d'un fort colmatage (Hosten et San, 1999).

De manière générale, R_m peut être mesurée à partir de la perte de charge aux bornes du media filtrant (ΔP_m) :

$$R_m = \frac{\Delta P_m}{\mu q_{Lm}} \quad (\text{II.10})$$

où q_{Lm} est le débit spécifique du liquide à l'interface gâteau/media (égal au débit de filtrat).

Tiller et Leu (1983a) établissent une corrélation avec les résultats de Notebaert *et al.* (1975) qui permet de représenter l'augmentation continue de la résistance hydraulique du media depuis sa valeur initiale (R_{m0}) jusqu'à une valeur limite ($R_{m\infty}$) sous la forme :

$$R_m = R_{m\infty} - (R_{m\infty} - R_{m0}) \exp \left[-\theta \left(\frac{\omega_c V}{A} \right)^2 \right] \quad (\text{II.11})$$

où θ est un paramètre constant et R_{m0} la résistance du media propre. Cette résistance peut être mesurée de façon simple en faisant percoler du liquide clair à travers le media. Le terme $-\theta(\omega_c V/A)^2$ est un indicateur de la vitesse à laquelle la résistance du media filtrant atteint sa valeur limite (Fig. II.9). La littérature fournit d'autres modèles de colmatage, notamment Lee

(1997) qui obtient une nouvelle expression de R_m à partir d'un modèle statistique simple. Nous ne discuterons pas ici de la validité de ces modèles.

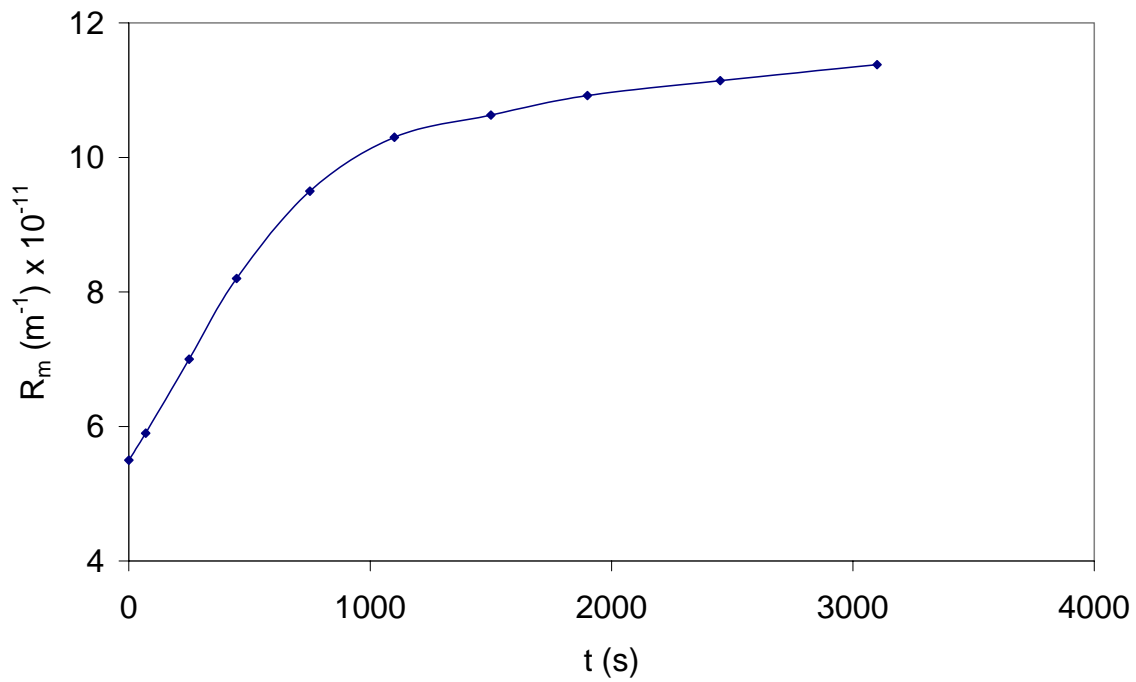


Fig. II.9. Résistance du media filtrant (papier filtre Whatman n°1) en fonction du temps pour une suspension de kaolin filtrée à 3,65 bar ($s = 0,05$) (d'après Tiller et Leu, 1983a).

Néanmoins, nous indiquons à la Fig. II.10, l'impact du colmatage sur les courbes $t/V = f(V)$ en utilisant le modèle décrit à l'équation II.11.

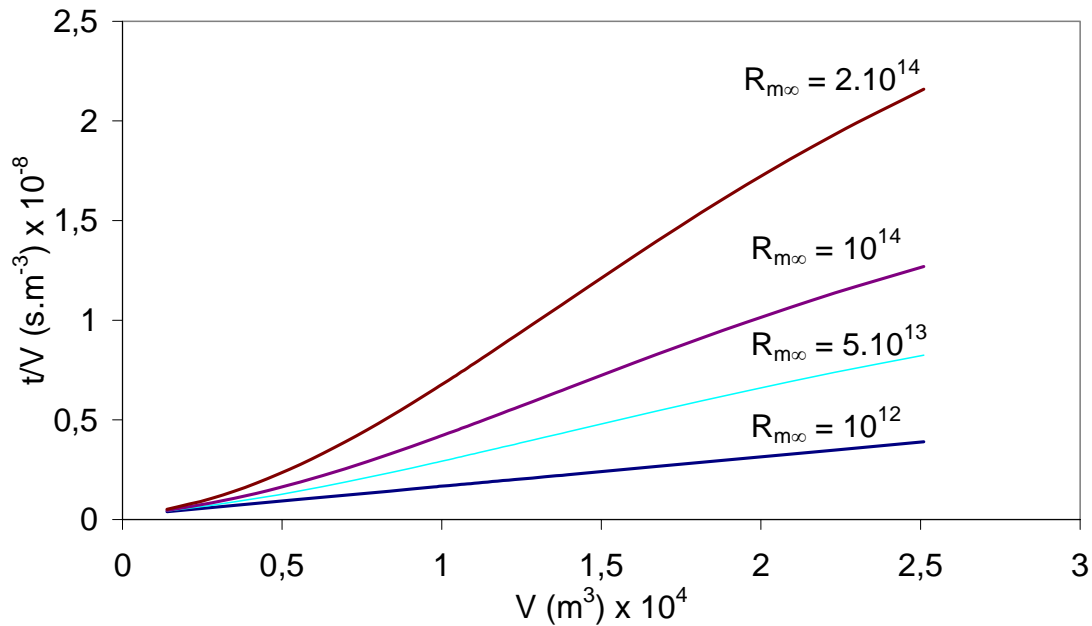


Fig. II.10. Phénomène de colmatage pendant une opération de filtration à pression constante
 $\Delta P = 1,5 \text{ bar}$; $\alpha = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ m.kg}^{-1}$; $\omega_c = 275 \text{ kg.m}^{-3}$; $R_{m0} = 10^{12} \text{ m}^{-1}$; $\theta = 0,01$; $s = 0,23$.

Le colmatage initial du média se traduit donc par une déviation aux temps courts, qui n'est pas toujours accessible par les mesures expérimentales. Le phénomène se prolonge pendant toute la durée de l'opération (forme sigmoïdale des courbes expérimentales). Le prolongement de la partie linéaire des courbes fournit alors une valeur « erronée » de la résistance du média (Tiller et Leu, 1983a).

Seule la mesure de la chute de pression à travers le média permet d'obtenir de façon certaine la résistance R_m au cours de l'opération.

Afin d'éviter la discussion sur la valeur de R_m , certains auteurs (Wu, 1994, Tien *et al.*, 2001) négligent la résistance R_m dans le cas de gâteaux très résistifs. Cependant, d'autres auteurs (Hosten et San, 1999) ont montré que pour du kaolin donnant des gâteaux de résistance spécifique élevée, R_m pouvait représenter 25 à 30 % de la résistance totale, même en fin d'opération.

Nous proposons ici d'étudier l'impact d'une aide thermique localisée au niveau du média filtrant. Une réduction de la viscosité de la phase fluide au niveau du média filtrant contribuerait à diminuer la perte de charge ΔP_m . Le colmatage ne serait pas affecté en tant que tel, mais le débit de liquide serait nettement amélioré.

En utilisant le modèle proposé par Tiller et Leu (eq. II.11), nous pouvons recalculer l'évolution du volume de filtrat récupéré afin d'étudier l'impact d'une aide thermique au

niveau du media filtrant sur le phénomène de colmatage. En première approximation, nous supposons que :

- ✓ l'apport de chaleur effectué au niveau du media filtrant ne modifie la viscosité du fluide qu'au travers du media (pas de propagation du flux de chaleur),
- ✓ la résistance spécifique du gâteau n'est pas modifiée.

Par définition le débit de filtrat est donné par :

$$q_L = \frac{A\Delta P}{\mu(\alpha\omega_c V + AR_m)} \quad (\text{II.12})$$

Si l'on considère que l'ensemble du gâteau de filtration est à température ambiante et que le media filtrant est à la température T, les hypothèses énoncées plus haut permettent d'écrire alors :

$$q_L = \frac{A\Delta P}{\mu_{(T_{amb})}\alpha\omega_c V + \mu_{(T)}AR_m} \quad (\text{II.13})$$

où $\mu_{(T_{amb})}$ est la viscosité du fluide à température ambiante et $\mu_{(T)}$ celle à la température T.

La résistance hydraulique du media étant définie par l'équation (II.9), elle n'est pas modifiée par la température (les effets de dilatation des fibres constituant le media sont négligés). La combinaison des équations (II.11) et (II.13) donne:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_{(T_{amb})}\alpha\omega_c}{A^2\Delta P} V + \frac{\mu_{(T)}}{A\Delta P} \left[R_{m\infty} - (R_{m\infty} - R_{mo}) \exp \left[-\theta \left(\frac{\omega_c V}{A} \right)^2 \right] \right] \quad (\text{II.14})$$

En intégrant l'équation ci-dessus, il vient :

$$t = \frac{\mu_{(T_{amb})}\alpha\omega_c}{2A^2\Delta P} V^2 + \frac{\mu_{(T)}R_{m\infty}}{A\Delta P} V - \frac{\mu_{(T)}(R_{m\infty} - R_{mo})}{2\Delta P\sqrt{\theta}\omega_c} \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\theta}\omega_c V}{A} \right) \quad (\text{II.15})$$

Considérons la filtration d'une suspension de Kaolin ($s = 0,23$) à 1,5 bar. En utilisant l'équation (II.15), les volumes de filtrat récupérés pour différentes températures de media sont calculés (Fig. II.11) dans le cas d'un colmatage prononcé du media filtrant (paramètres choisis indiqués au tableau II.1).

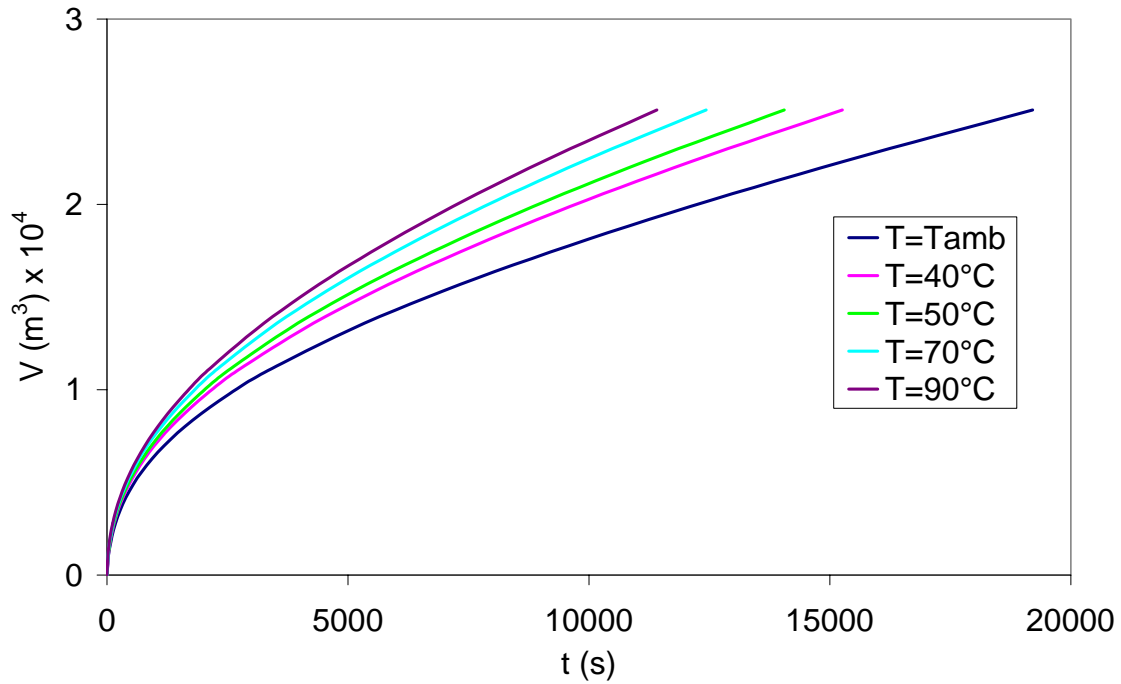


Fig. II.11. Détermination théorique de l'évolution du volume de filtrat pour 5 températures de filtre (filtration d'une suspension de kaolin à 1,5 bar, $s=0,23$) évaluée à partir de l'équation (II.15).

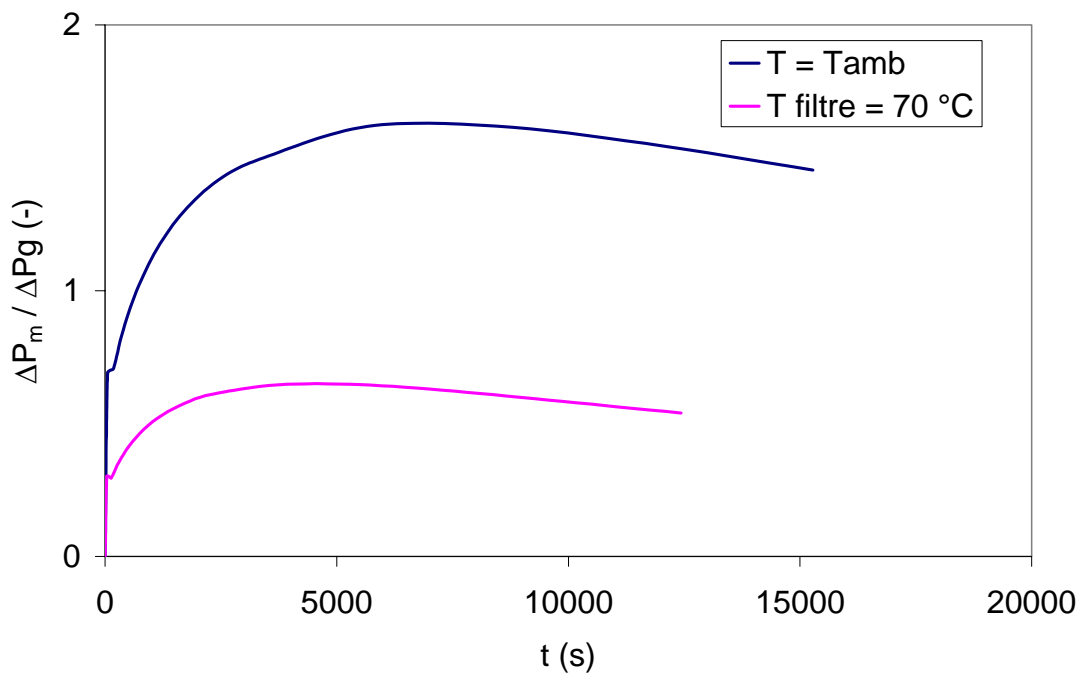


Fig. II.12. Détermination du rapport de la perte de charge à travers le media filtrant sur la perte de charge à travers le gâteau pour deux températures de filtre (d'après l'équation II.10).

θ (-)	0,01
Rm_0 (m^{-1})	10^{12}
Rm_∞ (m^{-1})	5.10^{13}
α ($m.kg^{-1}$)	2.10^{12}
ω_c ($kg.m^{-3}$)	275,4
ΔP (bar)	1,5

Tableau II.1. Paramètres utilisés pour les courbes théoriques (Fig. II.11 et Fig. II.12).

La figure II.11 montre qu'une aide thermique localisée au niveau du media filtrant permet en principe d'améliorer de façon significative les cinétiques de filtration (la durée de traitement est réduite de moitié pour une température de 70°C) dans le cas d'un fort colmatage du media filtrant. La perte de charge à travers le media filtrant est également réduite comme le montre l'évolution du rapport de la perte de charge à travers le media filtrant sur la perte de charge à travers le gâteau en fonction du temps pour deux températures de fonctionnement (Fig. II.12).

Nous avons supposé ici qu'il n'y avait pas de propagation du flux de chaleur dans le système. On peut donc s'attendre à une réelle efficacité d'une aide thermique au niveau du media filtrant. En effet, une réduction de viscosité de la phase fluide au niveau du media et de la partie inférieure du gâteau de filtration (propagation du flux de chaleur) semble suffisante pour accélérer notablement la séparation, notamment dans le cas du traitement d'une suspension difficile à filtrer (débits de filtrat faibles).

On suppose de plus ici que l'aide thermique n'a aucune influence sur la structure du gâteau (résistance spécifique supposée constante).

II.2.3.2. Sédimentation des particules solides en suspension

L'équation (II.8) suggère que la masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat, ω_c , est constante pendant la filtration. Cependant, les particules dans la suspension ont la même vitesse que le liquide seulement si le phénomène de sédimentation est négligé. Lorsque la sédimentation des particules solides dans la suspension est considérée, la concentration de particules solides au-dessus du gâteau n'est alors plus constante. Tiller *et al.* (1995) montrent que les mesures de résistance spécifique sont faussées car alors ω_c est sous-estimé. Les valeurs des résistances spécifiques calculées à partir de l'équation (II.8) peuvent dans ce cas être 3 à 4 fois plus importantes que celles calculées en prenant en compte la sédimentation. Pour éviter ce phénomène, les auteurs préconisent de filtrer des suspensions chargées.

II.2.3.3. Gâteaux compressibles

L'évolution des propriétés locales d'un gâteau compressible, porosité et perméabilité, est liée à l'écoulement du fluide qui circule dans les pores du gâteau (Tiller *et al.* 1999). Cet écoulement, dû au gradient de pression hydraulique, provoque un transfert de quantité de mouvement aux interfaces liquide – solide (forces de frottement, Wakeman, 1978). Si l'édifice résultant de l'arrangement des particules solides est tel qu'il ne peut pas supporter les efforts liés à l'écoulement sans mouvement des particules, alors le gâteau est compressible. Ce transfert de quantité de mouvement provoque des réarrangements des particules auxquels peut s'ajouter une migration de fines entraînées par le liquide (Corapcioglu et Abboud, 1990).

Ces réarrangements sont qualifiés de compressions internes de la matrice solide (Wakeman, 1981). Il s'agit d'un mouvement d'ensemble des particules qui provoque une modification de la structure interne de la matrice solide et non une déformation des particules solides supposées indéformables. Ces compressions engendrent alors un gradient de porosité sur toute la hauteur du gâteau. La porosité est la plus élevée à la surface du gâteau pour atteindre un minimum à l'interface gâteau/media filtrant. L'évolution temporelle de la porosité locale engendre une variation du débit liquide selon la variable d'espace.

II.3. Cas des gâteaux compressibles

II.3.1. Concept de pression solide

Les caractéristiques des gâteaux de filtration (porosité, perméabilité et résistance spécifique) sont souvent supposées dépendre exclusivement d'une grandeur empruntée à la mécanique des sols : la pression effective ou solide. C'est le facteur responsable du mouvement des particules solides dans le gâteau (Tosun et Willis, 1986). Nous décrivons ici l'expérience de Terzaghi (1967) qui permet de discerner les deux composantes de la contrainte normale totale s'exerçant sur toute surface horizontale d'un sol saturé et qui fournit une description de la pression solide.

La figure II.13a montre une fine couche d'un lit de sable qui recouvre le fond d'un réservoir. Si une contrainte par unité de surface (P_{app}) est appliquée à la surface de cet échantillon (par exemple en le recouvrant d'une grenaille de plomb, Fig. II.13b) la porosité du lit décroît de ε_0 à ε_1 . La pression P_{app} provoque une modification de toutes les propriétés mécaniques du lit (comme la résistance au cisaillement). Pour cette raison, on dit que c'est une pression effective, notée P_s .

Si maintenant le récipient est rempli d'eau d'une hauteur h_L (Fig. II.13c) telle que $h_L = P_{app}/\rho_L g$, la charge sur la surface horizontale supérieure de l'échantillon est également augmentée de P_{app} . Cependant, cette augmentation de pression due au poids de la colonne d'eau n'a pas d'effet mesurable sur la porosité ou toute autre propriété du sol. Cette pression est dite neutre et est notée P_L .

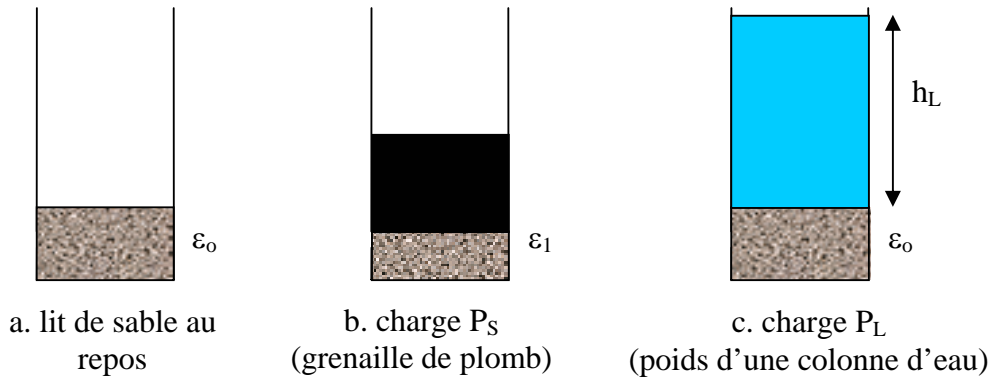


Fig. II.13. Illustration de l'expérience de Terzaghi (1967).

Ainsi, la contrainte normale totale sur toute section horizontale d'un sol saturé est composé de deux éléments :

- d'abord P_L , qui agit sur le liquide et le solide dans toutes les directions avec la même intensité ; c'est la pression neutre ou pression liquide de pore.
- puis une deuxième composante qui est un excès par rapport à la pression liquide ; c'est la pression effective ou solide.

Soit d'après Terzaghi (1936b) :

$$P_{app} = P_s + P_L \quad (\text{II.16})$$

Dans l'expérience décrite à la Fig. II.13, le liquide dans le sol saturé est au repos. En déshydratation mécanique par filtration - compression, le liquide s'écoule à travers la matrice poreuse (le gâteau de filtration). En effectuant le même type d'expérience, avec cette fois-ci un liquide s'écoulant à travers le lit de sable, Terzaghi (1967) montre que, si la pression liquide de pore augmente ou décroît de ΔP_L , alors la pression effective décroît ou augmente de la même valeur. Soit :

$$\Delta P_s = -\Delta P_L \quad (\text{II.17})$$

La variation correspondante de la pression effective dans le lit est dite pression de suintement ou de fuite. Elle provient des frottements du liquide sur les parois de la matrice

poreuse et peut être décrite comme dérivant d'une traînée. Ainsi, lorsqu'un liquide s'écoule au travers d'un lit de particules solides (milieu déformable), celles-ci sont entraînées dans la direction de l'écoulement. L'écoulement provoque alors une augmentation de la pression solide (accompagnée d'une réduction de la pression liquide de pore) et une diminution de la porosité du lit.

Afin de rendre compte des modifications structurelles d'un gâteau compressible, la notion de pression solide a été utilisée pour l'étude du procédé de filtration - compression. Nous décrivons ici l'expression du bilan de force, écrit dans le gâteau de filtration, fréquemment rencontré dans la littérature.

Considérons une tranche d'épaisseur dz d'un gâteau compressible (Fig. II.14).

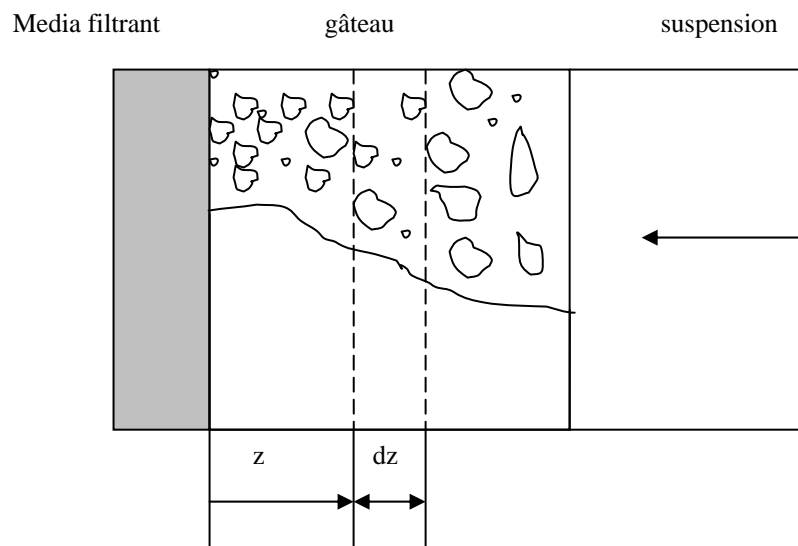


Fig. II.14. Coupe schématique d'un gâteau de filtration.

Alors que le liquide s'écoule à travers la matrice poreuse, l'effet visqueux sur les particules produit une force de compression qui s'accumule du sommet du gâteau à l'interface gâteau/media. Cette force de compression est nulle à l'interface suspension/gâteau et maximale à l'interface gâteau/media, où les particules solides subissent non seulement les forces visqueuses dues à l'écoulement du fluide mais aussi les forces de compression qui s'accumulent le long de la matrice poreuse (Tosun et Willis, 1983). C'est ce qui provoque un gradient de porosité dans le gâteau.

Tiller et Crump (1977) proposent un arrangement idéal des particules dans le gâteau de filtration. En supposant les particules en contact ponctuel, ils définissent une membrane qui ne traverse aucune particule et qui leur permet d'effectuer un bilan de force sur les deux phases (Fig. II.15)

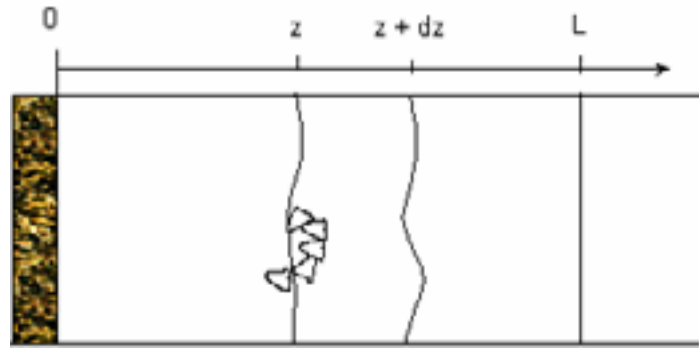


Fig. II.15. Définition du bilan de force dans un gâteau de filtration (d'après Tiller et Crump, 1977).

En supposant que les irrégularités des membranes sont négligeables par rapport à l'échelle du gâteau les bilans de force sur le solide et le liquide s'écrivent respectivement (en négligeant les forces d'inertie et les effets de la pesanteur) :

$$\frac{\partial F_s}{\partial z} dz + A \frac{\partial}{\partial z} [(1 - \varepsilon) P_L] dz + AR(1 - \varepsilon) dz = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$A \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon P_L) dz - AR(1 - \varepsilon) dz = 0 \quad (\text{II.19})$$

La définition de cette membrane permet à Tiller et Crump (1977) d'affirmer que la pression liquide est effective sur toute section du gâteau.

Le terme F_s représente ici la résultante des forces de compression qui s'accumulent le long du gâteau et qui sont transmises d'une particule à une autre par les points de contact, ε est la porosité et R est ici le frottement visqueux par unité de volume de solide qui agit sur les particules solides du fait de la différence de vitesse des deux phases. Ce terme est considéré comme un gain de quantité de mouvement pour la phase solide et une perte pour la phase liquide. Les effets de parois (cellule de filtration) ne sont pas pris en compte dans les équations (II.18) et (II.19). Koenders et Wakeman (1995) montrent en effet qu'une modélisation unidimensionnelle est légitime lorsque le rapport de la hauteur de la cellule (H) sur son diamètre (D) est supérieur à l'unité car, dans ce cas précis, l'épaisseur de la couche de cisaillement est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur du media. Ainsi, pour $H/D > 1$, les effets de parois sont négligeables pendant la phase de filtration. Les cellules de filtration – compression développées au laboratoire répondent à cette exigence. Pour des gâteaux confinés (phase de compression), les effets de parois ont été étudiés de façon intensive dans la littérature. Ces différentes études (Tiller *et al.*, 1972, Tiller et Lu, 1972, Teoh *et al.*, 2002) ont d'abord montré que les effets de parois sur un gâteau comprimé dans les cellules de compression - perméabilité (cf. chapitre II.3.3.2) et les cellules de filtration - compression

(Fig. II.1) étaient négligeables pour des rapports $L/D < 0,6$ (L étant la hauteur du gâteau). Récemment, Lu *et al.* (1998) ont montré que la pression transmise au gâteau était de l'ordre de 85 % de la pression appliquée même pour des rapports $L/D = 0,2$. Ainsi, pour l'ensemble de l'opération de déshydratation mécanique (filtration et compression), les effets de parois sont négligeables pour $H/D > 1$ et $L/D < 0,2$.

La somme des deux bilans (eqs. II.18 et II.19) donne :

$$\frac{\partial F_s}{\partial z} + A \frac{\partial P_L}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.20})$$

L'effet de la température sur la résistance au cisaillement a été étudié par de nombreux auteurs (Kuntiwattanakul *et al.*, 1995, De Bruyn et Thimus, 1995). L'augmentation de la température dans un échantillon déclenche simultanément deux phénomènes inverses. D'une part, elle induit une diminution de la viscosité de l'eau interstitielle donc une diminution de la cohésion qui conduit à une diminution de la résistance au cisaillement. D'autre part, l'apport d'énergie aux atomes participant aux liaisons entre les particules induit une rupture de ces liaisons et une densification du gâteau, créant de nouvelles liaisons. Or cette densification dépend de plusieurs paramètres comme l'indice de plasticité ou l'état de contrainte. Dans le cas d'une argile, Hueckel et Baldi (1990) ont observé une diminution de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de température. Dans ce cas, les limites de validité de l'équation (II.20) sont étendues.

L'intégration de l'équation (II.20) conduit à :

$$F_s + AP_L = AP_{app} \quad (\text{II.21})$$

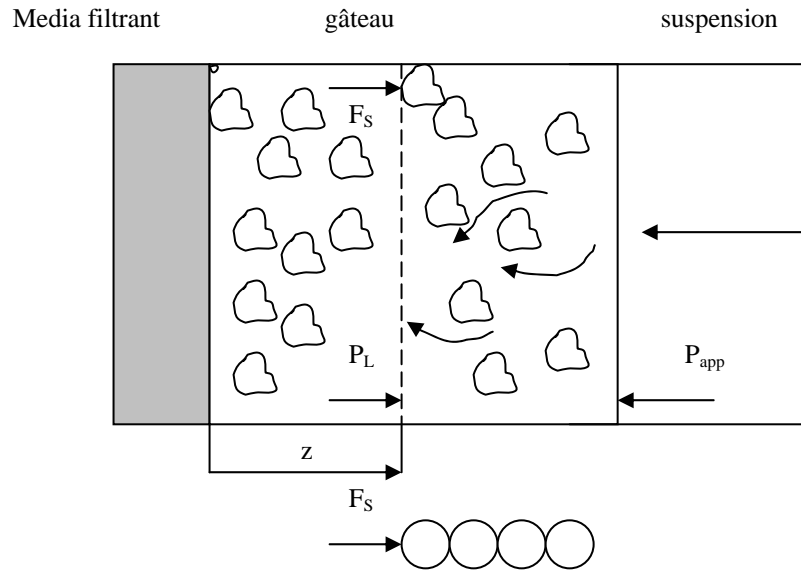


Fig. II.16. Frottements dans un gâteau de filtration d'après Tiller et Hornig (1983).

En définissant $P_S = F_S/A$, il vient :

$$P_S + P_L = P_{app} \quad (\text{II.22})$$

P_S est définie comme étant la pression compressive ou effective, rejoignant ici la terminologie employée en mécanique des sols. Cependant, cette notion de pression solide telle qu'elle est couramment employée en filtration, n'a pas de réel sens physique. En effet, la pression effective serait la force F_S divisée par la surface de contact entre particules et non par la section horizontale totale du gâteau. Cependant, dans l'arrangement idéal proposé par Tiller, la surface sur laquelle F_S s'exerce est négligeable (Tiller et Leu, 1980). Le terme $P_S = F_S/A$ est donc introduit par souci d'alléger les équations du modèle. Il ne s'agit pas d'une pression mais elle représente une contrainte appelée encore « pression fictive » (Shirato *et al.*, 1987). L'équation (II.22) permet de représenter de façon simple les répartitions de la pression hydraulique et de la pression solide sur l'épaisseur du gâteau compressible (Fig. II.17).

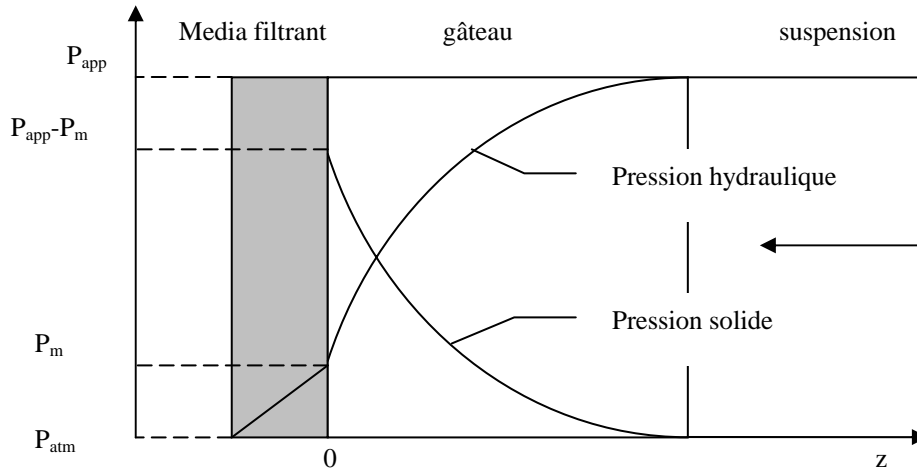


Fig. II.17. Répartition des pressions dans un gâteau de filtration.

II.3.2. Equation de Ruth appliquée aux matériaux compressibles

L'équation de Ruth peut être adaptée au cas des gâteaux compressibles en supposant que les variations de porosité sur l'épaisseur du gâteau n'entraînent pas de variation du débit spécifique q_L . Cette hypothèse suggère que les variations de porosité locale sont négligeables devant celles de la résistance spécifique locale.

Sur une épaisseur infinitésimale de gâteau, l'équation de Darcy s'écrit :

$$q_L = \frac{k}{\mu} \frac{dP_L}{dz} = -\frac{k}{\mu} \frac{dP_S}{dz} \quad (\text{II.23})$$

où k est la perméabilité du gâteau et q_L la vitesse superficielle du liquide dans le gâteau. On note ici que la vitesse des particules solides n'est pas prise en compte.

En introduisant $d\omega_A$ la masse de gâteau sec déposé dans une couche d'épaisseur dz à la côte z par unité de surface filtrante définie par :

$$d\omega_A = \rho_s(1 - \varepsilon)dz \quad (\text{II.24})$$

avec ρ_s la masse volumique des solides, et en introduisant la résistance spécifique locale α_z définie par (Carman, 1938) :

$$\alpha_z = \frac{1}{k\rho_s(1 - \varepsilon)} \quad (\text{II.25})$$

l'équation (II.23) s'écrit :

$$\mu\alpha_z q_L = -\frac{dP_S}{d\omega_A} \quad (\text{II.26})$$

L'équation ci-dessus est alors écrite en coordonnées matérielles (ou coordonnées de Lagrange).

D'après l'équation (II.25), la résistance spécifique locale est une fonction de la porosité. Il est largement accepté (et plausible, Tiller et Cooper, 1960) que les modifications de structure soient directement liées aux variations de pression solide. L'équation (II.26) peut donc s'écrire :

$$-\mu q_L \int_0^{\omega_{AT}} d\omega_A = \int_{P_{app}-P_m}^0 \frac{dP_S}{\alpha_z} \quad (II.27)$$

Les limites de l'intégrale, ($\omega_A=0$, $P_S=P_{app}-P_m$) et ($\omega_A=\omega_{AT}$, $P_S=0$), correspondent aux interfaces suspension/gâteau et gâteau/media respectivement (cf. Fig. II.17). Le débit superficiel du liquide est ici considéré comme constant puisque les variations de porosité sont négligées. En introduisant la résistance spécifique moyenne (Tiller et Cooper, 1960) :

$$\langle \alpha \rangle = \frac{P_{app} - P_m}{\int_0^{P_{app}-P_m} \frac{dP_S}{\alpha_z}} \quad (II.28)$$

et en effectuant la même analogie électrique que pour l'équation (II.2) il vient :

$$\mu q_L = \frac{\Delta P}{(\langle \alpha \rangle \omega_{AT} + R_m)} \quad (II.29)$$

On remarquera ici que la résistance spécifique moyenne demeure constante pendant l'opération seulement si P_m est négligée, ce qui signifie que la résistance du media doit être négligeable (cf. chapitre II.2.3.1).

Tosun *et al.* (1993) remarquent que la définition de la résistance spécifique moyenne employée dans l'équation (II.28) n'est pas rigoureusement celle d'une valeur moyenne. En effet, le terme de droite dans l'équation (II.28) est mathématiquement égal à $1/\langle 1/\alpha \rangle$ et, en général, $\langle 1/\alpha \rangle \neq 1/\langle \alpha \rangle$. Tiller et Horng (1983, p.301) suggèrent qu'il serait peu aisé de changer une pratique courante et qu'employer $\langle 1/\alpha \rangle$ au lieu de $1/\langle \alpha \rangle$ demanderait des modifications compliquées sur des équations largement utilisées dans la littérature.

En introduisant la masse de gâteau sec déposée par unité de volume de filtrat (ω_c), il vient :

$$q_L = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta P}{\mu (\langle \alpha \rangle \omega_c V + A R_m)} \quad (II.30)$$

Si, comme pour l'équation (II.7), $\langle \alpha \rangle$, ω_c et R_m sont constants pendant toute la durée de l'opération (avec l'hypothèse relative au débit superficiel de liquide constant dans le gâteau (eq. (II.27)), l'intégration de l'équation (II.30) donne une forme analogue à celle de l'équation (II.8) mais applicable au cas des gâteaux compressibles :

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \langle \alpha \rangle \omega_c}{2A^2 \Delta P} V + \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \quad (\text{II.31})$$

L'équation (II.31) peut donc être utilisée dans le cas des matériaux compressibles pour analyser une opération de filtration. Néanmoins, ce modèle reste très restrictif et ne représente qu'une extension limitée du modèle proposé par Ruth (eq. II.8) aux gâteaux compressibles. La résistance du media et la résistance spécifique moyenne du gâteau sont supposées constantes et les variations du débit liquide à l'intérieur du gâteau ainsi que la vitesse des particules ne sont pas prises en compte.

II.3.3. Données de compression

II.3.3.1. Influence de la pression de fonctionnement

De nombreux modèles empiriques peuvent être développés pour décrire les variations de la résistance spécifique moyenne. D'un point de vue pratique, la variation de la résistance spécifique moyenne en fonction de la pression de fonctionnement est souvent représentée par une loi puissance (Shirato *et al.*, 1987) :

$$\langle \alpha \rangle = a' (\Delta P)^{n'} \quad (\text{II.32})$$

où a' et n' sont des constantes empiriques dépendant de la suspension et de sa concentration, qui peuvent être déterminées à partir d'une série d'essais de filtration à différentes pressions de fonctionnement (Fig. II.18). Le paramètre n' est alors appelé coefficient de compressibilité apparent (Yim, 1984).

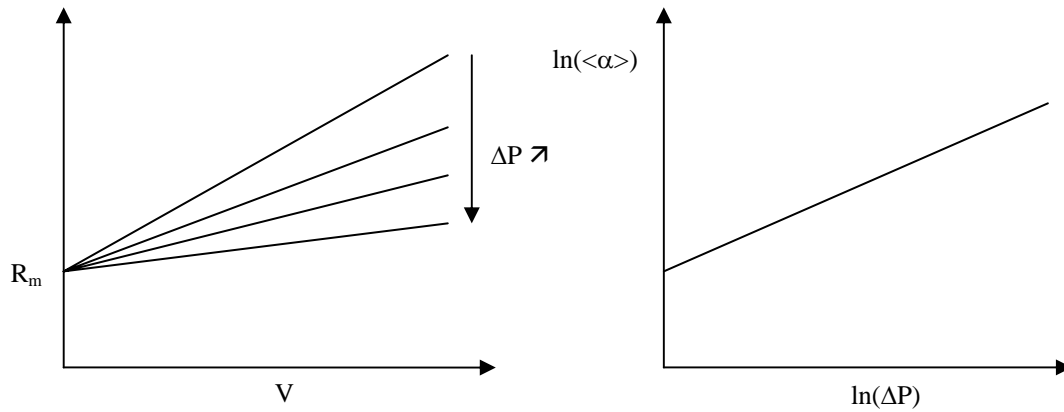


Fig. II.18. Détermination du coefficient de compressibilité.

L'équation (II.32) est une relation qui ne retranscrit pas les hétérogénéités du gâteau de filtration. Bien que les bases théoriques de cette relation puissent être mises en doute, elle se révèle être suffisante pour dimensionner les filtres industriels. Cependant, cette équation n'est qu'une approximation et découle de l'équation (II.33) qui représente de façon empirique l'évolution de la résistance spécifique locale à la pression solide (Tiller, 1953) :

$$\alpha_z = a'' P_s^{n'} \quad (\text{II.33})$$

Soit, en utilisant l'équation (II.28) :

$$\langle \alpha \rangle = a'' (1 - n') \Delta P_g^{n'} = a'' (1 - n') (P_{\text{app}} - P_m) \quad (\text{II.34})$$

Si la résistance du média filtrant est négligée (cf. chap.II.2.3.1), on retrouve l'équation (II.32) :

$$\langle \alpha \rangle = a'' (1 - n') (P_{\text{app}} - P_{\text{atm}}) = a' \Delta P^{n'} \quad (\text{II.35})$$

On remarque que l'équation (II.33) (et donc l'équation (II.34)) n'est valable que pour des valeurs de n' inférieures à 1, d'où le terme « compressibilité apparente ». Karpukin (1972, dans Yim, 1984) montre d'ailleurs que la méthode décrite à la figure (II.18) donne toujours des valeurs de n' inférieures à l'unité.

II.3.3.2. Cellule de Compression – Perméabilité (CCP)

Ruth (1946) introduit la cellule de compression - perméabilité (CCP) (Fig. II.19) censée « palier le manque de base théorique dans le domaine de la filtration ». Ce dispositif expérimental, appelé consolidomètre dans le domaine de la mécanique des sols, a été utilisé

par de nombreux auteurs pour simuler une opération de filtration. L'objectif d'un tel dispositif est de relier les caractéristiques internes des gâteaux compressibles (porosité et résistance spécifique) aux grandeurs moyennes (à l'échelle du gâteau), accessibles par des expériences de filtration classiques.

De façon simple, une cellule de compression - perméabilité est constituée d'un piston mobile grâce auquel une charge mécanique peut être transmise au gâteau. La résistance spécifique et la porosité sont obtenues en faisant traverser le gâteau par un liquide.

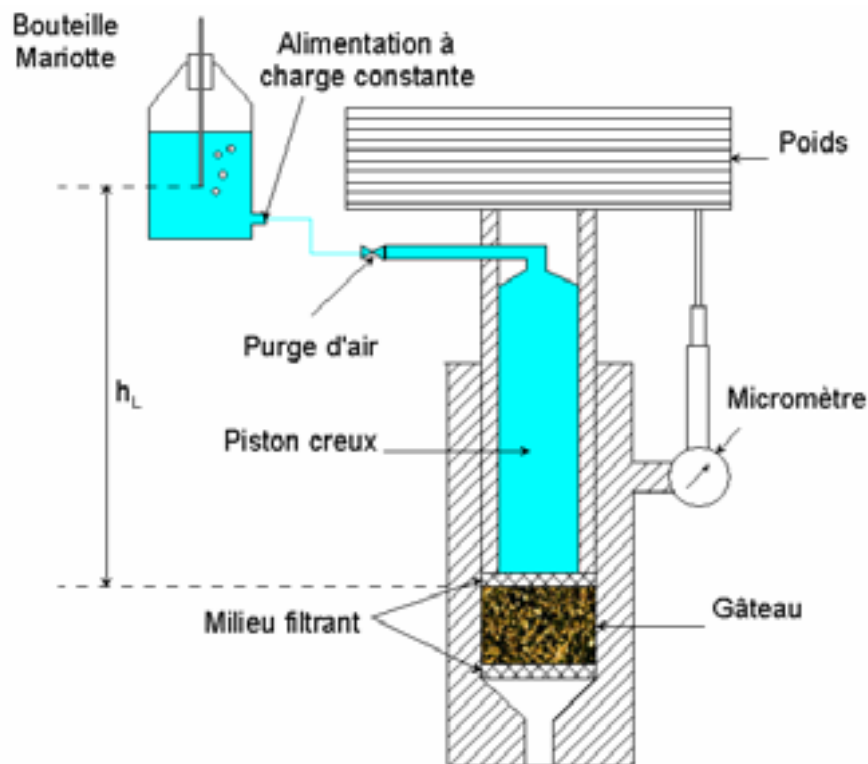


Fig. II.19. Cellule de compression – perméabilité.

L'utilisation d'une cellule de compression - perméabilité comme outil de simulation (pour obtenir une correspondance unique entre les données de CCP et de filtration) repose sur deux hypothèses fondamentales :

- ✓ la résistance spécifique du gâteau n'est fonction que de la pression solide (pas d'influence de la variable temporelle et comportement élastique), (H1)
- ✓ la pression solide (ou la charge appliquée sur le gâteau) est exactement égale à la chute de pression hydraulique à travers le gâteau (ΔP_g),
au cours de la filtration (H2)

Willis *et al.* (1974) ont confirmé la première hypothèse mais remarquent que pour les matériaux utilisés dans leur étude, la pression solide est égale à la chute de pression liquide dans le gâteau multiplié par la porosité moyenne du gâteau. Cependant, Tien *et al.* (2001) montrent que la relation liant la pression solide au gradient de pression liquide dépend largement du matériau étudié. On voit déjà ici que l'utilisation de la CCP en tant qu'outil de simulation est sujette à caution et qu'une méthodologie rigoureuse reste encore à déterminer (Tien, 2002).

La deuxième hypothèse suggère de plus qu'en un point du gâteau de filtration (dans un cas dynamique où le gâteau est en formation) où la pression solide est égale à la charge mécanique appliquée en CCP ($P_{s1} = \text{poids divisé par la surface du gâteau} + \text{le poids de la colonne d'eau}$, Fig. II.19), la résistance spécifique (α_z) et la porosité (ε) locales sont équivalentes aux valeurs obtenues en CCP, dans un état d'équilibre statique (Fig. II.20).

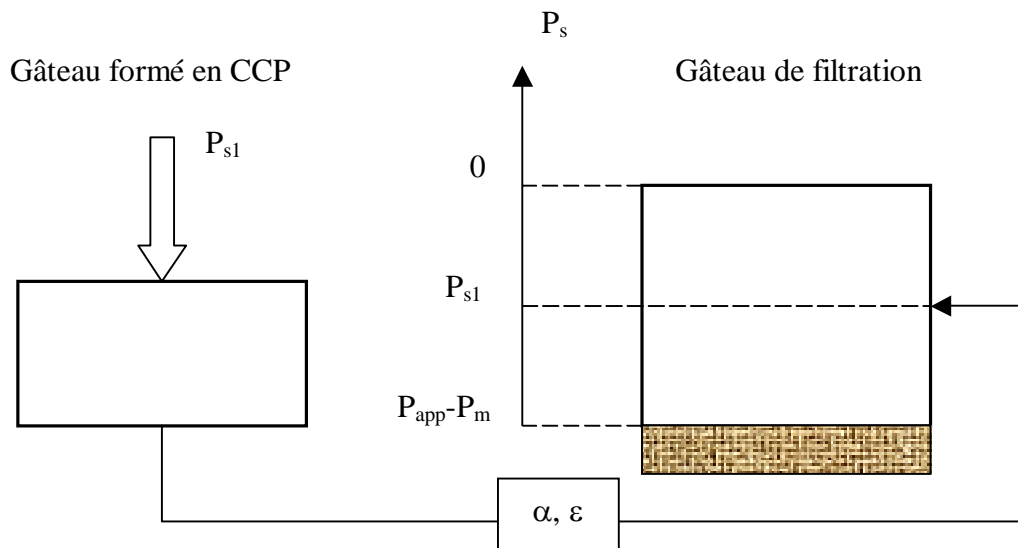


Fig. II.20. Correspondance des résultats de CCP avec un gâteau de filtration.

Sous ces hypothèses, il est possible de relier la résistance spécifique locale et la porosité locale d'un gâteau de filtration à la pression solide locale par des lois empiriques généralement exprimées en termes de lois puissance.

Tiller (1953) propose l'équation (II.33). Mais cette équation suggère que la résistance spécifique tend vers zéro lorsque la pression solide tend vers zéro, ce qui est contraire aux observations expérimentales.

Tiller (1955) propose alors une modification des équations constitutives et suggère que les gâteaux sont incompressibles en dessous d'une certaine pression P_i :

$$\alpha_z = a'' P_s^{n'} \text{ pour } P_s > P_i \quad (\text{II.36})$$

$$\alpha_z = b'' P_i^{n'} \text{ pour } P_s < P_i \quad (\text{II.37})$$

$$1 - \varepsilon = a'' P_s^\beta \text{ pour } P_s > P_i \quad (\text{II.38})$$

$$1 - \varepsilon = b'' P_i^\beta \text{ pour } P_s < P_i \quad (\text{II.39})$$

Tiller et Leu (1983b) montrent en étudiant la compressibilité de gâteaux de latex (très compressibles) que les équations (II.36) à (II.39) ne sont valables que pour des valeurs de $(n + \beta)$ inférieures à 0,7.

Wakeman (1981) montre expérimentalement que, dans le domaine des faibles pressions, un gâteau ne peut pas être considéré comme incompressible car les variations internes y sont très prononcées. Il conclut que les équations (II.36) à (II.39) ne sont pas valables.

Tiller et Leu (1980) proposent enfin :

$$\alpha_z = \alpha_0 (1 + P_s/P_a)^n \quad (\text{II.40})$$

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon^0) (1 + P_s/P_a)^\beta \quad (\text{II.41})$$

où P_a est une constante et α_0 et ε^0 sont les valeurs de la résistance spécifique et de la porosité à pression solide nulle. Les équations (II.40) et (II.41) sont alors définies sur tout le domaine de pression et sont adoptées par la plupart des auteurs.

En utilisant l'équation (II.28) définissant la résistance spécifique moyenne et en exprimant la porosité moyenne du gâteau (ε^*) par :

$$\varepsilon^* = \frac{1}{L} \int_0^L \varepsilon dz = 1 - \frac{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_s}{\alpha_z}}{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_s}{\alpha_z (1 - \varepsilon)}} \quad (\text{II.42})$$

avec L la hauteur du gâteau, on obtient les valeurs moyennes de la résistance spécifique et de la porosité en fonction des paramètres obtenus en CCP :

$$\langle \alpha \rangle = \alpha_0 \frac{(1 - n)(\Delta P_g/P_a)}{(1 + \Delta P_g/P_a)^{1-n} - 1} \quad n \neq 1 \quad (\text{II.43})$$

$$\langle \alpha \rangle = \alpha_0 \frac{\Delta P_g/P_a}{\ln(1 + \Delta P_g/P_a)} \quad n = 1 \quad (\text{II.44})$$

$$(1 - \varepsilon^*) = (1 - \varepsilon^o) \frac{1 - n - \beta}{1 - n} \frac{(1 + \Delta P_g / P_a)^{1-n} - 1}{(1 + \Delta P_g / P_a)^{1-n-\beta} - 1} \quad n \neq 1 \quad (\text{II.45})$$

$$(1 - \varepsilon^*) = (1 - \varepsilon^o) \frac{\beta \ln(1 + \Delta P_g / P_a)}{1 - (1 + \Delta P_g / P_a)^{-\beta}} \quad n = 1 \quad (\text{II.46})$$

En utilisant la relation (II.40), Tiller et Horng (1983) donnent une classification des gâteaux compressibles en fonction du paramètre n (Tableau II.2).

Valeurs du coefficient n	Caractéristiques des gâteaux
0,2	Faiblement compressible
0,6	Modérément compressible
1	Très compressible
> 1,5	Extrêmement compressible

Tableau II.2. Compressibilité des gâteaux (Tiller et Horng, 1983).

Remarquons ici qu’il n’y a aucune relation entre n’ défini à l’équation (II.32) et le coefficient de compressibilité n utilisé pour cette classification.

La volonté d’utiliser la CCP comme outil de simulation explique les modifications successives des lois phénoménologiques. Cependant, les résultats obtenus avec ce dispositif doivent être considérés avec précaution.

D’autre part, même si Willis *et al.* (1974) ont confirmé la validité de l’hypothèse H1, leurs expériences furent réalisées avec des suspensions diluées, excluant ainsi toute dépendance de la résistance spécifique moyenne d’un gâteau de filtration avec la concentration de la suspension, pourtant évoquée par Rushton *et al.* (1980). De plus, aucune étude à notre connaissance, ne présente de résultats décrivant l’effet de la température sur la résistance spécifique. Towhata *et al.* (1993) montrent expérimentalement (sur des gâteaux de kaolinite consolidés) une augmentation de la perméabilité (pour la même porosité) avec la température. Cette augmentation est essentiellement liée à la diminution de la viscosité de l’eau qui a pour conséquence de diminuer la résistance hydraulique à l’écoulement du gâteau. Delage *et al.* (2000), quant à eux, ont étudié expérimentalement la dilatation thermique de l’argile de Boom. Leurs essais consistaient à consolider de façon isotrope les échantillons et à effectuer un chauffage jusqu’à 100 °C. Leurs résultats montrent une diminution de la porosité des échantillons avec la température. La température est donc susceptible de modifier les propriétés intrinsèques d’un gâteau de filtration comme sa résistance spécifique définie par l’équation (II.25).

La méthodologie de la CCP impose la définition d'un état d'équilibre statique d'un gâteau soumis à une charge. Lu *et al.* (1970) et Wakeman (1981) étudient la réduction de porosité d'un gâteau soumis à une charge constante et mettent en doute l'établissement d'un état d'équilibre pour la porosité et la résistance spécifique, même après une longue période.

Tiller *et al.* (1972) et Tiller et Leu (1972) montrent que les résultats obtenus en CCP sont affectés par les effets de parois et sont largement dépendants du rapport hauteur de gâteau sur le diamètre de la cellule. La concordance des résultats obtenus en CCP et ceux donnés par une opération de filtration (Grace, 1953) est certainement due à la somme de ces effets.

Rushton et Wakeman (1978) déterminent les résistances spécifiques moyennes d'un grand nombre de gâteaux par CCP et par une opération de filtration et obtiennent des différences importantes entre les deux méthodes.

Enfin, les lois constitutives (eq. (II.40) et (II.41)) ne sont valables que pour des matériaux très compressibles. Pour des matériaux extrêmement compressibles, tels que les boues de station d'épuration, les paramètres n et β sont fortement dépendants de la pression (Tiller et Yeh, 1987).

Nous citons ici plusieurs raisons (effets de parois, évolution des caractéristiques du gâteau avec le temps, inaptitude de la CCP à retranscrire les effets de la concentration et de la température des suspensions) pour lesquelles l'utilisation d'une cellule de compression - perméabilité en tant qu'outil de simulation d'une opération de filtration est sujette à caution. Néanmoins, même si les porosités et résistances spécifiques moyennes ne peuvent être prédites par ce dispositif, il s'avère utile pour la classification du comportement de différents types de matériaux soumis à une contrainte.

II.3.3.3. Interface gâteau / media : couche dense

Dans le cas d'un gâteau très compressible, une fine couche de particules, un talon, se forme à l'interface media filtrant / gâteau. Cette notion de couche dense a été introduite de façon intuitive par Tiller et Green (1973) qui proposent des profils théoriques de porosité et de pression liquide dans un gâteau de particules de Latex. En utilisant les équations (II .23) et (II.25) avec les hypothèses correspondantes, il vient :

$$\int_0^z dz = z = \frac{1}{\mu q_L \rho_s} \int_{P_s}^{\Delta P_g} \frac{dP_s}{\alpha_z (1 - \varepsilon)} \quad (\text{II.47})$$

Puis, en intégrant sur toute l'épaisseur du gâteau et en divisant l'équation (II.47) par l'épaisseur du gâteau, on obtient :

$$\frac{z}{L} = 1 - \frac{\int_0^{P_s} dP_s / \alpha_z (1 - \varepsilon)}{\int_0^{\Delta P_g} dP_s / \alpha_z (1 - \varepsilon)} \quad (\text{II.48})$$

Tiller et Green (1973) proposent cette équation qui fournit une relation entre la pression solide P_s et la variable $z/L(t)$ (position dans le gâteau ramenée à son épaisseur). Ils utilisent ensuite les équations (II.36) à (II.39) et en négligeant la résistance du média filtrant ($\Delta P_g = \Delta P$), ils analysent les profils de pression liquide et de porosité dans le gâteau. Ces profils montrent alors que 90 % de la perte de charge à travers le gâteau est localisée dans une fine couche proche du média filtrant où la porosité est très faible.

Pour illustrer leur analyse, nous proposons ici d'utiliser les équations constitutives (II.40) et (II.41) qui font autorité désormais. En utilisant les expressions de la porosité locale et de la résistance spécifique locale décrites par ces équations et en intégrant l'équation (II.48), il vient :

$$\frac{z}{L} = 1 - \frac{(1 + P_s/P_a)^{1-n-\beta} - 1}{(1 + \Delta P_g/P_a)^{1-n-\beta} - 1} \quad (\text{II.49})$$

soit :

$$P_s = P_a \left\{ \left[1 + \left(1 - \frac{z}{L} \right) \left[(1 + \Delta P_g/P_a)^{1-n-\beta} - 1 \right]^{\frac{1}{1-n-\beta}} - 1 \right] \right\} \quad (\text{II.50})$$

En utilisant alors les paramètres constitutifs mesurés en CCP (cf Tableau II.4), par Tiller *et al.* (2001) pour des gâteaux de Kaolin floculé, les profils de porosité et de pression liquide (cf Fig. II.21) illustrent le phénomène de talon.

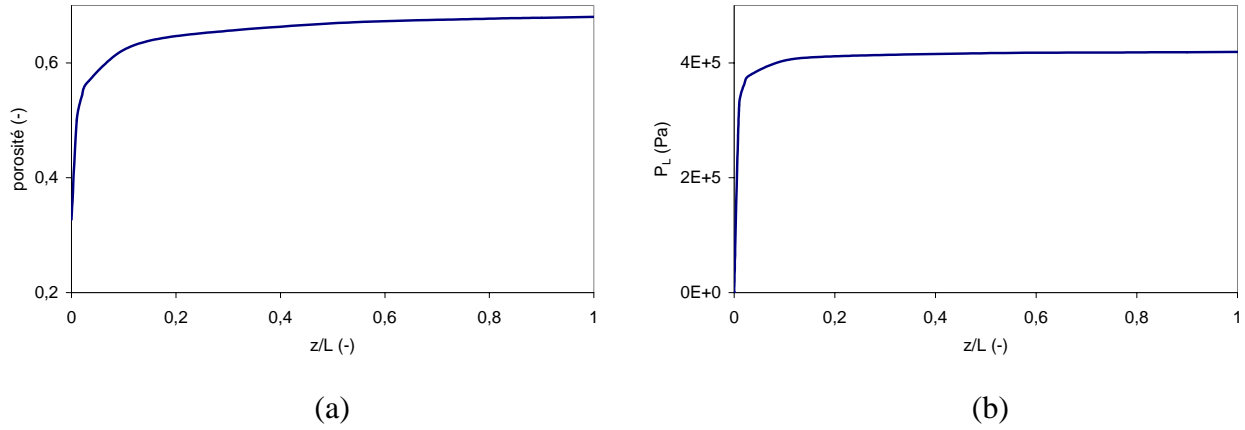


Fig. II.21. Profils de porosité (a) et de pression liquide (b) pour un gâteau de Kaolin flocculé d'après Tiller et al. 2001.

Paramètres	Kaolin flocculé
n (-)	1,9
β (-)	0,4
ε ^o (-)	0,966
Pa (Pa)	3100
ΔP (Pa)	4,19.10 ⁵

Tableau II.3. Paramètres utilisés pour les profils proposés à la figure II.21 d'après Tiller et al. 2001.

Comme le montre la figure II.21, pour des matériaux très compressibles, les plus grandes variations de pression liquide et de porosité apparaissent au voisinage du media filtrant. Cette couche dense est à l'origine du comportement singulier de ce type de matériau en filtration. En effet, dans ce cas, une augmentation de la pression de fonctionnement ne modifie ni la vitesse de filtration ni la porosité moyenne du gâteau. Lorsque n est supérieur à 1, l'équation (II.46) peut s'écrire :

$$(1 - \varepsilon^*) = (1 - \varepsilon^o) \left(\frac{n + \beta - 1}{n - 1} \right) \frac{1 - 1 / (1 + \Delta P_g / P_a)^{n-1}}{1 - 1 / (1 + \Delta P_g / P_a)^{n+\beta-1}} \quad (\text{II.51})$$

et quand ΔP_g tend vers l'infini, la porosité moyenne atteint alors une valeur limite :

$$\varepsilon^*_{\max} = \varepsilon^o \frac{(n + \beta - 1)}{(n - 1)} \quad (\text{II.52})$$

La confirmation expérimentale de l'existence d'une telle couche dense a été établie par Yim (1984) grâce à des mesures de profils de porosité au cours de la phase de filtration pour des boues de station d'épuration.

Ce talon extrêmement dense affecte énormément les cinétiques de déshydratation et serait à l'origine des faibles siccités obtenues pour des matériaux très compressibles comme les

résidus provenant du traitement de l'eau (n= 1,25, Kwon, 1995), les boues activées (n = 1,40, Kwon, 1995) ou les matériaux biologiques (n = 1,83, La Heij, 1994).

Comme pour le problème de colmatage, une aide thermique au niveau du media filtrant avec propagation du flux de chaleur dans cette partie peu perméable du gâteau pourrait améliorer de façon significative les cinétiques de filtration grâce à une réduction de la viscosité du liquide dans cette région.

II.4. Modèles avancés de la filtration sur gâteau

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de faire une étude détaillée des différents modèles du procédé de filtration sur gâteau rencontrés dans la littérature (un lecteur désireux de plus d'informations sur les différentes approches trouvera une analyse complète dans les travaux par exemple de Lee et Wang (2000) (en n'omettant pas les remarques pertinentes de Tien (2001)) et de Tien (2002).

Néanmoins, nous proposons ici une méthode systématique pour obtenir l'équation différentielle décrivant le phénomène ainsi qu'une discussion sur les conditions à la limite à l'interface mobile suspension / gâteau rencontrées dans divers travaux.

Pour les matériaux très compressibles, les modèles présentés plus haut ne permettent plus de décrire l'écoulement dans le gâteau. Un certain nombre d'auteurs se sont attachés à développer des modèles incluant les aspects suivants :

- ✓ dépendance de la porosité locale avec les variables d'espace et temporelle (et les variations de débit spécifique liquide qui en découlent) (Tiller et Huang, 1961, Tiller *et al.*, 1999),
- ✓ prise en compte de la vitesse du solide (Shirato *et al.*, 1969, Tiller et Yeh, 1987, Willis et Tosun, 1980, Stamatakis et Tien, 1991).

L'analyse débute par la combinaison des équations de continuité et des bilans de quantité de mouvement pour les conditions décrites au début de ce chapitre. Soit, dans le cas unidirectionnel (avec les notations décrites à la figure II.22), les équations de continuité sont :

$$\frac{\partial \varepsilon(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial q_L(z, t)}{\partial z} \quad (\text{II.53})$$

$$-\frac{\partial \varepsilon(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial q_S(z, t)}{\partial z} \quad (\text{II.54})$$

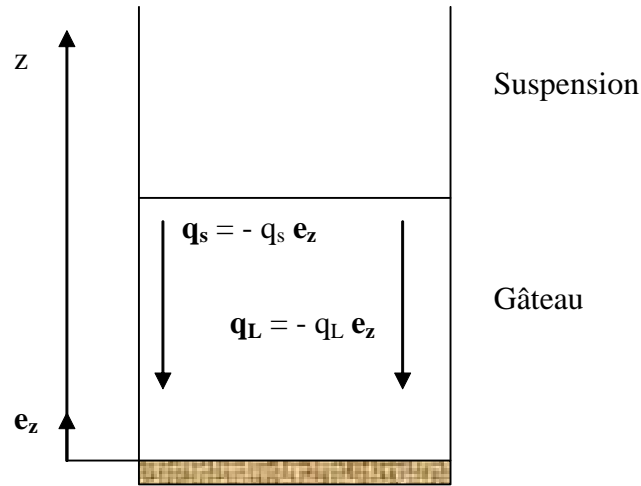


Fig. II.22. Définition des variables dans le gâteau

Il vient alors :

$$q_L(z, t) + q_S(z, t) = \text{cste} = q_{Lm}(t) \quad (\text{II.55})$$

La conservation de la quantité de mouvement sur la phase liquide conduit à l'équation de Darcy-Shirato :

$$q_L(z, t) - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} q_S(z, t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P_L}{\partial z} \quad (\text{II.56})$$

Cette équation fut d'abord introduite de façon intuitive par Shirato *et al.* (1969). Willis et Tosun (1980), en utilisant la technique de prise de moyenne volumique locale appliquée aux milieux poreux (en Annexe E sont présentées les techniques de base de la méthode de prise de moyenne volumique locale), montrent que cette équation peut être obtenue rigoureusement de manière théorique.

Le bilan de forces sur le solide est certainement le point le plus critique de la théorie désormais appelée : « modèle de Tiller-Shirato ». La plupart des auteurs utilisent l'approche décrite au chapitre II.3.1 avec l'équation :

$$dP_S + dP_L = 0 \quad (\text{II.57})$$

Ainsi, en combinant les équations (II.53), (II.55), (II.56) et (II.57) on obtient l'équation intégral-différentielle non linéaire où la porosité n'est supposée dépendre que de P_S (à l'instant t) :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 - \varepsilon) \frac{k}{\mu} \frac{\partial P_S}{\partial z} \right] + q_{Lm} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \quad (\text{II.58})$$

La littérature (Tiller et Shirato, 1964, Shirato *et al.*, 1969) fournit des expressions analytiques de la résistance spécifique moyenne prenant en compte les phénomènes internes au gâteau décrits plus haut. Elles sont rassemblées dans le tableau II.4.

RUTH	RUTH - TILLER	TILLER - SHIRATO
$q_L = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P_L}{\partial z} = q_{Lm}(t)$	$q_L = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P_L}{\partial z} = q_L(z, t)$	$q_L(z, t) - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} q_s(z, t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P_L}{\partial z}$
$k^{-1} = \rho_s(1 - \varepsilon)\alpha_z$		$d\omega_A = \rho_s(1 - \varepsilon)dz$
$q_{Lm}(t) = \frac{1}{\mu\alpha_z} \frac{\partial P_L}{\partial \omega_A}$	$q_L(z, t) = \frac{1}{\mu\alpha_z} \frac{\partial P_L}{\partial \omega_A}$	$q_L(z, t) - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} q_s(z, t) = \frac{1}{\mu\alpha_z} \frac{\partial P_L}{\partial \omega_A}$
Intégration sur toute la masse du gâteau à chaque instant		
$\mu q_{Lm} \omega_{AT} = \int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_S}{\alpha_z}$	$\mu q_{Lm} \omega_{AT} = \frac{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_S}{\alpha_z}}{\int_0^1 \left(\frac{q_L}{q_{Lm}} \right) d\left(\frac{\omega_A}{\omega_{AT}} \right)}$	$\mu q_{Lm} \omega_{AT} = \frac{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_S}{\alpha_z}}{\int_0^1 \left(\frac{q_L}{q_{Lm}} - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{q_s}{q_{Lm}} \right) d\left(\frac{\omega_A}{\omega_{AT}} \right)}$
Définition générale de la résistance spécifique moyenne		
$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{\mu q_{Lm} \omega_{AT}} \Delta P_g$		
$\langle \alpha \rangle = \frac{\Delta P_g}{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_S}{\alpha_z}}$	$\langle \alpha \rangle = J_1 \frac{\Delta P_g}{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_S}{\alpha_z}}$ avec $J_1 = \int_0^1 \left(\frac{q_L}{q_{Lm}} \right) d\left(\frac{\omega_A}{\omega_{AT}} \right)$	$\langle \alpha \rangle = J_1 \frac{\Delta P_g}{\int_0^{\Delta P_g} \frac{dP_S}{\alpha_z}}$ avec $J_1 = \int_0^1 \left(\frac{q_L}{q_{Lm}} - \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{q_s}{q_{Lm}} \right) d\left(\frac{\omega_A}{\omega_{AT}} \right)$

Tableau II.4. Expressions de la résistance spécifique moyenne en fonction des phénomènes considérés (inspiré du tableau proposé par Tosun *et al.*, 1993).

Dans ce tableau, l'analyse débute avec la loi de Darcy exprimée de façon différente suivant les phénomènes pris en compte. La première équation suppose que le débit superficiel du liquide est constant sur toute la hauteur du gâteau, la seconde rend compte des variations du débit liquide et la dernière introduit le débit superficiel des particules solides (q_s). les

facteurs J_1 et J_2 intervenant dans les dernières équations sont des facteurs correctifs inférieurs à 1 et qui dépendent de la concentration de la suspension. Ils peuvent être réinjectés dans l'équation (II.30) afin d'obtenir des modèles plus complets. Ils sont généralement négligés pour des suspensions diluées.

Tosun et Willis (1983) réfutent l'équation (II.57) en affirmant que cette équation n'est valable que si la porosité est égale à 1. En effet, en effectuant un bilan de forces sur la phase solide, ils obtiennent :

$$dP_S + \varepsilon dP_L = 0 \quad (\text{II.59})$$

Cependant, leur approche est différente. En effectuant une prise de moyenne volumique sur le bilan de quantité de mouvement de la phase liquide, on obtient une expression de la force totale exercée par le fluide sur le liquide (avec les hypothèses décrites plus haut) :

$$\nabla \varepsilon \langle P_L \rangle^L = -\mathbf{F} \quad (\text{II.60})$$

où $\langle P_L \rangle^L$ est la moyenne intrinsèque de phase de la pression liquide mesurable par un manomètre (cf. Annexe E) et \mathbf{F} la force totale exercée par le fluide sur le solide par unité de volume. Cette force s'écrit :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{V} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \cdot \mathbf{\Pi}_L dA = \frac{1}{V} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \cdot (\boldsymbol{\tau}_L + p_L \mathbf{I}) dA \quad (\text{II.61})$$

avec V le volume associé à la prise de moyenne, A_{LS} la surface de l'interface liquide solide contenu dans le VER, \mathbf{n}_{LS} la normale sortante, $\mathbf{\Pi}_L$ le tenseur totale des contraintes, \mathbf{I} le tenseur identité et $\boldsymbol{\tau}_L$ le tenseur des contraintes visqueuses (connu pour un fluide Newtonien). En négligeant la déviation spatiale relative à la pression liquide, Willis et Tosun (1980) transforment l'équation (II.61) en :

$$-\varepsilon \nabla \langle P_L \rangle^L = \frac{1}{V} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \cdot \boldsymbol{\tau}_L dA = \mathbf{F}_d \quad (\text{II.62})$$

\mathbf{F}_d est ici le frottement visqueux (traînée) par unité de volume. La suite de leur raisonnement consiste à émettre l'hypothèse de l'existence d'un potentiel scalaire $\langle \sigma_S \rangle^S$ pour lequel :

$$\mathbf{F}_d = \nabla \langle \sigma_S \rangle^S \quad (\text{II.63})$$

Il vient alors :

$$-\varepsilon \nabla \langle P_L \rangle^L = \nabla \langle \sigma_s \rangle^S \quad (\text{II.64})$$

C'est avec cette équation (eq.18 dans Willis et Tosun (1980)) qu'ils concluent que l'équation (II.57) n'est pas valable. Or le potentiel scalaire $\langle \sigma_s \rangle^S$ n'est pas la pression solide telle qu'elle est définie par l'équation (II.22). Il semble que les désaccords entre les deux approches soient liés à un problème de définition de la pression solide. La cohérence entre les deux approches reste encore à approfondir (Tien, 2002). Néanmoins, en effectuant un bilan de forces classique sur la phase solide avec le processus de prise de moyenne volumique locale, la somme des bilans sur les deux phases conduit à :

$$\nabla \langle P_L \rangle^L + \nabla \cdot \langle \tau_s \rangle = 0 \quad (\text{II.65})$$

L'intégration de l'équation (II.65) entre un point du gâteau à la côte z et la surface du gâteau donne suivant l'axe z :

$$\langle \tau_s \rangle_{zz} = P_{\text{app}} - \langle P_L \rangle^L \quad (\text{II.66})$$

Ainsi, la contrainte sur les particules solides en un point du gâteau est égal à la différence de pression liquide entre la surface du gâteau et ce point. Si la composante suivant z du tenseur des contraintes visqueuses $\langle \tau_s \rangle$ correspond à la pression solide, alors les deux approches concordent.

Une formulation complète du problème requiert l'écriture d'une condition à la limite sur l'interface mobile suspension / gâteau pour obtenir l'épaisseur du gâteau au cours du temps et permettre de distinguer le « domaine suspension » du « domaine gâteau ». Wakeman (1978) effectue un bilan de masse sur le liquide à cette interface. Son approche cependant n'est valable que si la porosité moyenne du gâteau est égale à la porosité de la surface du gâteau, ce qui ne peut être vrai que pour des gâteaux incompressibles :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon^o}{1 - \varepsilon_o} \frac{\mu}{k} \frac{d\varepsilon}{dP_L} \frac{dL}{dt} \quad \text{en } z = L(t) \quad (\text{II.67})$$

avec ε_o la porosité de la suspension (uniforme) et ε^o la porosité du gâteau en $z = L(t)$ (constante au cours du temps).

Tosun (1986) intègre l'équation (II.58) entre 0 (surface du media) et L (surface du gâteau) pour obtenir la condition à la limite. Dans ses transformations, il impose (ce qui n'est pas indiqué dans la publication) que la porosité moyenne du gâteau est constante au cours du temps :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{1 - \varepsilon^*}{1 - \varepsilon^0} \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^0}{1 - \varepsilon_0} \frac{\mu}{k} \frac{d\varepsilon}{dP_L} \frac{dL}{dt} \quad \text{en } z = L(t) \quad (\text{II.68})$$

Sorensen *et al.* (1996) effectuent un bilan de masse sur la phase fluide en coordonnées Lagrangiennes. Ce bilan s'écrit en coordonnées spatiales :

$$\frac{d}{dt} \left[\int_0^L (1 - \varepsilon) dz \right] = \frac{(1 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon^0)}{\varepsilon_0 - \varepsilon^0} \left\{ \varepsilon \left(\frac{q_L}{\varepsilon} - \frac{q_s}{1 - \varepsilon} \right) \right\} \Big|_{z=L} \quad (\text{II.69})$$

Ce bilan semble erroné car le flux de liquide à l'interface suspension / gâteau est sous-estimé. En effet, dans cette équation, la fraction de liquide initialement contenue dans la suspension et ensuite présente dans le gâteau n'est pas prise en compte.

Stamatakis et Tien (1991) effectuent un bilan de masse sur le liquide et le solide à l'interface pour obtenir une relation entre les vitesses liquide et solide dans la suspension et dans le gâteau :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{q_{s0} - q_{si}}{\varepsilon_0 - \varepsilon^0} = \frac{q_{li} - q_{l0}}{\varepsilon_0 - \varepsilon^0} \quad (\text{II.70})$$

où q_{l0} et q_{s0} sont les débits spécifiques du liquide et du solide à l'interface suspension / gâteau côté suspension et q_{li} et q_{si} côté gâteau (cf. Fig. II.23).

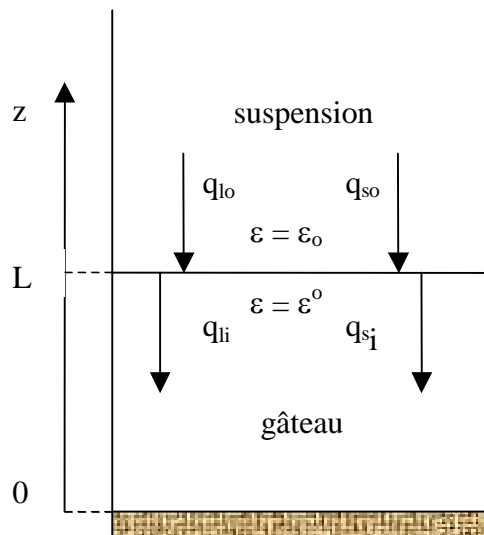


Fig. II.23. Condition à la limite sur l'interface mobile suspension / gâteau.

Cette dernière formulation de la condition à la limite a été validée par Tosun *et al.* (1995). La formulation est complète si on utilise les équations constitutives (eq. (II.40) et (II.41)) réduisant ainsi le nombre de variables indépendantes à 1.

Le point commun entre ces différentes approches, malgré leur caractère avancé, est qu'aucune ne prend en compte les interactions entre particules ; elles ne sont donc valables que pour des suspensions non colloïdales. Bowen et Jenner (1995) et Bowen *et al.* (1996) montrent que les interactions de double couche sont des facteurs influençant énormément la filtration. Cependant, la micromécanique qui y est appliquée n'est pas valable pour de faibles valeurs de potentiel Zeta ni pour des porosités importantes. Koenders et Wakeman (1996, 1997a, 1997b) ont développé une approche permettant d'analyser les données d'essais de filtration en prenant en compte les propriétés fondamentales des suspensions à traiter. Cette approche consiste en deux étapes. D'abord le dépôt initial des particules sur le media filtrant est analysé en prenant en compte les fluctuations de la vitesse des particules solides proches du media. Ensuite, la structuration du gâteau de filtration est modélisée en prenant en compte les interactions entre particules. Cette approche montre que le débit initial de filtrat est fonction du potentiel Zeta. La portée de ces travaux n'est pas encore assez conséquente pour tenter une extension aux problèmes de dimensionnement de filtres industriels.

Enfin, quelques auteurs (Lu et Hwang, 1993, Lu *et al.*, 1997a) tentent de décrire la formation d'un gâteau de filtration en utilisant un modèle incluant la dynamique des particules. Dans cette modélisation, les trajectoires des particules contenues dans une suspension sont déterminées par la deuxième loi de Newton. Un bilan de forces inclut les forces de gravité, d'inertie et de traînée. Afin de déterminer la stabilité statique des particules, Lu et Hwang (1995) définissent un paramètre appelé angle critique de friction. Théoriquement, le procédé de séparation peut être entièrement décrit si toutes les interactions entre les particules sont correctement mises en forme. Cependant, un temps de calcul extrêmement long est à prévoir pour simuler la formation d'un gâteau de 10 000 particules (60 000 équations différentielles à résoudre simultanément, Lu *et al.*, 1997b).

II.5. Etape de consolidation

Dans cette étape de la déshydratation mécanique par filtration – compression, le liquide est expulsé du gâteau par réduction de volume. Si pendant la phase de filtration la vitesse du solide pouvait être négligée sous certaines conditions, cette hypothèse simplificatrice n'est plus valable pendant la phase de compression. En effet, le mouvement du liquide est cette fois exclusivement dû au déplacement du solide.

Shirato *et al.* (1974) ont adopté le modèle rhéologique de Terzaghi – Voigt (Fig. II.24) pour décrire l'étape de compression ou de consolidation. Ce modèle suggère que le procédé de compression est divisé en deux étapes :

- ✓ une compression primaire faisant intervenir la composante élastique du gâteau (module de Terzaghi),
- ✓ une compression secondaire qui rend compte du caractère viscoélastique du gâteau (module de Voigt).

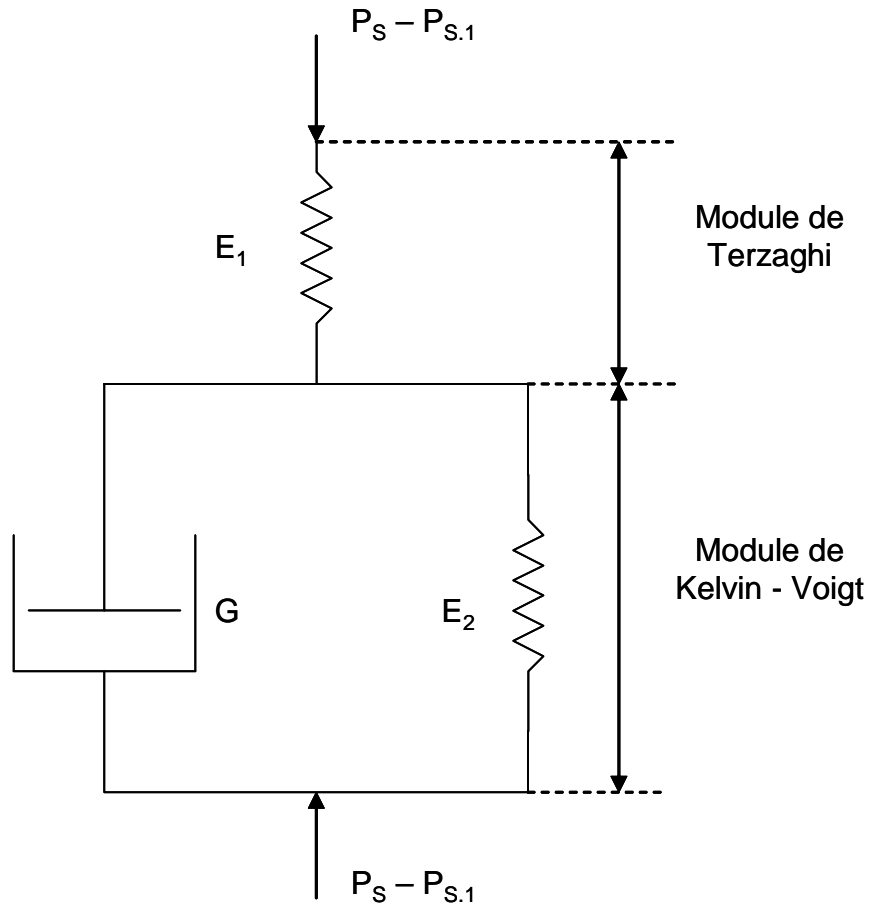


Fig. II.24. Modèle rhéologique de Terzaghi - Voigt .

Ce modèle est représentatif de la plupart des gâteaux rencontrés en séparation liquide – solide. L'équation de continuité en coordonnées matérielles s'écrit :

$$\frac{\partial e}{\partial t_c} = \frac{\partial u}{\partial \omega} \quad (\text{II.71})$$

avec e le taux de vide ($e = \varepsilon / (1-\varepsilon)$), t_c le temps de compression , ω le volume de solide par unité d'aire compris entre la surface du media filtrant et une position arbitraire dans le gâteau et u la vitesse relative du liquide définie par :

$$u = q_L - eq_s = -\frac{1}{\mu\rho_s\alpha} \frac{\partial P_s}{\partial \omega} \quad (\text{II.72})$$

Ici, les variations du taux de vide sont dues aux effets combinés des compressions primaire et secondaire, soit :

$$\frac{\partial e}{\partial t_c} = \left(\frac{\partial e}{\partial t_c} \right)_{t_1} + \left(\frac{\partial e}{\partial t_c} \right)_{t_2} \quad (\text{II.73})$$

Les termes $\left(\frac{\partial e}{\partial t_c} \right)_{t_1}$ et $\left(\frac{\partial e}{\partial t_c} \right)_{t_2}$ représentent les variations du taux de vide dues aux compressions primaire et secondaire respectivement. $\left(\frac{\partial e}{\partial t_c} \right)_{t_1}$ ne dépend que de P_s et peut donc s'écrire :

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t_c} \right)_{t_1} = \left(\frac{\partial e}{\partial P_s} \right)_{t_1} \left(\frac{\partial P_s}{\partial \omega} \right) = -a_{t_1} \left(\frac{\partial P_s}{\partial \omega} \right) \quad (\text{II.74})$$

En définissant a_{t_2} , le coefficient de compressibilité pour la compression secondaire, par :

$$a_{t_2} = - \left(\frac{\partial e}{\partial P_s} \right) = \frac{(1+e)}{E_2} \quad (\text{II.75})$$

et η par :

$$\eta = \frac{E_2}{G} \quad (\text{II.76})$$

la combinaison des équations (II.72), (II.73) et (II.74) donne, en supposant a_{t_1} , a_{t_2} et η constants pendant l'étape de compression, l'équation du modèle rhéologique de Terzaghi – Voigt combiné :

$$\frac{\partial P_s}{\partial t_c} + \beta \eta \frac{\partial}{\partial t_c} \int_0^{t_c} (P_s - P_{s,1}) \exp\{-\eta(t_c - \tau)\} d\tau = C_e \frac{\partial^2 P_s}{\partial \omega^2} \quad (\text{II.77})$$

avec $\beta = a_{t_2} / a_{t_1}$.

C_e , le coefficient de compression modifié supposé constant, est défini par :

$$C_e = \frac{1}{\mu \rho_s \langle \alpha \rangle a_{t_1}} \quad (\text{II.78})$$

Le terme $P_{s,1}$ dans l'équation (II.77) représente le profil de pression solide initial du gâteau.

La résolution ce problème nécessite une définition des conditions initiales et aux limites :

$$P_s = P_{s,1} \quad \text{à } t_c = 0 \quad (\text{II.79})$$

$$P_s = P_{app} \quad \text{à } \omega = 0 \quad (\text{II.80})$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial \omega} = 0 \quad \text{à } \omega = \omega_0 \quad (\text{II.81})$$

La distribution de pression hydraulique dans un gâteau compressible peut être assimilée à un profil sinusoïdal (Okamura et Shirato, 1955). Ainsi, le profil initial de pression solide dans un gâteau compressible est donné par :

$$P_{s,1} = P_{app} \left\{ 1 - \sin\left(\frac{\pi \omega}{2 \omega_0}\right) \right\} \quad (\text{II.82})$$

Résoudre l'équation (II.77) pour les conditions définies par les équations (II.79), (II.80), (II.81) et (II.82) avec l'hypothèse que la vitesse de la compression secondaire est largement inférieure à celle de la compression primaire ($\eta \ll C_e (\pi/2\omega_0)^2$, Shirato *et al.*, 1986) conduit à la définition du taux moyen de consolidation U_c :

$$U_c = \frac{L_o - L}{L_o - L_\infty} = (1 - B) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\pi^2 C_e}{4 \omega_0^2} t_c\right) \right\} + B \{1 - \exp(-\eta t_c)\} \quad (\text{II.83})$$

où L_o est la hauteur initiale du gâteau en phase de compression et L_∞ sa hauteur en fin de compression. B est un paramètre empirique défini par :

$$B = \frac{a_{t_2}}{a_{t_1} + a_{t_2}} = \frac{E_1}{E_2} \quad (\text{II.84})$$

et représente la fraction de liquide expulsé pendant la compression secondaire.

La valeur de l'épaisseur initiale en phase de compression (L_o) peut être déterminée à partir de la méthode graphique proposée par Shirato *et al.* (1970) qui consiste à tracer l'évolution de $dL^{1/2}/dt$ en fonction du temps. Cette courbe présente un point d'inflexion à l'instant initial de l'étape de compression (un exemple est donné en figure II.25).

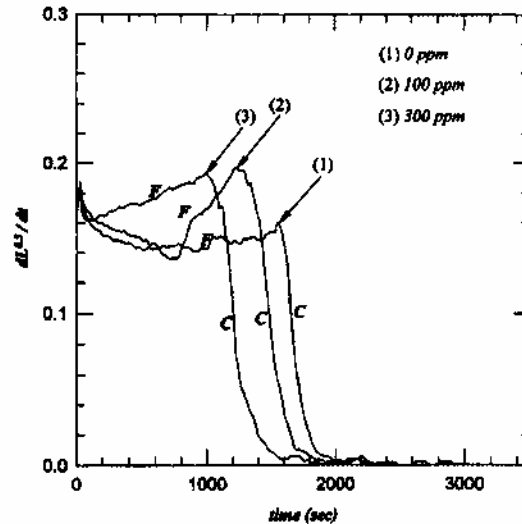


Fig. II.25. Détermination de l'instant initial de l'étape de compression pour des boues biologiques (d'après Chu et Lee, 1999)

La plupart des cellules de filtration compression étant opaques, l'épaisseur du gâteau ne peut être déterminée qu'à partir de modèles analytiques. En effet, en supposant constants ω_c et la porosité moyenne du gâteau, l'épaisseur du gâteau est donnée par :

$$L(t) = \frac{\omega_c V}{\rho_s A (1 - \varepsilon^*)} \quad (\text{II.85})$$

Cependant, pour les cellules dont la position du piston (h) est enregistrée en continue, l'analyse reste la même en représentant $-dh^{1/2}/dt$ en fonction du temps.

Aux temps longs, l'équation (II.83) se réduit à :

$$U_c = 1 - B \exp(-\eta t_c) \quad (\text{II.86})$$

Plusieurs études ont montré que l'équation (II.86) pouvait décrire le comportement en compression à pression constante d'un grand nombre de matériaux. Cependant, Kawasaki *et al.* (1994) ont étudié la compression de plusieurs échantillons de boues biologiques et ont montré qu'à partir de valeurs de U_c supérieures à 0,8, le modèle de Terzaghi - Voigt n'était plus représentatif de leurs échantillons. Chang et Lee (1998) ont analysé les écarts entre le modèle décrit par l'équation (II.86) et leurs résultats expérimentaux. Ils proposent alors un modèle rhéologique à trois modules (Fig. II.26) pour prendre en compte l'expulsion de l'eau liée abondante dans ce type de matériau (Vaxelaire, 2001). Il s'agit ici de l'intégration d'une dernière composante : la compression tertiaire.

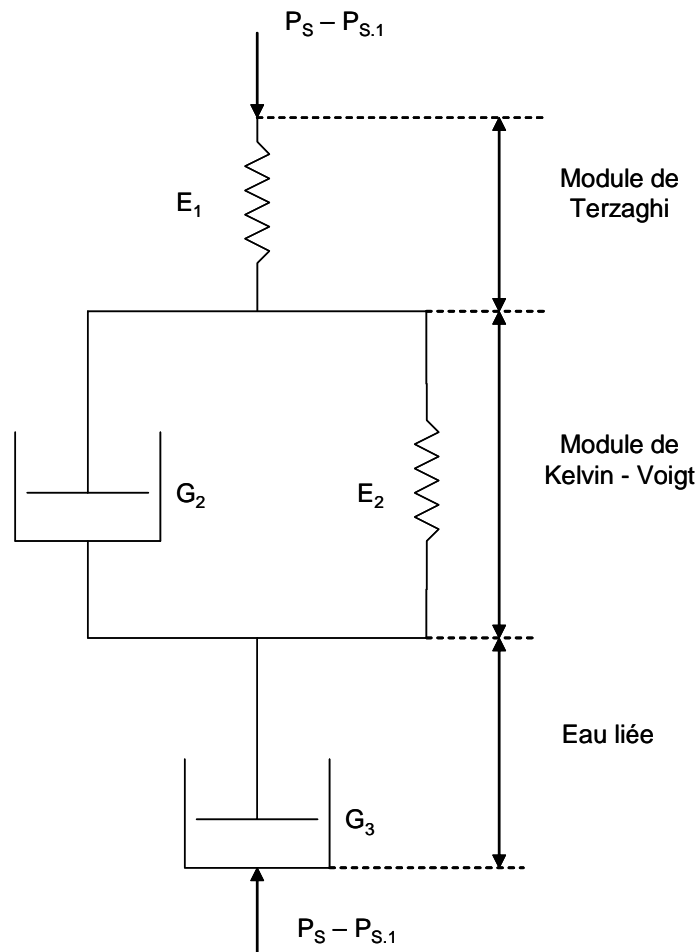


Fig. II.26. Modèle rhéologique prenant en compte de les effets de l'eau liée (Chang et Lee, 1998).

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'approche classique de filtration sur gâteau à pression constante et de manière succincte les modèles avancés. Le dimensionnement des filtres industriels est basé sur un couplage des essais en CCP et des essais de filtration – compression dans des cellules normalisées en utilisant l'équation (II.31). Nous avons mis l'accent sur les limites de validité de cette approche. Cependant, il apparaît que quel que soit le matériau à traiter, les modèles existants permettent de dimensionner de façon acceptable des filtres industriels. Nous avons également comparé deux approches (modèle de Tiller-Shirato et approche de Willis et Tosun) basées l'une sur une approche phénoménologique, l'autre sur des fondements théoriques plus rigoureux. Les modèles obtenus dans les deux cas sont très similaires mais des divergences apparaissent liées notamment à l'interprétation du termes de pression solide.

Pour le projet d'étude en tant que tel, nous pouvons dégager de ce chapitre les conclusions suivantes :

- ✓ La **résistance spécifique** d'un gâteau est susceptible d'être sensible à la **température**.
- ✓ Le **facteur limitant** d'une déshydratation mécanique par filtration d'un matériau très compressible est **l'interface gâteau / media filtrant** qui peut être très dense, très résistive et très peu perméable. Dans certains cas, une augmentation de la pression de filtration ne se traduit pas par une augmentation du débit de filtrat (au-delà d'une certaine pression critique).
- ✓ L'évolution de la résistance hydraulique du media filtrant par **colmatage** peut atteindre jusqu'à 30% de la résistance totale du système (gâteau + media filtrant) ce qui réduit sensiblement les débits de filtrat.

Ces remarques ont orienté le projet expérimental que nous avons mis en place. Les essais de filtration – compression assistée thermiquement s'effectueront sur des suspensions formant des gâteaux de **compressibilité différentes** (Talc et Kaolin). L'impact de la température sur la résistance spécifique sera étudié. **L'aide thermique** sera utilisée pour améliorer les cinétiques de déshydratation mécanique et s'effectuera donc au **niveau du media filtrant**, endroit sensible de la séparation. Néanmoins, nous nous laissons l'opportunité d'effectuer une aide thermique à la **surface des gâteaux** pendant la phase de compression afin de créer un éventuel front de vaporisation qui pourrait expulser le liquide et augmenter ainsi les siccités des gâteaux. Chaque expérience sera interprétée en terme de production de filtrat, de vitesse de filtration, de profils de température et de teneur en eau finale.

II.7. Références bibliographiques

AFNOR, 1979, Essais des Boues – Détermination des Caractéristiques en Liaison avec l'Aptitude à la Concentration, T97.001.

Bowen, W.R., Jenner, F., 1995, Dynamic ultrafiltration model for charged colloidal dispersions : a Wiger-Seitz cell approach, *Chemical engineering science*, 50, 11, pp. 1707-1736.

Bowen, W.R., Mongruel, A., Williams, P.W., 1996, Predictions of the rate of crossflow membrane ultrafiltration : a colloidal interaction approach, *Chemical engineering science*, 51, 18, pp. 4321-4333.

Carman, P.C., 1938, Fundamental principles of industrial filtration, *Trans. IChemE.*, 16, pp. 168-188.

Chang, I.L., Lee, D.J., 1998, Ternary expression stage in biological sludge dewatering, *Water research*, 32, 3, pp. 905-914.

Chase, G.G., Arconti, J., Kanel, J., 1994, The effect of filter cakes on filter medium resistance, *Separation science and technology*, 29, 16, pp. 2179-2196.

Chu, C.P., Lee; D.J., 1999, Three stages consolidation dewatering of sludges, *Journal of environmental engineering*, 125, pp. 959-965.

Civan, F., 1998, Practical model for compressive cake filtration including fine particle invasion, *AIChE Journal*, 44, 11, pp. 2388-2398.

Corapcioglu, M.Y., Abboud, N.M., 1990, Cake filtration with particle penetration at the cake surface, *SPE Reservoir engineering*, August, pp. 317-326.

De Bruyn, D., Thimus, J.F., 1995, The influence of anisotropy on clay strength at high temperature, 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, pp. 37-42.

Delage, P., Sultan, N., Cui, Y.J., 2000, The thermal consolidation of a natural low porosity clay, *Canadian geotechnical journal*, 37, 3, pp. 607-620.

Grace, H.P., 1953, Resistance and compressibility of filter cakes, *Chemical engineering progress*, 49, pp. 303-318.

Granger, J., Dodd, J., Leclerc, D., 1985, Filtration of low concentration of latex particles on membrane filters, *Filtration and Separation*, 22, p. 58.

Hosten, C., San, O., 1999, Role of clogging phenomena in erroneous implications of conventional data analysis of constant pressure cake filtration, *Separation Science and Technology*, 34, pp. 1759-1772.

Hueckel, T., Baldi, G., 1990, Thermoplasticity of saturated clays : experimental constitutive study, *Journal of geotechnical Engineering*, 116, 12.

Karpukhin, V.A., 1972, Determination of the compressibility, Exponent in Lewis' equation for dewatering waste water precipitates *Khimisck, I Neftyanse Mashinostroemie*, 4, 17.

Kawasaki, K., Matsuda, A., Murase, T., 1994, The effects of a freezing and thawing process on the expression characteristics and final moisture content of excess activated sludge, *International chemical engineering*, 34, pp. 403-409.

Koenders, M.A., Wakeman, R.J., 1995, Radial flow dependence in filtration experiments, *Chemical engineering science*, 50, 23, pp. 3777-3782.

Koenders, M.A., Wakeman, R.J., 1996, The initial stages of compact formation from suspension by filtration, *Chemical engineering science*, 51, 16, 3897-3908.

Koenders, M.A., Wakeman, R.J., 1997a, Filter cake formation from structured suspensions, *Trans IchemE*, 75, pp. 309-320.

Koenders, M.A., Wakeman, R.J., 1997b, Initial deposition of interacting particles by filtration of dilute suspensions, *AIChE Journal*, 43, 4, pp. 946-958.

Kuntiwattanukul, P., Towhata, I., Ichiro, S., 1995, Temperature effects on undrained shear characteristics of clay, *Soils and foundations*, 35, 1, pp.

Kwon, J.H., 1995, Effects of compressibility and cake clogging on sludge dewatering characteristics, PhD. Thesis, Seoul National University, Korea.

La Heij, E.J., 1994, An analysis of sludge filtration and expression, PhD. Thesis, University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.

La Heij, E.J., Kerkhof, P.J.A.M, Herwijn, A.J.M, Coumans, W.J., 1996a, Fundamental aspects of sludge filtration and expression, *Water Res.*, Vol. 30, pp. 697-703.

La Heij, E.J., Kerkhof, P.J.A.M, Kopinga, K., Pel, L., 1996b, Determining porosity profiles during filtration and expression of sewage sludge by NMR imaging, *AIChE Journal*, Vol. 42, n° 4, pp. 953-959.

Lee, D.J., 1997, Filter media clogging during cake filtration, *AIChE journal*, 43, 1, pp. 273-276.

Lee, D.J., Wang, C.H., 2000, Review paper : Theories of cake filtration and consolidation and implication to sludge dewatering, *Water research*, 34, 1, pp. 1-20.

Lu, W.M., Tiller, F.M., Cheng, F., Chien, C., 1970, A new method to determine local porosity and filtration resistance of filter cakes, *Journal of Chinese Institute of Chemical engineers*, 1, pp. 45-53.

Lu, W.M., Hwang, K.J., 1993, Mechanism of cake formation in constant pressure filtrations, *Sep. Tech.*, Vol. 3, pp. 122-132.

Lu, W.M., Hwang, K.J., 1995, Cake formation in 2D cross-flow filtration, *AIChE, Journal*, Vol. 41, pp. 1443-1455.

Lu, W.M., Tung, K.L., Hwang, K.J., 1997a, Effect of woven structure on transient characteristics of cake filtration, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 11, pp. 1743, 1756.

Lu, W.M., Huang, Y.P., Kwang, K.J., 1997b, Methods to determine the relationship between cake properties and solid pressure, *Solid liquid separation and environmental protection technology*, National University of Singapore, Singapore.

Lu, W.M., Huang, Y.P., Hwang, K.J., 1998, Stress distribution in a confined wet cake in the compression-permeability cell and its application, *Powder Technology*, 97, pp. 16-25.

Meeten, G.H., 2000, Septum and filtration properties of rigid and deformable particle suspensions, *Chemical engineering science*, 55, pp. 1755-1767.

Notebaert, F.F., Wilms, D.A., Van Haute, A.A., 1975, A new deduction with a larger application of the specific resistance to filtration sludges, *Water research*, 9, pp. 667-673.

Okamura, S., Shirato, M., 1955, Liquid pressure distribution within cakes in the constant pressure filtration, *Kagaku Kogaku*, 19, pp. 8-14.

Rushton, A., Wakeman, R.J., 1978, Theory vs practice in vacuum, pressure and centrifugal filtration, *Journal of powder and bulk solids technology*, 1, pp. 58-65.

Rushton, A., Hosseini, M., Hassan, I., 1980, *Journal of separation process technology*, 1, 35.

Ruth, B.F., Montillon, G.H., Montonna, R.E., 1933, Studies in filtration : II. Fundamental axiom of constant pressure filtration, *Industrial and engineering chemistry*, 25, 2, pp. 153-161.

Ruth, B.F., 1935, Studies in Filtration : III. Derivation of general filtration equations, *Industrial and engineering chemistry*, 27, 6, pp. 708-723.

Ruth, B.F., 1946, Correlating filtration theory with industrial practice, *Industrial and engineering chemistry*, 38, pp. 564-571.

Shirato, M., Sambuichi, M., Kato, H., Aragaki, T., 1969, Internal flow mechanism in filter cakes, *AIChE Journal*, 15, 3, pp. 405-409.

Shirato, M., Murase, T., Kato, H., Fukaya, S., 1970, Fundamental analysis for expression under constant pressure, *Filtration and separation*, 7, pp; 277-282.

Shirato, M., Murase, T., Tokunaga, A., Yamada, O., 1974, Calculation of consolidation period in expression operations, *Journal of chemical engineering Japan*, 7, pp. 229-231.

Shirato, M., Murase, T., Iwata, M., Nakatsuka, S., 1986, The Terzaghi-Voigt combined model for constant-pressure consolidation of filter cakes and homogeneous semi-solid material, *Chemical engineering science*, 41, 12, pp. 3213-3218.

Shirato, M., Murase, T., Iritani, E. Tiller, F.M., Alciatore, A.F., 1987, Filtration in the chemical process industry, *Filtration : Principles and practices*, Dekker Ed., pp. 299-423.

Smith, E.G., 1951, Fabric Filter media, *Chemical Engineering Progress*, 47, pp. 545-549.

Sorensen, B.L., Sorensen, P.B., 1997, Structure compression in cake filtration, *Journal of environmental engineering*, n° 123 , pp. 345-353.

Sorensen, P.B., Hansen, J.A., 1993, Extreme solid compressibility in biological sludge dewatering, *Water Science and technology*, 28, 1, pp. 133-143.

Sorensen, P.B., Moldrup, P., Hansen, J.A., 1996, Filtration and expression of compressible cakes, *Chemical Engineering science*, 51, 6, pp. 967-979.

Sperry, D.R., 1916, The principles of filtration, *Met. Chem. Eng.*, 15, pp. 198-203.

Stamatakis, K., Tien, C., 1991, Cake formation and growth in cake filtration, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 46, pp. 1917-1933.

Teoh, S.K., Reginald, B.H., Tien, C., 2002, Correlation of C-P cell and filtration test data using a new test cell, *Separation and purification technology*, sous presse.

Terzaghi; K., 1936b, The shearing resistance of saturated soils, *Proceedings of the first Conference of Soil Mechanics*, Cambridge, 1, pp. 54-56.

Terzaghi; K., 1967, *Soil mechanics in engineering practice*, Wiley-Interscience Ed.

Tien, C., Bai, R., Ramarao, B.V., 1997, Analysis of cake growth in cake filtration : Effect of fine particle retention, *AIChE Journal*, 43, pp. 33

Tien, C., 2001, Comment on “theories of cake filtration and consolidation and implications to sludge dewatering”, *Water research*, 35, 5, pp. 1367-1368.

Tien, C., Teoh, S.K., Tan, R.B.H., 2001, Cake analysis – the effect of the relationship between the pore liquid pressure and the cake compressive stress, *Chemical engineering science*, 56, pp. 5361-5369.

Tien, C., 2002, Cake filtration research – a personal view, *Powder technology*, 127, 1, pp. 1-8.

Tiller, F.M., 1953, The role of porosity in filtration : I. Numerical methods for constant flow and constant pressure filtration based on Kozeny’s law, *Chemical Engineering Progress*, 49, 9, pp. 467-479.

Tiller, F.M., 1955, The role of porosity in filtration : II. Analytical equations for constant rate filtration, *Chemical Engineering Progress*, 51, 6, pp. 282-290.

Tiller, F.M., Cooper, H.R., 1960, The role of porosity in filtration : IV. Constant pressure filtration, *AIChE Journal*, Vol. 6, pp. 595-601.

Tiller, F.M., Huang, C.J., 1961, Theory, *Industrial and engineering chemistry*, 53, pp. 529-537.

Tiller, F.M., Cooper, H.R., 1962, The role of porosity in filtration : V. Porosity variation in filtration cake, *AIChE Journal*, Vol. 8, pp. 445-449.

Tiller, F.M., Shirato, M., 1964, The role of porosity in filtration : VI. New definition of filtration resistance, *AIChE Journal*, 10, 1, pp. 61-67.

Tiller, F.M., Haynes, S., Lu, W., 1972, The role of porosity in filtration : VII. Effect of side wall friction in compression-permeability cell, *AIChE Journal*, 18, 1, pp. 13-20.

Tiller, F.M., Lu, W., 1972, The role of porosity in filtration : VIII. Cake non-uniformity in compression-permeability cells, *AIChE Journal*, 18, 3, pp. 569-572.

Tiller, F.M., Green, T.C., 1973, The role of porosity in filtration : IX. Skin effect with highly compressible materials, *AIChE Journal*, Vol. 19, pp. 1266-1269.

Tiller, F.M., 1975, Compressible cake filtration, *The scientific basis of filtration*, Series E, 2, Noordhof.

Tiller, F.M., Crump, J.R., 1977, Solid liquid separation : an overview. As energy costs rise, the need for better solid-liquid theory and practice becomes increasingly more urgent, *Chemical engineering progress*, Octobre, pp. 65-75.

Tiller, F.M., Leu, W.F., 1980, Basic data fitting in filtration, *Journal of the Chinese institute of chemical engineers*, 11, pp. 61-70.

Tiller, F.M., Weber, W., Davies, O., 1981, Clogging phenomena in the filtration of liquefied coal, *Chemical engineering progress*, 77, pp. 61-68.

Tiller, F.M., Horng, L., 1983, Hydraulic deliquoring of compressible filter cakes. Reverse flow in filter presses, *AIChE Journal*, 29, 2, pp. 297-305.

Tiller, F.M., Leu, W., 1983a, Experimental study of the mechanism of constant pressure cake filtration : Clogging of filter media, *Separation science and technology*, 18, 13, pp. 1351-1369.

Tiller, F.M., Leu, W.F., 1983b, Cake compressibility – critical element in solid-liquid separation, *World filtration congress IIIrd*, Philadelphia, pp. 270-279.

Tiller, F.M., Yeh, C.S., 1987, Role of porosity in filtration : XI. Filtration followed by expression, *AIChE Journal*, 33, 8, pp. 1241-1256.

Tiller, F.M., Hsyung, N.B., Cong, D.Z., 1995, Role of porosity in filtration : XII. Filtration with sedimentation, *AIChE Journal*, 41, 5, pp. 1153-1164.

Tiller, F.M., Kwon, J.H., 1998, The role of porosity in filtration : XIII. Behaviour of highly compactible cakes, *AIChE Journal*, Vol. 44, n° 10, pp. 2159-2167.

Tiller, F.M., Lu, R., Kwon, J.H., Lee, D.J., 1999, Variable flow rate in compactible filter cakes, *Water research*, 33,1,pp. 15-22.

Tiller, F.M., Li, W.P., Lee, J.B., 2001, Determination of the critical pressure drop for filtration of super-compactible cakes, *Water science and technology*, 44, 10, pp. 171-176.

Tosun, I., Willis, M.S., 1983, Drag stress – pressure drop relationship in filtration, *Chemical Engineering Science*, 38, 3, pp. 485-487.

Tosun, I., 1986, Formulation of cake filtration, *Chemical engineering science*, 41, 10, pp. 2563-2568.

Tosun, I., Willis, M.S., 1986, Cake filtration theory : an overview, 4th World Filtration Congress, Technologisch Instituut-Koninklijke Vlaamse Ingenieursvereniging, Ostend, Belgique, pp 4.13-4.20.

Tosun, I. Yetis, U., Willis, M.S., Chase, G.G., 1993, Specific cake resistance : myth or reality ?, *Water science technology*, 28, 1, pp. 91-101.

Tosun, I., Willis, M.S., Desai, F., Chase, G.G., 1995, Analysis of drag and particulate stress in porous media flow, *Chemical engineering science*, 50, 12, pp. 1961-1969.

Towhata, I., Kuntiwattanakul, P., Seko, I., Ohishi, K., 1993, Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests, *Soils and foundations*, 44, 4.

Vaxelaire, J., 2001, Moisture sorption characteristics of waste activated sludge, *Journal of chemical technology and biotechnology*, 76, pp. 377-382.

Wakeman, R.J., 1978, A numerical integration of the differential equations describing the formation of and flow in compressible filter cakes, *Trans. IChemE.*, 56, pp. 258-265.

Wakeman, R.J., 1981, Thickening and filtration : a review and evaluation of recent research, *Transaction of the Institution of chemical Engineers*, 59, pp. 147-160.

Wakeman, R.J., Tarleton, E.S., 1999, *Filtration. Equipment selection modeling and process simulation*, Elsevier Ed.

Willis, M.S., Shen, M., Gray, K.J., 1974, Investigation of the fundamental assumptions relating compression-permeability data with filtration, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52, pp. 331-337.

Willis, M.S., Tosun, I., 1980, A rigorous cake filtration theory, *Chemical engineering science*, 35, pp. 2427-2438.

Willis, M.S., Collins, R.M., Bridges, W.G., 1983, Complete analysis of non-parabolic filtration behavior, *Chemical Engineering Research and Design*, 61, pp. 96-109.

Wu, Y., 1994, An analysis of constant pressure filtration, *Chemical engineering science*, 49, 6, pp. 831-836.

Yim, S.S., 1984, Filtration sur gâteau compressible, Thèse de doctorat, INP Toulouse.

Yim, S.S., Kwon, Y.D., Kim, H.I., 2001, Effect of pore size, suspension concentration, and pre-sedimentation on the measurement of filter medium resistance in cake filtration, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 18, 5, pp. 741-749.

CHAPITRE III

ETAPES DE CONCEPTION DU DISPOSITIF DE FILTRATION - COMPRESSION ASSISTEE THERMIQUEMENT

L'objectif de ce travail est d'assister thermiquement une opération de déshydratation mécanique (filtration et compression). L'ajout de résistances chauffantes à des emplacements appropriés d'une cellule de filtration compression classique (au niveau du media filtrant et à la surface de contact du piston) est la solution technique retenue. Néanmoins, l'introduction de tels éléments et les modifications qui en découlent sont susceptibles de perturber le fonctionnement tant de la cellule que celui des capteurs (élévation de la température). Ainsi, un dispositif intermédiaire a été élaboré au laboratoire afin de confirmer les choix technologiques. Ce chapitre décrit les étapes de conception du dispositif expérimental destiné à étudier l'effet d'une aide thermique localisée sur une étape de déshydratation mécanique.

III. ETAPES DE CONCEPTION DU DISPOSITIF DE FILTRATION – COMPRESSION ASSISTE THERMIQUEMENT	89
III.1. Caractérisation des matériaux.....	91
III.2. Cellule de filtration – compression	93
III.2.1 Dispositif expérimental.....	93
III.2.2 Protocole expérimental	96
III.3. Influence du pseudo-piston	98
III.3.1 Filtration – compression à pression constante.....	99
III.3.2 Mesures de pression liquide à la surface du gâteau	101
III.3.3 Pseudo-piston : alternative technologique	102
III.4. Cellule de filtration - compression assistée thermiquement.....	103
III.4.1 Description du dispositif expérimental	103
III.4.2 Protocole expérimental	107
III.4.3 Influence de la canne pyrométrique.....	108
III.5. Conclusion	110
III.6. Références bibliographiques	111

III.1. Caractérisation des matériaux

Le choix des matériaux utilisés pour notre étude est guidé par les phénomènes que nous voulons mettre en évidence (impact de la thermique sur la déshydratation mécanique de suspensions difficiles à filtrer). Deux types de suspensions à base de particules de Talc et de Kaolin sont utilisées. Ces suspensions sont susceptibles de former des gâteaux de compressibilité différente (Tien *et al.*, 2001, Willis *et al.*, 1974). Les propriétés intrinsèques des particules solides sont listées dans le tableau III.1 ; la figure III.1 montre la distribution de taille des particules. Les diffusivités thermiques (γ) ont été mesurées à partir de la méthode flash face arrière (Degiovanni, 1984) sur les poudres sèches compactées.

	Talc	Kaolin
ρ_s (kg.m ⁻³)	2350	2600
d_{50} (μm)	15,13	5,73
γ (m ² .s ⁻¹)	$1,4.10^{-7}$	$1,3.10^{-7}$

Tableau III.1. Propriétés des particules solides pour le Talc et le Kaolin.

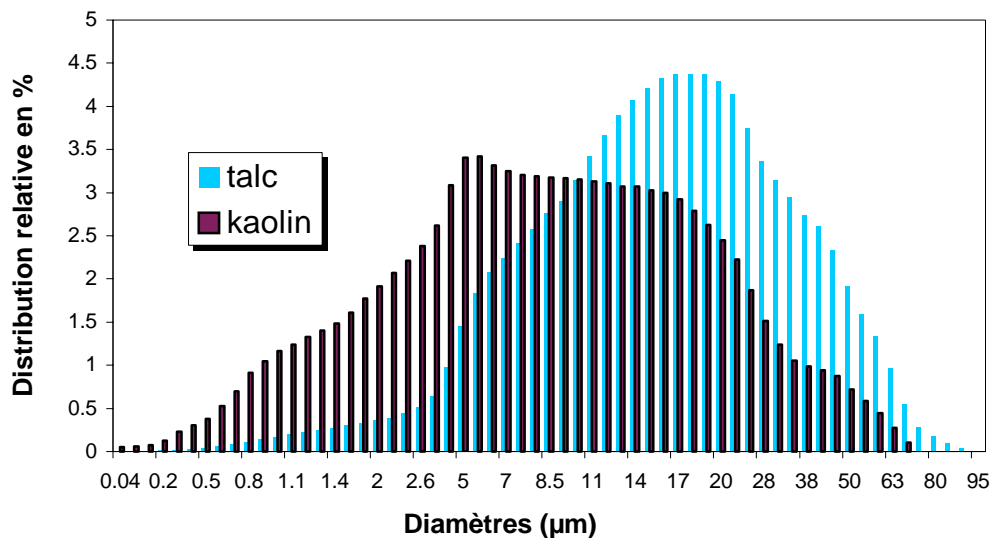


Fig. III.1. Distribution de la taille des particules pour le talc et le kaolin.

Les histogrammes représentant la distribution des tailles des particules (en volume) pour le Talc et le Kaolin montrent que cette distribution est plus resserrée pour le Talc. De plus, les particules de Kaolin sont plus fines que celles de Talc (caractéristique d'une suspension difficile à filtrer, Bersa *et al.*, 2000).

Les compressibilités respectives des gâteaux sont mesurées à l'aide d'une cellule de compression-perméabilité (Ruth, B.F., 1946, Grace, H.P., 1953). Les valeurs des différents coefficients intervenant dans les équations (II.40) et (II.41) ont été déterminées par nos soins selon la méthode définie par Tiller et Leu (1980) et sont indiquées dans le tableau III.2.

D'après la classification donnée par Tiller et Yeh (1987) et Sorensen et Hansen (1993), le Talc est un matériau modérément compressible alors que le Kaolin est très compressible, susceptible donc de former un talon à l'interface media filtrant / gâteau.

Paramètres	Talc	Kaolin
β (-)	0,15	0,21
n (-)	0,48	1,17
P_a (Pa)	$6,20 \times 10^3$	$1,25 \times 10^4$
ε_s^0 (-)	0,34	0,32
α_0 (m.kg ⁻¹)	$1,02 \times 10^{10}$	$4,10 \times 10^{10}$

Tableau III.2. Paramètres des équations constitutives pour le Talc et le Kaolin.

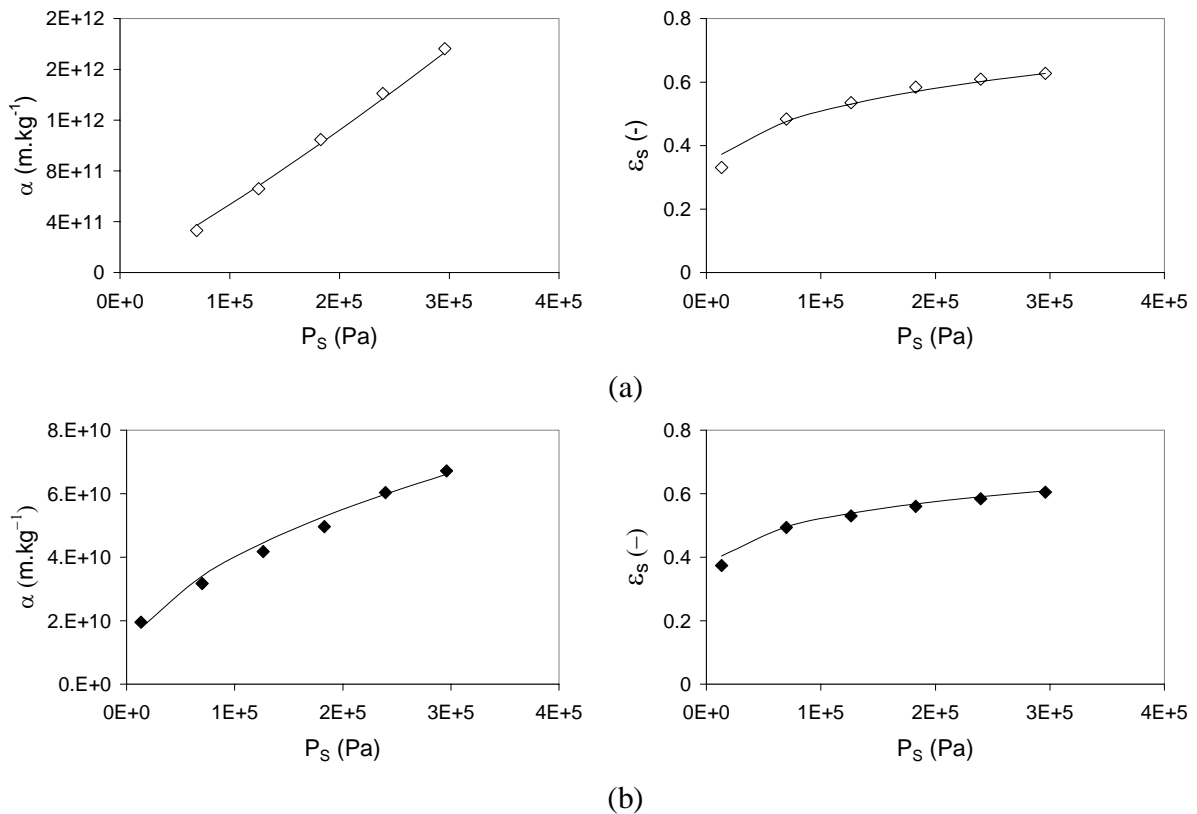


Fig. III.2. Corrélation des équations constitutives (eq.II.40 et II.41) pour le Kaolin (a) et le Talc (b).

En utilisant l'analyse présentée au paragraphe II.3.3.3, nous pouvons représenter (Fig. III.3) les profils de porosité et de pression liquide pour les gâteaux de Talc et de Kaolin traités à $\Delta P = 4,2$ bar.

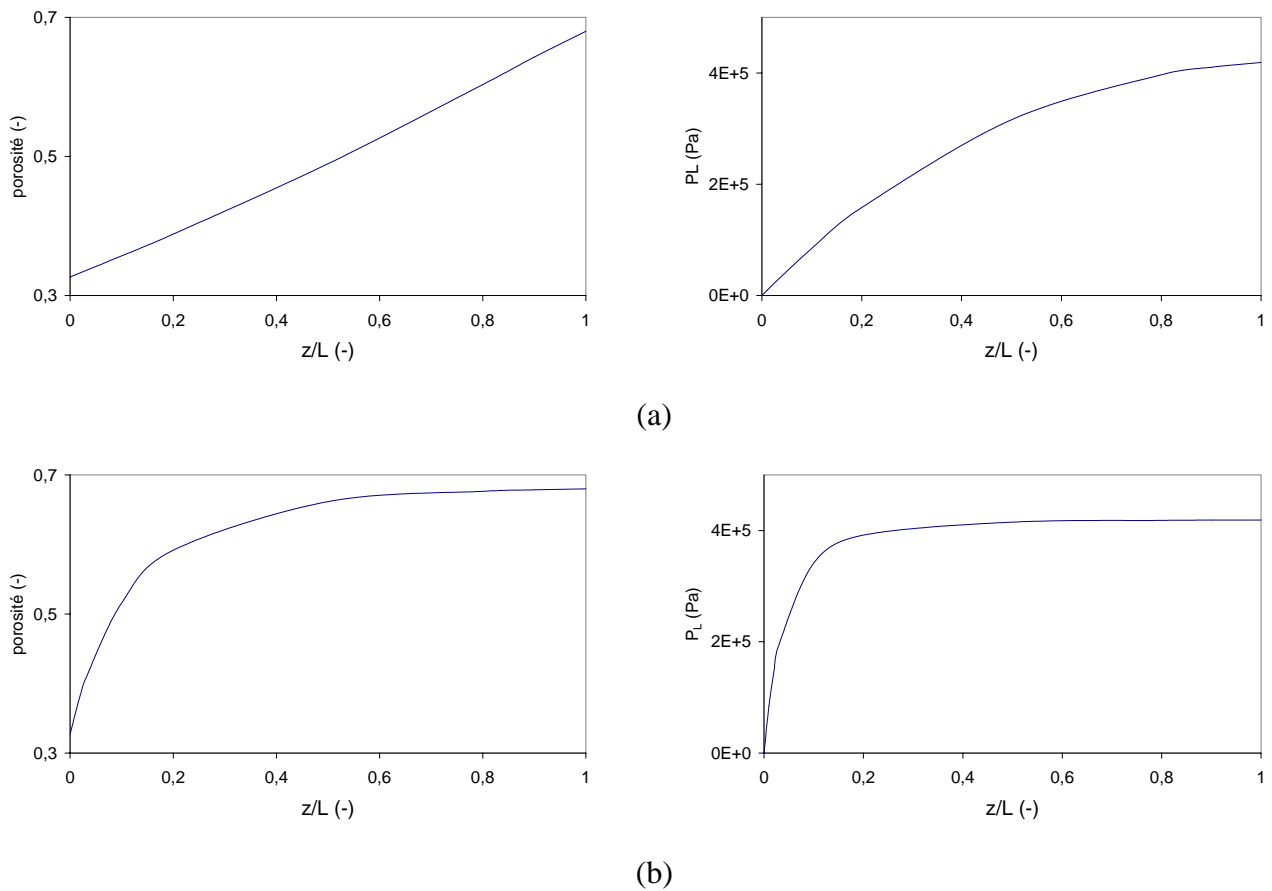


Fig. III.3. Profils théoriques de porosité et de pression liquide dans des gâteaux de Talc (a) et Kaolin (b) pour des suspensions filtrées à $\Delta P = 4,2$ bar.

Comme le montre la figure ci-dessus, le Kaolin forme un talon à l'interface media filtrant / gâteau : les variations de pression liquide et de porosité sont les plus importantes près du media filtrant. Dans le cas du Kaolin, 90 % de la perte de charge est localisée dans 20 % de l'épaisseur du gâteau.

III.2. Cellule de filtration – compression (CFC)

III.2.1. Dispositif expérimental

Sur le dispositif expérimental capable d'assister thermiquement la séparation mécanique, les résistances chauffantes seront disposées au niveau du media filtrant et à la surface de contact piston/suspension. Afin de protéger l'électronique des différents capteurs placés sur le piston, la résistance chauffante supérieure sera logée dans une pièce en avant du piston. Cette

pièce, appelée par la suite pseudo-piston, a nécessité la réalisation d'une cellule de filtration – compression modifiée (Fig. III.4) destinée à étudier l'impact de cette pièce sur l'opération.

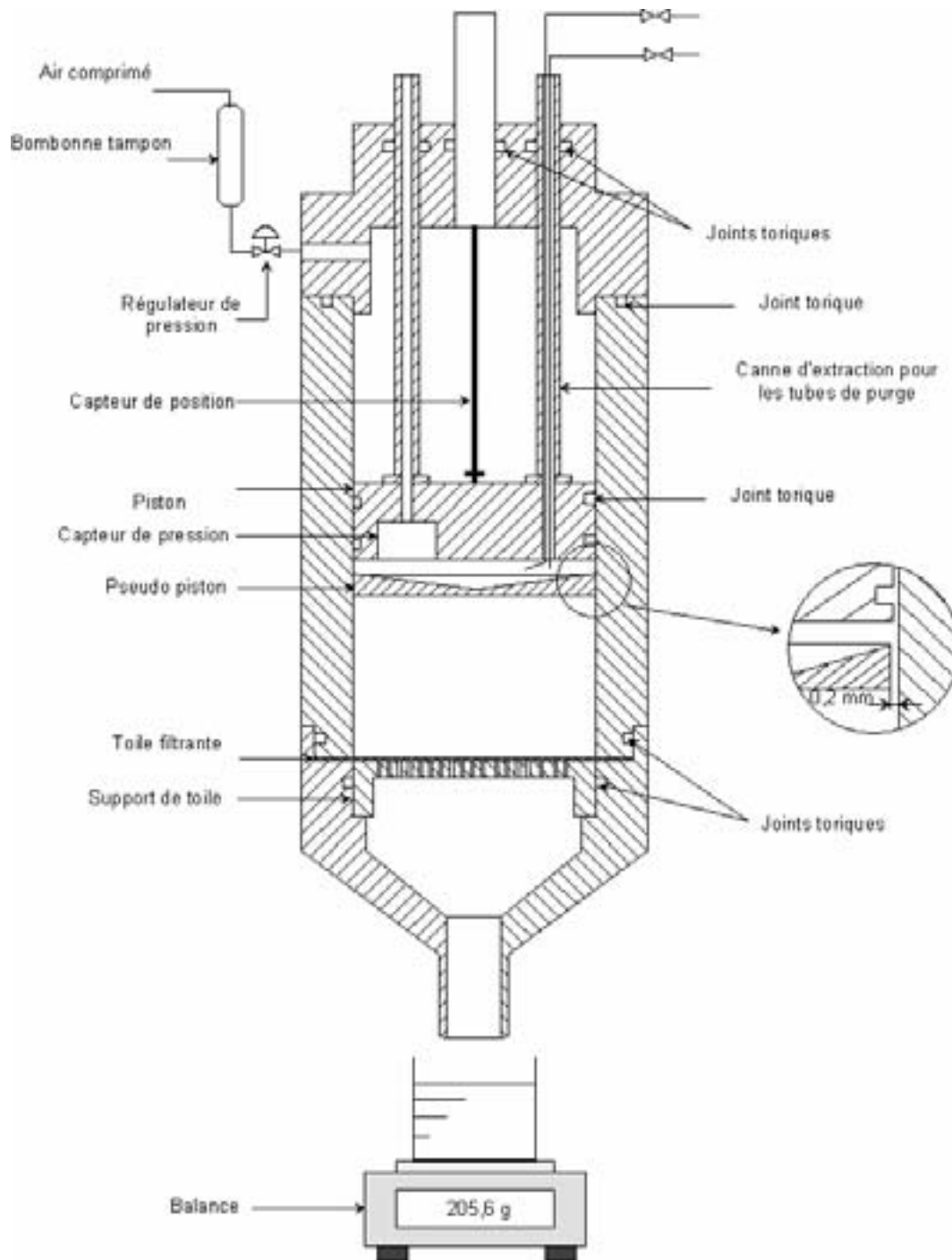


Fig. III.4. Cellule de filtration – compression développée au LEPT-ENSAM.



(a)



(b)

Fig. III.5. Photo du dispositif expérimental de filtration compression (a) et du pseudo piston (b).

La figure III.4 décrit le pilote de filtration – compression modifié. Ce dispositif, élaboré conformément à la norme AFNOR T97.001 (1979), permet de filtrer 500 mL de suspension sur une plage de pression variant de 0,5 à 10 bar (la pression est appliquée grâce au réseau d'air comprimé). Il est constitué des mêmes éléments caractéristiques que ceux d'une cellule de filtration – compression classique : le corps de la cellule (cylindre creux en inox de 70 mm de diamètre interne), le piston amovible, le couvercle hermétique et l'ensemble support de filtre (disque perforé) et toile filtrante.

Un capteur de déplacement fixé au piston permet de suivre l'évolution de la position du piston au cours de la filtration et la taille du gâteau en compression.

Un capteur de pression à membrane affleurante, situé dans le piston, indique la pression hydraulique effectivement appliquée sur la suspension au cours de la filtration. L'électronique de ce capteur ainsi que les deux tubes de purge sont reportés à l'extérieur de la cellule grâce à deux cannes cylindriques creuses. L'étanchéité est assurée grâce à plusieurs joints toriques. Ces joints augmentent bien entendu les frottements mais le capteur de pression à membrane

affleurante situé sur la face inférieure du piston donne la valeur précise de la pression exercée sur la suspension. On s'affranchit ainsi de l'influence des frottements. En effet, en présence de frottements importants, la mesure de la pression d'air appliquée en amont du piston peut être très différente de la pression effectivement appliquée à la suspension par le piston.

Enfin, une pièce cylindro-conique appelée pseudo-piston, est placée en face avant du piston. Le jeu entre le pseudo-piston et le corps de la cellule assure la continuité liquide entre la suspension et le capteur de pression. Ce pseudo-piston a double emploi. Sa fonction propre est de protéger les capteurs fixés au piston d'un point chaud. Il permet également de protéger la membrane du capteur de pression des particules solides en phase de compression, lorsque le piston a rejoint le gâteau.

L'ajout de cette pièce nécessite la mise en place d'un protocole expérimental particulier. En effet, l'espace entre le piston et le pseudo-piston ne doit pas gêner la saturation complète de la cellule et le volume de suspension piégé doit être extrait à la fin de chaque expérience pour ne pas fausser les mesures de teneur en eau des gâteaux. Un système de purge impliquant deux tubes (aspiration et mise à l'air) a donc été intégré au dispositif afin de résoudre ces problèmes.

III.2.2. Protocole expérimental

Lorsque la pression de fonctionnement est réglée, les toiles filtrantes sont mises en place à la base de la cellule. Les toiles filtrantes utilisées sont des toiles tissées faites de fibres synthétiques fournies par Sefar Fyltis (Ref : 25841 AN, Annexe F). Ces toiles sont préalablement saturées en eau pour ne pas fausser les mesures de résistance de media filtrant : la présence de bulles d'air dans la toile augmente sa résistance et peut accroître de façon fictive la compressibilité des matériaux étudiés (Chase et Willis, 1991).

Le piston est mis au contact de la suspension et dans le même temps la cellule est mise en dépression par l'intermédiaire des deux tubes de purge. Ainsi, l'air, éventuellement piégé dans la cellule est aspiré par les tubes de purge (Fig. III.6a). Cette purge s'achève lorsque la suspension atteint un niveau prédéterminé dans les tubes.

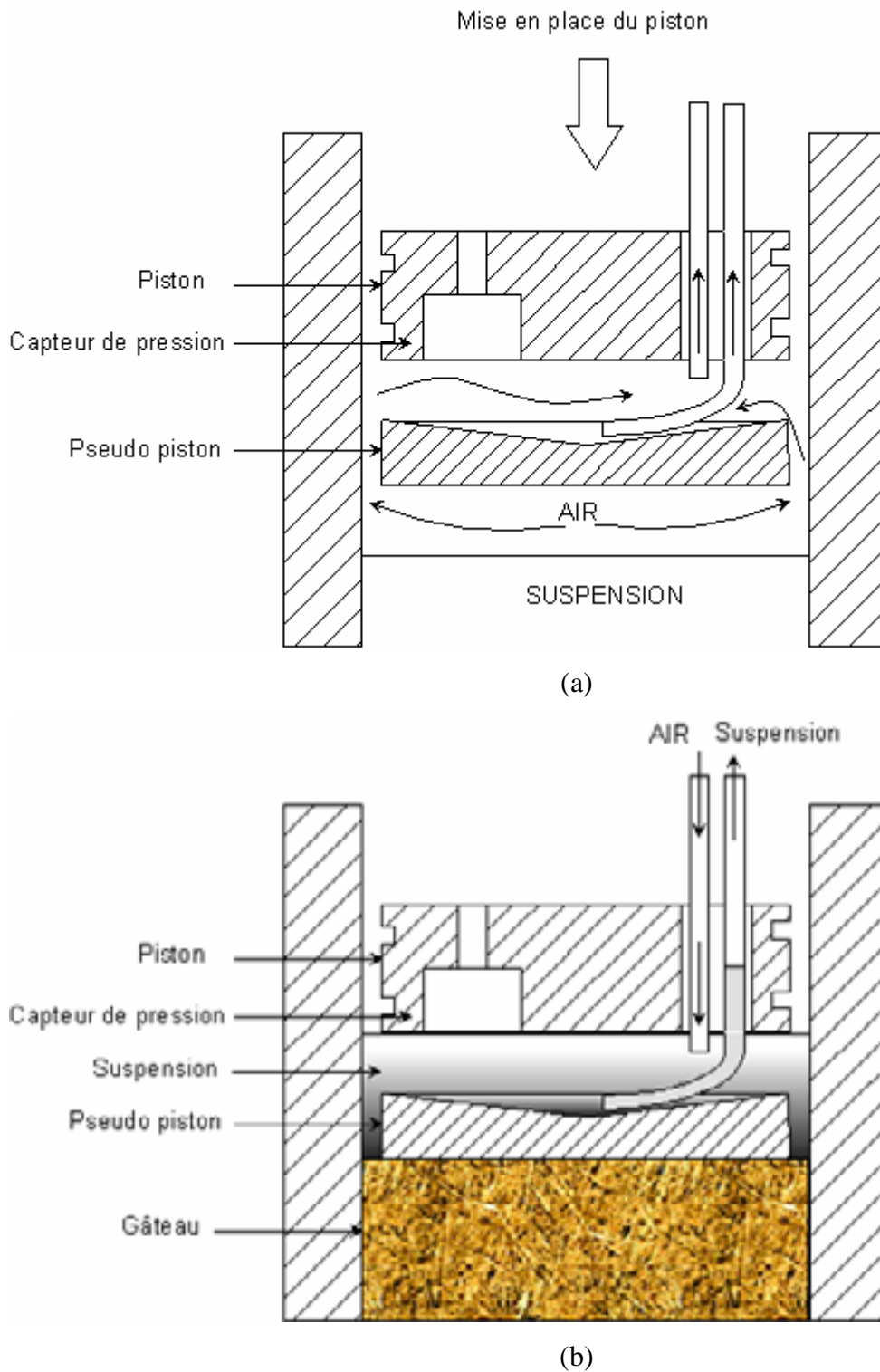


Fig. III.6. Protocole expérimental : mise en place du piston (a) ; purge (b)

L'acquisition des différents paramètres (position du piston, pression liquide dans la suspension et masse de filtrat) démarre lorsque la cellule est mise sous pression.

La durée du protocole a été optimisée afin de limiter un phénomène de sédimentation initiale dans la cellule (Koenders et Wakeman, 1996), de sorte que la totalité des gâteaux est

formée par le phénomène de filtration exclusivement. En utilisant des suspensions chargées, les vitesses de sédimentation sont faibles, ce qui permet également de limiter ce phénomène.

Le pseudo-piston autorise le passage du liquide et des particules solides. Ainsi, la concentration initiale de la suspension à traiter n'est pas modifiée par le protocole. Les concentrations des suspensions utilisées permettent aussi de limiter ce phénomène.

En fin d'expérience, le volume de suspension piégé entre le pseudo-piston et le piston est aspiré par un des deux tubes de purge pour éviter que le liquide ne réhydrate le gâteau formé (le deuxième tube ne fait office que de mise à l'air libre pour éviter une aspiration du gâteau, Fig. III.6b). Les gâteaux sont séchés dans une étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention des masses sèches.

III.3. Influence du pseudo-piston

Afin d'évaluer l'impact du pseudo-piston sur le procédé de séparation mécanique, une série d'expériences a été réalisée pour confronter les résultats expérimentaux de notre cellule (Fig. III.4) à ceux d'une cellule classique (Fig. III.7). Ainsi, des essais de filtration – compression à pression constante sont conduits dans les deux cellules pour des conditions de pression et de concentration identiques.

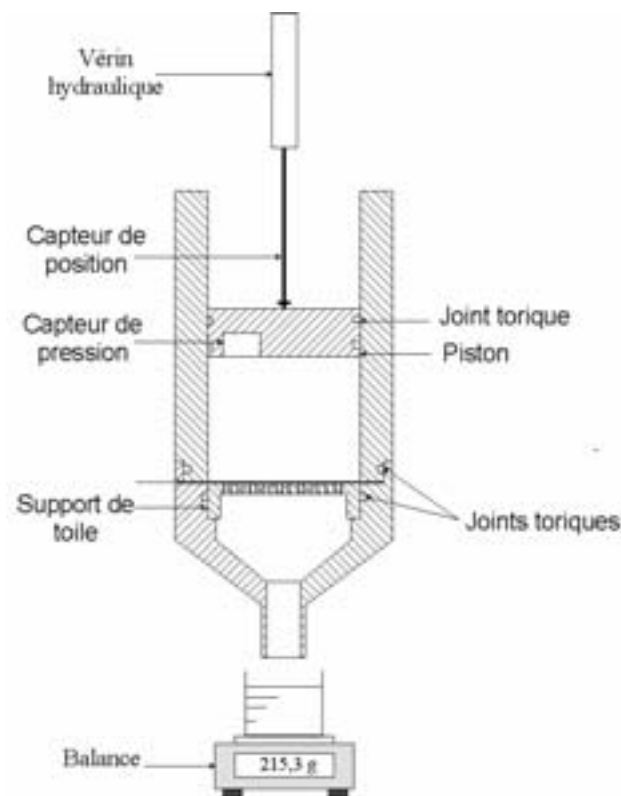


Fig. III.7. Cellule de filtration - compression classique.

III.3.1. Filtration – compression à pression constante

Les essais de filtration-compression sont réalisés avec les deux dispositifs expérimentaux pour les mêmes conditions de pression (2,6 et 4,2 bar) et de concentration ($s = 0,23$).

Afin de comparer les résultats obtenus avec les différents dispositifs, les variables normées V_N (rapport du volume de filtrat au temps t sur le volume de filtrat à la fin de l'expérience), h_N (rapport de la position du piston au temps t sur l'épaisseur finale du gâteau) et P_N (rapport de la pression liquide au temps t sur la pression de fonctionnement) sont introduites. Le volume de suspension piégé entre le piston et le pseudo-piston rend difficile l'obtention du même volume initial dans les deux dispositifs. De même, le nombre important de joints d'étanchéité dans notre dispositif augmente les frottements. Il était donc difficile de régler très exactement les mêmes pressions de consigne dans les deux cellules.

La figure III.8 montre les résultats expérimentaux obtenus pour les suspensions, et le tableau III.3 donne les propriétés des différents gâteaux (l'ensemble des expériences est rassemblé en annexe A). On remarque que l'ajout du pseudo-piston n'a aucune incidence sur le comportement en déshydratation mécanique des suspensions et ne modifie pas les propriétés des gâteaux.

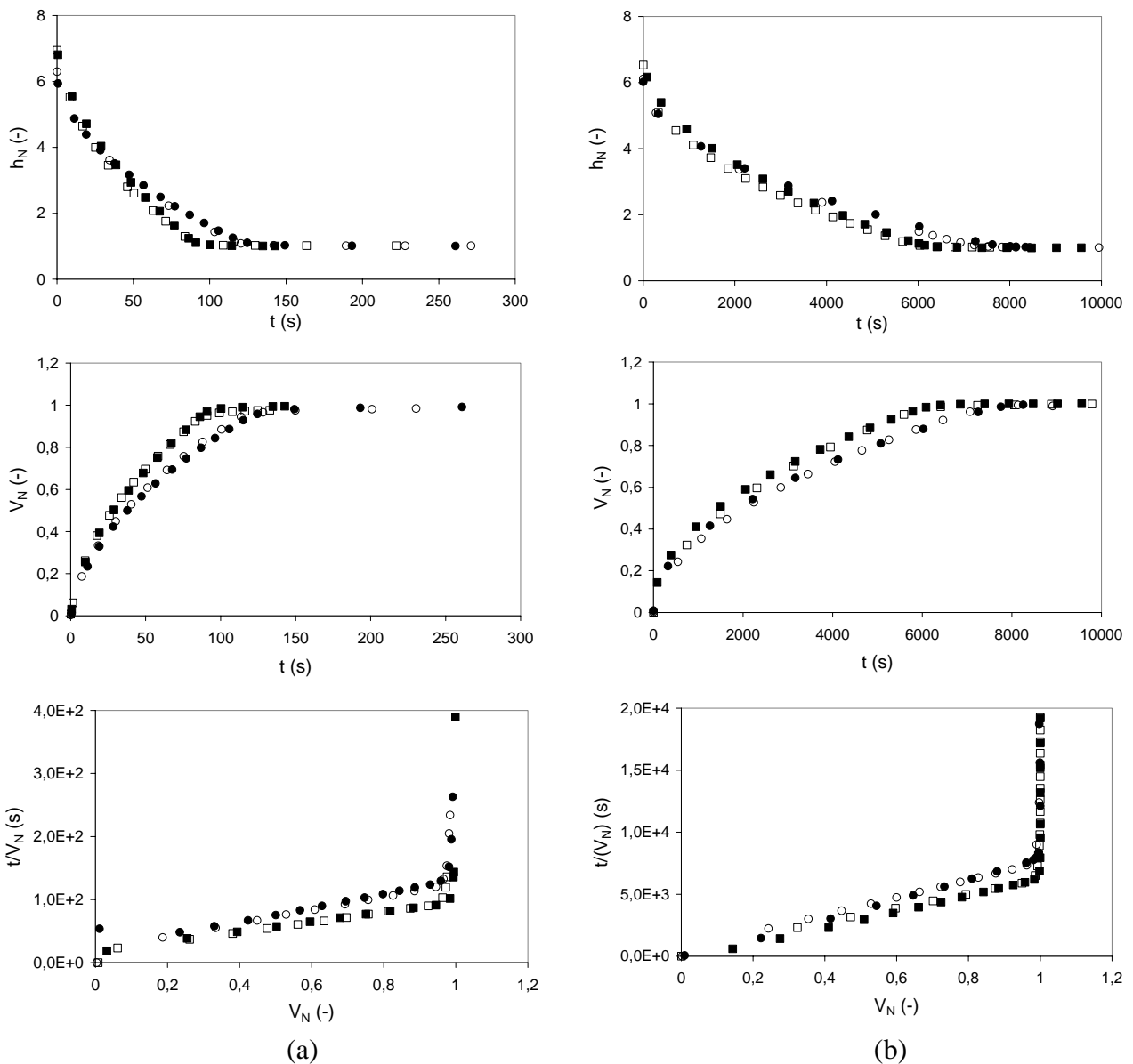


Fig. III.8. Comparaison des courbes de filtration obtenues pour le talc (a) et le kaolin (b) :
 Dispositif classique : 2,6 bar (•) ; 4,2 bar (▪)
 Pseudo-piston : 2,6 bar (◦) ; 4,2 bar (◻)
 (Essais 1; 3; 5; 7).

	Talc		Kaolin	
	Cellule classique	Pseudo - piston	Cellule classique	Pseudo-piston
$\langle \alpha \rangle (m.kg^{-1})$	$(4,5 \pm 0,2).10^{10}$	$(4,7 \pm 0,2).10^{10}$	$(3,6 \pm 0,2).10^{12}$	$(3,3 \pm 0,2).10^{12}$
$\varepsilon^* (-)$	$0,45 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,02$
Siccité (%)	$70,3 \pm 0,3$	$70,8 \pm 0,3$	$68,4 \pm 0,3$	$69,6 \pm 0,3$

Tableau III.3. Propriétés des gâteaux obtenus ($\Delta P = 2,6 bar ; s = 0,23$)
 (Essais 1; 5).

On constate que les siccités obtenues à l'aide de la nouvelle cellule sont toujours supérieures à celles mesurées dans la cellule classique. Ceci est dû à une réhydratation du gâteau en fin d'expérience dans la cellule classique. En effet, la partie du gâteau en contact avec la membrane du capteur (situé en retrait par rapport à la surface de contact du piston) est plus humide que le reste du gâteau et diminue la siccité finale.

III.3.2. Mesures de pression liquide à la surface du gâteau

La pression liquide dans la suspension, pendant la filtration et à la surface du gâteau, pendant la compression, est caractéristique de l'état de déshydratation des gâteaux (Novak *et al.*, 1999). Nous avons donc étudié l'impact du pseudo-piston sur les mesures de pression liquide. Si celui-ci n'a aucun effet en terme de volume de filtrat et de taille de gâteau, les mesures de pression (Fig. III.9) révèlent quant à elles un comportement différent pour les deux dispositifs.

Avec la cellule classique, P_N n'atteint pas zéro même après une longue période de compression. La pression résiduelle enregistrée est d'autant plus élevée que le matériau est compressible. Avec le nouveau dispositif (pseudo piston), on observe expérimentalement un retour à 0 de la pression liquide à la surface du gâteau lorsque la taille de celui-ci n'évolue plus, et ce quel que soit le degré de compressibilité du matériau.

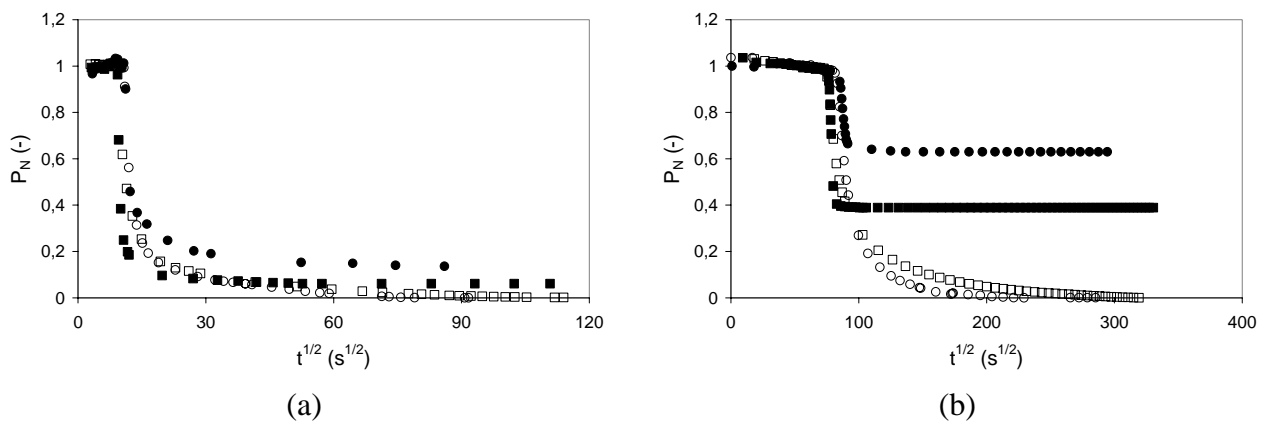


Fig. III.9. Mesures de pression liquide pour le talc (a) et le kaolin (b) :
 Dispositif classique : 2,6 bar (•) ; 4,2 bar (▪)
 Pseudo-piston : 2,6 bar (◦) ; 4,2 bar (◻)
 (Essais 1; 3; 5; 7).

Cette différence importante est liée à la nature de la pression mesurée pendant l'étape de compression. Dans notre dispositif expérimental, le pseudo-piston protège le capteur des particules solides formant le gâteau. La pression mesurée est la pression liquide de pore (moyenne intrinsèque de la pression dans la phase liquide, Whitaker, 1986). Dans une

configuration classique, le capteur mesure un effort dû à la contribution de la phase liquide mais aussi une partie de l'effort lié au contact de la matrice solide et du capteur. Le gâteau se déforme pendant la phase de compression et les particules solides viennent appuyer sur la membrane du capteur de pression (Fig. III.10).

L'apparition d'une telle pression résiduelle a été observée avec des cellules classiques (sans pseudo-piston) pour des matériaux très compressibles (Sorensen et Hansen, 1993, Novak *et al.*, 1999) et fut attribuée à la formation d'une peau à l'interface gâteau / media filtrant. Il n'est pas question de mettre en doute l'existence de ce talon (paragraphe II.3.3.3). Cependant, les expériences réalisées durant cette étude suggèrent que la pression liquide mesurée dans divers travaux n'était pas exactement la pression hydraulique de pore mais une somme des contributions des phases solide et liquide (Couturier *et al.*, 2002).

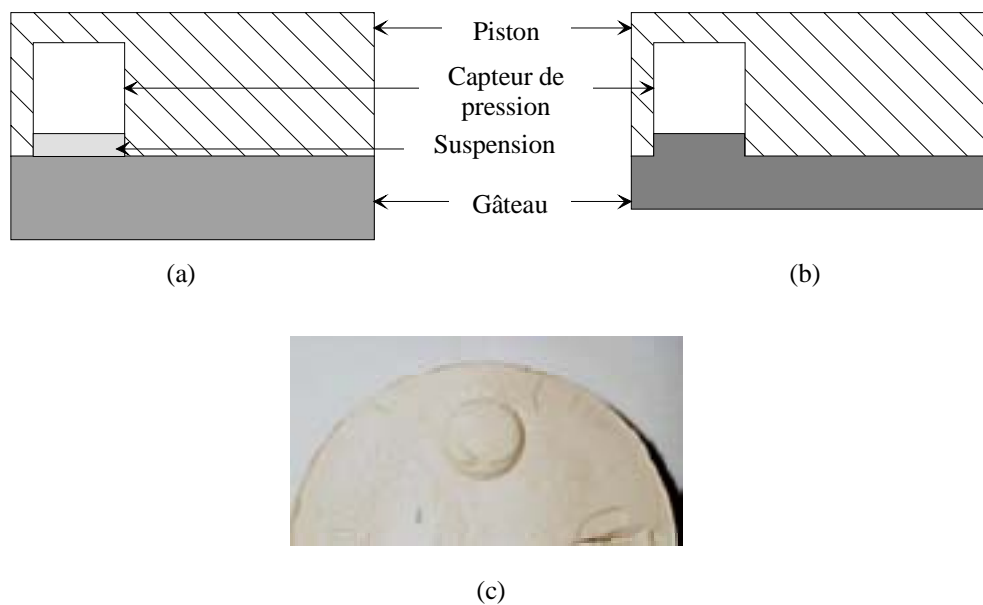


Fig. III.10. Comportement d'un gâteau extrêmement compressible à la fin de la filtration (a) et en compression (b) ; Photo d'un gâteau de Kaolin (c).

III.3.3. Pseudo-piston : alternative technologique

L'étude expérimentale menée sur le dispositif de filtration - compression doté d'un pseudo-piston a montré son efficacité pour caractériser l'état de déshydratation des gâteaux en compression.

Il s'agit d'une alternative technologique efficace pour l'étude de la compression car il permet de mesurer l'évolution de la pression liquide à la surface du gâteau durant toute l'opération de déshydratation mécanique.

De plus, il ne gêne pas le comportement en filtration – compression des suspensions. Une résistance chauffante peut donc y être logée sans modifier les résultats de filtration compression.

III.4. Cellule de filtration - compression assistée thermiquement

III.4.1. Description du dispositif expérimental

La figure III.11 décrit le dispositif destiné à assister thermiquement l'opération de déshydratation mécanique (par souci d'alléger la figure, les légendes correspondant aux nombreux joints toriques ne sont pas représentées). Cette cellule présente les mêmes caractéristiques que la cellule de filtration – compression présentée à la figure III.4 en terme de capacité et de pression de fonctionnement (500 mL de suspension ; 0,5 à 10 bar).

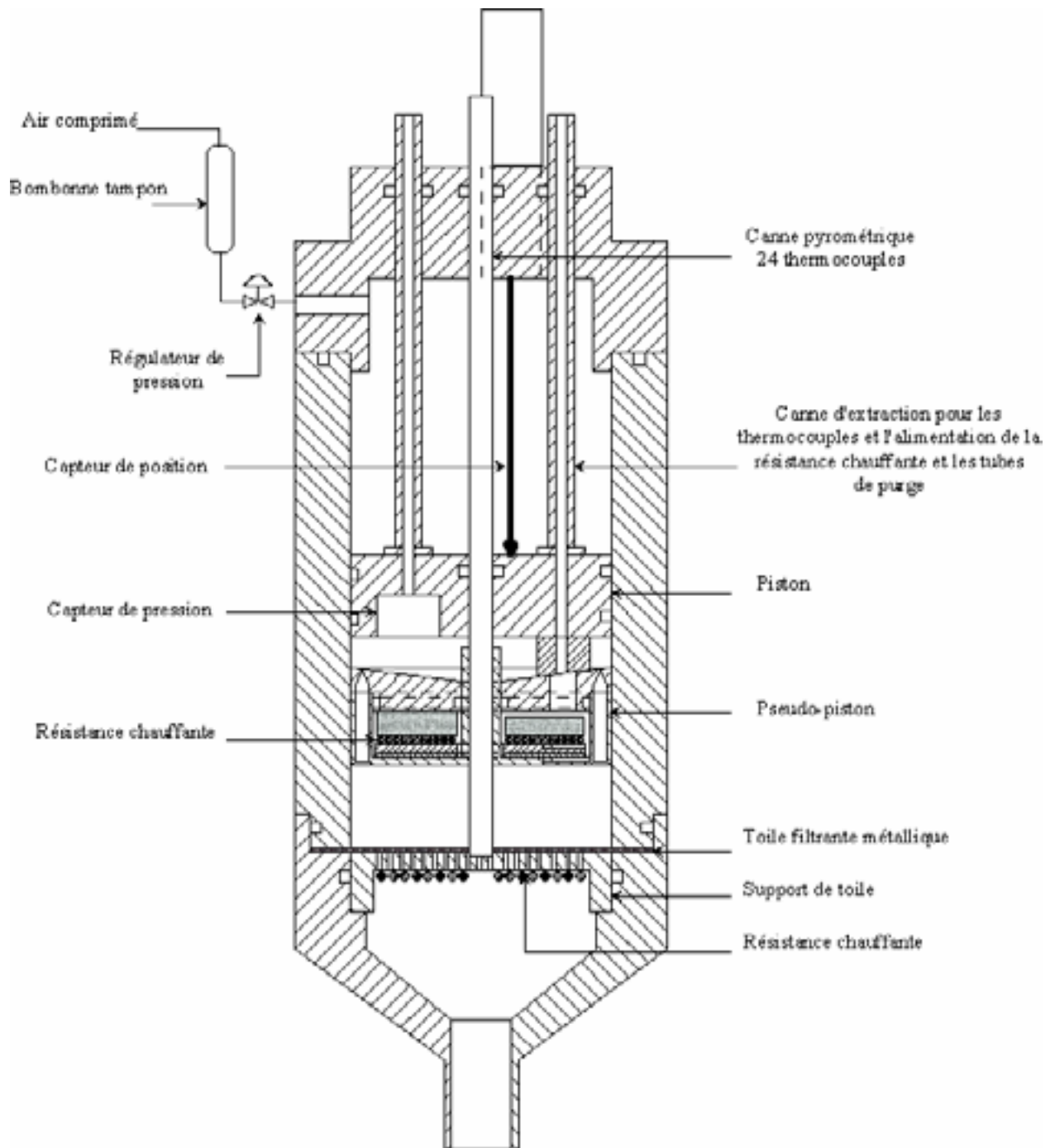


Fig. III.11. Cellule de filtration – compression assistée thermiquement.



Fig. III.12. Photo du dispositif de filtration – compression assistée thermiquement.

Logée dans le support de toile, une résistance chauffante à spires non jointives dissipant une puissance maximale de 320 W génère une aide thermique au niveau du media filtrant. Un thermocouple de type K situé sur le support de toile (Fig. III.13) donne la température du media qui est régulée (PID).

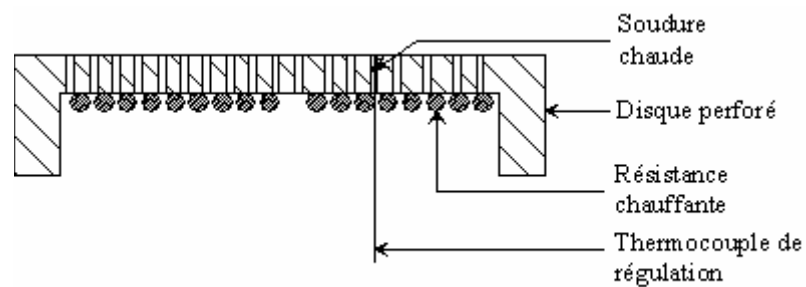


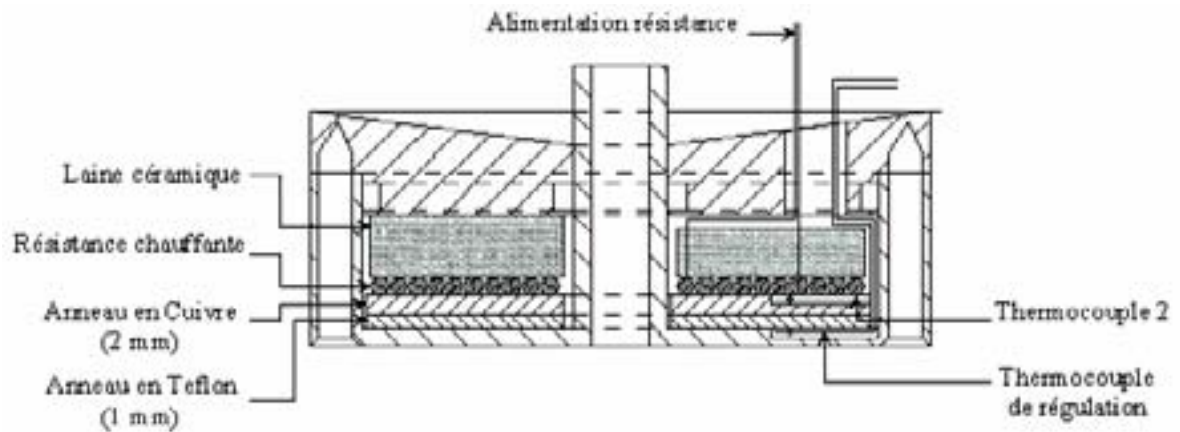
Fig. III.13. Système de chauffage au niveau du media filtrant.

Grâce à l'étude décrite au chapitre III.3, nous avons également équipé le dispositif de déshydratation mécanique assistée thermiquement d'un pseudo-piston (Fig. III.14a) dans lequel est insérée une résistance à spires jointives dissipant une puissance maximale de 280 W. Afin de mesurer le flux de chaleur fourni au système, un fluxmètre (sandwich

conducteur – isolant – conducteur) est également incorporé dans le pseudo-piston (Fig. III.14b). La température de la surface inférieure est également régulée grâce à un régulateur PID.



(a)



(b)

Fig. III.14. Pseudo-piston du dispositif de déshydratation mécanique assistée thermiquement.
(a) photo du pseudo-piston ; (b) coupe transversale du pseudo-piston.

Une canne pyrométrique en inox de 8 mm de diamètre composée de 24 thermocouples de type K fournit les profils de température sur l'axe du système.

Enfin, l'ensemble du dispositif est isolé thermiquement afin de limiter les pertes.

III.4.2. Protocole expérimental

Le protocole expérimental concernant le dispositif de déshydratation mécanique assistée thermiquement est identique à celui décrit au paragraphe III.2.2. Les toiles filtrantes utilisées sont ici des toiles métalliques fournies par la société Gantois (réf : 350x2180, annexe F). Lorsque la pression de fonctionnement ainsi que la température de la résistance au niveau du media et / ou du pseudo-piston sont réglées, la suspension est introduite dans la cellule. La canne pyrométrique puis le piston sont alors placés dans le système.

Ce dispositif autorise la mise en chauffe ou non de la cellule simultanément à sa mise sous pression.

Les signaux des différents capteurs (pression, position, température et puissance dissipée dans les résistances) ainsi que la masse de filtrat recueilli sont enregistrés en continu grâce à un scanner multivoies Keythley, et une interface graphique (logiciel Testpoint, Annexe G) (Fig. III.15).

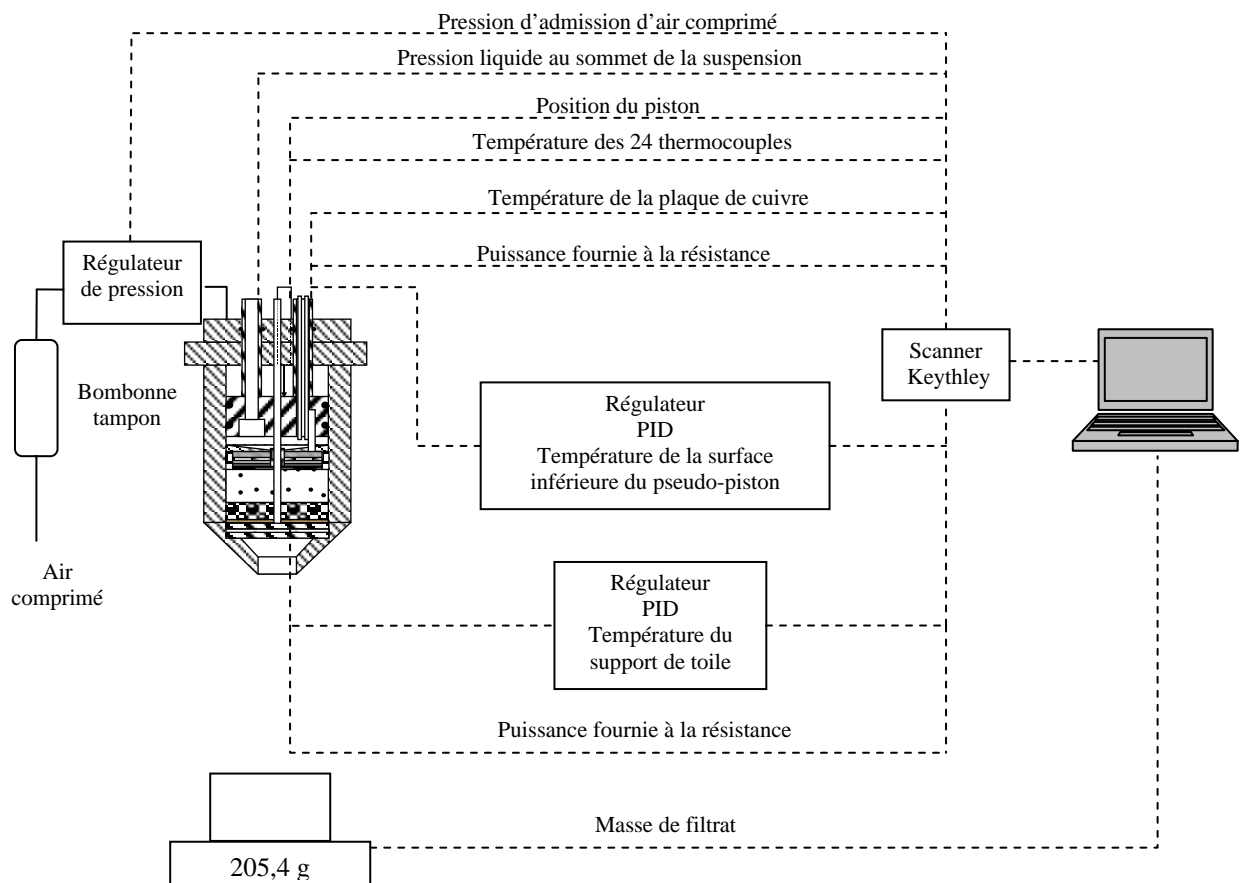


Fig. III.15. Schéma de principe pour l'acquisition des différents capteurs.

Le système de récolte du filtrat est constitué d'un bûcher sur lequel repose une plaque froide destinée à recondenser la vapeur d'eau.

En fin d'expérience, le liquide piégé entre le pseudo-piston et le piston est extrait de la même façon que dans la cellule de filtration – compression (Fig. III.4). Enfin, les gâteaux obtenus sont séchés dans une étuve à 105 °C pour déterminer les masses sèches.

III.4.3. Influence de la canne pyrométrique

Tout comme le pseudo-piston, la canne pyrométrique située dans l'axe de la cellule est susceptible de gêner le comportement des suspensions et des gâteaux, en déshydratation mécanique. En effet, elle réduit la surface filtrante et occupe un volume qui n'est plus disponible pour le gâteau. Ceux-ci, pour une même masse de suspension, sont donc plus épais que dans une cellule classique. La surface de filtration étant réduite, les cinétiques de filtration sont plus lentes.

En adoptant la même présentation que celle décrite au paragraphe IV.3.1, la figure III.16 présente une opération de filtration – compression réalisée avec une suspension de Kaolin dans les deux cellules (avec et sans canne pyrométrique).

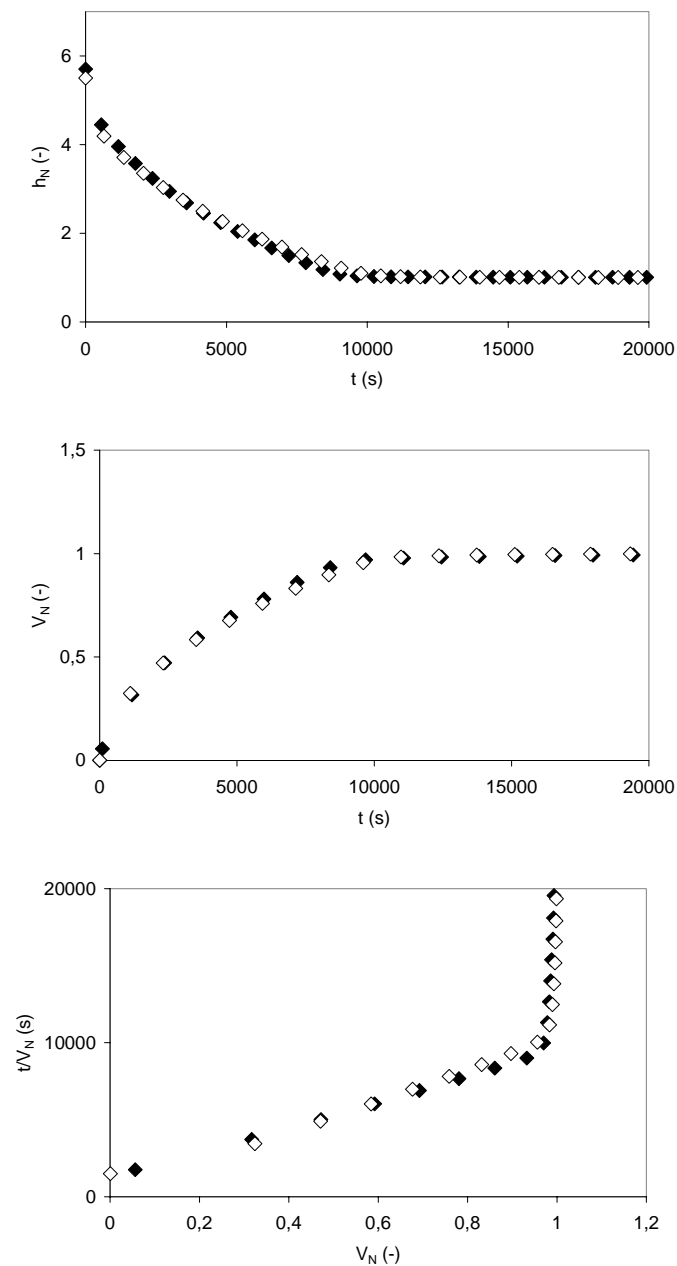


Fig. III.16. Filtration compression d'une suspension de Kaolin ($s = 0,23$) à $\Delta P = 1,4$ bar à température ambiante :

- ◆ : cellule de filtration – compression décrite à la Fig. III.4 (pseudo-piston seul)
- ◇ : cellule de filtration – compression assistée thermiquement (Fig. III.11) (Essais 4 et 20).

Comme le montre le tableau III.4, les propriétés intrinsèques des gâteaux de filtration sont identiques quelle que soit la cellule utilisée (avec ou sans canne pyrométrique) aux erreurs expérimentales près.

	Pseudo - piston	Canne pyrométrique
$\langle \alpha \rangle$ (m.kg ⁻¹)	$(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{12}$	$(2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{12}$
ε^* (-)	$0,55 \pm 0,02$	$0,56 \pm 0,02$
Siccité (%)	$67,1 \pm 0,3$	$66,6 \pm 0,3$

Tableau III.4. Propriétés des gâteaux de Kaolin traités dans la cellule de filtration – compression décrite à la figure III.4 (pseudo – piston seul) et dans le dispositif de filtration – compression assisté thermiquement ($\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = T_{amb}$) (Essais 4 et 20).

La canne pyrométrique ne modifie donc pas le comportement des suspensions en filtration – compression et peut donc être insérée dans une cellule afin d’obtenir les profils de température sur l’axe des gâteaux. Même si les gâteaux formés dans la cellule de filtration compression assistée thermiquement sont plus épais que ceux formés dans la cellule décrite à la figure III.4, l’impact sur les propriétés intrinsèques des gâteaux s’inscrit dans les erreurs expérimentales.

III.5. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les étapes de conception du dispositif de **déshydratation mécanique assistée thermiquement**.

Après avoir mis en exergue les avantages du **pseudo-piston** quant à l’étude de la déshydratation mécanique en termes de pression liquide, un dispositif capable de fournir de la **chaleur** au niveau du media filtrant et au sommet des suspensions a donc été élaboré.

L’accent a été mis sur la **métrologie**, avec notamment la mise en place d’une canne pyrométrique située sur l’axe de la cellule, capable de donner les profils de température dans le système.

Ce dispositif permet de fonctionner à température inférieure à la température d’ébullition de l’eau (à la pression considérée) ou au-delà. Nous limiterons l’étude à des températures locales situées entre 20 °C et 200 °C.

III.6. Références bibliographiques

AFNOR, 1979, Essais des Boues – Détermination des caractéristiques en liaison avec l'aptitude à la concentration, T97.001.

Chase, G.G., Willis, M.S., 1991, Flow resistance in filter cakes due to air, *Ibid.*, 26, 1, pp. 117-126.

Bersa, L., Sengupta, D.K., Roy, S.K., 2000, Particle characteristics and their influence on dewatering of Kaolin, Calcite and Quartz suspensions, *Int. J. Mineral Proc.*, 59, pp. 89-112.

Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J., Puiggali, J.R., 2002, Liquid pressure measurements in filtration-compression cell, *Separation Science and Technology*, sous presse.

Degiovanni, A., 1984, Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash, *Revue de physique appliquée*, 21, 3, pp. 229-237.

Grace, H.P., 1953, Resistance and compressibility of filter cakes, *Chemical Engineering Progress*, 46, p. 303.

Koenders, M.A., Wakeman, R.J., 1996, The initial stages of compact formation from suspension by filtration, *Chemical Engineering Science*, 51, 16, pp. 3897-3908.

Novak, J.T., Agerbaek, M.L., Sorensen, B.L., Hansen, J.A., 1999, Conditioning, filtering and expressing waste activated sludge, *Journal of Environmental Engineering*, September 1999, pp. 816-824.

Ruth, B.F., 1946, Correlating filtration theory with industrial practice, *Ind. Eng. Chem.*, 38, pp. 564-571.

Sorensen, P.B., Hansen, J.A., 1993, Extreme solid compressibility in biological sludge dewatering, *Water Science Technology*, 28, 1, pp. 133-143.

Tien, C., Teoh, S.K., Tan, R.B.H., 2001, Cake filtration analysis – The effect of the relationship between the pore liquid pressure and the cake compressive stress, *Chemical Engineering Science*, 56, pp. 5361-5369.

Tiller, F.M., Leu, W.F., 1980, Basic data fitting in filtration, *Journal of The Chinese Institute of Chemical Engineers*, 11, pp. 61-70.

Tiller, F.M., Yeh, C.S., 1987, The Role of porosity in filtration : Part XI. Filtration followed by expression, *AIChE Journal*, 33, 8, pp. 1241-1256.

Whitaker, S., 1986, Flow in Porous Media I : A theoretical derivation of Darcy's law, *Transport in Porous Media*, I, pp. 3-25.

Willis, M.S., Shen, M., Gray, K.J., 1974, Investigation of the fundamental assumptions relating compression – permeability data with filtration, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52, pp. 331-337.

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ensemble des résultats expérimentaux réalisés avec les deux matériaux (Talc et Kaolin) caractérisés au chapitre 2. Ils comprennent d'une part les essais de filtration – compression réalisés avec une aide thermique au niveau du media filtrant pour différentes conditions expérimentales. Ceux-ci révèlent une accélération significative de la cinétique de filtration dans le cas d'un matériau très compressible et un phénomène d'effondrement (réduction rapide de la porosité moyenne) du gâteau pendant la phase de compression pour une aide thermique réalisée à haute température ($> 100\text{ °C}$). L'effondrement observé permet d'atteindre des degrés de siccité élevés. Une discussion sur l'origine possible de ce phénomène sera abordée en fin de chapitre. D'autre part, nous présenterons les premiers résultats obtenus avec une aide thermique localisée au niveau du pseudo piston.



IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION.....	113
IV.1. Introduction.....	115
IV.1.1. Projet expérimental	115
IV.1.2. Protocoles expérimentaux et mesures	116
IV.2. Aide thermique au niveau du media filtrant	118
IV.2.1. Etude d'un matériau peu compressible	119
IV.2.1.1. Aide thermique à basse température ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	119
IV.2.1.2. Aide thermique à haute température ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) - effondrement	124
IV.2.1.3. Caractérisation de l'effondrement.....	131
IV.2.1.3.1. Influence de la température du media filtrant	132
IV.2.1.3.2. Influence de la pression de filtration - compression	133
IV.2.1.3.3. Influence du moment de la mise en œuvre de l'aide thermique	135
IV.2.1.3.4. Influence de la concentration des suspensions.....	137
IV.2.1.3.5. Influence du couplage mécanique / thermique	138
IV.2.1.4. Synthèse des résultats	139
IV.2.2. Etude d'un matériau très compressible	139
IV.2.2.1. Aide thermique à basse température ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	139
IV.2.2.2. Aspect énergétique.....	149
IV.2.2.3. Aide thermique à haute température ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	150
IV.2.2.4. Synthèse des résultats	155
IV.3. Aide thermique au niveau du pseudo piston	156
IV.3.1. Aide thermique à basse température ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	156
IV.3.2. Aide thermique à haute température ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	159
IV.4. Conclusion et discussion	159

IV.1. Introduction


IV.1.1. Projet expérimental

Dans le chapitre 2, les propriétés caractéristiques d'un gâteau en cours de constitution et en cours de consolidation ont été abordées sur la base d'une étude bibliographique. Dans le chapitre précédent, les étapes qui ont permis de concevoir, de développer et de valider une cellule de filtration compression chauffante ont été présentées. L'objectif du travail expérimental réalisé est de mettre en évidence, en relation avec la structure du gâteau, l'influence d'une aide thermique sur la filtration et la compression. Pour assister la séparation, il est en effet plus efficace d'améliorer les propriétés de transfert de matière du système dans les zones où leur aptitude au transfert est la moins bonne. Des essais ont donc été effectués en réalisant une aide thermique locale limitée (la température locale imposée étant fixée à une valeur soit inférieure à la température d'ébullition à pression atmosphérique, référencée comme basse température, soit supérieure, référencée comme haute température) au niveau :

- ✓ du media filtrant (zone où les résistances au transfert de matière sont élevées),
- ✓ du pseudo piston (zone a priori peu favorable à la mise en œuvre d'une aide thermique).

Nous étudierons donc l'impact d'un apport thermique localisé au niveau du media filtrant (référéncé aide thermique au niveau du media filtrant dans la suite du manuscrit et par le logo  dans les hauts de pages concernant ce mode de fonctionnement) et au niveau du pseudo piston (référéncé aide thermique au niveau du pseudo piston dans la suite du manuscrit et par le logo  dans les hauts de pages concernant ce mode de fonctionnement). L'étude portera sur la filtration compression de suspensions de Talc et de Kaolin dont les propriétés ont été étudiées au chapitre 3.

L'étude expérimentale s'effectuera en faisant varier divers paramètres.

Pour comparer l'efficacité de la configuration de l'aide thermique, les résultats expérimentaux seront confrontés à ceux obtenus dans les mêmes conditions mécaniques (pression, concentration...) à température ambiante et à température homogène (correspondant à la température de régulation). Les essais réalisés à température homogène seront référencés aide thermique homogène et par le logo  dans les hauts de pages concernant ce mode de fonctionnement.

Dans la présentation des résultats, de façon à faciliter la lecture du document, seuls les résultats des essais permettant le mieux de mettre en évidence les phénomènes observés seront donnés. L'ensemble des résultats obtenus est reporté en annexe B pour les essais réalisés avec une aide thermique homogène, en annexe C pour ceux réalisés avec une aide thermique au niveau du media filtrant et en annexe D pour les essais réalisés avec une aide thermique au niveau du pseudo piston.

IV.1.2. Protocoles expérimentaux et mesures

Nous décrivons ici le protocole expérimental suivi et ses variantes pour chaque type d'expérience. Nous avons déjà évoqué un protocole général au paragraphe III.4.2. Néanmoins, pour la clarté du document, nous apportons quelques précisions sur les différentes opérations nécessaires à la mise en œuvre de la cellule ainsi que sur les mesures effectuées. Ainsi, dans la suite du chapitre, ne seront présentés que les résultats expérimentaux et les analyses qui en découlent.

Préparation des suspensions

Quel que soit le mode de fonctionnement choisi, les suspensions sont préparées en terme de fraction massique de solide (s). Une masse m_s de solide (Talc ou Kaolin) est mélangée à une masse m_l d'eau, pour obtenir une suspension à la fraction massique de solide s voulue :

($s = \frac{m_s}{m_s + m_l}$). Les suspensions sont alors homogénéisées au moyen d'un agitateur

magnétique avant introduction dans la cellule.

Si l'essai doit se dérouler à température homogène, la suspension est préalablement placée dans un récipient adapté (pour limiter les pertes en eau) à l'étuve, à la température de l'essai pendant 12 heures.

Mise en place de la partie inférieure de la cellule

Une toile filtrante métallique est découpée au diamètre voulu, saturée en eau par immersion et placée dans son logement. Le bas de la cellule (cône collecteur) est alors placé sous le corps de la cellule et verrouillé.

Si l'essai doit se dérouler à température homogène, le serpentin chauffant et les protections isolantes sont disposés autour du corps de la cellule. La cellule est alors mise en préchauffe pendant 12 heures à la température de l'essai.

Si l'essai est prévu avec une aide thermique au niveau du media filtrant ou au niveau du pseudo piston, la température de consigne est réglée.

La pression de filtration est réglée à l'aide du détendeur et du capteur de pression placé sur le circuit d'air.

Mise en place de la suspension et du pseudo piston

Lorsqu'une partie de la suspension remonte dans les tubes de purges (cf. paragraphe III.2.2) jusqu'à un niveau déterminé, les vannes du système de purge sont fermées. Même si nous supposons que la concentration initiale de la suspension dans la cellule est identique à celle de la suspension préparée, il est possible que cette concentration varie faiblement en fonction des expériences. Pendant la mise en place du piston, les particules peuvent en effet sédimenter et une suspension moins concentrée remonte dans les tubes de purges. Ainsi, la fraction massique utilisée dans l'analyse des résultats (égale à celle de la suspension préparée avant introduction) peut être légèrement différente de la fraction massique réelle. L'incertitude sur ce phénomène n'est pas prise en compte dans les incertitudes indiquées dans les différents tableaux de ce chapitre.

Le couvercle de la cellule est alors placé sur le corps de la cellule et verrouillé.

Acquisition des mesures

L'acquisition des mesures démarre avant le début de l'expérience. L'instant initial sur le fichier résultat correspond à la première variation de masse enregistrée par la balance. La cellule est alors mise simultanément sous pression et en température dans le cas d'un essai où l'aide thermique est apportée dès le début de la séparation.

Conduite de l'essai

Le filtrat est recueilli dans un récipient dont la masse est enregistrée à intervalles de temps réguliers (environ 1,2 secondes). La pression liquide au niveau du pseudo piston, la position du piston, les températures sur l'axe de la cellule ainsi qu'au niveau du media filtrant et du pseudo piston sont enregistrées périodiquement via une centrale d'acquisition. L'affichage de la pression liquide au niveau du pseudo piston permet de détecter la fin de la phase filtration et le début de la compression (chute rapide de pression).

Ainsi, il est possible de déclencher l'aide thermique au niveau du media filtrant ou au niveau du pseudo piston, en début de compression, ou à un instant correspondant à une certaine pression liquide au niveau du pseudo piston.

Après un temps déterminé de compression, l'essai est arrêté (arrêt de l'alimentation des résistances chauffantes si nécessaire, arrêt de l'acquisition des données). La cellule étant encore sous pression, le liquide localisé entre le piston et le pseudo piston est aspiré par le système de purge. La cellule est alors mise à la pression atmosphérique. Une fois le bas de la cellule démonté, le piston est descendu manuellement et le gâteau récupéré, pesé (masse

humide : m_h) et mis à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse. La masse sèche du gâteau est alors déterminée par pesée (m_s). La porosité moyenne du gâteau est elle déterminée à l'aide des masses précédentes et de la hauteur du piston en fin d'essai (h_f) :

$$\varepsilon^* = 1 - \frac{m_s}{\rho_s (h_f A)} \quad (\text{IV.1})$$

ainsi que la siccité finale :

$$S = \frac{m_s}{m_h} \quad (\text{IV.2})$$

La mesure de la masse sèche utilisée dans le calcul de la porosité moyenne en fin d'essai est entachée d'une erreur liée au fait que dans le cas de matériaux pâteux comme le Kaolin, une certaine quantité de matière humide reste sur la face inférieure du pseudo piston et sur le filtre. De plus, lorsque les gâteaux sont très secs (ce qui est le cas dans certaines conditions expérimentales) ils sont très compacts et « cuits », ce qui rend difficile leur extraction de la cellule sans perte de matière. Cette erreur n'est pas intégrée dans les calculs d'incertitudes de ce chapitre, ce qui peut expliquer que, dans certains cas, les porosités moyennes finales des gâteaux ne varient pas rigoureusement dans le même sens que les siccités finales.

IV.2. Aide thermique au niveau du media filtrant

Au chapitre 2, nous avons mis en évidence l'intérêt d'une aide thermique au niveau du media filtrant. L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus pour ce mode de fonctionnement avec les deux suspensions caractérisées au chapitre 3 sont rassemblés dans cette partie. Ils concernent tout d'abord des essais réalisés avec des suspensions de Talc (matériau peu compressible) :

- ✓ à basses températures ($T < 100$ °C),
- ✓ à hautes températures ($T > 100$ °C) qui permettent de mettre en évidence un phénomène d'effondrement des gâteaux.

Ce phénomène sera alors étudié en faisant varier :

- ✓ la température imposée au niveau du media filtrant,
- ✓ la pression de filtration – compression,
- ✓ le moment de la mise en œuvre de l'aide thermique,
- ✓ la concentration des suspensions.

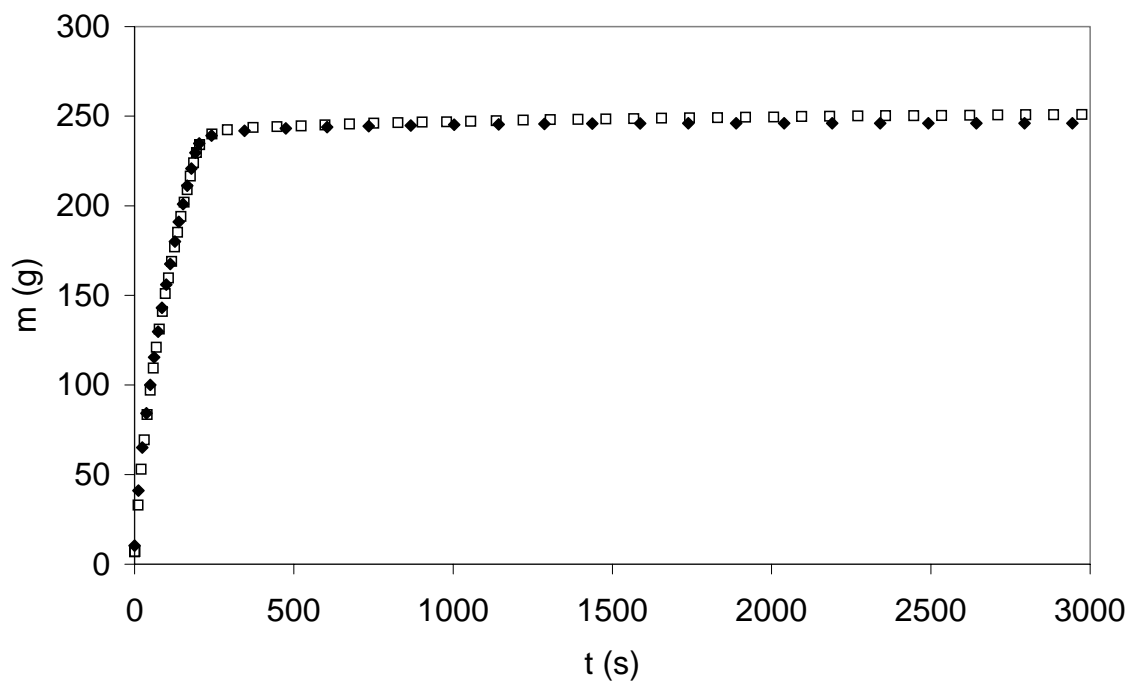
Une étude similaire sera menée sur un matériau très compressible (Kaolin) qui permettra de montrer que la compressibilité du matériau influence fortement le phénomène d'effondrement.

IV.2.1. Etude d'un matériau peu compressible

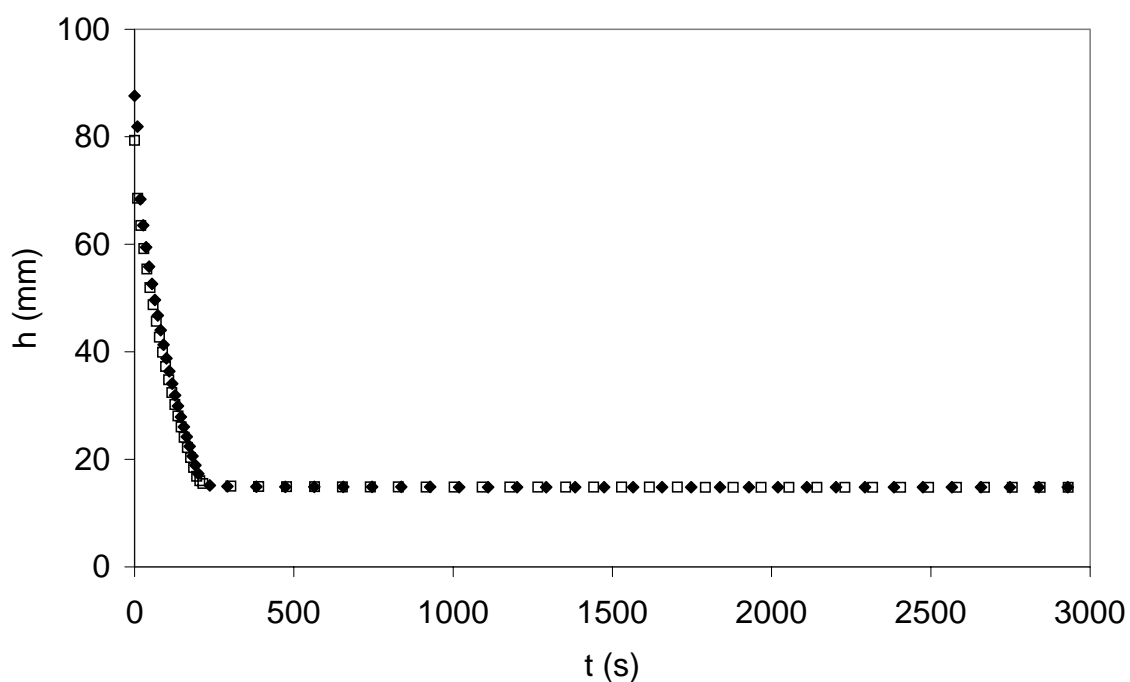
IV.2.1.1. Aide thermique à basse température ($T < 100\text{ °C}$)

Dans le chapitre 3, les différents essais menés en conditions normales (température ambiante) ont permis de montrer que les suspensions de Talc se filtrent facilement. Notamment, les temps de filtration sont courts ($< 200\text{ s}$) et les débits spécifiques sont élevés. Dans ces conditions, l'aide thermique au niveau du media filtrant a peu de chance d'accroître les performances du procédé de séparation pendant la phase de filtration. De façon à atteindre la température de consigne au niveau du media filtrant le plus rapidement possible, l'aide thermique est néanmoins mise en œuvre dès le début de l'essai.

La figure IV.1 compare un essai ($\Delta P = 1,6\text{ bar}$; $s = 0,23$) pour lequel la température de media filtrant a été réglée à 90 °C , avec la même opération réalisée à température ambiante.



(a)



(b)

Fig. IV.1. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc

($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$)

◆ : $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; □ : $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

(a). Evolution de la masse de filtrat

(b). Evolution de la position du pseudo piston

(Essais 8 et 9).

Comme le montrent les figures IV.1 (a et b), l'aide thermique au niveau du média filtrant à basse température n'a pas d'influence sur la filtration d'une suspension de Talc. En effet, les résultats sont similaires tant au niveau des courbes de récupération de filtrat qu'au niveau de celles de la position du pseudo piston. Les temps de filtration ainsi que les propriétés intrinsèques des gâteaux (porosité et siccité) en fin de filtration et en fin de compression sont identiques, aux erreurs de mesures près (Tableau IV.1).

Température (°C)	20	90
Siccité (%)	69,4 ± 0,3	69,4 ± 0,3
L (mm)	14,85 ± 0,01	14,84 ± 0,01
$\varepsilon^*_{\text{filt}}$ (-)	0,54 ± 0,02	0,55 ± 0,02
ε^* (-)	0,50 ± 0,02	0,49 ± 0,02
t_{filt} (s)	191 ± 9	191 ± 9

Tableau IV.1. Propriétés des gâteaux de Talc ($\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$)
(Essais 8 et 9).

Le point de transition entre la phase de filtration et de compression est déterminé de deux façons différentes : la méthode graphique décrite au paragraphe II.5 et la décroissance brusque de la pression liquide mesurée à la surface de la suspension pendant la filtration et à la surface du gâteau pendant la compression (Fig. IV.2).

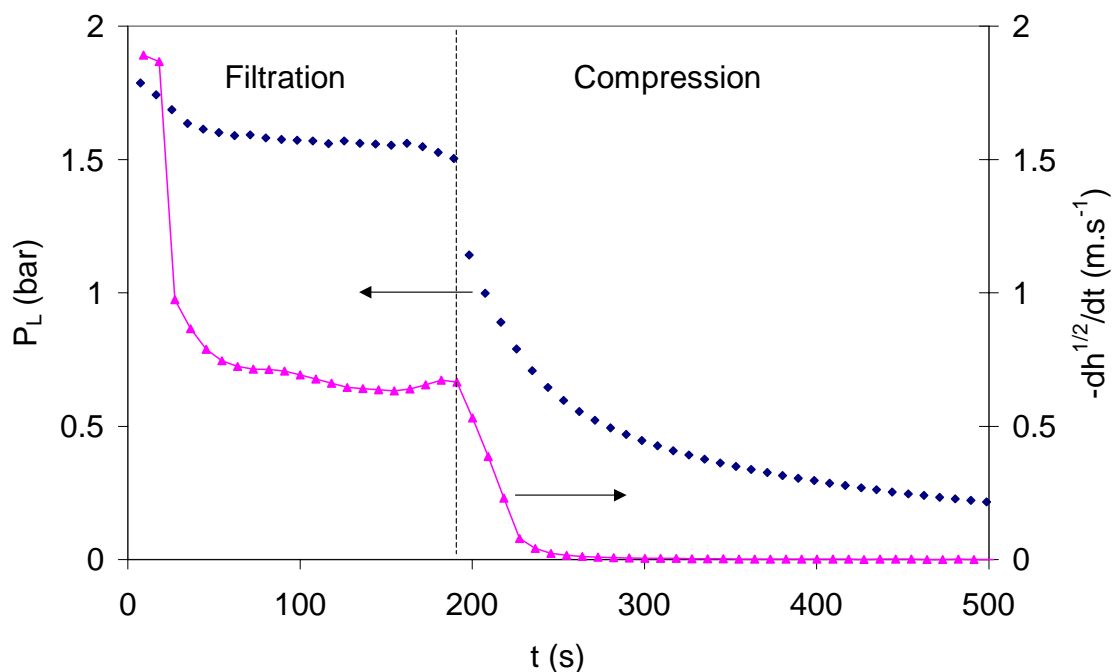


Fig. IV.2. Détermination du point de transition entre la phase de filtration et de compression.
(Suspension de Talc ; $T = 20$ °C ; $\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$)
(Essai 8).

Sur la figure IV.3, le champ de température sur l'axe du système est représenté en même temps que la température au niveau du media filtrant qui permet d'effectuer la régulation (cf. Fig. III.13).

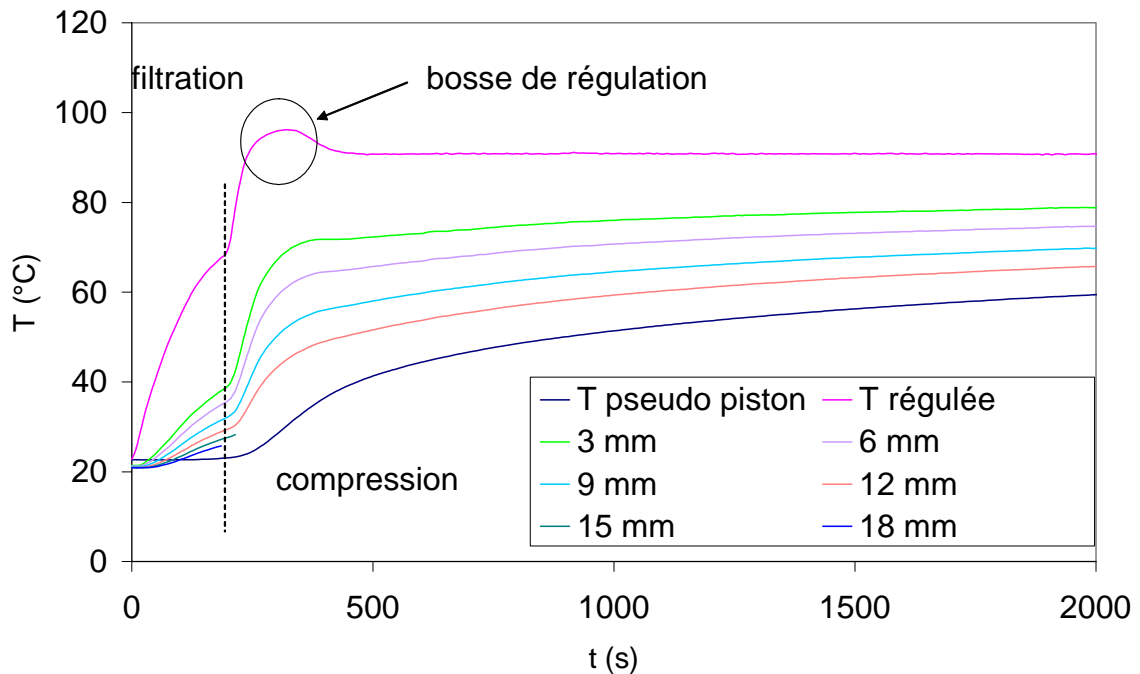


Fig. IV.3. Champ de température pour une déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc ($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$) (Essai 9).

On observe, dans un premier temps, une montée en température relativement lente du fait des débits spécifiques de filtrat élevés en début d'essais (Fig. IV.4). Les mesures effectuées à respectivement 15 et 18 mm au dessus du media filtrant ne sont plus reportées sur la figure IV.3 à partir du moment où les points considérés se trouvent en arrière du pseudo piston.

Lorsque la compression débute, une diminution nette du débit spécifique de filtrat induit une transition bien marquée sur le champ de température avec une montée en température beaucoup plus rapide.

La température mesurée au niveau du media filtrant, du fait de l'inertie de la régulation, dépasse légèrement la température de consigne (bosse de régulation) avant de se stabiliser à la température imposée.

Tant que la température de consigne n'est pas atteinte, la puissance dissipée dans l'élément chauffant est maximale pour chuter ensuite fortement lorsque la consigne est atteinte. Des exemples d'évolution de la puissance dissipée dans l'élément chauffant seront présentés dans la suite du document.

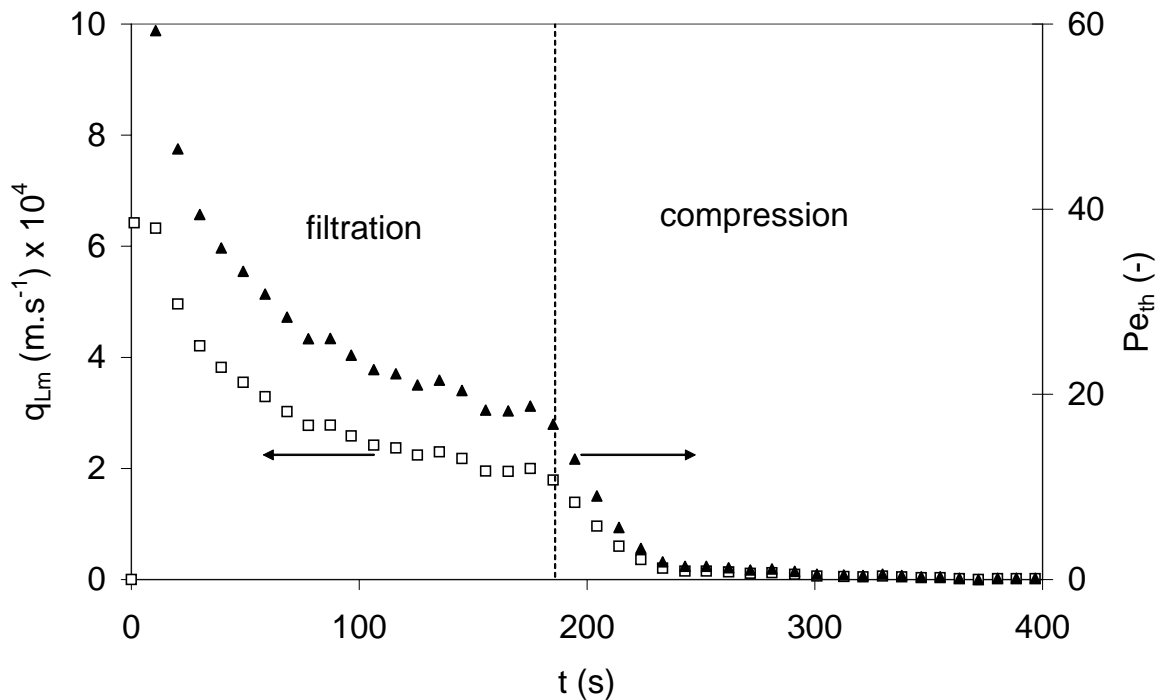


Fig. IV.4. Débit de filtrat spécifique et nombre de Péclet thermique durant un essai de filtration – compression assisté thermiquement d’une suspension de Talc ($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$) (Essai 9).

Dans cet essai, durant la phase de filtration, l’essentiel du flux de chaleur est évacué par le filtrat, ce qui ne permet pas d’atteindre des températures suffisamment élevées pour induire une réduction significative de la viscosité du liquide dans la partie inférieure du gâteau. Ceci peut être mis en évidence en traçant l’évolution du nombre de Péclet thermique (Pe_{th}) au cours du temps. Le nombre de Péclet thermique quantifie le rapport entre les effets convectifs et les effets conductifs. Par définition :

$$Pe_{th} = \frac{uX}{a_T} \quad (\text{IV.3})$$

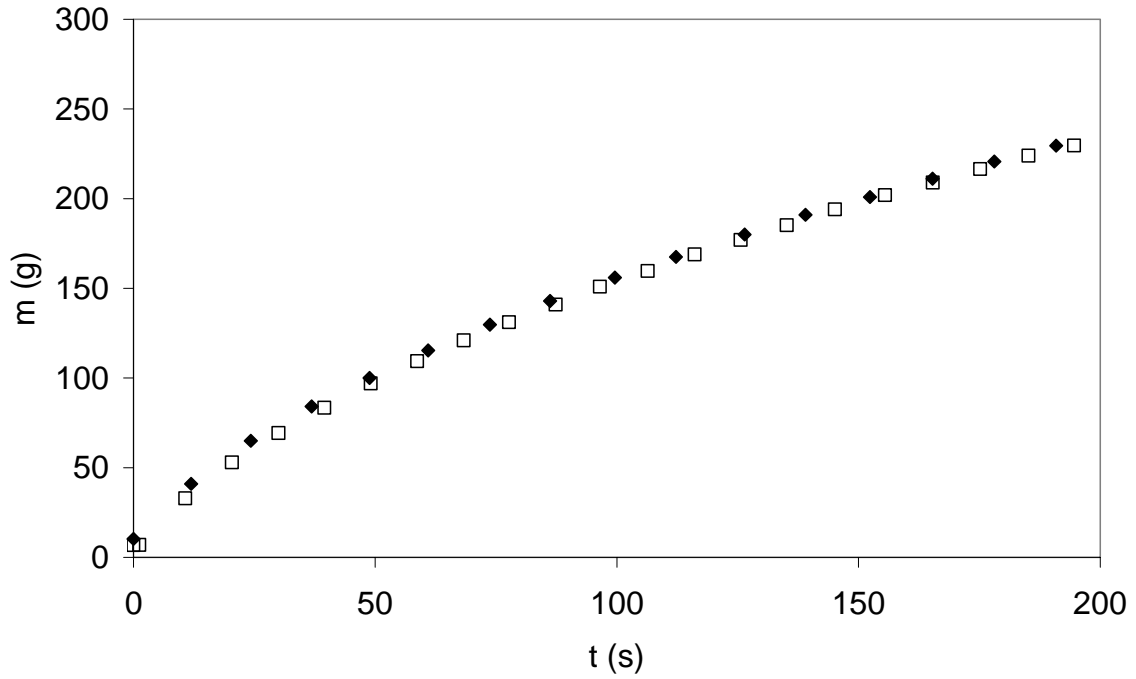
où u est une vitesse caractéristique de l’écoulement choisie ici égale à q_{Lm} , X une longueur caractéristique du système prise égale à l’épaisseur du gâteau en fin de filtration et a_T la diffusivité thermique du milieu prise égale à celle de l’eau.

Durant la phase de filtration, le Péclet thermique reste toujours supérieur à 20 et décroît rapidement au cours de la compression (Fig. IV.4), ce qui correspond à la montée en température nettement plus rapide dans le gâteau. Cependant, la réduction de viscosité du fluide qui en découle ne semble pas modifier la façon dont le gâteau se structure au cours de la compression.

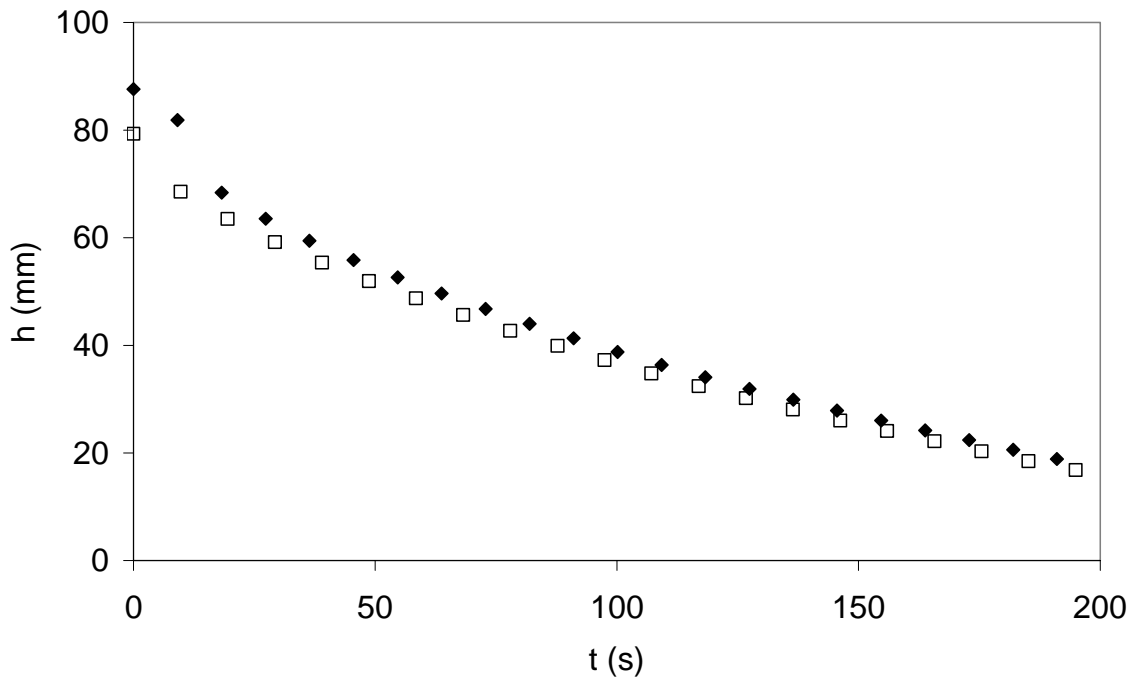
Dans cette partie, nous avons étudié l'effet d'une aide thermique localisée pour une température donnée, sur la filtration compression d'un matériau peu compressible. Cette aide thermique n'a pas permis d'améliorer la cinétique de séparation. Une étude plus complète, dans les mêmes conditions mais en utilisant un matériau très compressible pour lequel les débits spécifiques de filtrat sont beaucoup plus faibles, sera présentée dans la suite du document.

IV.2.1.2. Aide thermique à haute température ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) - effondrement

Dans le cas d'un matériau faiblement compressible, l'effet de l'aide thermique localisée au niveau du media filtrant n'a pas pu être mis en évidence pour une température imposée égale à $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un essai a été réalisé dans des conditions analogues mais en imposant cette fois une température au niveau du media filtrant égale à $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour atteindre rapidement des niveaux de température élevés dans le gâteau, l'aide thermique a été mise en œuvre dès le début de l'essai (de la même manière que précédemment).



(a)



(b)

Fig. IV.5. Etape de filtration d'une déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc
 ($\Delta P = 1,6\text{ bar}$; $s = 0,23$)
 ♦ : $T = 20\text{ °C}$; □ : $T = 125\text{ °C}$
 (a). Evolution de la masse de filtrat
 (b). Evolution de la position du pseudo piston
 (Essais 8 et 10).

Comme le montrent les figures IV.5 (a et b) traçant l'évolution de la masse de filtrat et de la position du pseudo piston en fonction du temps, l'aide thermique n'a pas d'effet sur la phase de filtration, pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe précédent.

Sur la figure IV.6 sont présentés le champ de température sur l'axe du système ainsi que l'évolution de la position du pseudo piston pour un essai réalisé à température ambiante et dans le cas considéré.

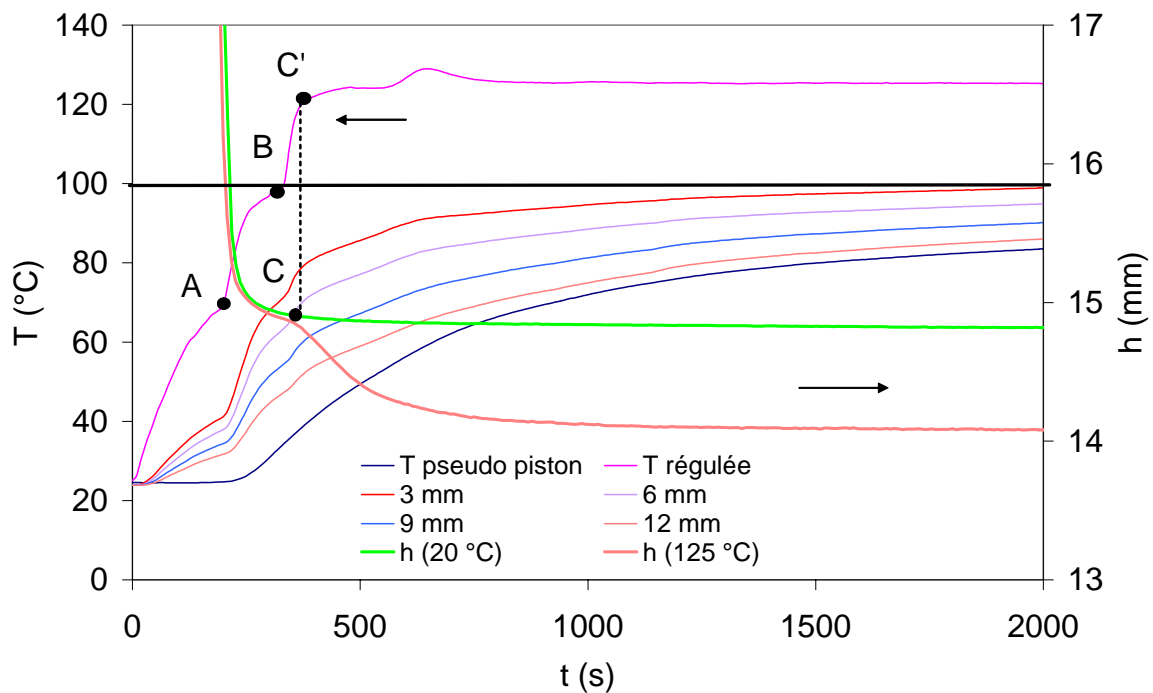


Fig. IV.6. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc
 ($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$)
 (Essai 10).

Concernant le champ de température, on retrouve les mêmes caractéristiques que dans le cas de l'essai réalisé à $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (montée en température lente en filtration puis plus rapide lorsque débute la compression, point A sur la figure IV.6, et bosse de régulation). Il apparaît également, au moment où la température du media filtrant approche $100 \text{ }^\circ\text{C}$, un palier (point B sur la figure IV.6) correspondant à la vaporisation du liquide au voisinage de l'élément chauffant. Un deuxième palier de température est observé (point C' sur la figure IV.6) juste avant la bosse de régulation. Ce palier semble correspondre à la vaporisation d'une partie du liquide dans le gâteau, au voisinage du media filtrant.

L'évolution de la position du pseudo piston qui jusque là coïncidait avec celle obtenue à température ambiante, subit une décroissance rapide (point C sur la figure IV.6). Cette décroissance semble ralentir lorsque la température au niveau du media filtrant augmente à nouveau (début de la bosse de régulation). L'évolution de l'épaisseur du gâteau suit alors une

évolution analogue à celle obtenue à température ambiante. Nous ferons référence au phénomène original de décroissance rapide de l'épaisseur du gâteau qui semble correspondre à un changement de structure de l'agencement des particules sous le terme d'effondrement du gâteau.

Dans les conditions de l'expérience, l'amplitude de l'effondrement est de 0,7 mm. Cette variation d'épaisseur correspond à 5 % de l'épaisseur du gâteau avant effondrement en un temps d'environ 400 s. De cet effondrement résulte une chute rapide de la porosité moyenne du gâteau et un gain conséquent en terme de siccité finale (cf. Tableau IV.2).

ε^* (-)	$0,45 \pm 0,02$
$\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_{av}^*$ (-)	$0,039 \pm 0,002$
Siccité (%)	$89,7 \pm 0,03$

Tableau IV.2. Propriétés du gâteaux de Talc ($\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$; $T = 125$ °C)
(Essai 10).

Dans le tableau IV.2, le rapport $\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_{av}^*$ (-) est défini comme le rapport de la différence de porosité moyenne du gâteau avant et après effondrement sur sa porosité moyenne avant effondrement (ε_{av}^*). Un gain de siccité de près de 20 % est obtenu par rapport à une opération à température ambiante.

L'effondrement est logiquement accompagné d'une reprise de production qui est bien mise en évidence sur la figure IV.7 donnant l'évolution de la masse de filtrat tout au long de l'essai.

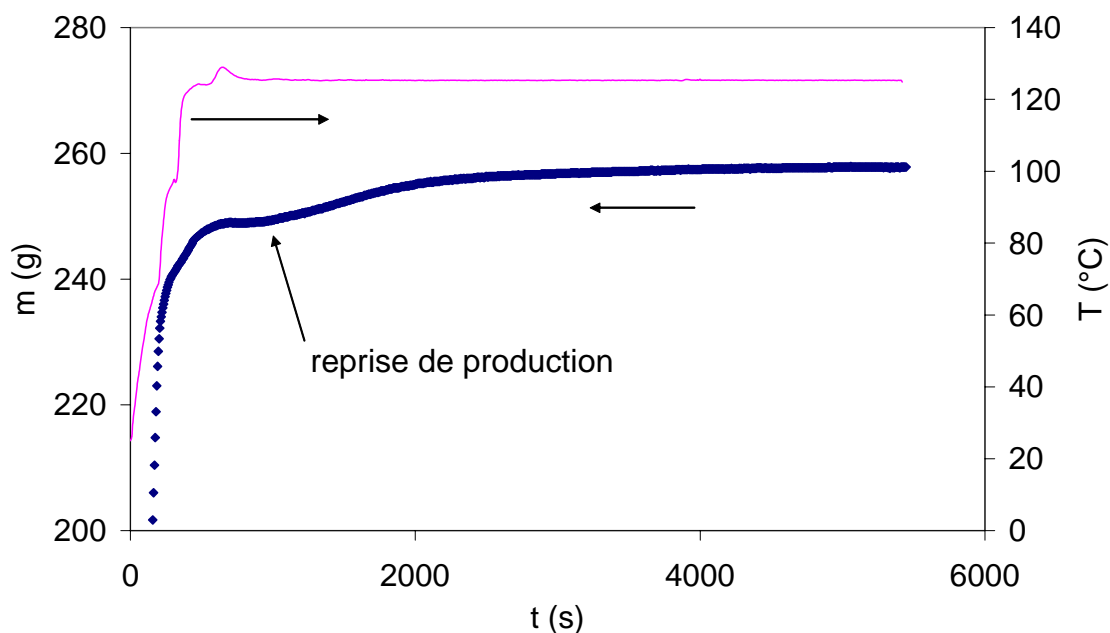


Fig. IV.7. Evolution de la masse de filtrat recueillie pour une déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc ($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$) (Essai 10).

L'évaluation de l'intensité électrique qui circule dans l'élément chauffant permet d'obtenir la puissance dissipée dans la résistance. Cette puissance dissipée est maximale (Fig. IV.8) pendant l'effondrement puisque la température régulée n'a pas atteint la température de consigne.

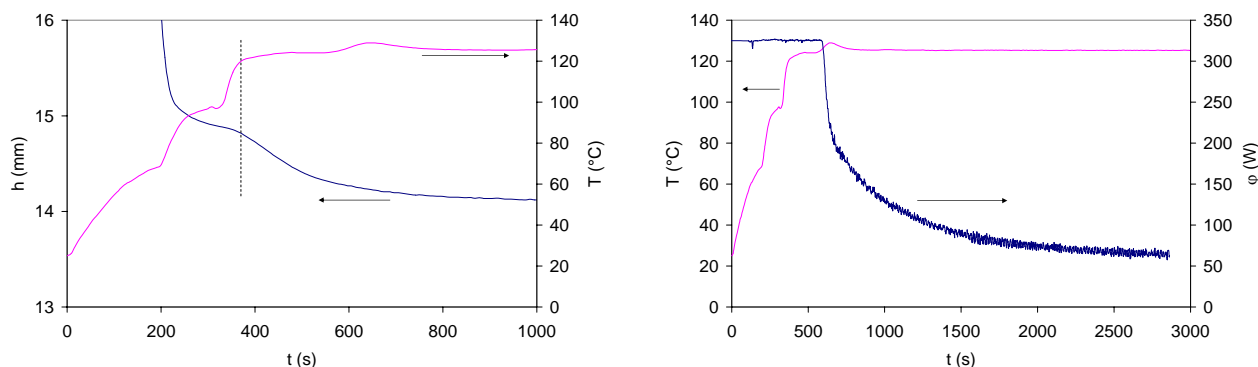


Fig. IV.8. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc. Evolution comparée hauteur de gâteau – puissance – température régulée ($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$) (Essai 10).

Pour mieux mettre en évidence le rôle des effets thermiques sur le phénomène d'effondrement, l'évolution de la porosité moyenne du gâteau est représentée (Fig. IV.9) en fonction de la température au niveau du media filtrant.

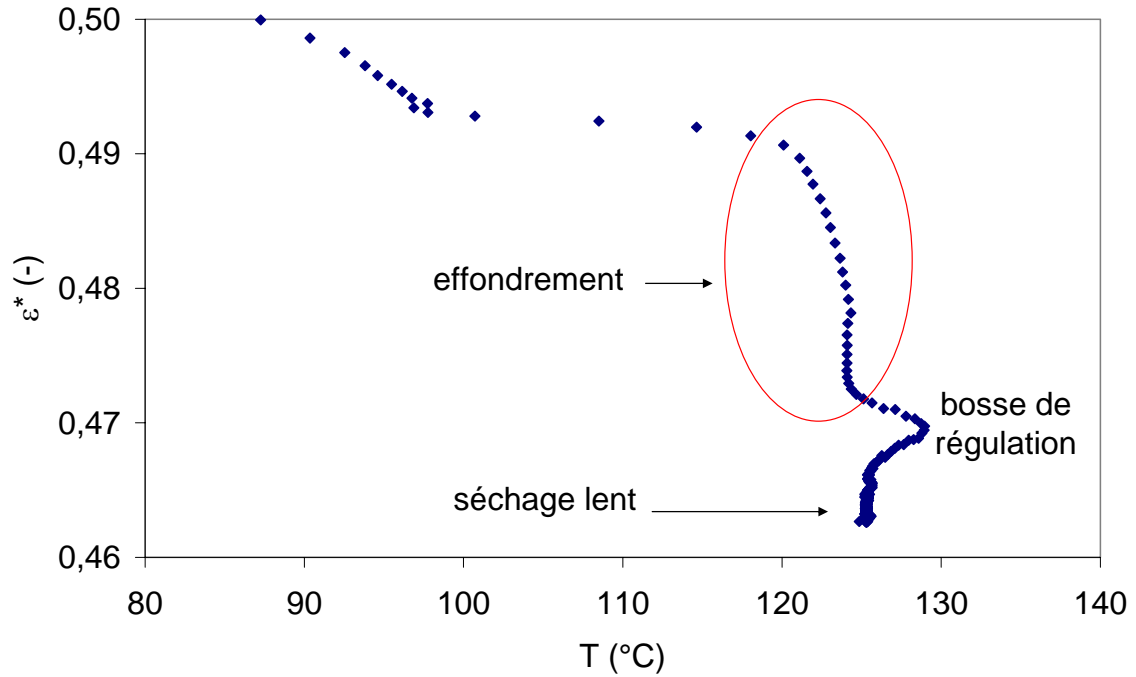


Fig. IV.9. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc.
Evolution de la porosité moyenne du gâteau en fonction de la température régulée
($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$)
(Essai 10).

Le phénomène est alors clairement relié à une stagnation de la température du média filtrant aux alentours de $124 \text{ }^\circ\text{C}$. La suite de la réduction de la porosité moyenne du gâteau, de par son évolution lente au cours du temps, correspond plus vraisemblablement à un phénomène de retrait au cours du séchage sous contrainte qui s'opère après effondrement.

Il est à noter que, durant la phase de compression et par conséquent durant le phénomène d'effondrement, l'essentiel du gâteau reste à des températures relativement faibles ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$, Fig. IV.10).

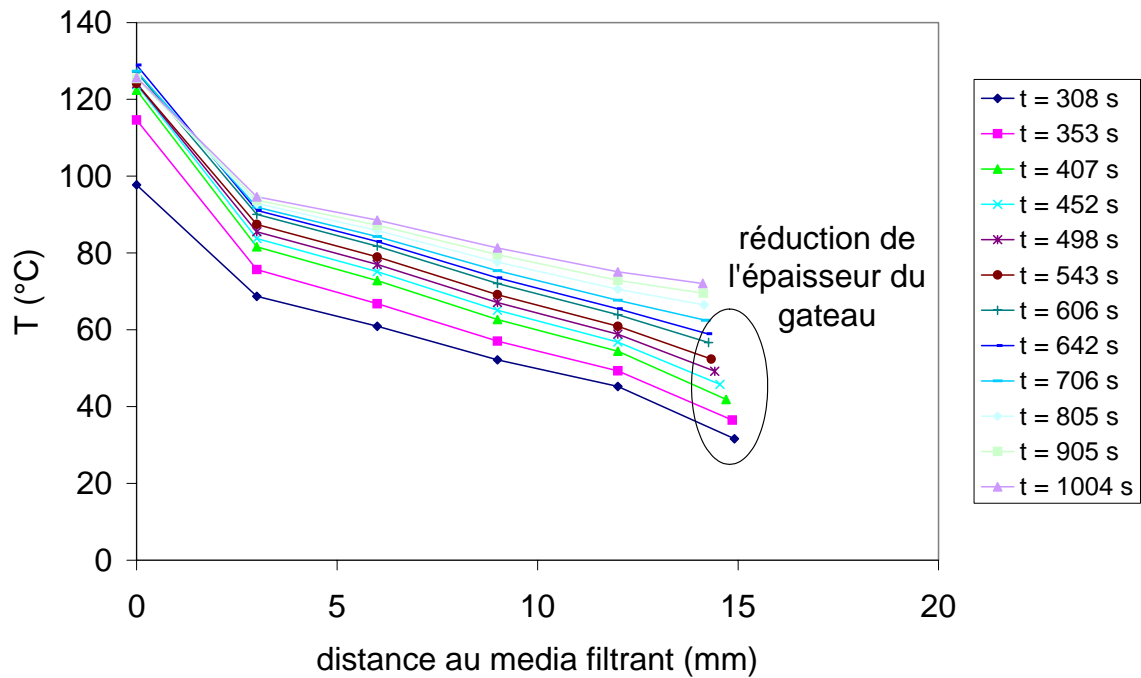


Fig. IV.10. Profils de température dans le gâteau pendant la phase de compression
 (Talc ; $\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$; $T = 125$ °C)
 (Essai 10).

D'autre part, au moment où apparaît l'effondrement, la pression relative du liquide mesurée à la surface du gâteau est proche de zéro (Fig. IV.11).

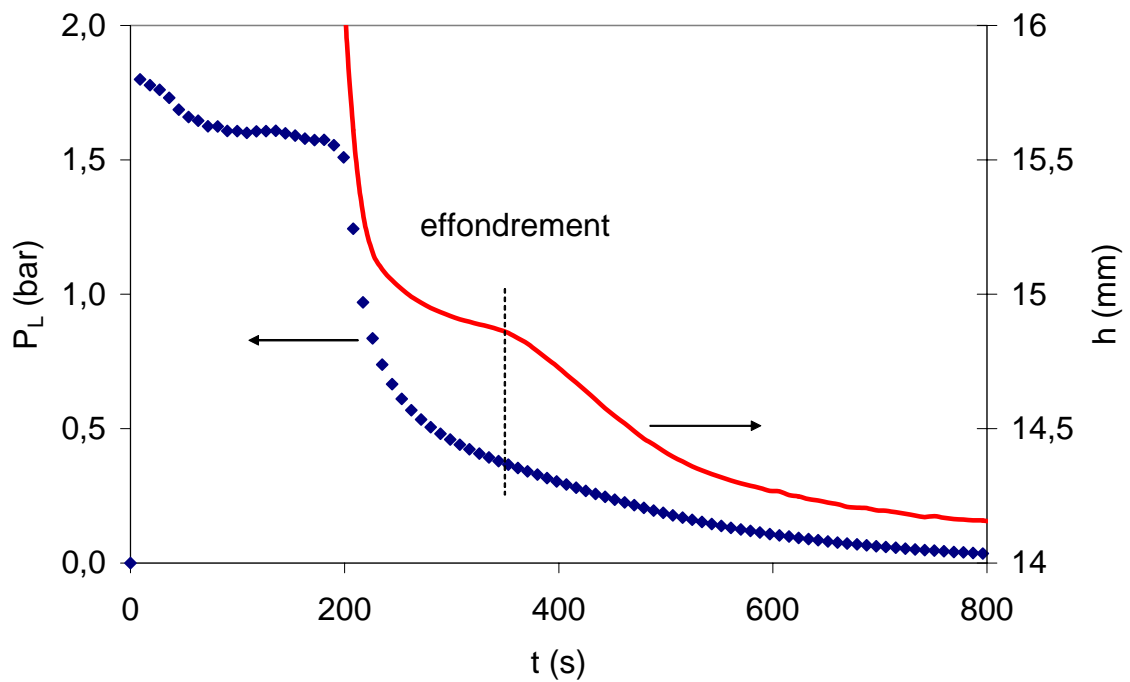


Fig. IV.11. Evolution comparée pression liquide à la surface du gâteau et position du pseudo piston
 (Talc ; $\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$; $T = 125$ °C)
 (Essai 10).

Cela indique que la structuration du gâteau liée aux effets mécaniques est pratiquement achevée (cf. paragraphe III.3.2)

Le niveau de température (environ 124 °C) atteint au moment du déclenchement de l'effondrement est, semble-t-il, associé à un changement de phase du liquide dans le gâteau à proximité du media filtrant. La pression liquide étant faible, le changement de phase devrait apparaître aux environs de 100 °C. Ce paradoxe apparent est probablement lié à la localisation du thermocouple de régulation placé à 2 mm sous le media filtrant (cf. Fig. III.13). Il est donc possible que la température de 124 °C mesurée au moment de l'effondrement à cet endroit corresponde à une température proche de 100 °C à l'interface gâteau / media filtrant. Cette hypothèse sera discutée et des éléments de vérification seront apportés dans la suite du document.

IV.2.1.3. Caractérisation de l'effondrement

Le phénomène d'effondrement qui vient d'être décrit n'a, à notre connaissance, pas été rapporté dans la littérature relative à la séparation liquide – solide. Les mécanismes mis en jeu étant inconnus, nous avons effectué une étude des différents paramètres susceptibles d'influencer cet effondrement. Sur la base de l'essai réalisé à température ambiante avec une suspension de Talc de fraction massique $s = 0,23$ (pour une pression de fonctionnement de 1,6 bar) nous avons fait varier les paramètres suivants :

- ✓ la température imposée au niveau du media filtrant,
- ✓ la pression de filtration – compression,
- ✓ le moment de la mise en œuvre de l'aide thermique,
- ✓ la concentration de la suspension.

Nous avons, de plus, tenté de mettre en évidence le rôle du couplage mécanique / thermique sur l'effondrement.

Les résultats sont présentés sous la forme des courbes donnant l'évolution de la taille des gâteaux rapportées à leur taille avant effondrement (h/h_{av}). Les autres données expérimentales sont données en annexe C.

Lorsque les effondrements interviennent à des instants différents, le rapport h/h_{av} est tracé en fonction de la variable t_{eff} dont l'origine correspond au déclenchement de chacun des effondrements.

IV.2.1.3.1. Influence de la température du media filtrant

La figure IV.12 décrit l'effondrement des gâteaux de Talc pour différentes températures de media filtrant (125 °C, 150 °C et 170 °C).

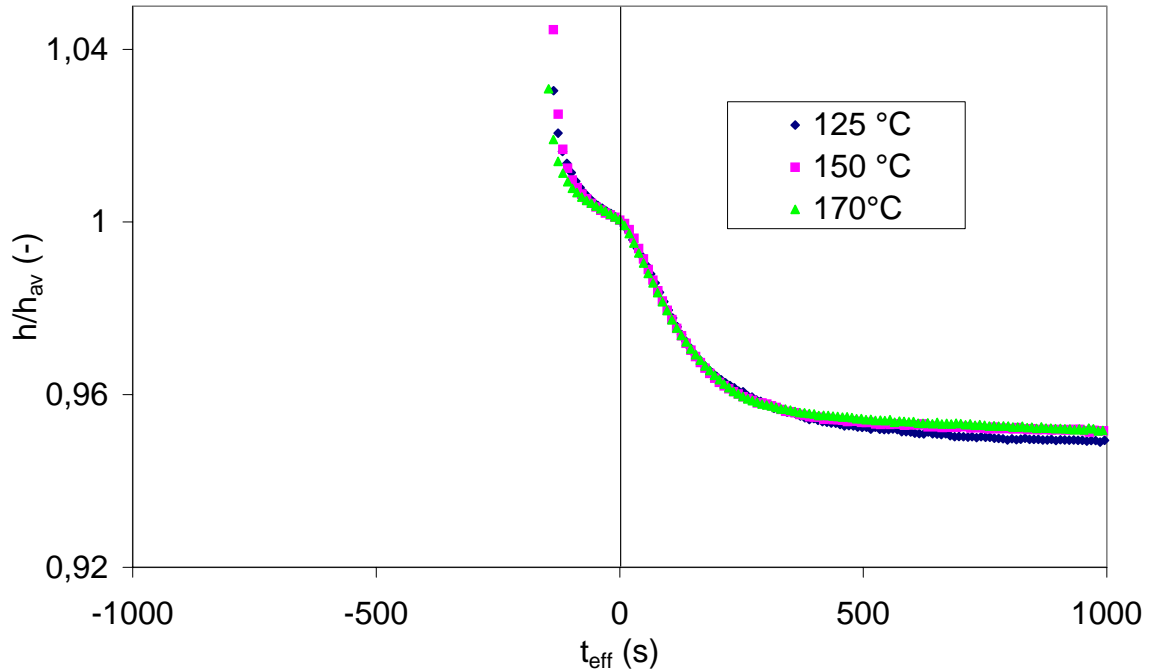


Fig. IV.12. Effondrement des gâteaux de Talc pour trois températures de media filtrant ($\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$) (Essais 10, 11 et 12).

T (°C)	$\Delta h/h_{av}$ (-)	$\Delta \varepsilon^*/\varepsilon^*_{av}$ (-)
125	$0,04 \pm 0,01$	$0,039 \pm 0,002$
150	$0,04 \pm 0,01$	$0,040 \pm 0,002$
170	$0,04 \pm 0,01$	$0,041 \pm 0,002$

Tableau IV.3. Effondrements relatifs des gâteaux de Talc ($\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$) (Essai 10, 11 et 12).

Il semble, d'après la figure IV.12 et le tableau IV.3, que l'amplitude et la vitesse de l'effondrement ne soient pas affectées par la température imposée au niveau du media filtrant. En réalité, pendant toute l'opération et donc jusqu'à la fin de l'effondrement, la puissance dissipée dans l'élément chauffant est maximale car la température du media filtrant n'a pas atteint la consigne. Les essais donnent donc des résultats identiques puisque l'effondrement apparaît, pour chacun des essais, pour la même valeur de température mesurée au niveau du media filtrant (≈ 124 °C) au même niveau de température (Fig. IV.13).

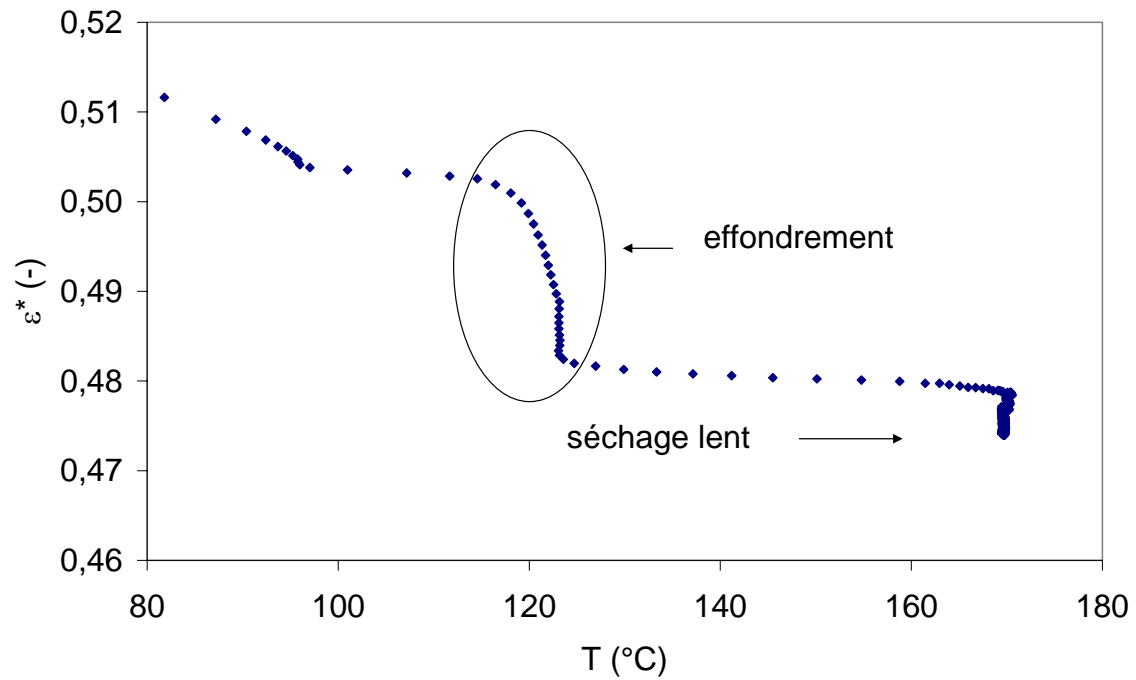


Fig. IV.13. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc
Evolution de la porosité moyenne du gâteau en fonction de la température régulée
($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
(Essai 12).

IV.2.1.3.2. Influence de la pression de filtration - compression

La figure IV.14 décrit l'effondrement des gâteaux de Talc pour différentes pressions de fonctionnement (1,6 bar ; 4, 2 bar ; et 6 bar).

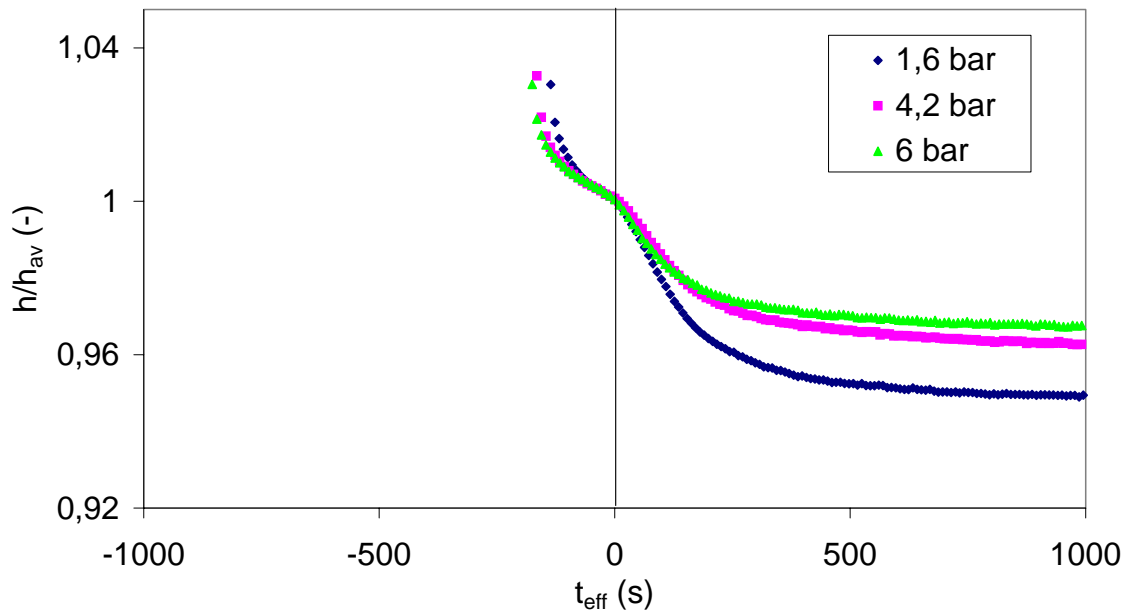


Fig. IV.14. Effondrement des gâteaux de Talc pour trois pressions de fonctionnement
 ($T = 125\text{ °C}$; $s = 0,23$)
 (Essais 10, 13 et 14).

ΔP (bar)	$\Delta h/h_{av}$ (-)	$\Delta \varepsilon^*/\varepsilon^*_{av}$ (-)
1,6	$0,04 \pm 0,01$	$0,039 \pm 0,002$
4,2	$0,03 \pm 0,01$	$0,035 \pm 0,002$
6	$0,02 \pm 0,01$	$0,030 \pm 0,002$

Tableau IV.4. Effondrements relatifs des gâteaux de Talc ($T = 125\text{ °C}$; $s = 0,23$)
 (Essais 10, 13 et 14).

On observe ici une diminution de l'amplitude de l'effondrement lorsque la pression augmente. Ainsi, plus les gâteaux sont compactés, moins l'effondrement est significatif. La porosité moyenne des gâteaux avant effondrement détermine l'amplitude de l'effondrement (Fig. IV. 15).

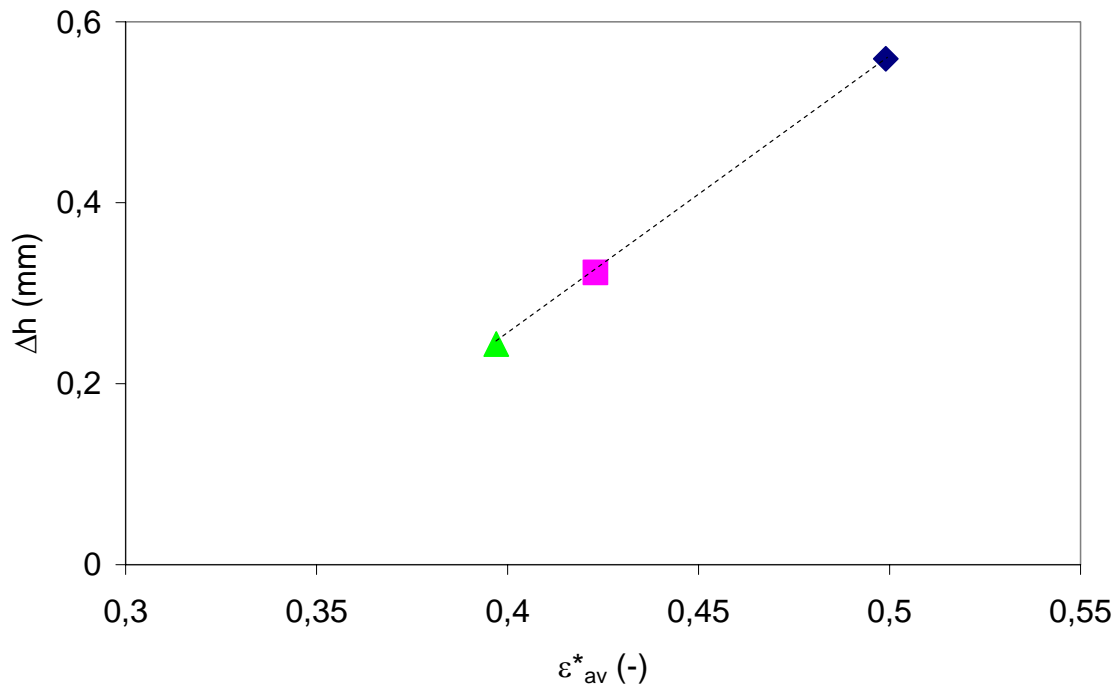


Fig. IV. 15. Amplitude des effondrements en fonction de la porosité moyenne des gâteaux de Talc avant effondrement (Essais 10, 13 et 14).

IV.2.1.3.3. Influence du moment de la mise en œuvre de l'aide thermique

Intuitivement, il apparaît que la structure du gâteau doit jouer un rôle sur le phénomène d'effondrement. Le dispositif expérimental utilisé ne permet pas de déclencher l'effondrement aussi tôt qu'on le souhaiterait (en cours de filtration par exemple) du fait de la limitation de la puissance maximale de chauffe disponible. Trois types d'essais ont néanmoins été menés, l'un pour lequel l'aide thermique est mise en œuvre dès le début de l'essai, un autre où l'aide thermique est mise en œuvre dès la fin de la filtration et un dernier pour lequel l'aide thermique intervient à la fin de la compression.

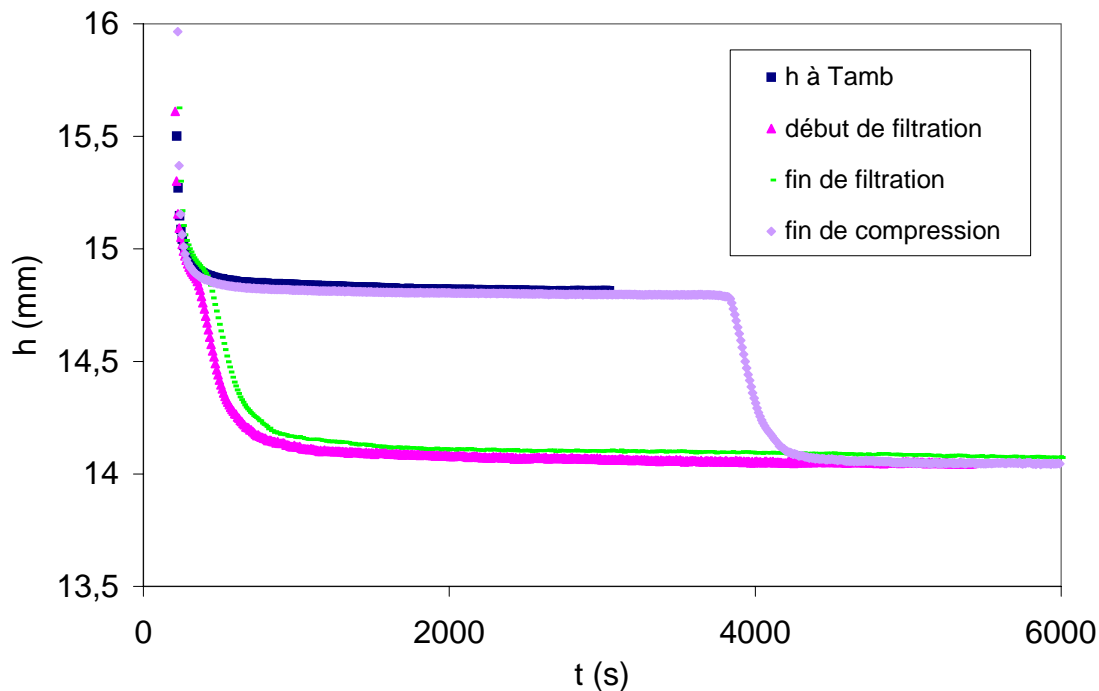


Fig. IV.16. Effondrement des gâteaux de Talc pour différents instants du déclenchement de l'aide thermique ($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$; $s = 0,23$) (Essais 8, 10, 15 et 16).

Instant de déclenchement de l'aide thermique	$\Delta h/h_{av}$ (-)	$\Delta \varepsilon^*/\varepsilon^*_{av}$ (-)
Début d'essai	$0,04 \pm 0,01$	$0,039 \pm 0,002$
Fin de filtration	$0,04 \pm 0,01$	$0,041 \pm 0,002$
Fin de compression	$0,04 \pm 0,01$	$0,040 \pm 0,002$

Tableau IV.5. Effondrements relatifs des gâteaux de Talc ($T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta P = 1,6 \text{ bar}$) (Essais 10, 15 et 16).

On constate que les effondrements (amplitude et vitesse) se déroulent de façon similaire en dépit d'une structuration probablement différente des gâteaux (Fig. IV.16). Les données relatives aux effondrements sont reportées dans le tableau IV.5 et confirment qu'aux erreurs expérimentales près, les variations d'épaisseur et de porosité avant et après effondrement sont les mêmes. Cependant, le Talc étant un matériau faiblement compressible, les variations de porosité moyenne des gâteaux (et donc les modifications structurelles) sont faibles au cours de la compression. Les effondrements sont alors identiques dans ce type d'expérience pour le matériau considéré.

IV.2.1.3.4. Influence de la concentration des suspensions

La modification de la fraction massique en solide des suspensions (à masse de liquide constante) va permettre de faire varier l'épaisseur des gâteaux formés. Quatre essais ont été menés pour quatre fractions massiques en solide différentes ($s = 0,11$; $s = 0,23$; $s = 0,47$; $s = 0,67$). Les effondrements ont été provoqués en fin de compression (le moment de la mise en œuvre de l'aide thermique n'ayant pas eu d'influence sur l'effondrement). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.17.

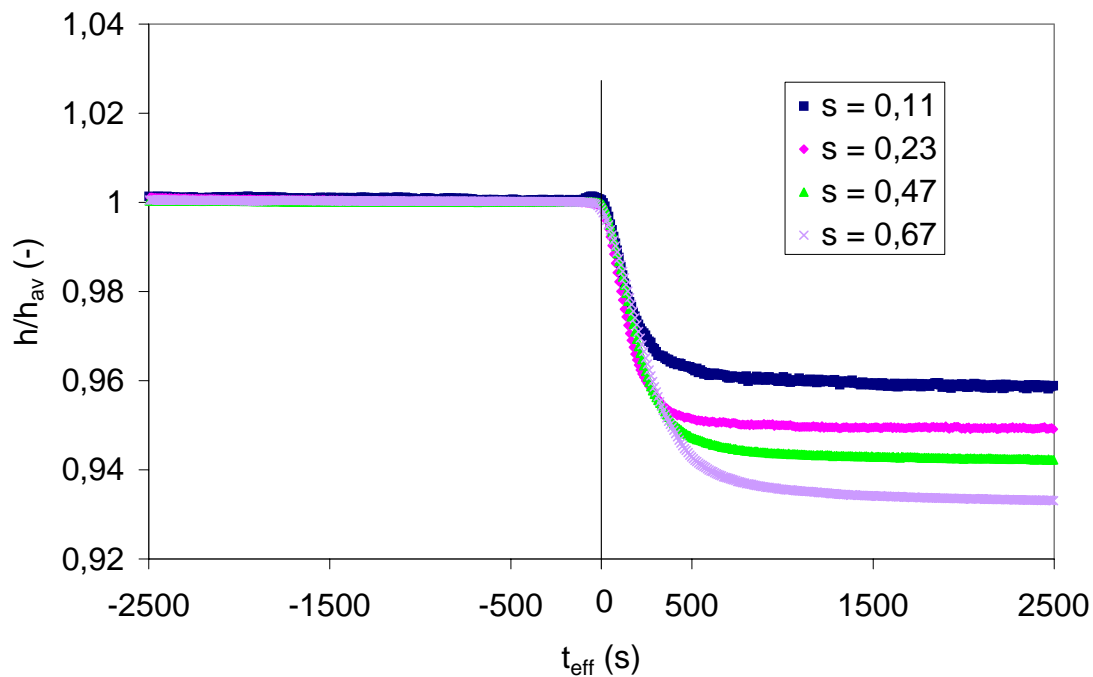


Fig. IV.17. Effondrement des gâteaux de Talc différentes concentrations
($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$)
(Essais 16, 17, 18 et 19).

s (-)	$\Delta h/h_{av}$ (-)	$\Delta \epsilon^*/\epsilon^*_{av}$ (-)
0,11	$0,03 \pm 0,01$	$0,030 \pm 0,002$
0,23	$0,04 \pm 0,01$	$0,039 \pm 0,002$
0,47	$0,04 \pm 0,01$	$0,047 \pm 0,002$
0,67	$0,05 \pm 0,01$	$0,051 \pm 0,002$

Tableau IV.6. Effondrements relatifs des gâteaux de Talc ($T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta P = 1,6 \text{ bar}$)
(Essais 16, 17, 18 et 19).

On observe clairement une augmentation de l'amplitude de l'effondrement lorsque la fraction massique en solide augmente. Ce résultat est important puisqu'il tend à montrer que les mécanismes de l'effondrement qui prennent naissance au niveau de la base du gâteau (au niveau du média filtrant) se propagent, d'une certaine manière, au cœur du gâteau.

IV.2.1.3.5. Influence du couplage mécanique / thermique

L'effondrement semble résulter du couplage entre l'application d'une charge sur le gâteau (par l'intermédiaire du piston) et d'un changement de phase provoqué au niveau du media filtrant. Afin d'évaluer l'importance de ce couplage, un essai a été réalisé en mettant en œuvre l'aide thermique en fin de compression en ayant préalablement relâché la pression d'air sur le piston et donc la contrainte sur le gâteau. Cet essai a été réalisé avec un piston classique car la conception du piston chauffant n'autorise pas l'arrêt de la compression sans risque de réhydratation du gâteau, (cf. paragraphe III.2.2). Les résultats obtenus sont donnés sur la figure IV.18.

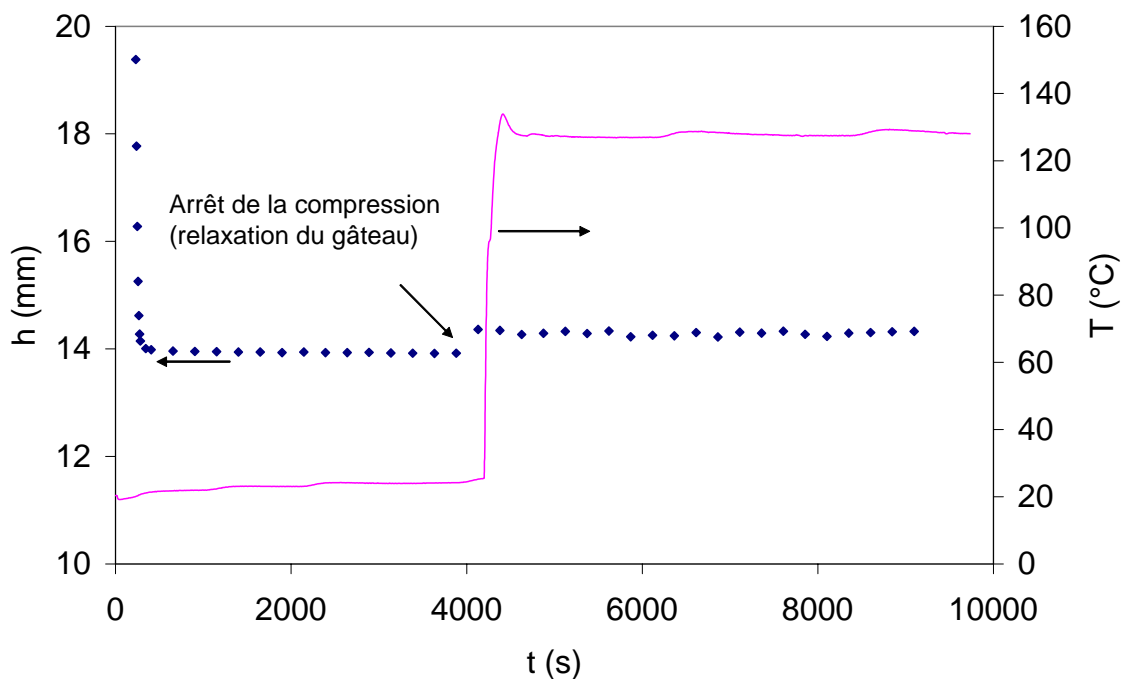


Fig. IV.18. Arrêt de la compression au moment de la mise en œuvre de l'aide thermique ($\Delta P = 1,6$ bar ; $T = 125$ °C).

On observe une relaxation du gâteau au moment où la pression est relâchée. En dépit d'une aide thermique analogue à celle mise en œuvre dans les essais précédents, aucun effondrement n'est observé. En effet, l'enregistrement de la température au niveau du media filtrant suit une évolution analogue à celle obtenue pour un essai où la compression est maintenue mais, lorsque cette température approche 124 °C, l'épaisseur du gâteau ne varie pas même après plus d'une heure. On peut donc conclure que le phénomène d'effondrement met en jeu des mécanismes liés au couplage entre la compression mécanique et l'apport thermique au travers du changement de phase que subit le liquide au niveau du media filtrant.

IV.2.1.4. Synthèse des résultats

Les essais de filtration – compression réalisés sur un matériau peu compressible ont permis de montrer qu’une aide thermique localisée au niveau du media filtrant n’avait pas d’influence sur la séparation pour des basses températures ($< 100\text{ °C}$).

En revanche, lorsque l’aide thermique est mise en œuvre à haute température ($> 100\text{ °C}$), un phénomène d’effondrement du gâteau en phase de compression est observé. Ce phénomène, non décrit dans la littérature, apparaît dépendre de la pression appliquée sur le gâteau et de la fraction massique des suspensions (et donc de la taille des gâteaux). L’influence de la température de régulation n’a pas pu être mise en évidence du fait de la limitation du dispositif expérimental. Le moment de la mise en œuvre de l’aide thermique n’a, semble-t-il, pas d’influence sur le phénomène. Enfin, aucun effondrement n’est observé si la contrainte appliquée sur le gâteau par l’intermédiaire du piston est stoppée lorsque l’aide thermique est mise en œuvre.

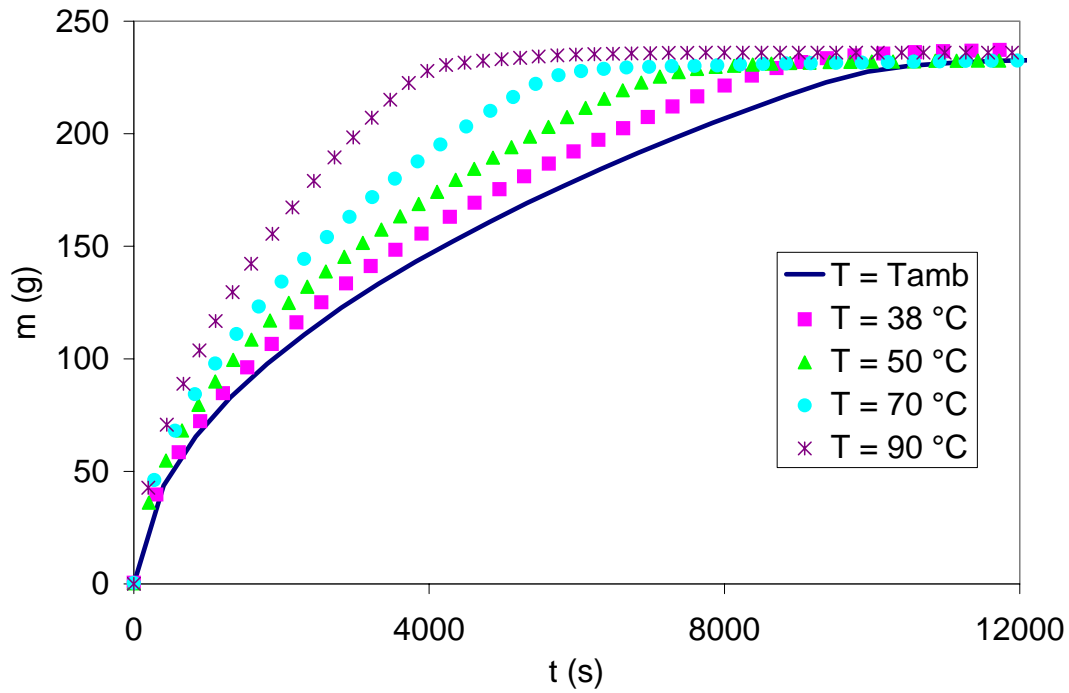
IV.2.2. Etude d’un matériau très compressible

Une confirmation des résultats obtenus pour une suspension de Talc et en particulier du phénomène d’effondrement devait être apportée. Cette confirmation a été recherchée au travers d’essais réalisés sur des suspensions à base d’un matériau très compressible et de nature différente du Talc : le Kaolin.

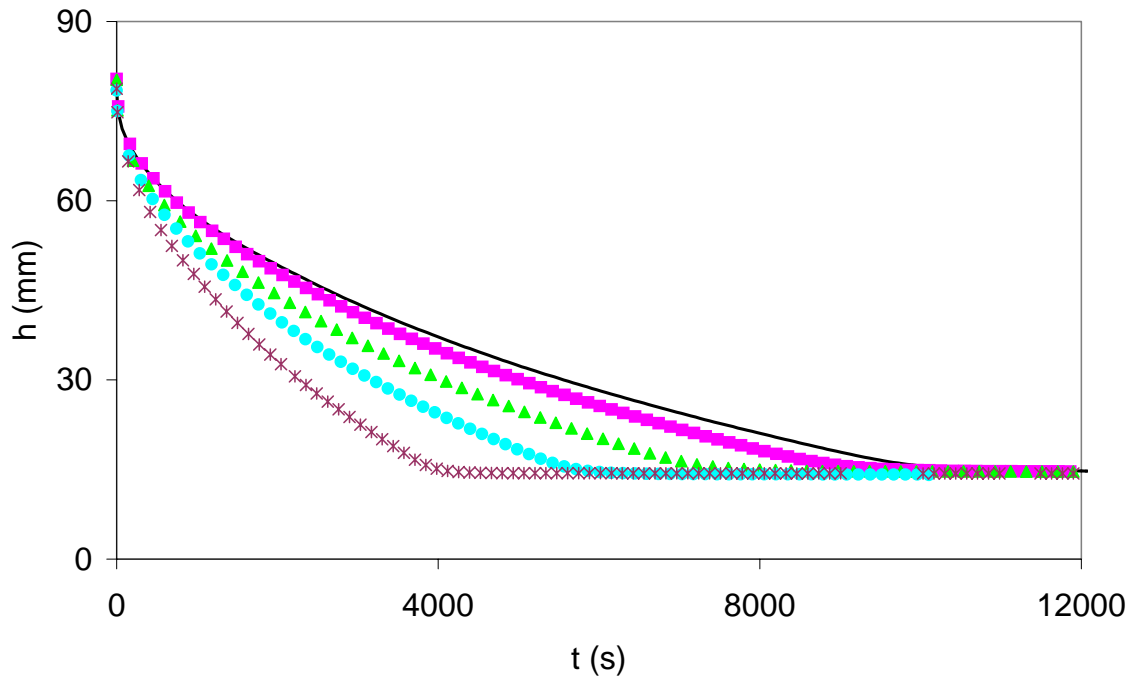
IV.2.2.1. Aide thermique à basse température ($< 100\text{ °C}$)

Nous avons montré au chapitre 3 que les gâteaux de Kaolin ont des résistances spécifiques élevées. Les essais de filtration compression réalisés avec ce matériau présentent des cinétiques de séparation beaucoup plus lentes. On peut, dans ce cas, espérer pouvoir atteindre dans la partie inférieure du gâteau (la plus résistive), en cours de filtration, des niveaux de température suffisamment élevés pour diminuer significativement la viscosité du liquide.

La figure IV.19 présente des essais de filtration – compression d’une suspension de Kaolin ($\Delta P = 1,4\text{ bar}$; $s = 0,23$) avec aide thermique au niveau du media filtrant pour 5 températures mesurées au niveau du media filtrant différentes (20 °C , 38 °C , 50 °C , 70 °C et 90 °C). Les résultats sont représentés en terme de masse de filtrat recueillie et de position du pseudo piston.



(a)



(b)

Fig. IV.19. Filtration - compression de suspension de Kaolin à 1,4 bar ($s = 0,23$) pour une aide thermique au niveau du media filtrant,
 (a). Evolution de la masse de filtrat recueilli,
 (b). Evolution de la position du pseudo piston
 (Essais 20, 21, 22, 23 et 24).

L'évolution des masses de filtrat montre une accélération importante de la filtration avec l'élévation de la température imposée au niveau du media filtrant (Fig. IV.19a). Cette tendance est confirmée par l'évolution de la position du pseudo piston au cours du temps (Fig. IV.19b).

Une analyse plus détaillée sera menée à partir des résultats obtenus pour une température au niveau du media filtrant réglée à 70 °C (référéncée T₇₀). Les résultats complémentaires pour les essais effectués à températures différentes sont regroupés en annexe C.

Comme attendu (cf. paragraphes II.2.3.1 et II.3.3.3), l'aide thermique localisée au niveau du media filtrant accélère les cinétiques de filtration d'une suspension de Kaolin. En effet, pour une température de media réglée à 70 °C, le temps de filtration est diminué de 45 % par rapport à un essai réalisé à température ambiante et les débits spécifiques de filtrat pendant la phase de filtration sont plus élevés (Fig. IV.20).

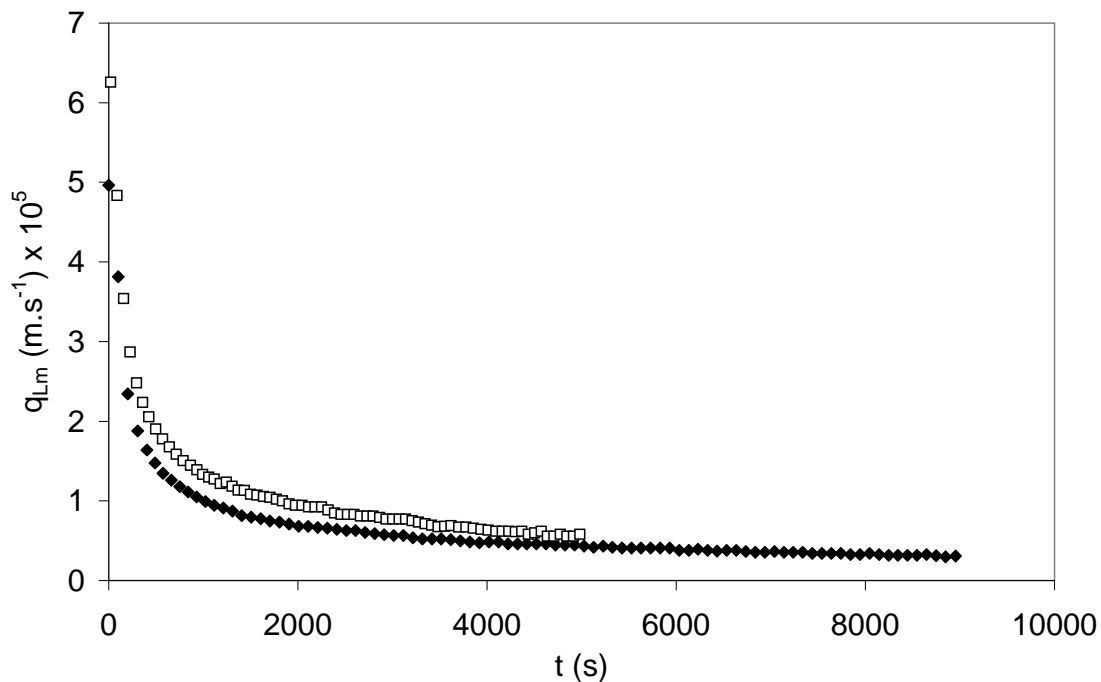


Fig. IV.20. Débit de filtrat pendant la phase filtration d'une déshydratation d'une suspension de Kaolin
($\Delta P = 1,4 \text{ bar}$, $s = 0,23$)
◆ : T = 20 °C ; □ : T = 70 °C
(Essais 20 et 23).

L'évolution du nombre de Péclet au cours du temps (Fig. IV.21) permet de montrer que la propagation de la chaleur dans le gâteau par conduction peut s'opérer alors que la filtration est encore loin d'être achevée.

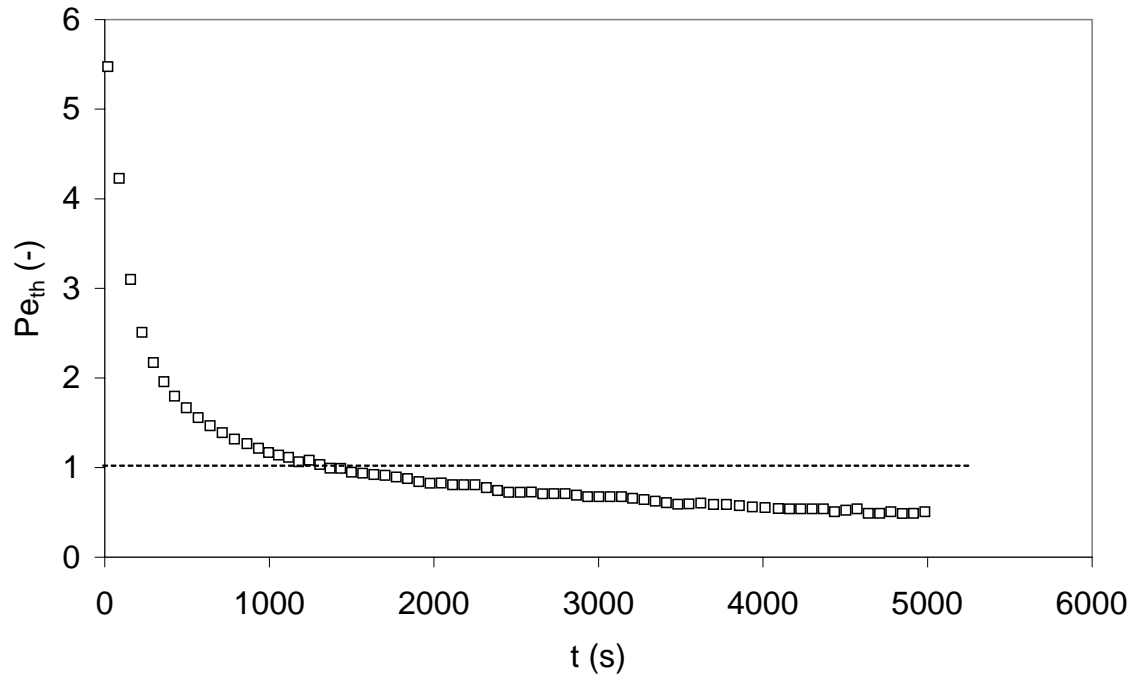
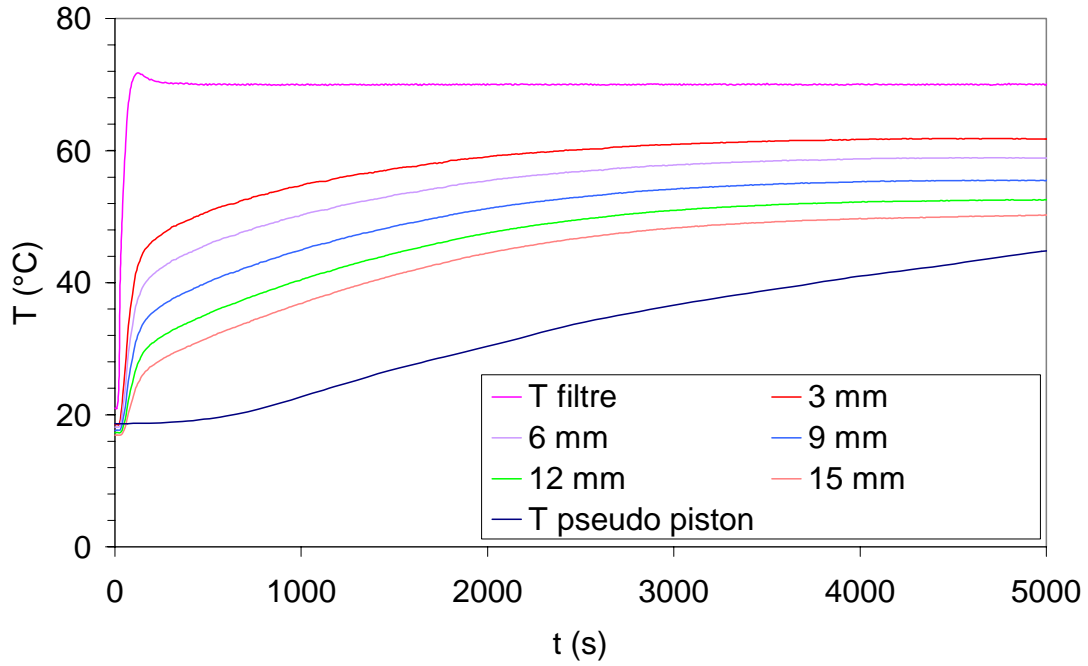
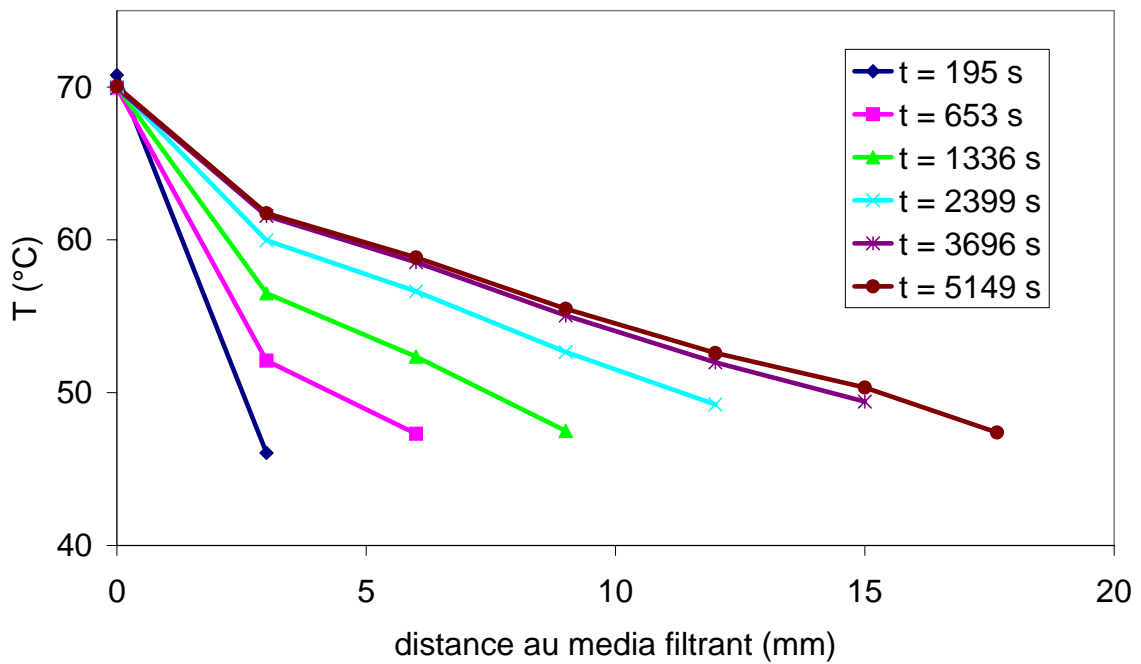


Fig. IV.21. Evolution du nombre de Péclet pendant la phase filtration d'une déshydratation assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin ($\Delta P = 1,4 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$) (Essai 23).

Les températures enregistrées sur l'axe du système font apparaître une montée rapide tant que la température de régulation n'est pas atteinte (le flux de chaleur fourni est alors maximal) puis une évolution plus lente (Fig. IV.22a). En fin de filtration, l'ensemble du gâteau se trouve à une température supérieure à $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Les profils de température dans le gâteau (Fig. IV.22b) permettent même de montrer que pendant presque toute l'opération de filtration, l'ensemble du gâteau est à une température supérieure à $45 \text{ }^\circ\text{C}$.



(a)



(b)

Fig. IV.22. (a) Evolution de la température sur l'axe du système
 (b) Profil de température dans le gâteau
 pendant la phase de filtration assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin
 ($\Delta P = 1,4$ bar, $s = 0,23$, $T = 70^\circ\text{C}$)
 (Essai 23).

Cette propagation du flux de chaleur induit une diminution significative de la viscosité du filtrat dans le gâteau (Fig. IV.23).

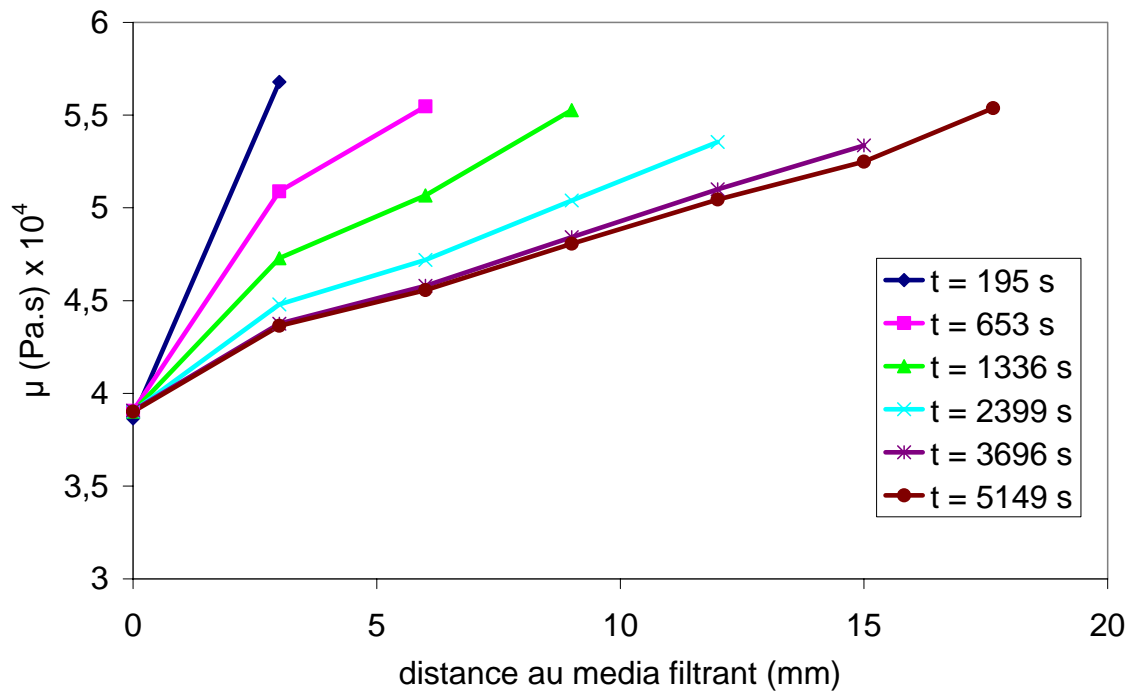


Fig. IV.23. Profils de viscosité pendant la phase de filtration assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin ($\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = 70^\circ C$) (Essai 23).

Jusqu'ici, nous avons supposé que l'augmentation de la température n'avait aucun effet sur la structuration des gâteaux. Néanmoins, comme le montre le tableau IV.7, les gâteaux en fin de filtration ont une porosité moyenne qui diminue lorsque la température de consigne augmente.

T (°C)	20	38	50	70	90
Siccité (%)	66,6 ± 0,3	66,7 ± 0,3	66,6 ± 0,3	66,7 ± 0,3	68,1 ± 0,3
h (mm)	14,57 ± 0,01	14,52 ± 0,01	14,57 ± 0,01	14,34 ± 0,01	14,29 ± 0,01
ε^* (-)	0,57 ± 0,02	0,57 ± 0,02	0,56 ± 0,02	0,56 ± 0,02	0,55 ± 0,02
t_{filt} (s)	9015 ± 9	7913 ± 9	6633 ± 9	5149 ± 9	3683 ± 9
$\varepsilon^*_{\text{filt}}$ (-)	0,67 ± 0,02	0,66 ± 0,02	0,65 ± 0,02	0,64 ± 0,03	0,63 ± 0,02

Tableau IV.7. Propriétés des gâteaux de Kaolin ($\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$) (Essais 20, 21, 22, 23 et 24).

Cette diminution de la porosité avec l'augmentation de la température est à relier à l'analyse présentée au paragraphe II.3.3.2. En effet, pour une même pression de filtration, les gâteaux sont plus compacts lorsque la température augmente. Cette diminution de la porosité est également observée en phase de compression mais dans une moindre mesure. Ceci est dû à

la faible pression utilisée pour nos expériences. Les siccités mesurées en fin de compression suivent la même tendance (aux erreurs expérimentales près). Ainsi, l'aide thermique au niveau du media filtrant permet d'accélérer la cinétique de filtration en diminuant la viscosité du liquide dans le media filtrant et dans la partie la moins perméable du gâteau. L'effet thermique, comme indiqué au paragraphe II.3.3.2, provoque une réduction de la porosité et de la teneur en eau.

Ces essais sont comparés à des essais réalisés à température homogène (Fig. IV.24) pour lesquels le protocole a été décrit en début de chapitre.

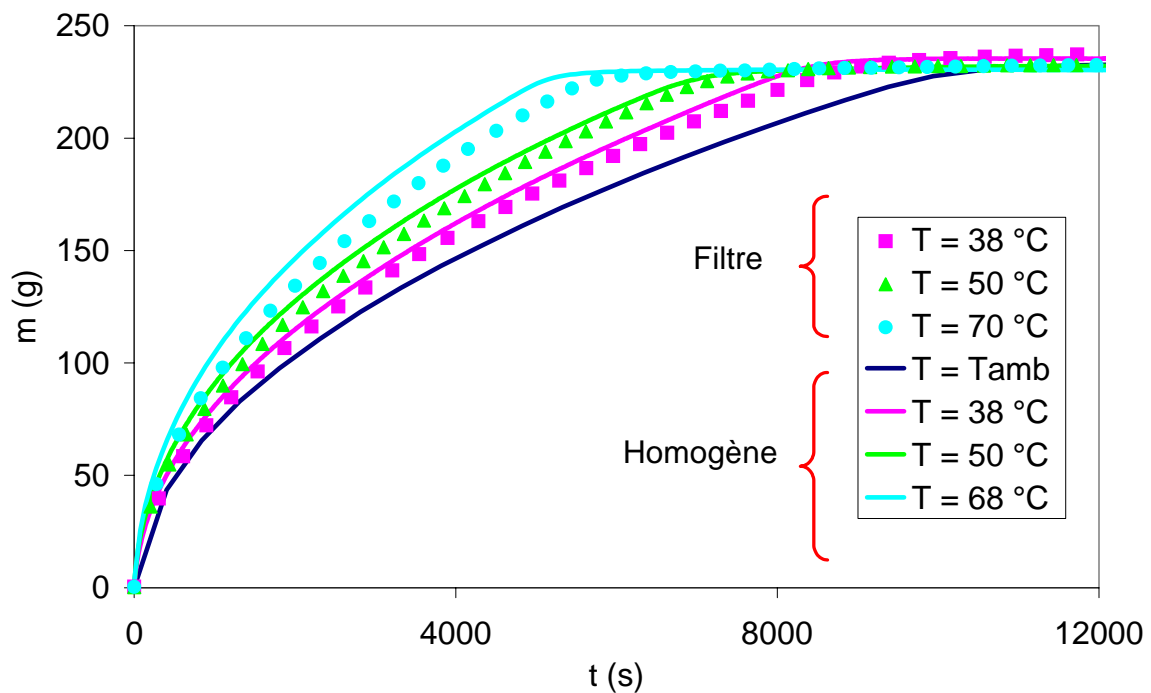


Fig. IV.24. Confrontation de l'évolution de la masse de filtrat recueilli pour différentes températures et 2 modes de fonctionnement.
(Kaolin ; $\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$)
(Essais 20, 21, 22, 23, 25, 26 et 27).

Comme le montre la figure IV.24, les évolutions de la masse de filtrat pour les deux modes de fonctionnement sont très proches, bien que pour les expériences à température homogène, la température soit uniforme dans tout le système (donc dans le gâteau) (Fig. IV.25).

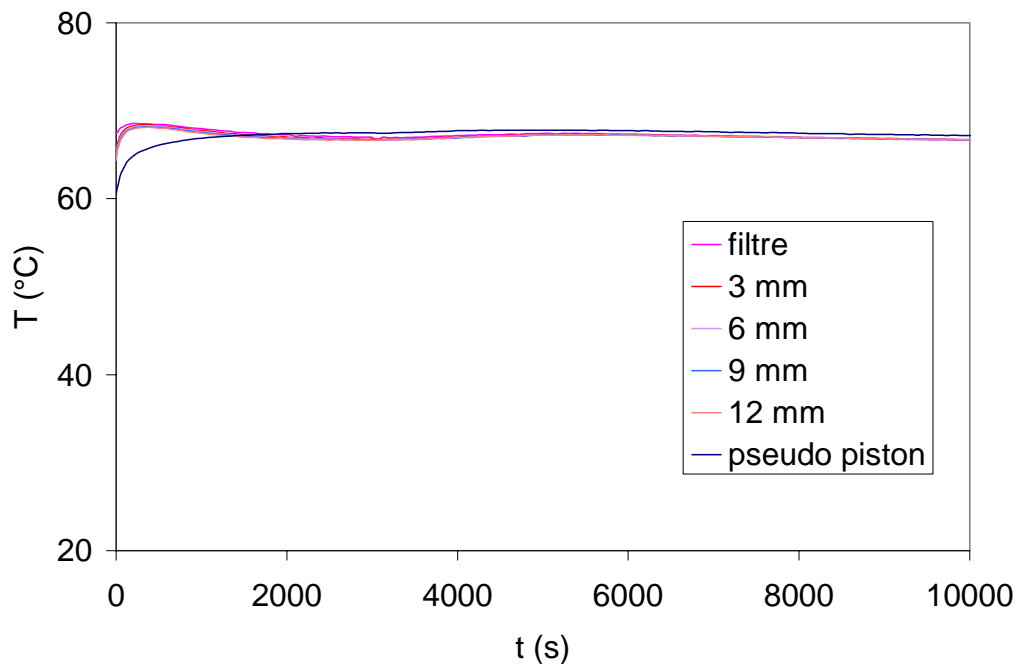


Fig. IV.25. Champ de température sur l'axe du système pour une déshydratation mécanique à température homogène
(Kaolin ; $\Delta P = 1,4$ bar, $s = 0,23$, $T = 68$ °C)
(Essai 27).

Le tableau IV.8 reporte les rapports des temps de filtration pour chaque mode opératoire (aide thermique au niveau du media filtrant et température homogène) sur le temps de filtration d'une opération effectuée à température ambiante ($t_{f(T)}/t_{f(20\text{ °C})}$).

Aide thermique au niveau du media filtrant		Opération à température homogène	
Température (°C)	$t_{f(T)}/t_{f(20\text{ °C})}$	$t_{f(T)}/t_{f(20\text{ °C})}$	Température (°C)
20	1	1	20
38	0,87	0,83	38
50	0,73	0,70	50
70	0,57	0,52	68

Tableau IV.8. Rapports de temps de filtration pour chaque mode opératoire sur le temps de filtration d'une déshydratation mécanique à température homogène
(Kaolin ; $\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$)
(Essais 20, 21, 22, 23, 25, 26 et 27).

On montre ainsi que les efficacités respectives des deux modes de fonctionnement sont très proches. Ce résultat est lié au fait que :

- ✓ d'une part, la majeure partie de la résistance hydraulique du système gâteau / media filtrant est localisée au voisinage du media filtrant et cette zone subit une élévation de température dans les deux cas,

- ✓ d'autre part, l'élévation de température induit une augmentation de la résistance spécifique plus importante dans le cas homogène que dans le cas d'une aide thermique localisée au niveau du media filtrant (Tableau IV.9).

T (°C)	ΔP (bar)	$\langle \alpha \rangle$ (m.kg ⁻¹)
20	1,4	$(2,5 \pm 0,2).10^{12}$
	2,6	$(3,3 \pm 0,2).10^{12}$
	3,6	$(3,9 \pm 0,2).10^{12}$
	4,2	$(4,5 \pm 0,2).10^{12}$
38	1,4	$(2,8 \pm 0,2).10^{12}$
	3,6	$(4,3 \pm 0,2).10^{12}$
50	1,4	$(2,9 \pm 0,1).10^{12}$
	3,6	$(4,5 \pm 0,2).10^{12}$
68	1,4	$(3,1 \pm 0,2).10^{12}$
	3,6	$(4,6 \pm 0,2).10^{12}$

Tableau IV.9. Evolution des résistances spécifiques moyennes des gâteau de Kaolin pour une aide thermique homogène ($s = 0,23$)
(Essais 20, 4, 6, 7, 25, 28, 26, 29, 27 et 30).

Le tableau IV.9 montre par exemple qu'une augmentation de 30 °C de la température de l'essai provoque une augmentation de la résistance spécifique moyenne correspondant à celle que provoquerait une augmentation de la pression de 0,7 bar. Cette évolution de la résistance spécifique moyenne avec la température de l'essai est représentée sur la figure IV.26.

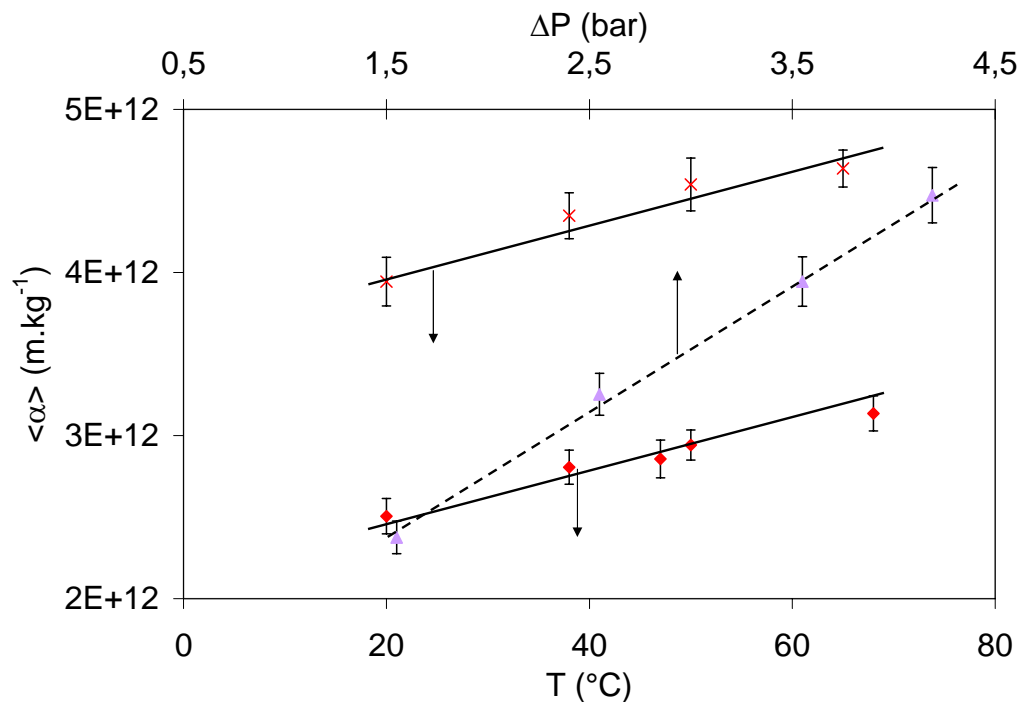


Fig. IV.26. Influence de la température sur la résistance spécifique moyenne (Kaolin, $s = 0,23$)

- ◆ évolution de la résistance spécifique moyenne en fonction de la température ($\Delta P = 1,4$ bar),
- ▲ évolution de la résistance spécifique moyenne en fonction de la pression ($T = 20$ °C),
- × évolution de la résistance spécifique moyenne en fonction de la température ($\Delta P = 3,6$ bar).

La figure IV.26 décrit notamment l'évolution comparée de la résistance spécifique moyenne d'un gâteau de Kaolin en fonction de la pression (à température ambiante, ▲) et en fonction de la température pour deux pressions de fonctionnement (◆ : 1,4 bar ; × : 3,6 bar). Cette modification de la résistance spécifique moyenne est due à une réduction de porosité des gâteaux liée à l'augmentation de la température (Tableau IV.10).

T (°C)	20	38	50	68
Siccité (%)	$66,6 \pm 0,3$	$66,9 \pm 0,3$	$67,1 \pm 0,3$	$67,7 \pm 0,3$
ε^* (-)	$0,57 \pm 0,02$	$0,57 \pm 0,02$	$0,56 \pm 0,02$	$0,56 \pm 0,02$
t_{filt} (s)	9015 ± 9	7497 ± 9	6340 ± 9	4696 ± 9
$\varepsilon^*_{\text{filt}}$ (-)	$0,67 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,02$	$0,63 \pm 0,02$

Tableau IV.10. Propriétés des gâteaux de Kaolin ($\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$) déshydratés pour une aide thermique homogène (Essais 20, 25, 26 et 27).

L'effet de l'aide thermique sur les porosités moyennes a également été observé à plus forte pression (Tableau IV.11).

T (°C)	20	38	50	68
Siccité (%)	71,8 ± 0,3	72,1 ± 0,3	72,2 ± 0,3	72,3 ± 0,3
ε^* (-)	0,51 ± 0,02	0,50 ± 0,02	0,49 ± 0,02	0,48 ± 0,02
t_{filt} (s)	5942 ± 9	4263 ± 9	3817 ± 9	3167 ± 9
$\varepsilon^*_{\text{filt}}$ (-)	0,61 ± 0,02	0,60 ± 0,02	0,58 ± 0,02	0,57 ± 0,02

Tableau IV.11. Propriétés des gâteaux de Kaolin ($\Delta P = 3,6$ bar ; $s = 0,23$) déshydratés pour une aide thermique homogène (Essais 6, 28, 29 et 30).

Ces résultats expérimentaux montrent donc une diminution de la porosité moyenne des gâteaux en fin de filtration et en fin d'expérience et donc une siccité finale plus importante que dans le cas d'une opération de déshydratation mécanique effectuée à température ambiante.

Ainsi, l'énergie thermique apportée au système réduit la viscosité du liquide, mais induit également une structuration des gâteaux en un arrangement plus compact qu'à température ambiante. C'est ce qui explique l'écart peu significatif entre une aide thermique au niveau du media filtrant et une aide thermique homogène. La compétition entre réduction de viscosité et restructuration du gâteau est plus faible dans le cas d'une aide thermique localisée. Les opérations de filtration – compression en température sont réalisées dans l'industrie (cf. paragraphe I.1.4.2) pour obtenir une séparation plus rapide qu'à température ambiante. Nous indiquons ici qu'une aide thermique modifie la structuration des gâteaux et qu'elle entraîne une augmentation de la résistance spécifique moyenne. Le dimensionnement d'unités industrielles fonctionnant en température à partir d'essais de filtration – compression doit donc prendre en compte ces variations de la résistance spécifique moyenne des gâteaux avec la température qui ne sont pas négligeables.

IV.2.2.2. Aspect énergétique

Sur la figure IV.27 est représentée l'évolution de la puissance dissipée dans la résistance située au niveau du media filtrant pour une opération de filtration - compression assistée thermiquement. L'évolution de la puissance dissipée est représentée en fonction de $t^{1/2}$ afin de bien décrire le procédé de déshydratation mécanique aux temps courts comme aux temps longs.

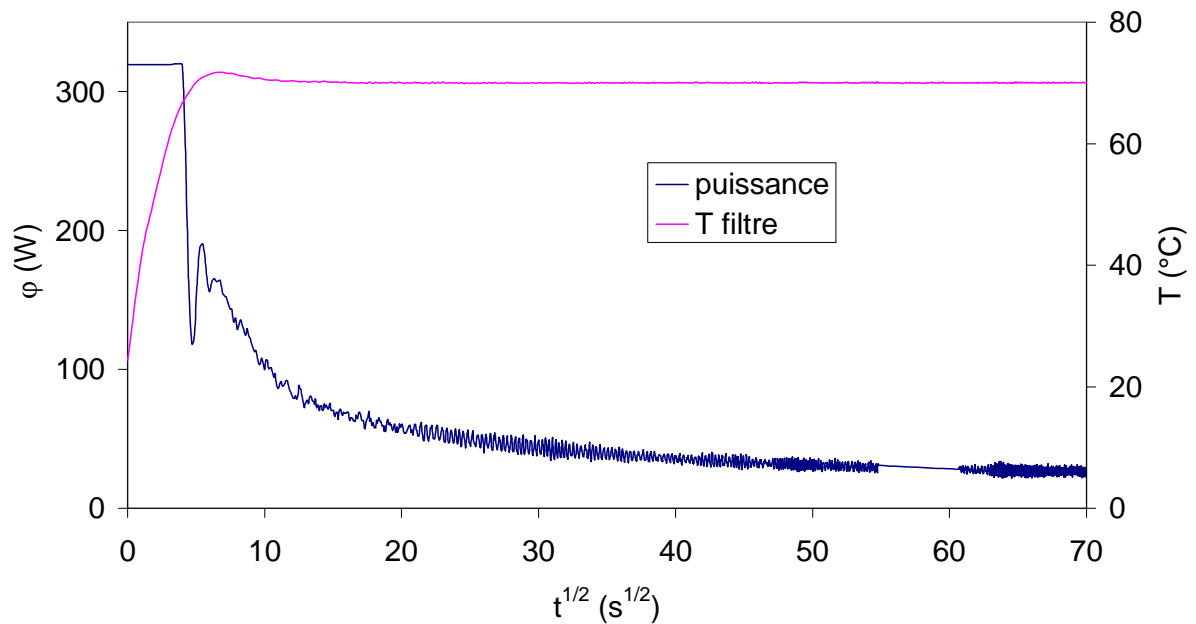


Fig. IV.27. Puissance dissipée dans la résistance
(Kaolin ; $\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = 70$ °C)
(Essai 23)

Aux temps courts, la puissance est maximale car le débit de liquide est encore conséquent (cf. Fig. IV.20). Puis, lorsque la température du filtre a atteint la température de consigne, la puissance diminue. La régulation PID se met en marche. La puissance dissipée est, semble-t-il, peu conséquente par rapport à la puissance qu'il faut fournir pour chauffer tout le dispositif expérimental dans le cas d'une opération à température homogène. Or, l'efficacité d'une aide thermique au niveau du media filtrant est très proche de celui d'une opération à température homogène. Ainsi, le gain énergétique paraît conséquent car l'énergie est fournie seulement à l'endroit le plus sensible de la déshydratation mécanique (au niveau du media filtrant et dans la partie la moins perméable du gâteau).

IV.2.2.3. Aide thermique à haute température (> 100 °C)

Les essais réalisés sur le Kaolin à haute température ont été effectués avec une aide thermique localisée (70 °C) au niveau du media filtrant pendant l'étape de filtration de façon à réduire le temps de filtration par deux. En cours de compression, un changement de la température de consigne de 70 °C à 125 °C est effectué (point A sur la figure IV.28).

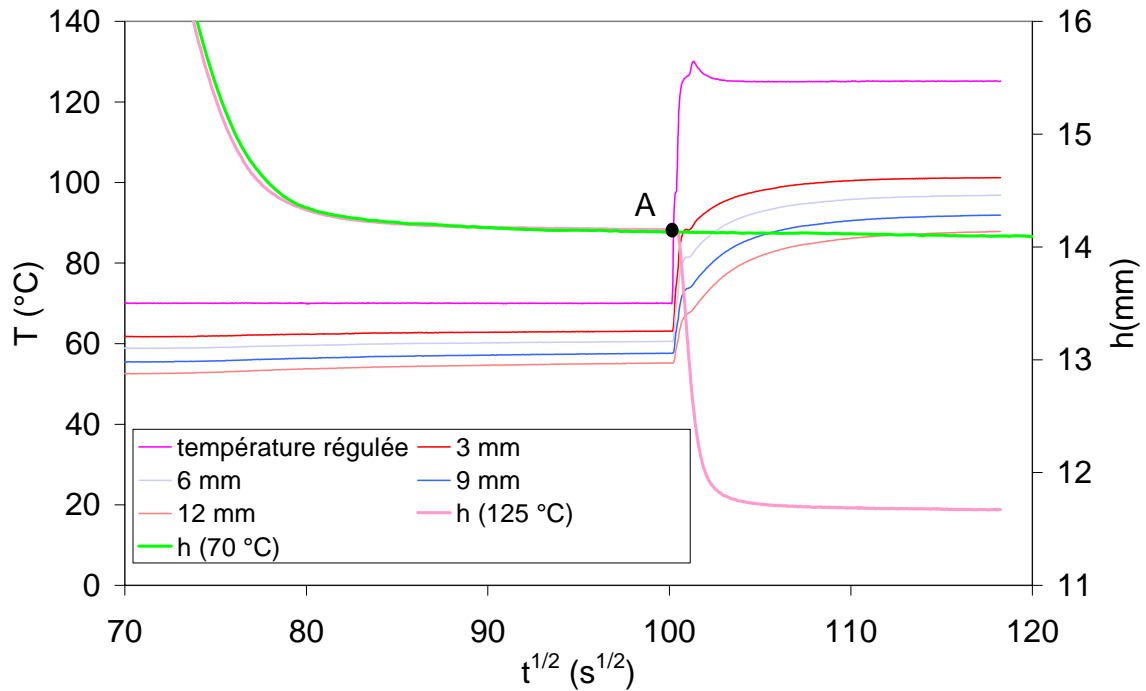


Fig. IV.28. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin ($\Delta P = 1,4 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (filtration) et $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ (compression) (Essai 31).

A la suite du changement de la température de consigne, le champ de température présente les mêmes caractéristiques que dans le cas d'une aide thermique à haute température pour le Talc (cf. paragraphe IV.2.1.2). Comme pour le Talc, l'effondrement se déclenche lorsque la température du media filtrant atteint un certain niveau ($\approx 124 \text{ }^\circ\text{C}$) mais l'amplitude est ici plus importante. En effet, le gâteau perd 20 % de sa taille initiale en 500 secondes (cf. Tableau IV.12).

ε^* (-)	$0,46 \pm 0,02$
$\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_{av}^*$ (-)	$0,185 \pm 0,002$
Siccité (%)	$87,4 \pm 0,03$

Tableau IV.12. Propriétés du gâteaux de Kaolin ($\Delta P = 1,4 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$) (Essai 31).

L'effondrement est également accompagné d'une reprise de production (Fig. IV.29).

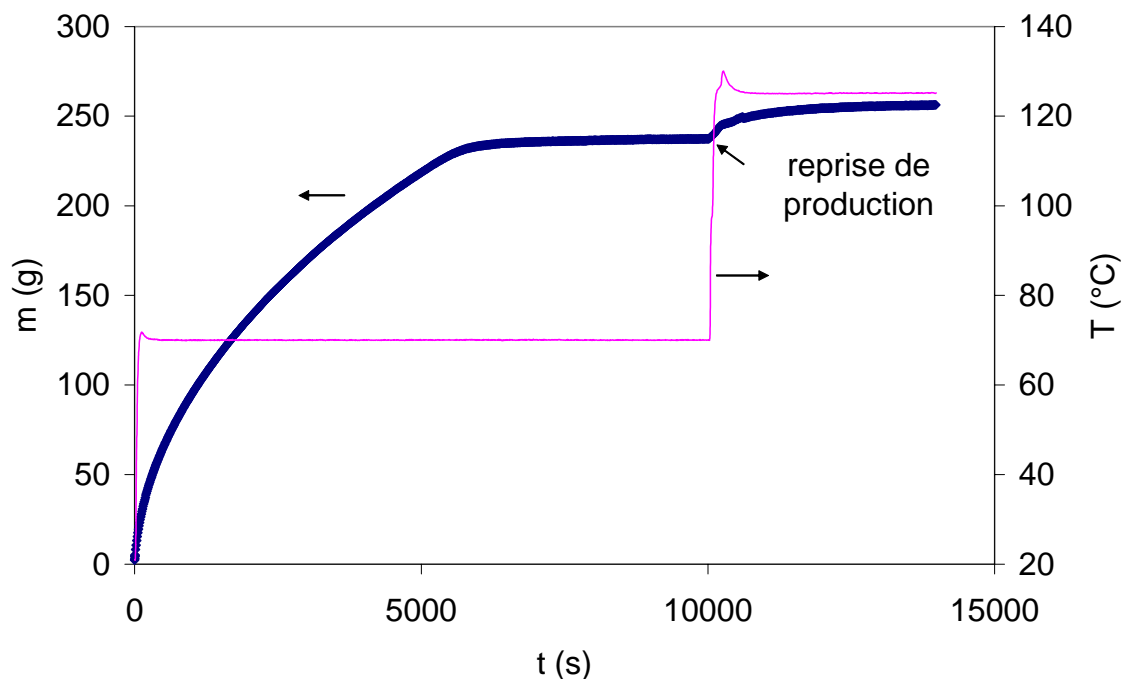


Fig. IV.29. Evolution de la masse de filtrat recueillie pour une déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin correspondant à l'essai de la figure IV.28 ($\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = 70$ °C (filtration) et $T = 125$ °C (compression) (Essai 31).

Pendant l'effondrement, la puissance dissipée dans la résistance est maximale (Fig. IV.30) car la température régulée n'a pas atteint la température de consigne. L'effondrement correspond encore ici à un palier en température aux alentours de 124 °C. Ce palier est mis en évidence sur la figure IV.31 où l'allure de la courbe porosité moyenne en fonction de la température est tout à fait analogue à celle observée pour le Talc.

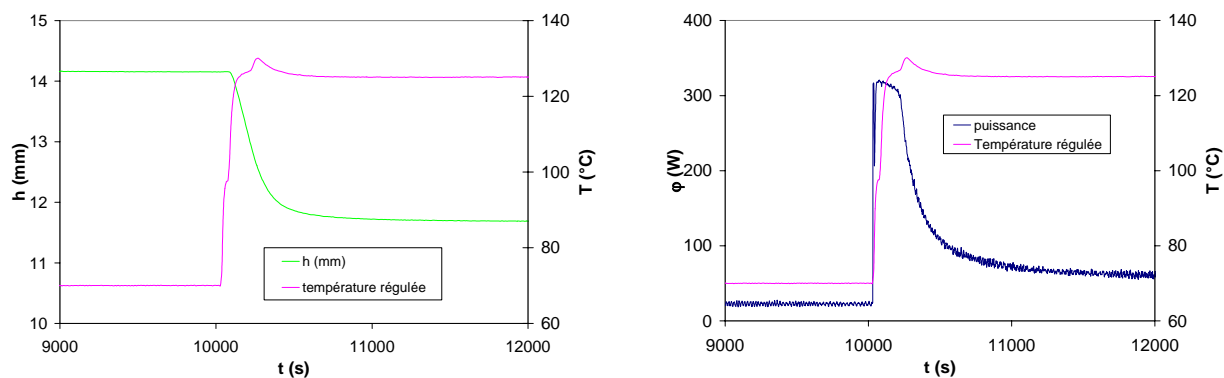


Fig. IV.30. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin Evolution comparée hauteur de gâteau – puissance – température régulée $\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = 70$ °C (filtration) et $T = 125$ °C (compression) (Essai 31).

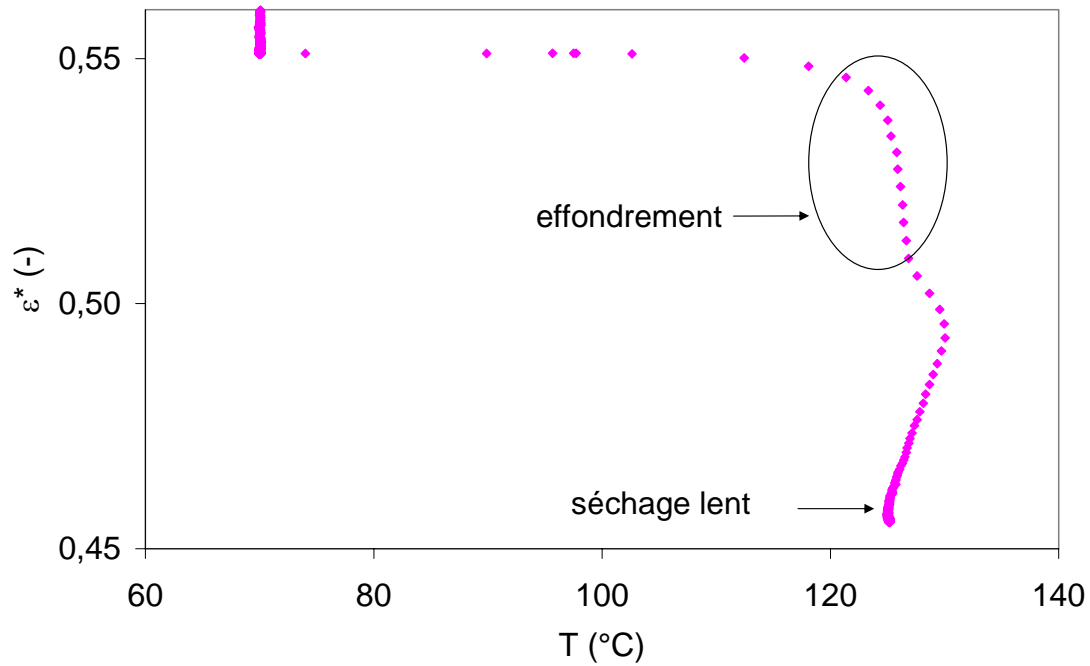


Fig. IV.31. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin
 Evolution de la porosité moyenne du gâteau en fonction de la température régulée
 $\Delta P = 1,4 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (filtration) et $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ (compression).

La température d'effondrement est la même pour un essai régulé à une température de 170 °C (Fig. IV.32).

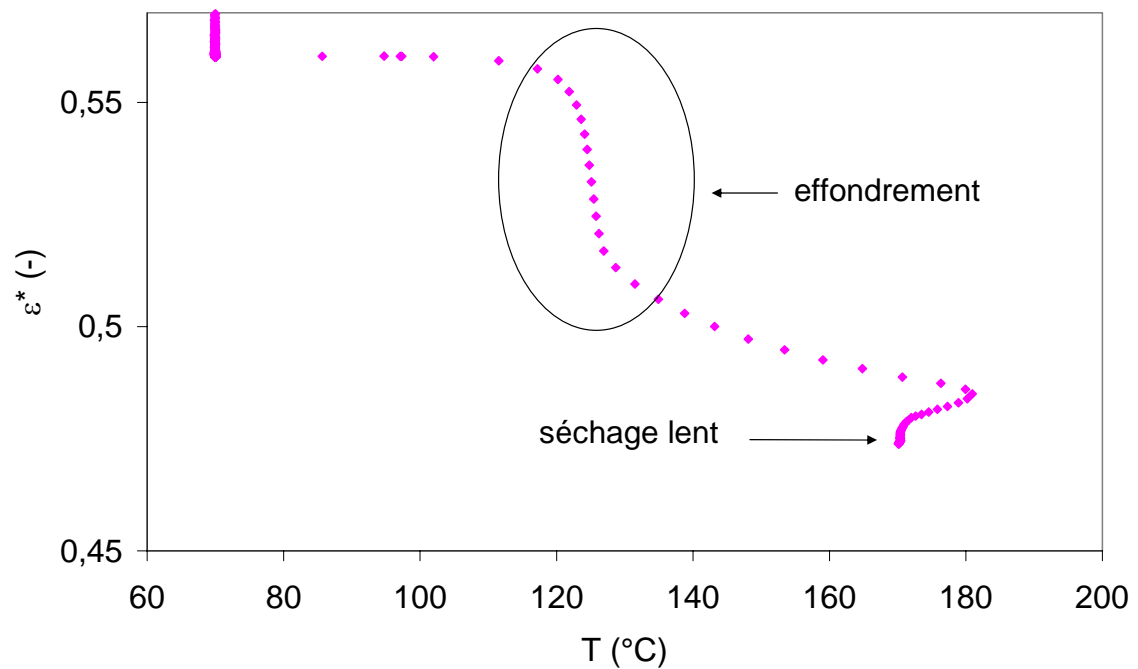


Fig. IV.32. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin
 Evolution de la porosité moyenne du gâteau en fonction de la température régulée
 $\Delta P = 1,4 \text{ bar}$; $s = 0,23$; $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (filtration) et $T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ (compression)
 (Essai 32).

Cette température de déclenchement correspond à un équilibre entre l'apport de chaleur et un phénomène d'ébullition sur la surface inférieure du gâteau. Nous rappelons ici que le thermocouple sur lequel la température est régulée est situé à 2 mm de la surface supérieure du media filtrant (cf. Fig. III.13 et paragraphe IV.2.1.2). Ainsi, en prenant en compte la conduction de la chaleur dans le disque perforé et la résistance de contact disque perforé – media filtrant, la température du media filtrant doit être de l'ordre de 100 °C pendant l'effondrement. De plus on peut noter que les propriétés thermiques du Talc et du Kaolin (cf. Tableau III.1) sont très proches, ce qui explique que la température de l'effondrement soit la même pour les deux matériaux.

En plaçant un thermocouple sur la toile filtrante métallique, nous avons pu mesurer la température réelle juste au niveau du media filtrant. En prenant comme référence cette température, l'effondrement se produit pour une température de l'ordre de 110 °C (Fig. IV.33).

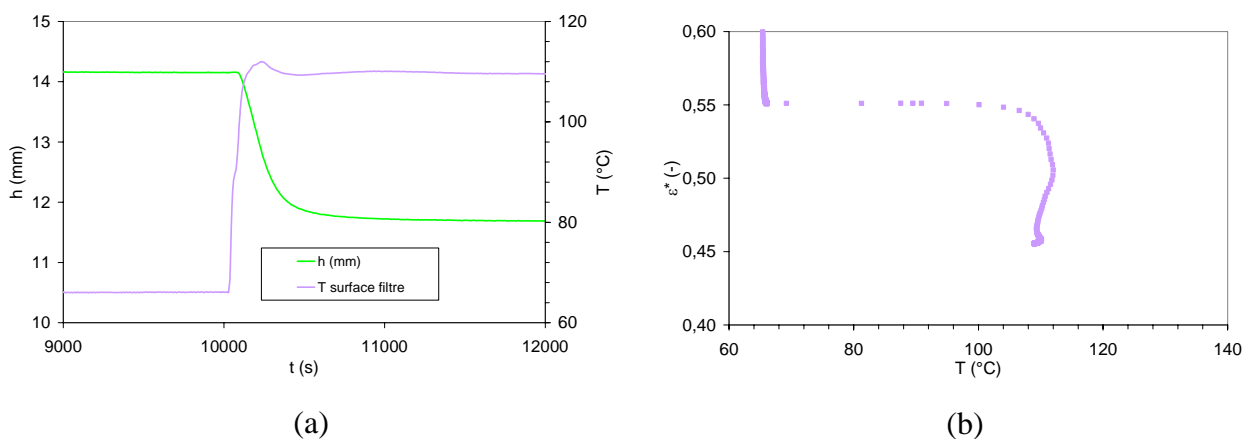


Fig. IV.33. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Kaolin
(a) : température à la surface du media et épaisseur de gâteau ;
(b) : Porosité moyenne en fonction de la température de surface du filtre
 $AP = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = 70$ °C (filtration) et $T = 125$ °C (compression)
(Essai 31).

Nous resterons très prudents sur la température de déclenchement du phénomène d'effondrement. Un modèle physique local (précis) décrivant les processus thermiques de notre dispositif expérimental permettrait une analyse plus fine, mais ceci n'a pas pu être réalisé dans le cadre de ce travail. Par souci de cohérence, nous continuerons dans la suite de faire référence à la température donnée par le thermocouple de régulation.

Comme dans le cas du Talc, la réduction rapide de la porosité moyenne du gâteau (effondrement) apparaît donc à partir d'un certain niveau de température du filtre alors que le reste du gâteau est encore à des températures relativement faibles (Fig. IV.34).

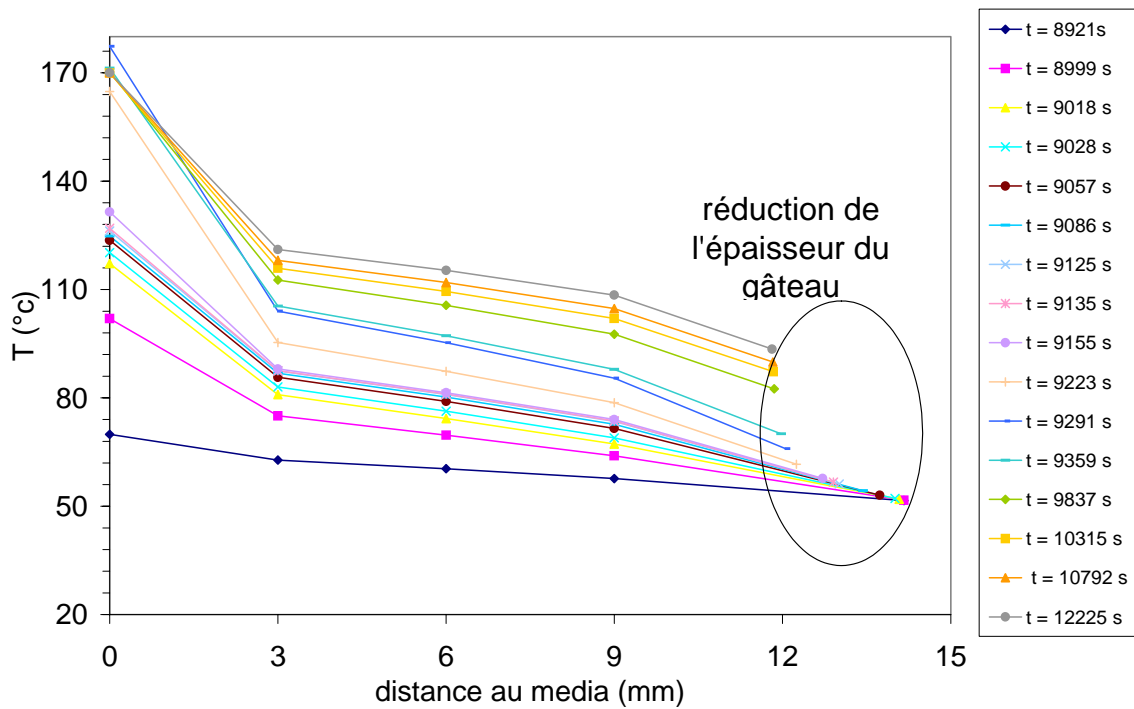


Fig. IV.34. Profils de température dans le gâteau pendant la phase de compression
Kaolin $\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$; $T = 70$ °C (filtration) et $T = 170$ °C (compression)
(Essai 31).

Encore ici, l'effondrement observé pendant l'étape de compression ne dépend pas de la température et l'amplitude est réduite lorsque la pression de fonctionnement augmente (Tableau IV13).

$\Delta P = 1,4$ bar $T = 125$ °C	ε^* (-)	$0,46 \pm 0,02$
	$\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_{av}^*$ (-)	$0,185 \pm 0,002$
$\Delta P = 1,4$ bar $T = 170$ °C	ε^* (-)	$0,47 \pm 0,02$
	$\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_{av}^*$ (-)	$0,183 \pm 0,002$
$\Delta P = 3,6$ bar $T = 125$ °C	ε^* (-)	$0,43 \pm 0,02$
	$\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_{av}^*$ (-)	$0,139 \pm 0,002$

Tableau IV.13. Propriétés des gâteaux de Kaolin ($s = 0,23$) pour différentes conditions expérimentales
(Essais 31, 32 et 33).

IV.2.2.4. Synthèse des résultats

Dans cette partie, nous avons mis en évidence l'intérêt et l'efficacité d'une aide thermique localisée au niveau du média filtrant pour assister la déshydratation mécanique d'un matériau

très compressible. Les résultats expérimentaux ont montré une accélération de la cinétique de séparation pour une aide thermique à basse température grâce notamment à une réduction de la viscosité du liquide dans le media filtrant et dans la partie la moins perméable du gâteau. Le faible écart entre ce mode de fonctionnement et une aide thermique homogène est lié à l'augmentation de la résistance spécifique des gâteaux avec la température. Les gâteaux sont en effet moins poreux dans le cas d'une aide thermique homogène que dans le cas d'une aide thermique au niveau du media filtrant. Nous avons montré que l'augmentation de température (en mode homogène ou au niveau du media filtrant) engendrait des gâteaux moins poreux en filtration, mais aussi en compression, ce qui permet d'accroître sensiblement les siccités finales. Le coût énergétique d'une aide thermique localisée au niveau du media filtrant est bien sûr moins important que dans le cas d'une aide thermique homogène car seule une partie du système est chauffée.

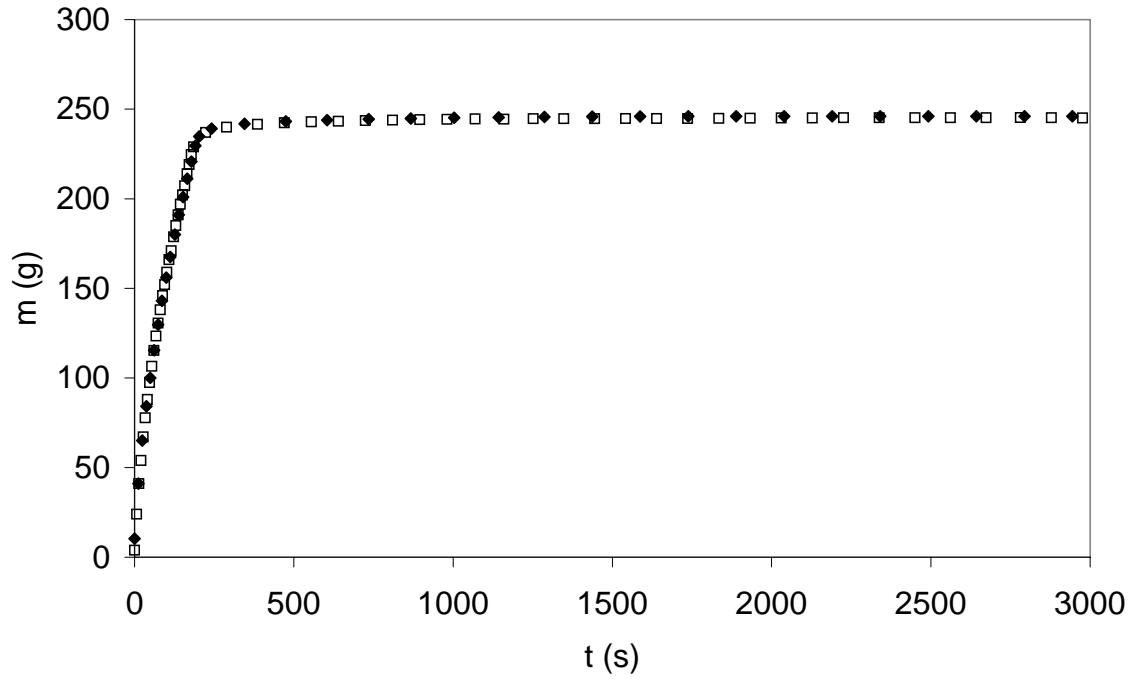
Enfin, nous avons mis en évidence le phénomène d'effondrement en phase de compression lorsque l'aide thermique est effectuée à haute température. Le phénomène se produit de façon identique à ce qui a été observé pour les suspensions de Talc. L'amplitude de l'effondrement est cependant bien plus significative dans le cas du Kaolin indiquant que la compressibilité du matériau influence les mécanismes de l'effondrement.

IV.3. Aide thermique au niveau du pseudo piston

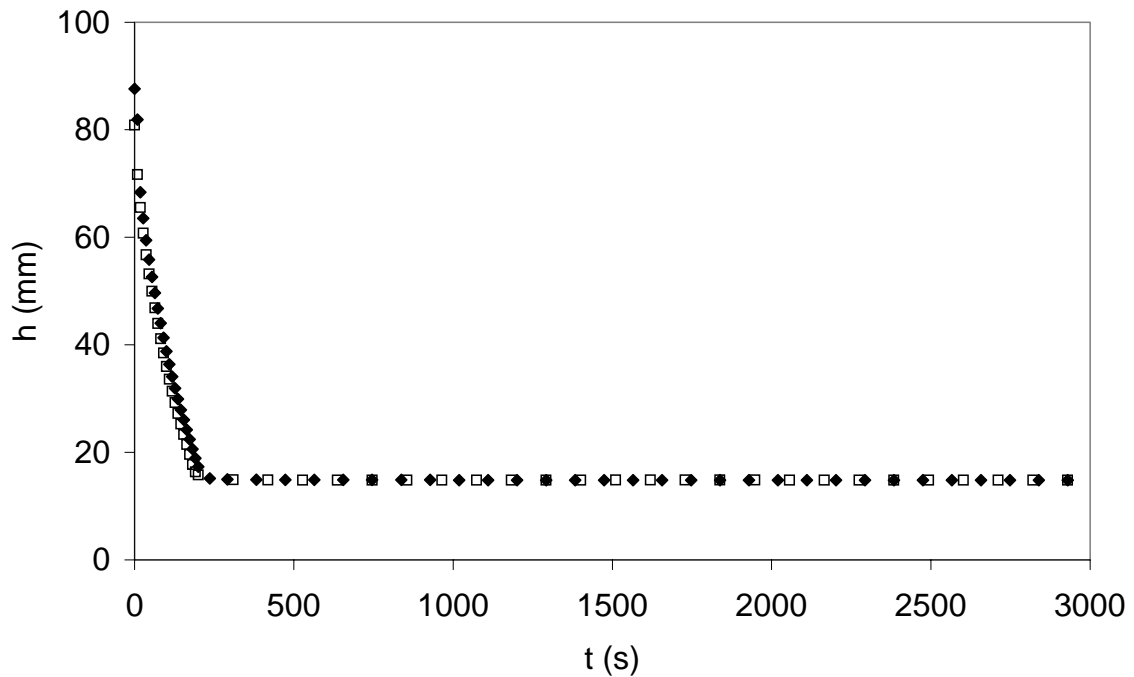
Même si l'aide thermique au niveau du pseudo piston semble peu indiquée pour assister la déshydratation mécanique, nous avons conçu au laboratoire un dispositif polyvalent capable de mettre en œuvre une aide thermique au niveau du media filtrant ainsi qu'au niveau du pseudo piston. L'objectif est ici de reproduire les essais de déshydratation thermomécanique évoqués au paragraphe I.1.4.2. Seuls les essais réalisés sur le Talc sont présentés ici.

IV.3.1. Aide thermique à basse température (< 100 °C)

La figure IV.35 présente les courbes expérimentales en termes de masse de filtrat et de position du pseudo piston pour une opération de filtration compression d'une suspension de Talc sous deux conditions expérimentales (20 °C et 90 °C).



(a)



(b)

Fig. IV.35. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc

($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,23$)

◆ : $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; □ : $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

(a). Evolution de la masse de filtrat

(b). Evolution de la position du piston

(Essais 8 et 34).

Comme le montre la figure IV.35, l'aide thermique au niveau du pseudo piston n'a aucun effet sur la filtration d'une suspension de Talc. En effet, les résultats sont similaires tant au niveau des courbes de récupération de filtrat que de celles de la position du pseudo piston. Les durées de filtration ainsi que les propriétés intrinsèques des gâteaux (porosité et siccité) en fin de filtration et en fin de compression sont identiques aux erreurs de mesures près (Tableau IV.14).

Température (°C)	20	90
Siccité (%)	69,4 ± 0,3	69,6 ± 0,3
L (mm)	14,85 ± 0,01	14,84 ± 0,01
$\varepsilon^*_{\text{filt}}$ (-)	0,54 ± 0,02	0,53 ± 0,02
ε^* (-)	0,50 ± 0,02	0,50 ± 0,02
t_{filt} (s)	191 ± 9	191 ± 9

Tableau IV.14. Propriétés des gâteaux de Talc ($\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$)
(Essais 8 et 34).

Lors de la filtration, les niveaux de température dans le gâteau sont très faibles (Fig. IV.36). En effet, la filtration étant très rapide (191 s), l'apport de chaleur généré au niveau du pseudo piston ne se propage pas dans le système pendant la phase de filtration (la profondeur de pénétration du signal thermique par diffusion dans de l'eau pure est de 5,5 mm pour un temps caractéristique de 191 secondes). Ainsi, aucune diminution de la viscosité du liquide dans le gâteau n'est observée.

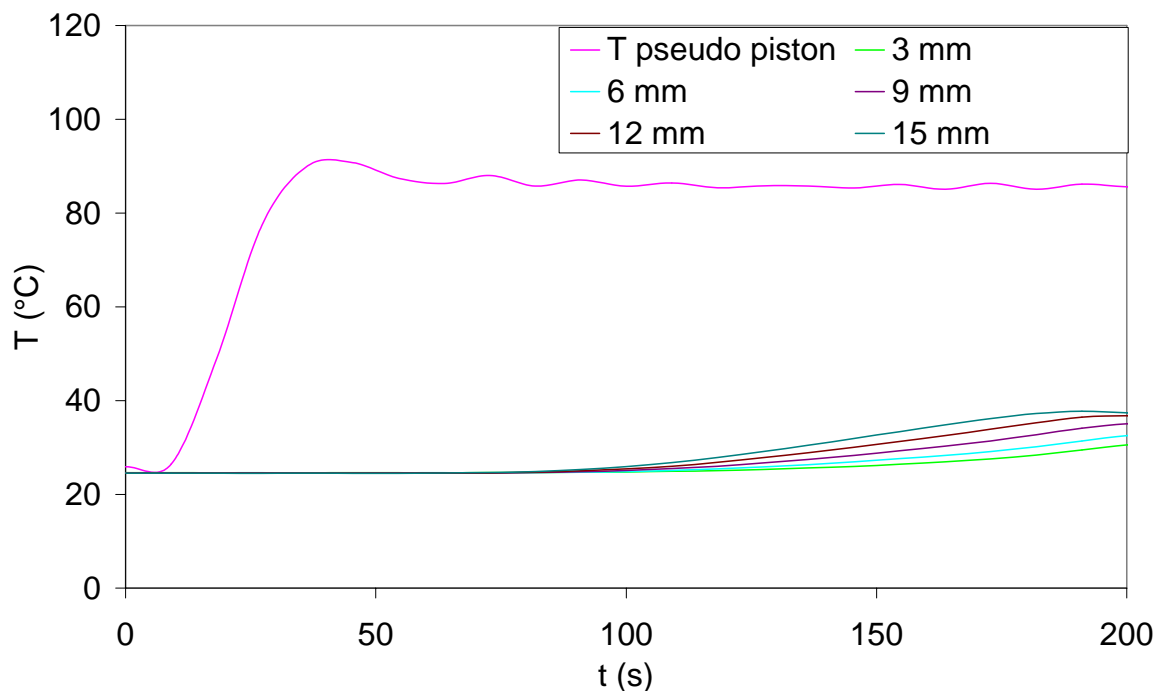


Fig. IV.36. Champ de température pendant la phase de filtration d'une suspension de Talc
($\Delta P = 1,6$ bar ; $s = 0,23$; $T = 90$ °C)
(Essai 34).

L'aide thermique au niveau du pseudo piston à basse température, comme attendu, s'avère donc peu, voire pas, efficace sur la séparation d'une suspension de Talc du fait d'une filtration rapide et d'une faible profondeur de pénétration du signal thermique.

IV.3.2. Aide thermique à haute température (> 100 °C)

Par manque de temps, l'étude complète de l'aide thermique au niveau du pseudo piston n'a pu être menée à bien. Les paramètres pertinents mis en évidence au paragraphe IV.2.2 n'ont pu être étudiés avec ce mode de fonctionnement.

Néanmoins, les premiers essais réalisés sur le Talc n'ont pu faire apparaître le phénomène d'effondrement, même à haute température. Seule une décroissance très lente de l'épaisseur du gâteau a été observée (Fig. IV.37).

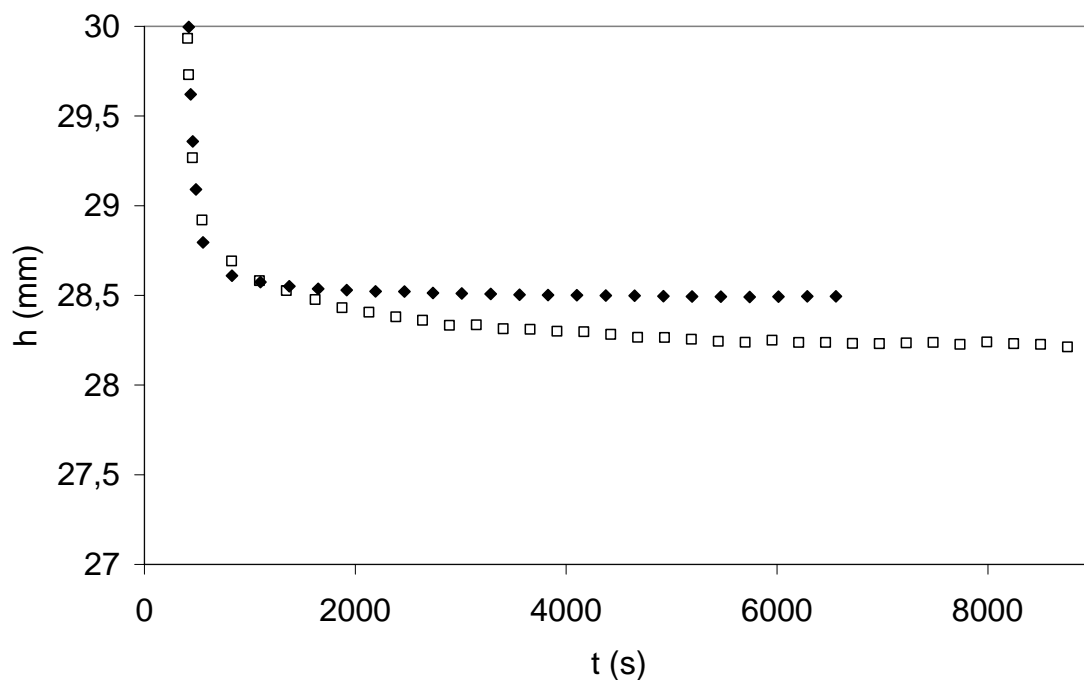


Fig. IV.37. Déshydratation mécanique assistée thermiquement d'une suspension de Talc
($\Delta P = 1,6 \text{ bar}$; $s = 0,47$)
◆ : $T = 20 \text{ °C}$; □ : $T = 165 \text{ °C}$
(Essais 8 et 35).

IV.4. Conclusion et discussion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus en déshydratation mécanique assistée thermiquement sur des suspensions de Talc et de Kaolin.

L'étude expérimentale a indiqué la faible efficacité d'une aide thermique au niveau du media filtrant à basse température dans l'amélioration de la cinétique de séparation du Talc (matériau peu compressible). Les forts débits de filtrat n'autorisent pas une propagation du flux de chaleur dans le système. Ainsi, la viscosité du liquide dans le media filtrant ainsi que dans le gâteau n'est pas modifiée.

L'aide thermique à haute température a, quant à elle, mis en évidence un phénomène d'effondrement (réduction rapide de la porosité moyenne du gâteau) pendant la phase de compression.

Les résultats expérimentaux obtenus ont également montré la réelle efficacité d'une aide thermique au niveau du media filtrant pour assister la déshydratation mécanique d'un matériau très compressible. Une accélération nette de la cinétique de séparation est observée à basse température grâce notamment à une réduction de la viscosité du liquide dans le media filtrant et dans la partie la moins perméable du gâteau. L'augmentation de la température engendre des gâteaux moins poreux en filtration, mais aussi en compression, ce qui permet d'accroître sensiblement les siccités finales. Le faible écart entre ce mode de fonctionnement et une aide thermique homogène est dû à une augmentation significative de la résistance spécifique des gâteaux avec la température

Nous avons mis en évidence le phénomène d'effondrement en phase de compression lorsque l'aide thermique est effectuée à haute température. Le phénomène est analogue à celui observé pour un matériau peu compressible. L'amplitude de l'effondrement est cependant bien plus significative dans le cas du Kaolin indiquant que la compressibilité du matériau influence les mécanismes de l'effondrement.

Ce phénomène permet d'accroître de façon très significative et très rapide les siccités finales des gâteaux. Ainsi, comme le montre la figure IV.38, l'aide thermique à basse température au niveau du media filtrant permet de réduire les temps de filtration d'un matériau très compressible, et l'effondrement, provoqué en phase de compression, permet d'obtenir des siccités finales 20 % plus élevées qu'à température ambiante.

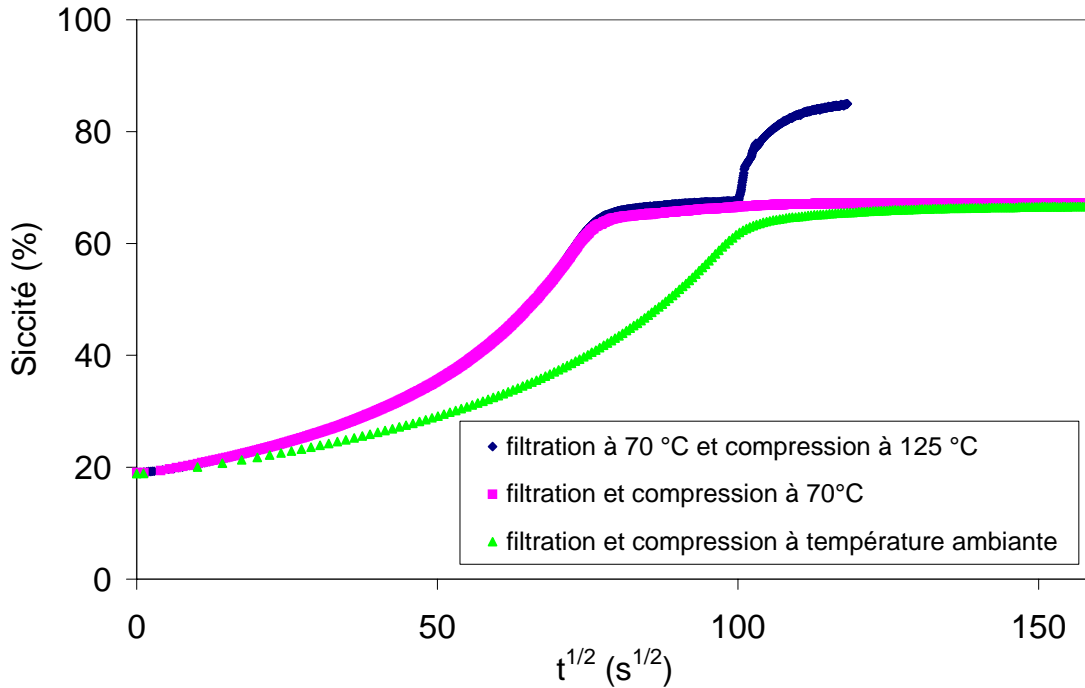


Fig. IV.38. Evolution de la siccité des suspensions de Kaolin pour différents modes de fonctionnement ($\Delta P = 1,4$ bar ; $s = 0,23$) (Essais 20, 23 et 31).

Enfin, l'efficacité de l'aide thermique à basse température au niveau du pseudo piston sur la déshydratation mécanique d'une suspension de Talc n'a pas été mise en évidence du fait d'une très faible longueur de pénétration du signal thermique. A haute température, les premiers essais sur des gâteaux de Talc n'ont pas révélé de phénomène d'effondrement.

Le phénomène d'effondrement met en jeu des mécanismes extrêmement complexes dont nous pouvons tenter d'appréhender quelques éléments au travers des résultats expérimentaux disponibles à l'issue de ce travail.

En cours de compression, le gâteau se structure. La structuration du gâteau dépend bien entendu de deux types de caractéristiques : la pression appliquée et les particules solides en terme de taille, de distribution de taille mais aussi de forme. L'arrangement, comme souvent observé dans les matériaux granulaires, doit laisser apparaître une structure plus ou moins homogène sous forme d'amas plus ou moins denses présentant des zones de vide. La structure peut supporter une charge plus ou moins élevée qui dépend, entre autres, de son taux de vide. Localement, la contrainte appliquée sur un élément du gâteau est représentée par la pression solide. Une élévation de la pression solide peut entraîner un « micro effondrement », par un mouvement des particules venant combler une lacune de l'arrangement. La réduction de porosité qui en résulte est extrêmement faible. Ce mécanisme très lent, explique le temps nécessaire à la diminution de la pression liquide enregistrée au niveau du pseudo piston en

cours de compression. Lorsque l'aide thermique au niveau du media filtrant est mise en œuvre, l'ébullition du liquide dans la couche du gâteau localisée à proximité du media permet à des bulles de vapeur fortement déformables, sous l'action de la poussée d'Archimède, de pénétrer dans le gâteau. Au fur et à mesure que la bulle pénètre, en s'éloignant de la zone chaude, dans le milieu poreux, sa taille diminue par condensation. A charge constante, la pression liquide locale diminue alors, favorisant l'apparition de « micro effondrements ». La somme des différents « micro effondrements » ainsi générés constitue l'effondrement du gâteau. Lorsque l'aide thermique est localisée au niveau du pseudo piston, les bulles de vapeur ne peuvent pas se propager dans le milieu (la force d'Archimède s'y oppose), la vapeur est piégée à la surface du pseudo piston, pénalisant ainsi le transfert de chaleur dans le gâteau (analogue au phénomène de caléfaction). Si on augmente la pression de filtration, la structure lacunaire de la matrice poreuse devient plus dense et l'amplitude de l'effondrement diminue. Plus le gâteau est épais, plus le phénomène peut se propager dans l'épaisseur du gâteau et plus l'effondrement est important.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'effet d'une aide thermique localisée sur une opération de déshydratation mécanique par filtration compression à pression constante.

L'étude bibliographique a orienté notre démarche pour concevoir un dispositif expérimental capable d'assister thermiquement la filtration et la compression en apportant de la chaleur au niveau du media filtrant et au niveau du piston grâce à des éléments chauffants incorporés dans le dispositif expérimental.

La conception de ce dispositif a nécessité la réalisation d'une cellule de filtration compression dotée d'un piston modifié : une pièce circulaire, appelée pseudo piston, a été placée en avant du piston. Ce pseudo piston destiné à accueillir un des éléments chauffants a aussi pour rôle de protéger l'ensemble des capteurs placés au niveau du piston d'une élévation de température trop importante. La cellule ainsi modifiée s'est révélée très efficace pour l'étude de la filtration compression. En effet, en protégeant le capteur de pression placé à la surface du piston d'un éventuel contact avec les particules solides du gâteau, le pseudo piston permet de suivre la pression liquide à la surface du gâteau pendant la phase de compression. L'étude expérimentale menée sur le Talc et le

Kaolin a montré que la pression relative du liquide à la surface du gâteau devient nulle en fin de compression, même pour des matériaux très compressibles, contrairement à ce qui a parfois été reporté dans la littérature.

Après avoir justifié les options techniques retenues, nous avons réalisé au laboratoire une cellule de filtration compression chauffante.

Une étude expérimentale complète a permis de dégager un certain nombre d'aspects importants concernant l'aide thermique que l'on peut apporter à une séparation par filtration compression.

On retiendra en particulier les points suivants :

- ✓ *Pour une aide thermique localisée au niveau du media filtrant, à basse température (< 100 °C), l'influence sur la filtration dépend de la « filtrabilité » de la suspension. Pour une suspension difficile à filtrer, l'aide thermique se révèle être presque aussi efficace que dans le cas d'un essai à température homogène. Ce résultat est lié au fait que l'apport thermique au niveau du media filtrant permet une réduction significative de la viscosité du liquide dans le gâteau et que l'élévation de température induit une modification de la structure du gâteau en augmentant sa résistance spécifique (ce deuxième effet étant plus marqué dans le cas d'un essai réalisé à température homogène).*
- ✓ *Pour une aide thermique localisée au niveau du media filtrant à haute température (> 100 °C), une réduction rapide de la porosité moyenne du gâteau, en cours de compression, a été observée. Ce phénomène, que nous avons appelé « effondrement » du gâteau, n'a, à notre connaissance, pas été décrit dans la littérature relative à la filtration. Le phénomène d'effondrement a été*

caractérisé et s'est révélé dépendre de plusieurs paramètres. L'amplitude de l'effondrement dépend de la compressibilité du matériau : plus le matériau est compressible, plus l'effondrement est important et les siccités atteintes élevées. La pression appliquée sur le gâteau, de part son rôle sur la structure du gâteau, modifie elle aussi l'effondrement. Plus la pression appliquée est élevée, moins l'effondrement est important. Le phénomène dépend apparemment de l'épaisseur du gâteau, ce qui semble conférer aux mécanismes mis en jeu un caractère impliquant l'ensemble de la matrice poreuse du gâteau. Enfin, le phénomène résulte du couplage entre un effet mécanique (pression) et un effet thermique (vaporisation au niveau du media filtrant). Lorsque la pression est relâchée, l'effondrement n'apparaît pas. L'interprétation du phénomène d'effondrement n'a pas été donnée. Des hypothèses sont avancées qui demandent une métrologie plus fine pour être confirmées.

- ✓ *Pour une aide thermique localisée au niveau du pseudo piston, à basse ou haute température, les premiers essais ont montré une influence faible, voire nulle, sur la séparation. Le point à retenir est qu'une élévation de température permettant de provoquer une vaporisation au niveau du pseudo piston n'engendre pas d'effondrement du gâteau.*

La suite immédiate de ce travail concerne tout d'abord la fin de l'étude de l'aide thermique localisée au niveau du pseudo piston.

Une caractérisation thermique de la cellule doit ensuite être menée de façon, par exemple, à utiliser les données

fournies par le flux mètre disposé dans le pseudo piston et faire une analyse plus précise des signaux thermiques.

L'étude de matériaux extrêmement compressibles comme les boues biologiques floculées semble un préambule d'un intérêt majeur pour l'utilisation de ce type de procédé. Dans le contexte actuel, le traitement des boues représente un enjeu économique capital. Les premières investigations menées sur une suspension de Kaolin floculé et une aide thermique au niveau du media filtrant (Fig.C1) nous encouragent à penser que l'aide thermique dans le cas de boues de station d'épuration pourrait se révéler très efficace.

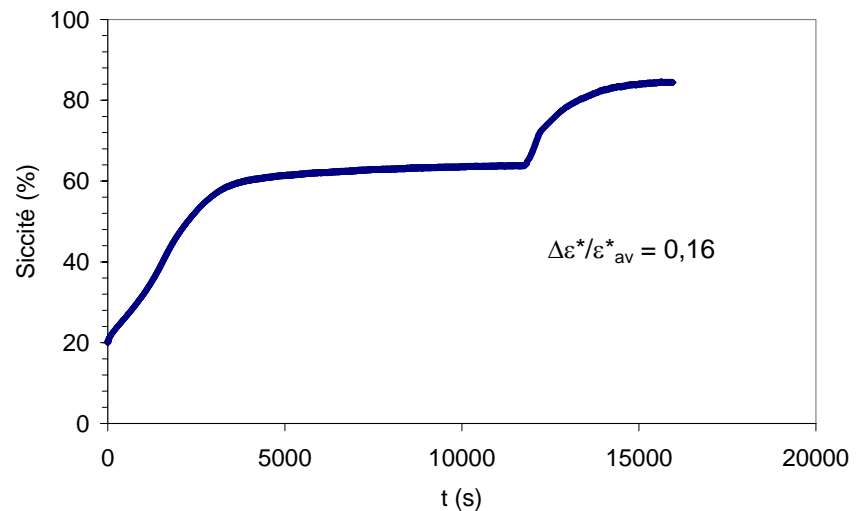


Fig.C1. Déclenchement d'un effondrement en phase de compression d'un gâteau de Kaolin floculé à 1 g/kg de matière sèche ($\Delta P = 1,4$ bar, $s = 0,23$, $T = 125$ °C).

Enfin, l'interprétation physique de l'effondrement doit être approfondie. Dans ce sens, l'étude de la littérature dans le domaine de la mécanique des sols saturés pourra sans doute apporter un certain nombre d'éléments qu'il conviendra d'éclairer par des expériences appropriées.

Nomenclature

Lettres romaines

a	pende des courbes $t/V = f(V)$	$s.m^{-6}$
a_T	diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
A	surface de filtration	m^2
A_{LS}	aire interfaciale	m^2
a'	paramètre empirique défini par l'équation (II.32)	-
a''	paramètre empirique défini par l'équation (II.33)	-
b	ordonnée à l'origine des courbes $t/V = f(V)$	$s.m^{-3}$
b''	paramètre empirique défini par l'équation (II.37)	-
B	rapport de la compression secondaire sur la compression totale	-
C	constante de Ruth (eq. II.1)	$m^6.s^{-1}$
C_e	coefficient de compression modifié	$m^{-2}.s^{-1}$
D	diamètre de cellule	m
d_{50}	diamètre médian des particules solides	μm
e	taux de vide	-
E_1	rigidité du module de Terzaghi	Pa
E_2	rigidité du module de Kelvin – Voigt	Pa
F_S	résultante des forces de compression s'accumulant	N
G_2	viscosité du module de Kelvin – Voigt (compression secondaire)	Pa.s
G_3	viscosité du module de Kelvin – Voigt (compression tertiaire)	Pa.s
H	hauteur de cellule	m
h	position du pseudo piston	m
h_{av}	position du pseudo piston avant effondrement	m
h_N	hauteur normalisée	-
h_f	position du pseudo piston en fin d'expérience	m
J_1	paramètre défini par le tableau (II.2)	-
J_2	paramètre défini par le tableau (II.2)	-
k	perméabilité du gâteau	m^2
k_m	perméabilité du media filtrant	m^2
L	épaisseur du gâteau de filtration	m
L_o	épaisseur du gâteau de filtration à $t_c = 0$	m
L_∞	épaisseur du gâteau en fin de compression	m
L_m	épaisseur du media filtrant	m
m_l	masse de liquide	kg
m_h	masse de gâteau humide	kg

m_s	masse de gâteau sec	kg
n	coefficient de compressibilité	-
n'	compressibilité apparente	-
p_L	pression liquide à l'échelle du pore	Pa
P_a	paramètre empirique défini par les équations (II.38) et (II. 39)	Pa
P_{app}	pression appliquée	Pa
P_{atm}	pression atmosphérique	Pa
Pe_{th}	nombre de Peclet thermique	-
P_i	pression définie par l'équation (II.36)	Pa
P_L	pression liquide	Pa
P_m	pression liquide à l'interface gâteau – media filtrant	Pa
P_N	pression liquide normalisée	-
P_S	pression solide	Pa
$P_{S.1}$	profil de pression solide à $t_c = 0$	Pa
q_L	débit spécifique de liquide	$m.s^{-1}$
q_{Li}	débit spécifique de liquide à l'interface suspension – gâteau côté gâteau	$m.s^{-1}$
q_{Lo}	débit spécifique de liquide à l'interface suspension – gâteau côté suspension	$m.s^{-1}$
q_{Lm}	débit spécifique de filtrat à l'interface gâteau – media	$m.s^{-1}$
q_S	débit spécifique de solide	$m.s^{-1}$
q_{Si}	débit spécifique de solide à l'interface suspension – gâteau côté gâteau	$m.s^{-1}$
q_{So}	débit spécifique de liquide à l'interface suspension – gâteau côté suspension	$m.s^{-1}$
R	frottement visqueux par unité de volume de solide	$N.m^{-3}$
R_g	résistance hydraulique du gâteau de filtration	m^{-1}
R_m	résistance hydraulique du media filtrant	m^{-1}
R_{m^∞}	résistance hydraulique limite du media filtrant (eq.II.11)	m^{-1}
R_{mo}	résistance hydraulique initiale du media filtrant	m^{-1}
s	fraction massique de solide dans la suspension	-
T	température	$^\circ C$
t	temps	s
t_c	temps de compression	s
t_{eff}	temps d'effondrement	s
t_o	paramètre de l'équation (II.1)	s
t_{filt}	durée de filtration	s
T_{amb}	température ambiante	$^\circ C$
T_{filtre}	température de régulation	$^\circ C$
T_{piston}	température sur la face inférieure du pseudo-piston	$^\circ C$
u	vitesse relative du liquide	$m.s^{-1}$
U_c	taux moyen de consolidation	-
V	volume du VER	m^3
V	volume de filtrat	m^3
V_o	paramètre de l'équation (II.1)	m^3
$V_{gâteau}$	volume de gâteau	m^3
V_N	volume normalisé	-
W	rapport masse de gâteau humide sur masse de gâteau sec	-
z	variable d'espace	m

Lettre grecques

α	résistance spécifique d'un gâteau incompressible	m.kg^{-1}
α_o	résistance spécifique du gâteau à pression solide nulle	m.kg^{-1}
α_z	résistance spécifique locale dans un gâteau compressible	m.kg^{-1}
$\langle \alpha \rangle$	résistance spécifique moyenne d'un gâteau compressible	m.kg^{-1}
β	paramètre empirique défini par l'équation (II. 39)	-
ΔP_g	perte de charge dans le gâteau de filtration	Pa
ΔP	pression de filtration	Pa
ΔP_m	perte de charge dans le media filtrant	Pa
ε	porosité locale	-
ε^*	porosité moyenne	-
$\varepsilon^*_{\text{filt}}$	porosité moyenne des gâteaux en fin de filtration	-
$\varepsilon^*_{\text{max}}$	porosité moyenne limite des gâteaux en fin de filtration	-
ε^o	porosité du gâteau à pression solide nulle	-
ε_o	porosité de la suspension	-
φ	puissance dissipée dans les résistances	W
μ	viscosité du filtrat	Pa.s
$\mu_{(T)}$	viscosité du filtrat à la température T	Pa.s
$\mu_{(T_{\text{amb}})}$	viscosité du filtrat à 20 °C	Pa.s
θ	paramètre empirique défini par l'équation (II.11)	$\text{m}^4.\text{kg}^{-2}$
ρ_L	masse volumique du liquide	kg.m^{-3}
ρ_S	masse volumique du solide	kg.m^{-3}
ω	volume de solide par unité d'aire compris entre la surface du media et une position arbitraire dans le gâteau	m
ω_A	masse de gâteau sec déposé par unité de surface filtrante à la cote z dans une couche d'épaisseur dz	kg.m^{-2}
ω_{AT}	masse de gâteau sec totale déposée par unité de surface filtrante	kg.m^{-2}
ω_c	masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat	kg.m^{-3}
ω_o	volume total de solide par unité d'aire	m

Tenseurs et vecteurs

\mathbf{e}_z	vecteur unitaire de l'axe z	-
\mathbf{F}	force totale exercée par les fluides sur le solide par unité de volume	(N.m^{-3})
\mathbf{F}_d	force de trainée par unité de volume	(N.m^{-3})
\mathbf{I}	tenseur identité	-
\mathbf{n}_{LS}	normale sortante	-
$\mathbf{\Pi}_L$	tenseur des contraintes	Pa
$\boldsymbol{\tau}_L$	tenseur des contraintes visqueuses	Pa
\mathbf{q}_L	débit spécifique de liquide	(m.s^{-1})
\mathbf{q}_S	débit spécifique de solide	(m.s^{-1})

Fonction

erf fonction erreur

Abréviations

CCP cellule de compression perméabilité
CFC cellule de filtration compression

Annexes

- A. FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE DOTEE DU PSEUDO PISTON (CF . FIG .III.4)

- B. FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE ASSISTEE THERMIQUEMENT POUR UNE AIDE THERMIQUE HOMOGENE

- C. FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE ASSISTEE THERMIQUEMENT POUR UNE AIDE THERMIQUE AU NIVEAU DU MEDIA FILTRANT

- D. FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE ASSISTEE THERMIQUEMENT POUR UNE AIDE THERMIQUE AU NIVEAU DU PSEUDO PISTON

- E. METHODE DE LA PRISE DE MOYENNE VOLUMIQUE LOCALE

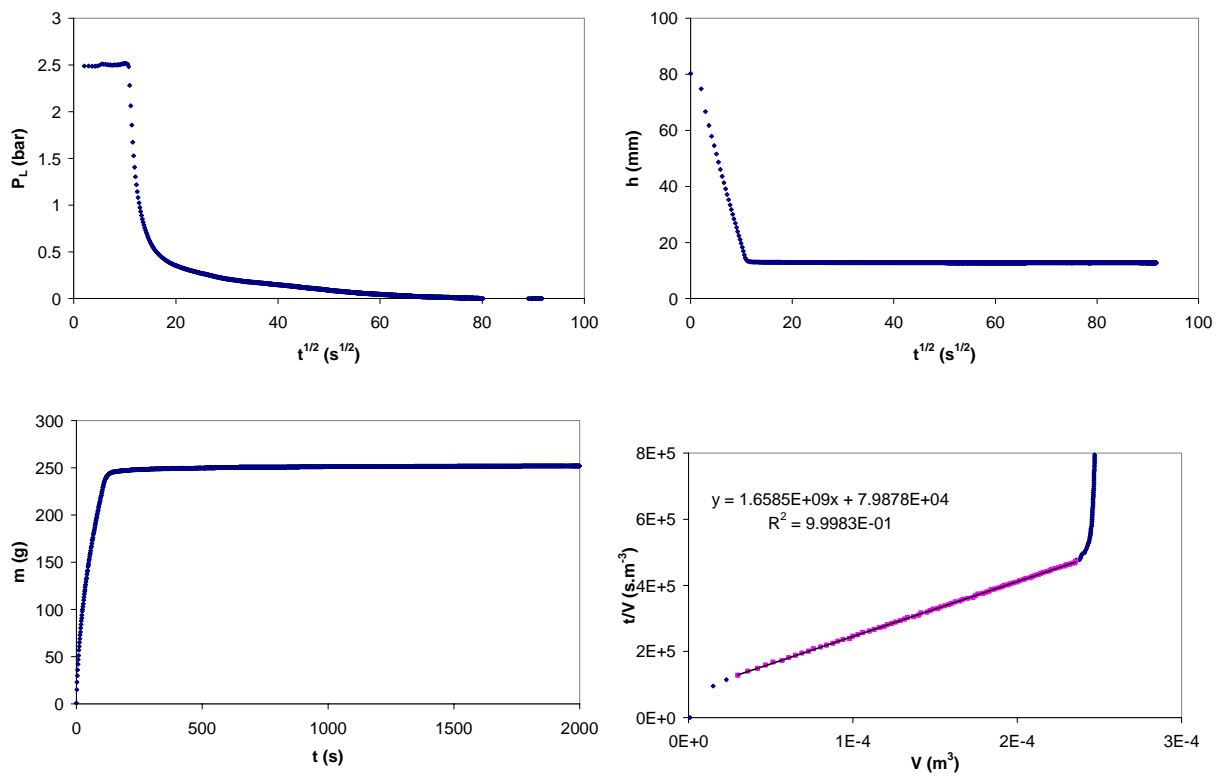
- F. CARACTERISTIQUES DES TOILES FILTRANTES UTILISEES POUR L’ETUDE EXPERIEMENTALE

- G. ACQUISITION DES DONNEES

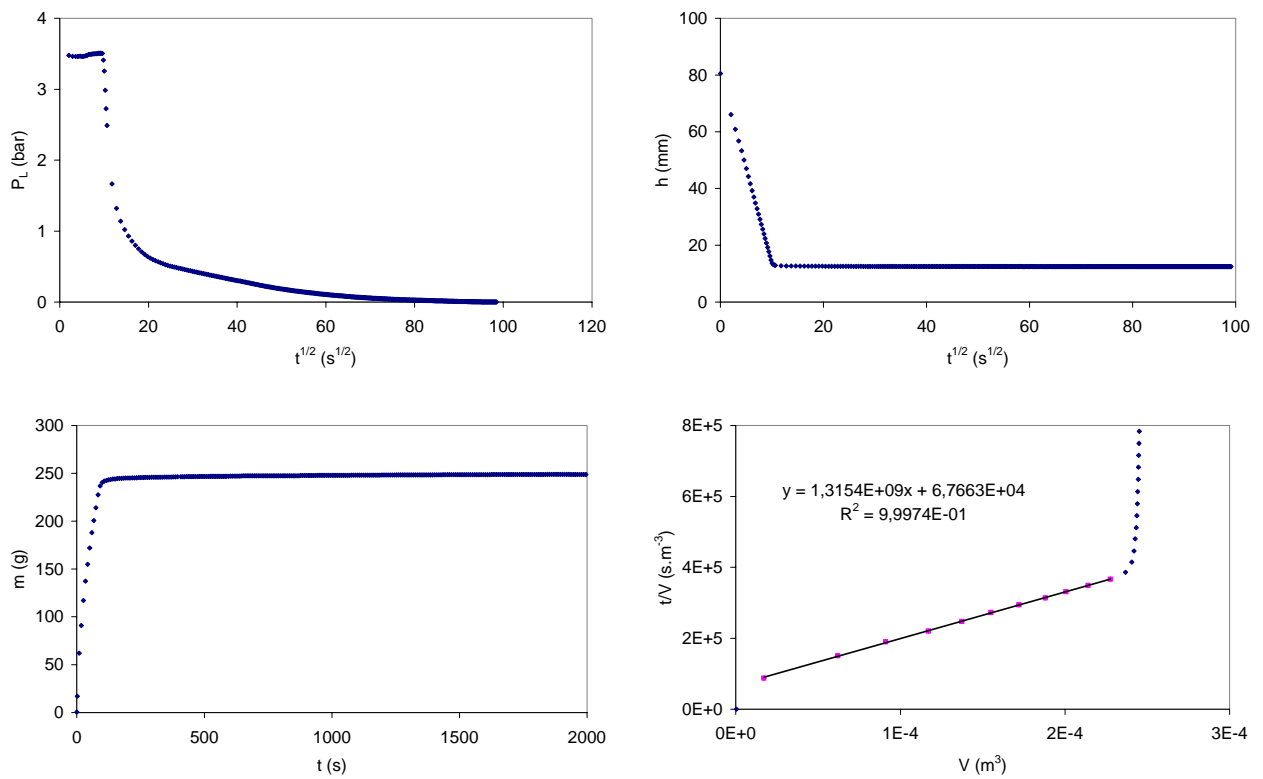
ANNEXE A**FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE DOTÉE DU PSEUDO PISTON (CF . FIG .III.4)**

Dans cette annexe sont regroupés tous les essais réalisés dans la cellule de filtration – compression dotée du pseudo piston et présentée à la figure III.4 :

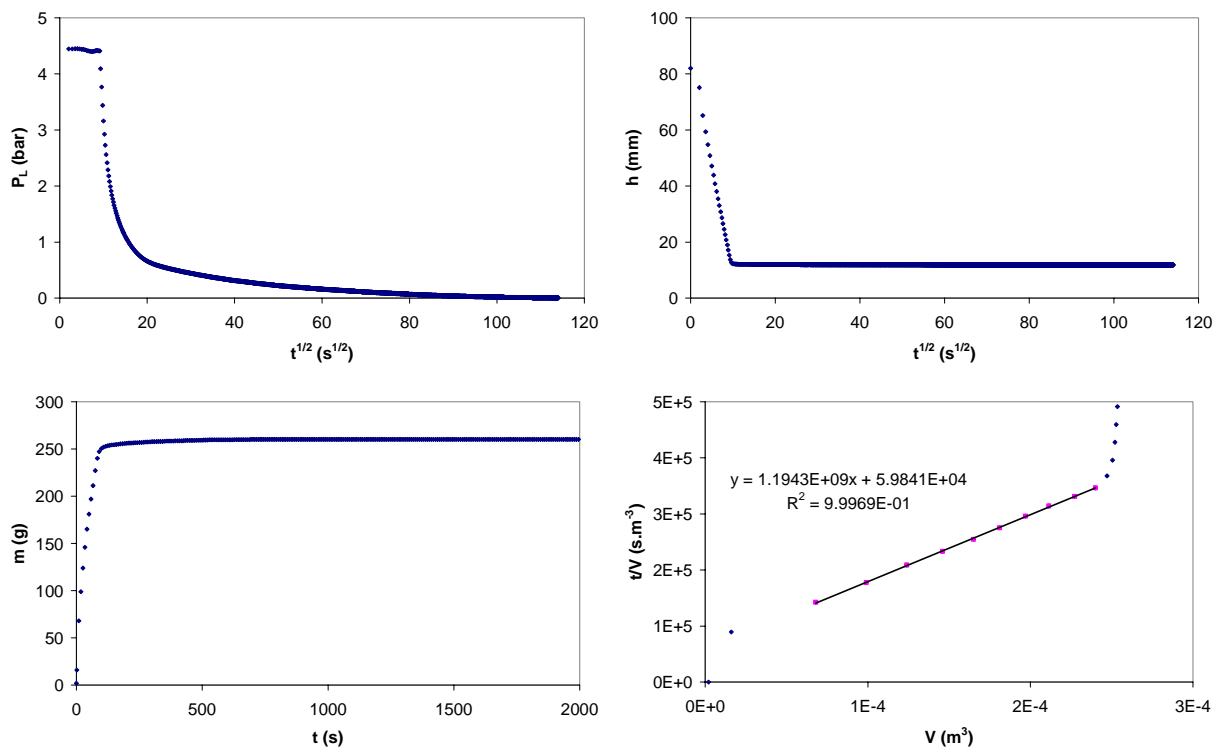
<i>Numéro de l'essai</i>	<i>Suspension</i>	<i>ΔP (bar)</i>
<i>Essai 1</i>	<i>Talc</i>	<i>2,6</i>
<i>Essai 2</i>	<i>Talc</i>	<i>3,5</i>
<i>Essai 3</i>	<i>Talc</i>	<i>4,2</i>
<i>Essai 4</i>	<i>Kaolin</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 5</i>	<i>Kaolin</i>	<i>2,6</i>
<i>Essai 6</i>	<i>Kaolin</i>	<i>3,6</i>
<i>Essai 7</i>	<i>Kaolin</i>	<i>4,2</i>



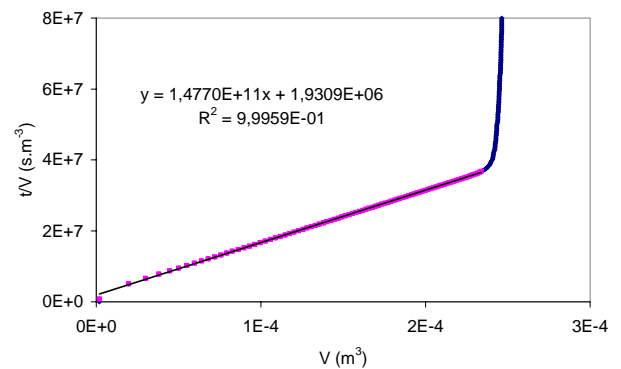
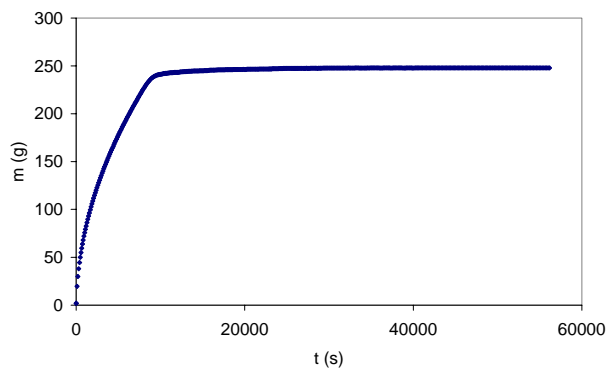
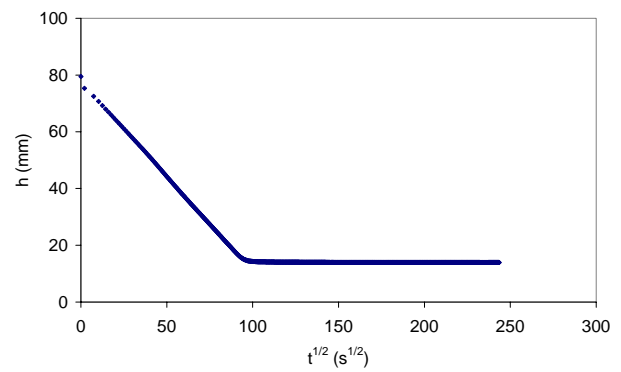
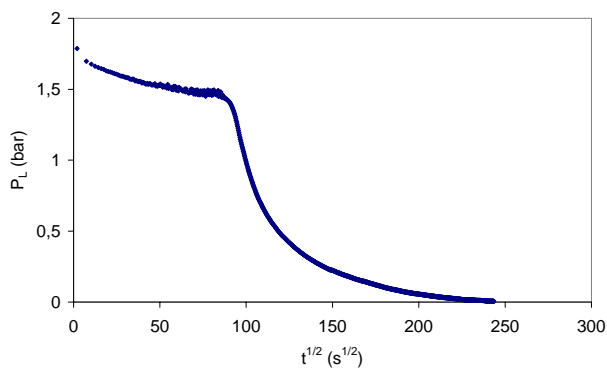
ESSAI 1	
pression de filtration (bar)	2,6
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	88,3
masse de gâteau sec (g)	62,5
siccité finale (%)	70,78
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	261,83
$t/V = aV + b$	
a	$1,66 \cdot 10^9$
b	$7,99 \cdot 10^4$
$\langle \alpha \rangle$ ($kg \cdot m^{-1}$)	$4,6822 \cdot 10^{10}$
R_m (m^{-1})	$7,68 \cdot 10^{10}$
hauteur de gâteau (m)	$1,28 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$4,92 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,46



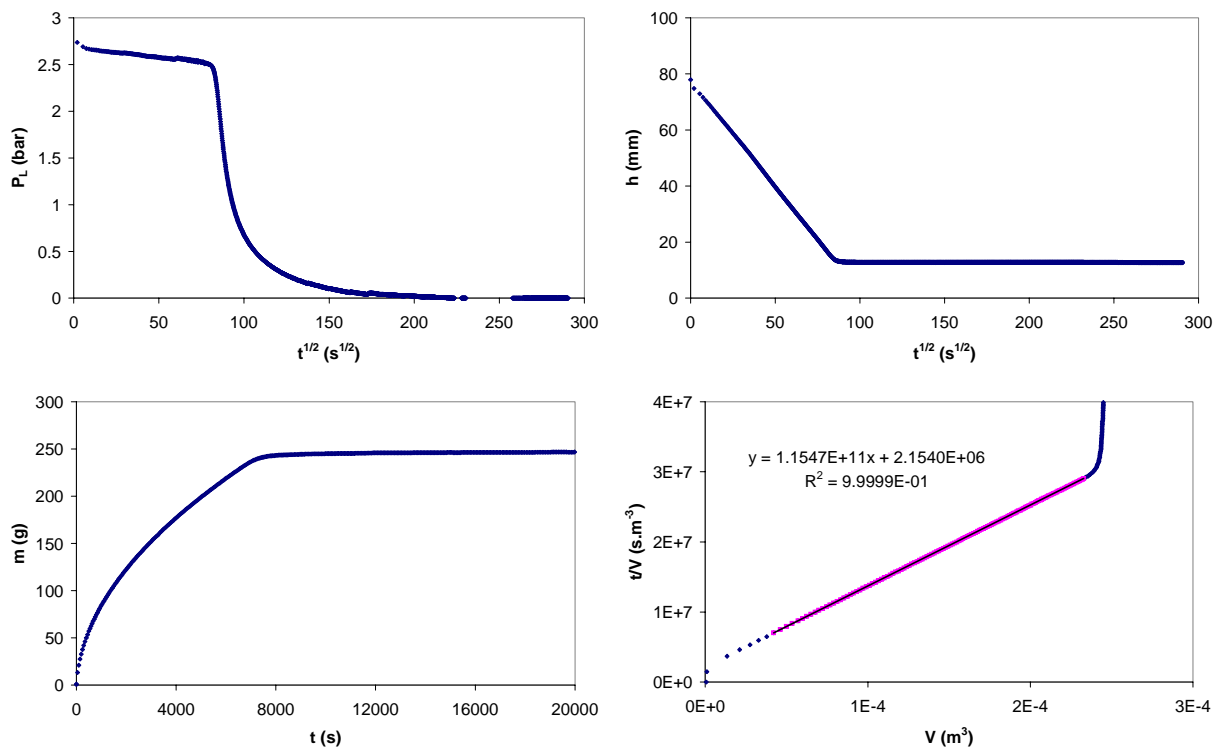
ESSAI 2	
pression de filtration (bar)	3,5
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	88,7
masse de gâteau sec (g)	64,8
siccité finale (%)	73,06
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	290,58
$t/V = aV + b$	
a	$1,32 \cdot 10^9$
b	$6,77 \cdot 10^4$
$\langle \alpha \rangle$ ($kg \cdot m^{-1}$)	$4,8959 \cdot 10^{10}$
R_m (m^{-1})	$8,19 \cdot 10^{10}$
hauteur de gâteau (m)	$1,25 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$4,80 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,45



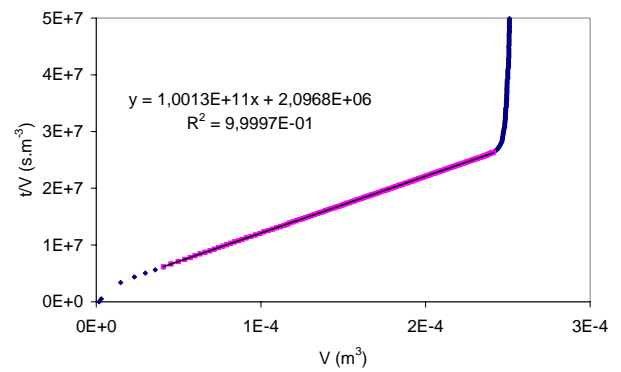
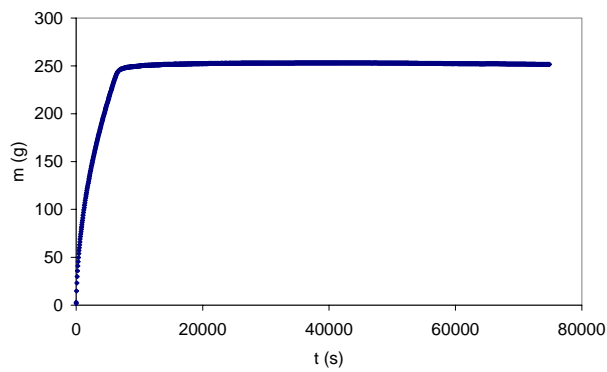
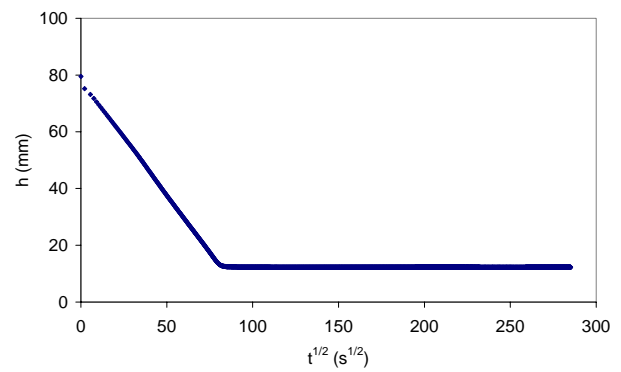
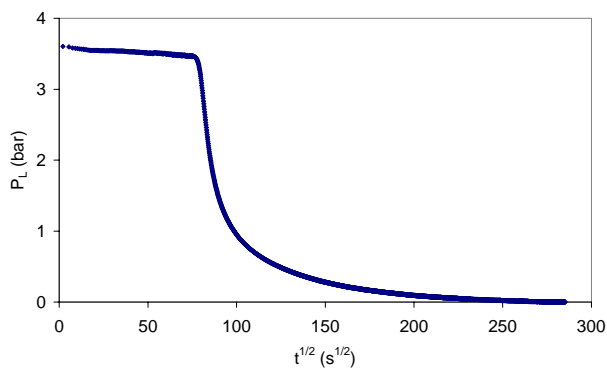
ESSAI 3	
pression de filtration (bar)	4,2
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	86,6
masse de gâteau sec (g)	66,4
siccité finale (%)	76,67
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	276.67
$t/V = aV + b$	
a	$1,19 \cdot 10^9$
b	$5,98 \cdot 10^4$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$5.6288 \cdot 10^{10}$
R_m (m ⁻¹)	$1.01 \cdot 10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	$1,18 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,54 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,44



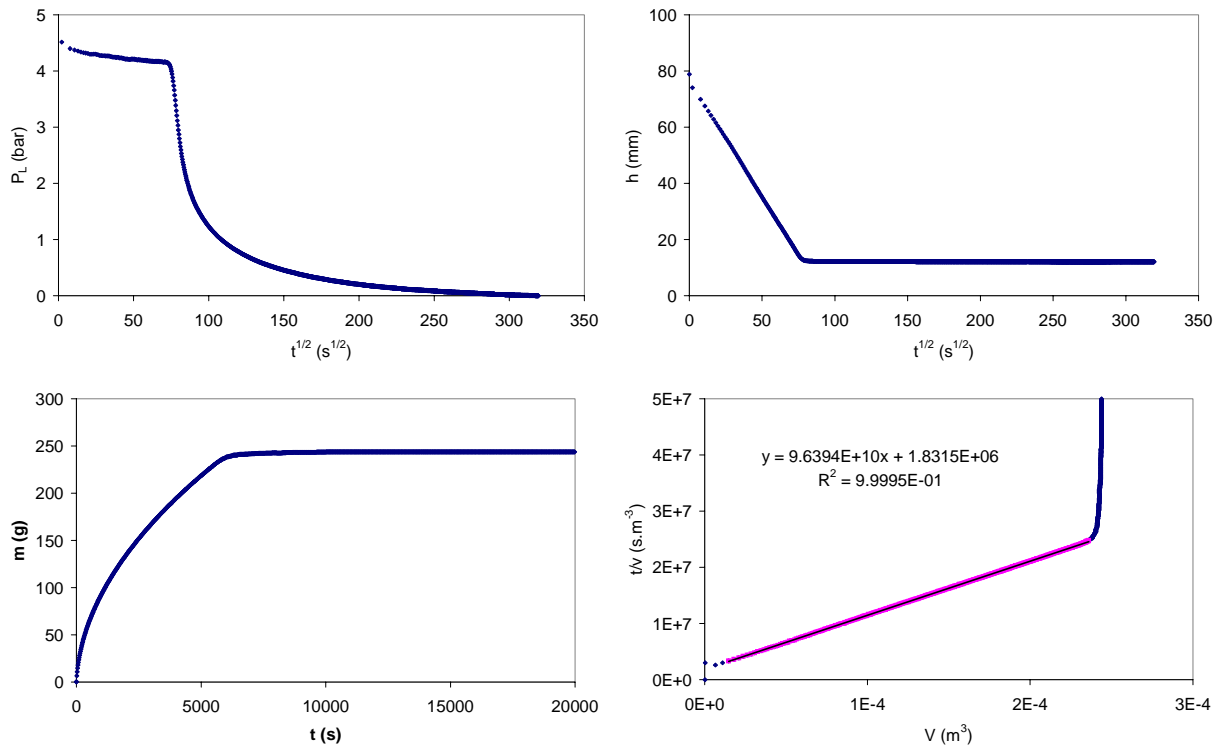
ESSAI 4	
pression de filtration (bar)	1,4
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	93
masse de gâteau sec (g)	62,4
siccité finale (%)	67,10
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	275,74
$t/V = aV + b$	
a	$1,48 \cdot 10^{11}$
b	$1,93 \cdot 10^6$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$2,3757 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$1,11 \cdot 10^{12}$
hauteur de gâteau (m)	$1,39 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,36 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,55



ESSAI 5	
pression de filtration (bar)	2,6
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	88,2
masse de gâteau sec (g)	61,4
siccité finale (%)	69,61
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	267.65
$t/V = aV + b$	
a	$1,15 \cdot 10^{11}$
b	$2,15 \cdot 10^6$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$3,2528 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$2,11 \cdot 10^{12}$
hauteur de gâteau (m)	$1,27 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,88 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,52



ESSAI 6	
pression de filtration (bar)	3,6
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	85,7
masse de gâteau sec (g)	61,5
siccité finale (%)	71,76
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	262,73
$t/V = aV + b$	
a	$1,00 \cdot 10^{11}$
b	$2,10 \cdot 10^6$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$3,9441 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$2,82 \cdot 10^{12}$
hauteur de gâteau (m)	$1,23 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,71 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,50

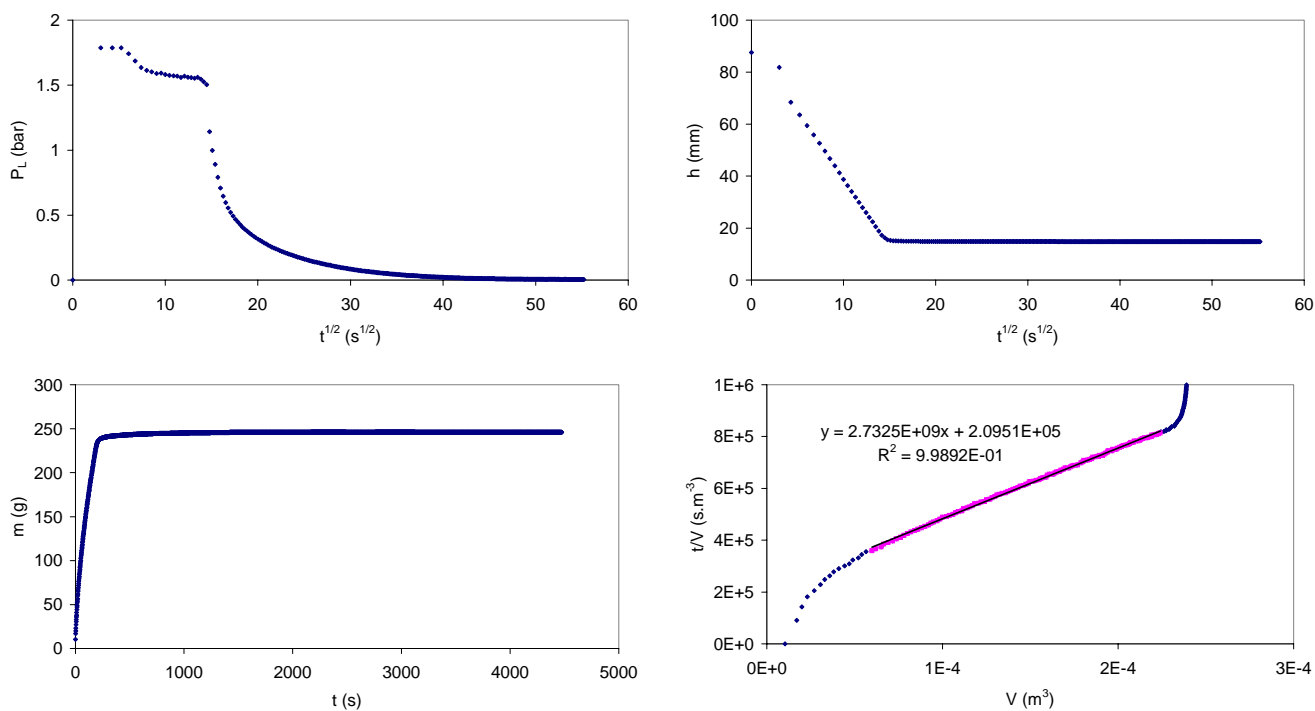


ESSAI 7	
pression de filtration (bar)	4,2
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	85,4
masse de gâteau sec (g)	60,,6
Siccité finale (%)	70,96
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	266,96
$t/V = aV + b$	
a	$9,46 \cdot 10^{10}$
b	$1,83 \cdot 10^6$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$4,4734 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$2,95 \cdot 10^{12}$
hauteur de gâteau (m)	$1,21 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,64 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,49

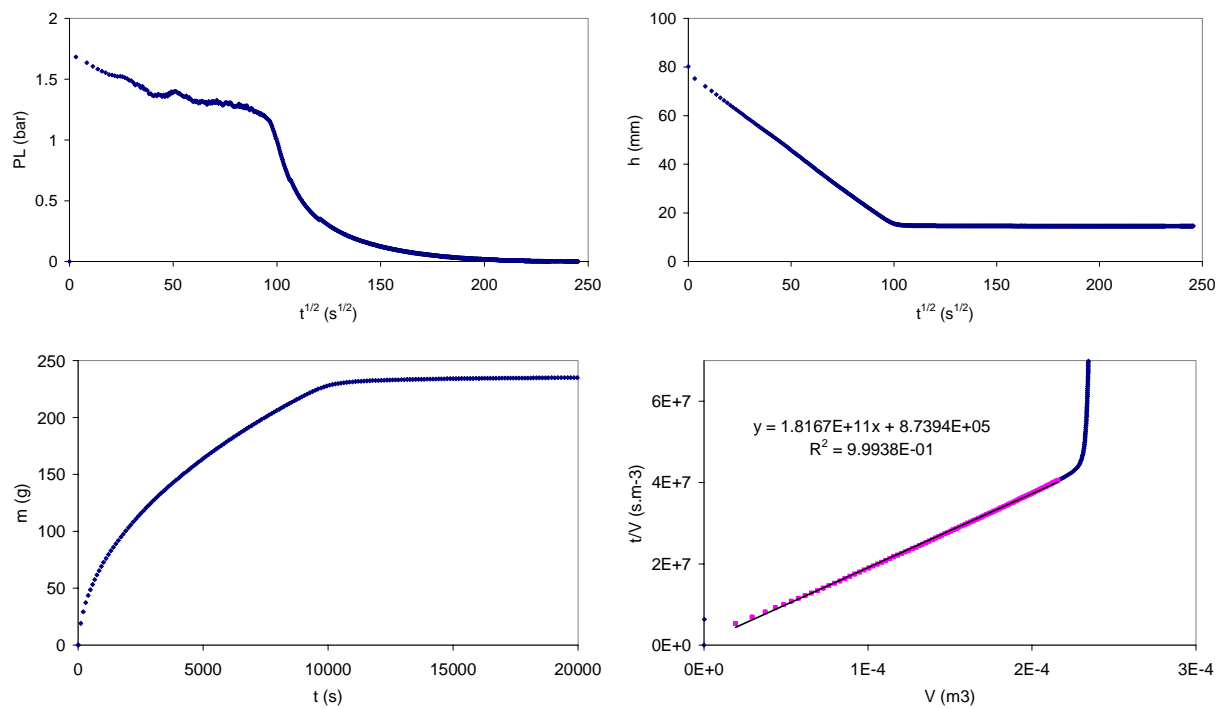
ANNEXE B**FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE
TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE ASSISTEE
THERMIQUEMENT POUR UNE AIDE THERMIQUE
HOMOGENE**

Dans cette annexe sont regroupés tous les essais réalisés dans la cellule de filtration – compression chauffante et présentée à la figure III.11 pour un mode de fonctionnement à température homogène :

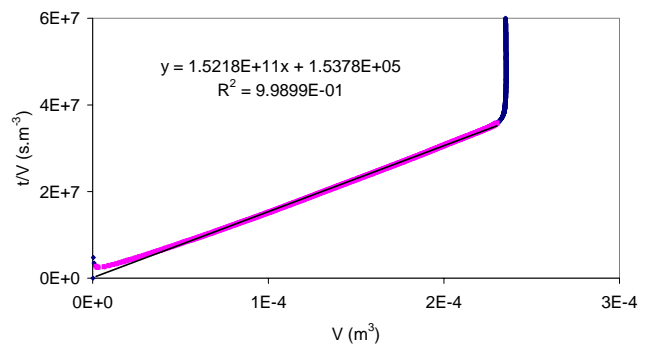
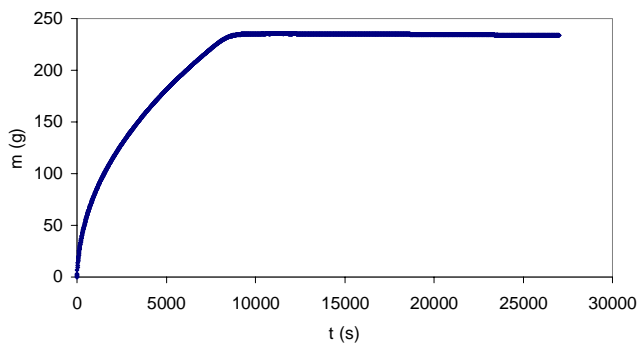
<i>Numéro de l'essai</i>	<i>Suspension</i>	<i>Température</i>	
		<i>de consigne</i>	<i>ΔP (bar)</i>
		<i>(°C)</i>	
<i>Essai 8</i>	<i>Talc</i>	<i>20</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 20</i>	<i>Kaolin</i>	<i>20</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 25</i>	<i>Kaolin</i>	<i>38</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 26</i>	<i>Kaolin</i>	<i>50</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 27</i>	<i>Kaolin</i>	<i>68</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 28</i>	<i>Kaolin</i>	<i>38</i>	<i>3,6</i>
<i>Essai 29</i>	<i>Kaolin</i>	<i>50</i>	<i>3,6</i>
<i>Essai 30</i>	<i>Kaolin</i>	<i>68</i>	<i>3,6</i>



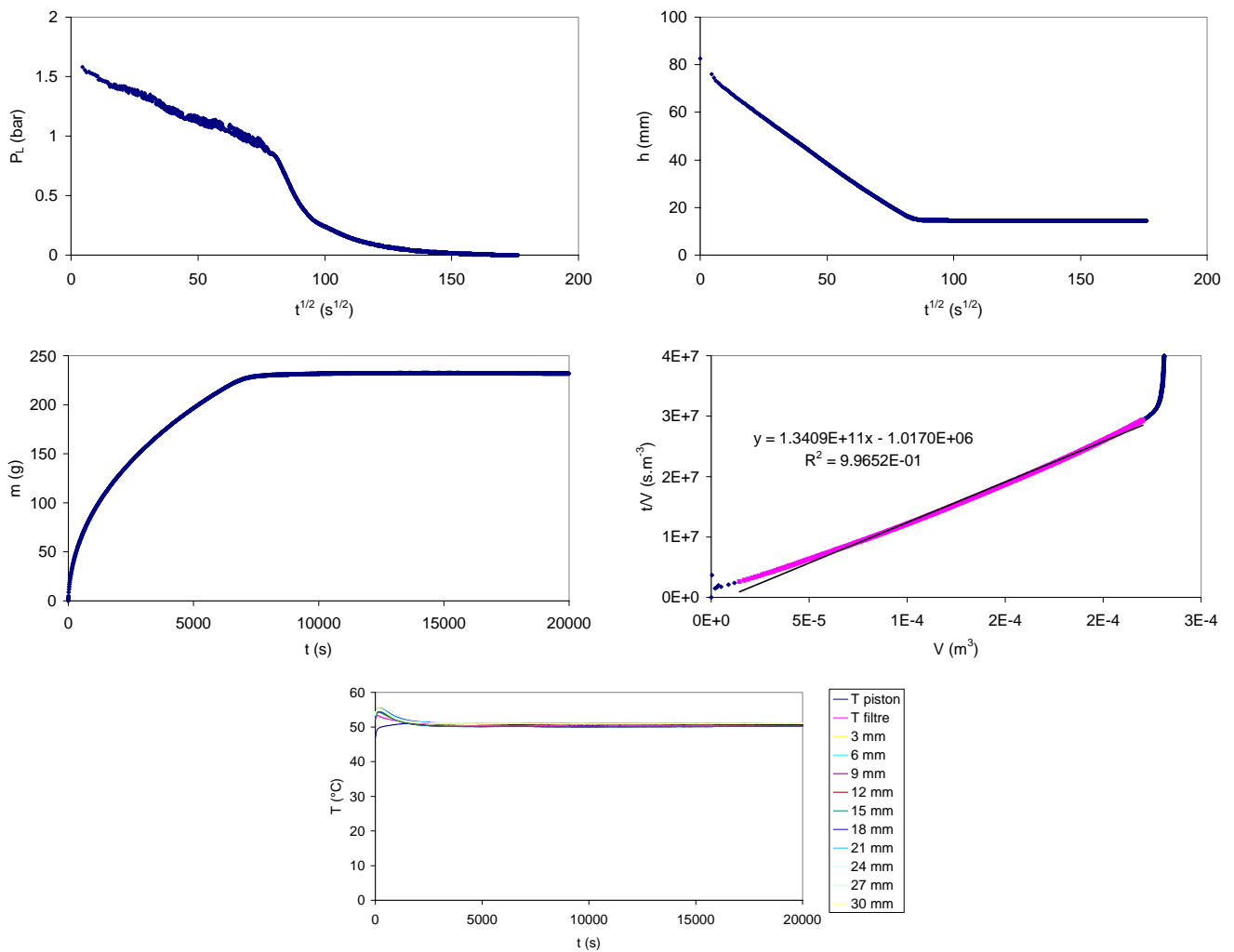
ESSAI 8	
pression de filtration (bar)	1,6
température de fonctionnement (°C)	20
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	96,3
masse de gâteau sec (g)	66,9
siccité finale (%)	69,4
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	282,99
$t/V = aV + b$	
a	$2,73 \cdot 10^9$
b	$2,10 \cdot 10^5$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$4,2778 \cdot 10^{10}$
R_m (m ⁻¹)	$1,24 \cdot 10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	$1,48 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,62 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,50



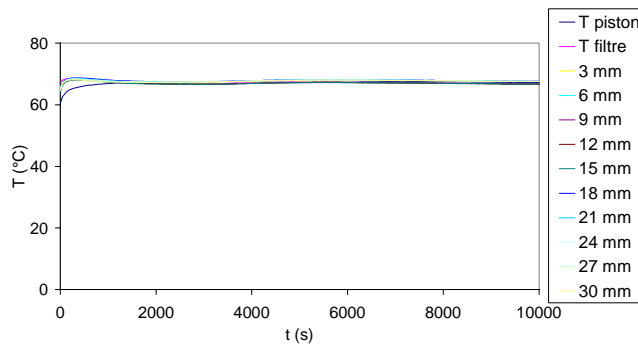
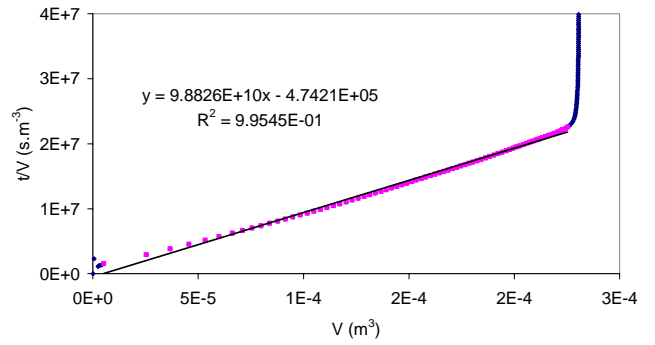
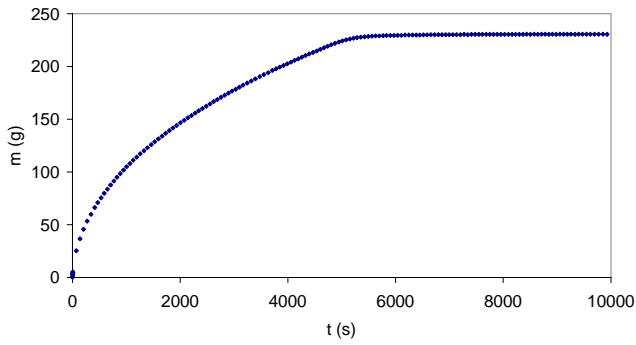
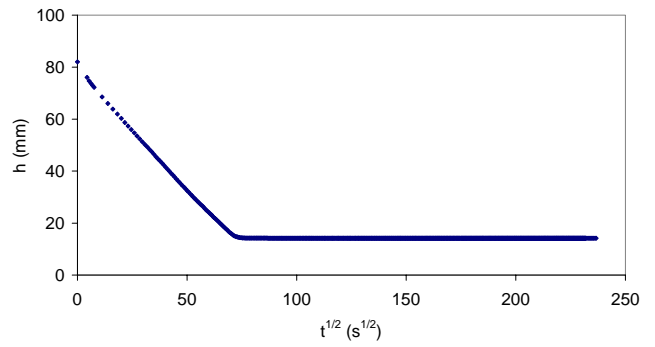
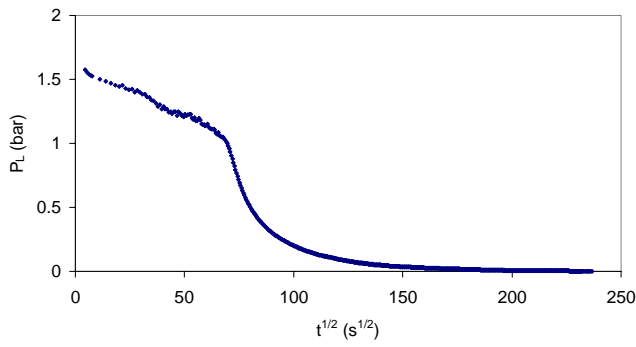
ESSAI 20	
pression de filtration (bar)	1,4
température de fonctionnement (°C)	20
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	93,1
masse de gâteau sec (g)	62
siccité finale (%)	66,59
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg.m^{-3}$)	278,28
$t/V = aV + b$	
a	$1,81.10^{11}$
b	$8,74.10^5$
$\langle \alpha \rangle$ ($kg.m^{-1}$)	$2,5057.10^{12}$
R_m (m^{-1})	$3,21.10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	$1,46.10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$5,53.10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,57



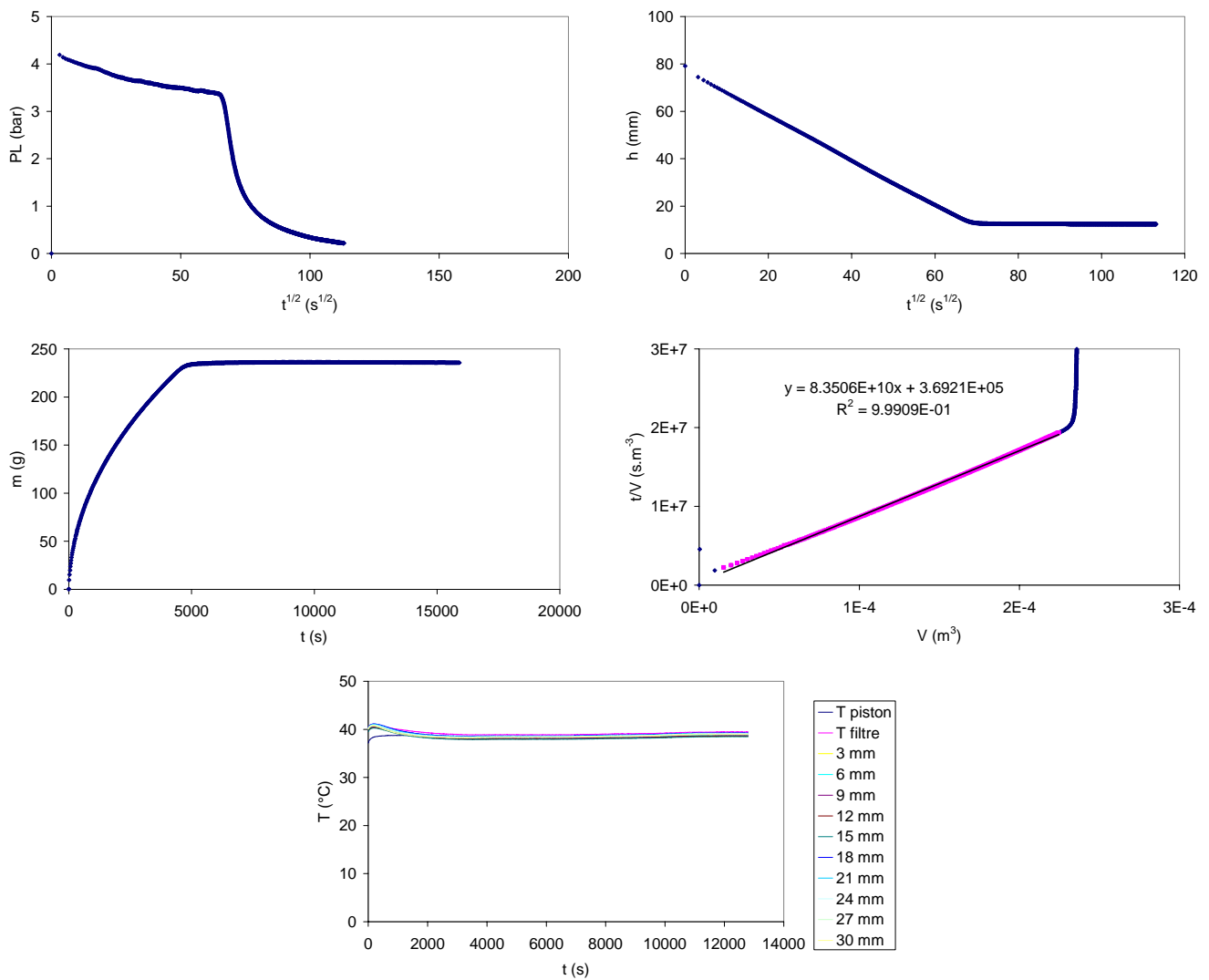
ESSAI 25	
pression de filtration (bar)	1,4
température de fonctionnement (°C)	38
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	91,6
masse de gâteau sec (g)	61,4
siccité finale (%)	66,9
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	281,128
$t/V = aV + b$	
a	$1,52 \cdot 10^{11}$
b	$1,54 \cdot 10^5$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$2,8063 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$1,05 \cdot 10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	
volume de gâteau (m ³)	
porosité moyenne finale (-)	0,57



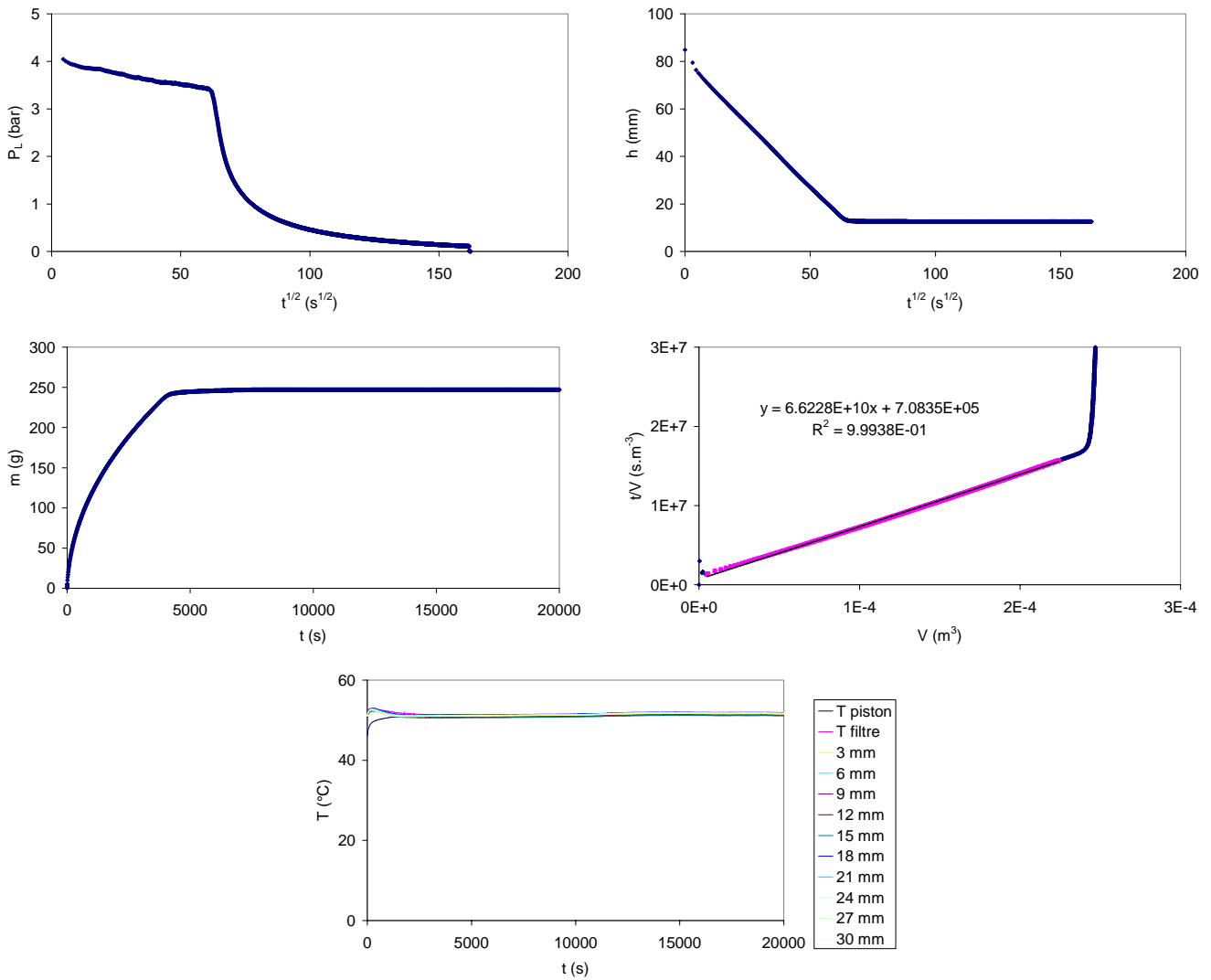
ESSAI 26	
pression de filtration (bar)	1,4
température de fonctionnement (°C)	50
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	92,5
masse de gâteau sec (g)	62,1
siccité finale (%)	67,13
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	283,17
$t/V=aV + b$	
a	$1,34 \cdot 10^{11}$
b	$1,02 \cdot 10^6$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$2,9425 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$8,32 \cdot 10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	$1,43 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,43 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,56



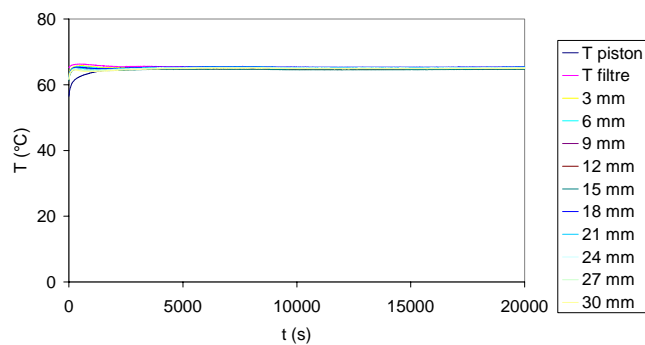
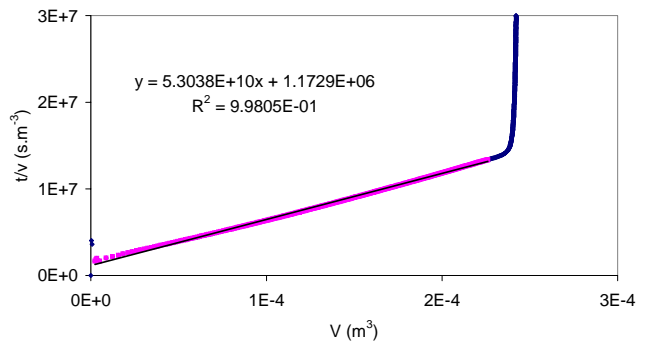
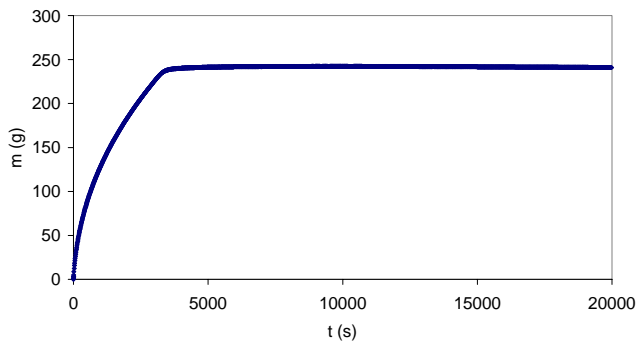
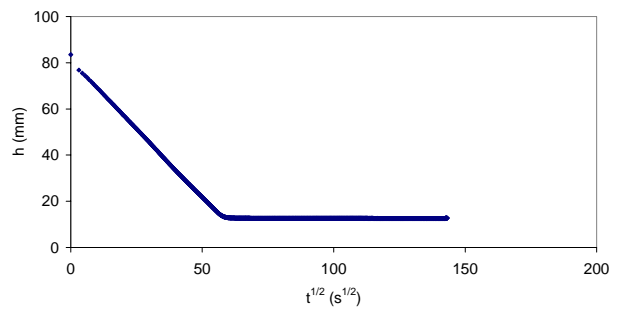
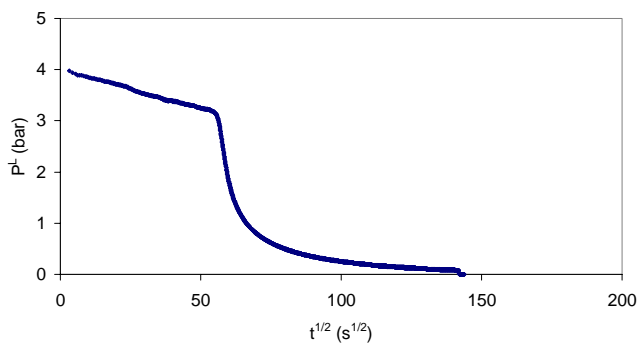
ESSAI 27	
pression de filtration (bar)	1,4
température de fonctionnement (°C)	68
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	91,4
masse de gâteau sec (g)	61,9
siccité finale (%)	67,72
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	284,20
$t/V = aV + b$	
a	$9,88 \cdot 10^{11}$
b	$4,74 \cdot 10^5$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$3,1358 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$5,63 \cdot 10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	$1,43 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,43 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,56



ESSAI 28	
pression de filtration (bar)	3,6
température de fonctionnement ($^{\circ}C$)	38
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	85,6
masse de gâteau sec (g)	61,8
siccité finale (%)	72,11
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	278,77
$t/V = aV + b$	
a	$8,35 \cdot 10^{10}$
b	$3,69 \cdot 10^5$
$\langle \alpha \rangle$ ($kg \cdot m^{-1}$)	$4,3480 \cdot 10^{12}$
R_m (m^{-1})	$7,06 \cdot 10^{11}$
hauteur de gâteau (m)	$1,24 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$4,71 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,50



ESSAI 29	
pression de filtration (bar)	3,6
température de fonctionnement (°C)	50
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	87,3
masse de gâteau sec (g)	63
siccité finale (%)	72,16
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	273,68
$t/V = aV + b$	
a	$6,62 \cdot 10^{10}$
b	$7,08 \cdot 10^5$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$4,5394 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$1,75 \cdot 10^{12}$
hauteur de gâteau (m)	$1,26 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,76 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,49



ESSAI 30	
pression de filtration (bar)	3,6
température de fonctionnement (°C)	68
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	85,6
masse de gâteau sec (g)	61,4
siccité finale (%)	72,3
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	266,15
$t/V = aV + b$	
a	$5,31 \cdot 10^{10}$
b	$1,17 \cdot 10^5$
$\langle \alpha \rangle$ (kg.m ⁻¹)	$4,6375 \cdot 10^{12}$
R_m (m ⁻¹)	$2,58 \cdot 10^{12}$
hauteur de gâteau (m)	$1,27 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,82 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,48

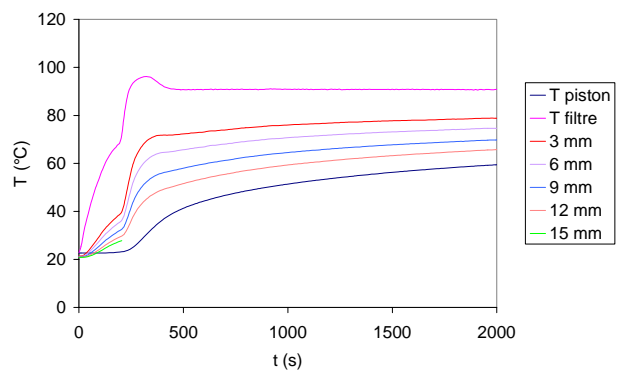
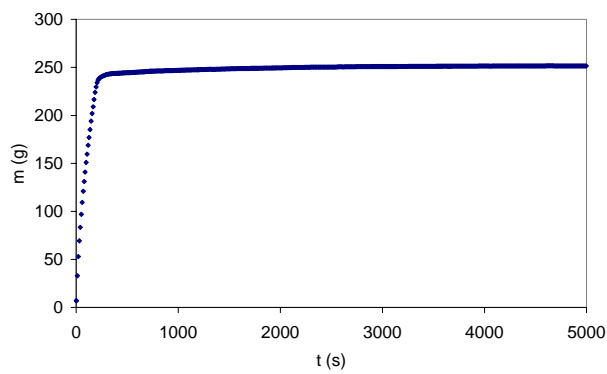
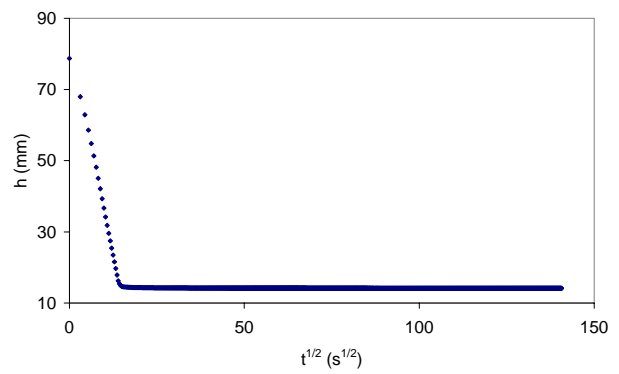
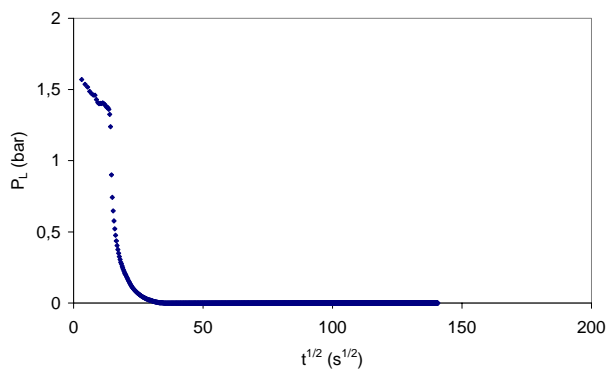
ANNEXE C

**FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE
TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE ASSISTEE
THERMIQUEMENT POUR UNE AIDE THERMIQUE AU
NIVEAU DU MEDIA FILTRANT**

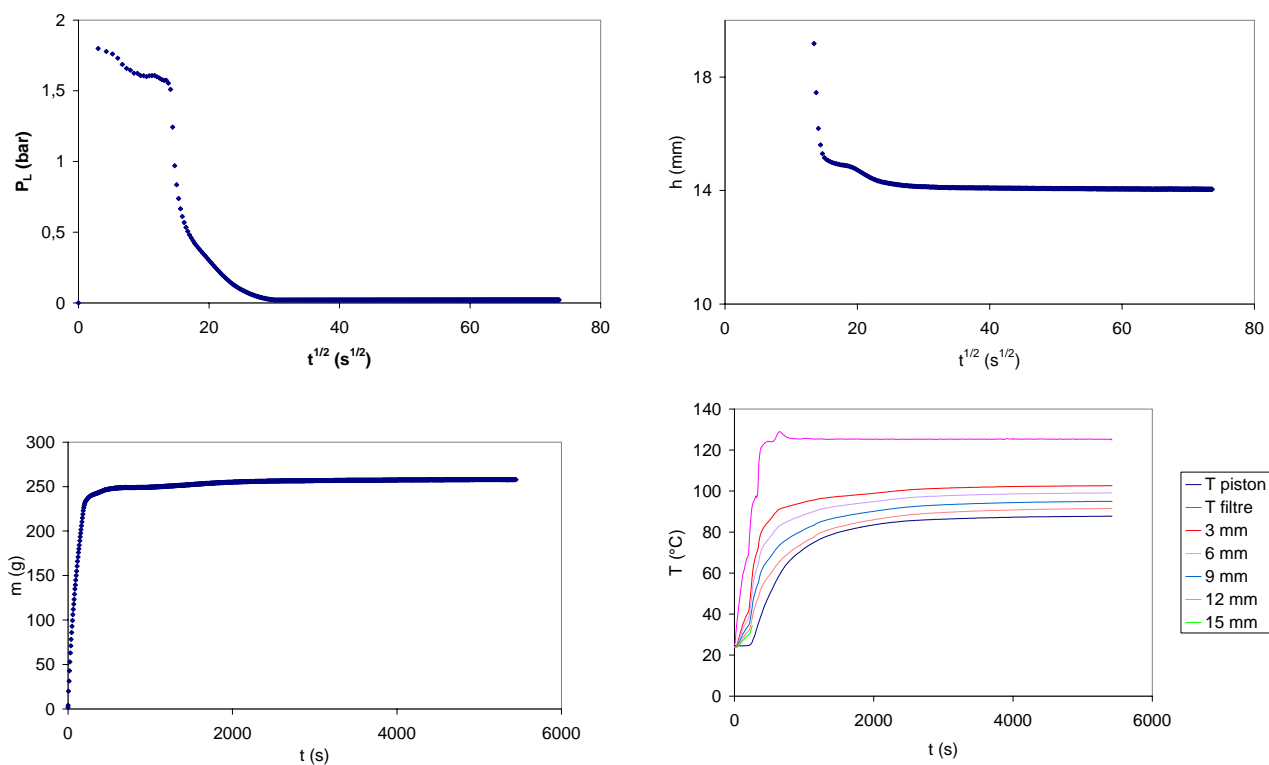
Dans cette annexe sont regroupés tous les essais réalisés dans la cellule de filtration – compression chauffante et présentée à la figure III.11 pour un mode de fonctionnement à température imposée au niveau du media filtrant :

<i>Numéro de l'essai</i>	<i>Suspension</i>	<i>Température de consigne (°C)</i>	<i>ΔP (bar)</i>
<i>Essai 9</i>	<i>Talc</i>	<i>90</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 10</i>	<i>Talc</i>	<i>125</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 11</i>	<i>Talc</i>	<i>150</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 12</i>	<i>Talc</i>	<i>170</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 13</i>	<i>Talc</i>	<i>125</i>	<i>4,2</i>
<i>Essai 14</i>	<i>Talc</i>	<i>125</i>	<i>6</i>
<i>Essai 15</i>	<i>Talc</i>	<i>125</i> <i>(début de compression)</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 16</i>	<i>Talc</i>	<i>125</i> <i>(fin de compression)</i>	<i>1,6</i>

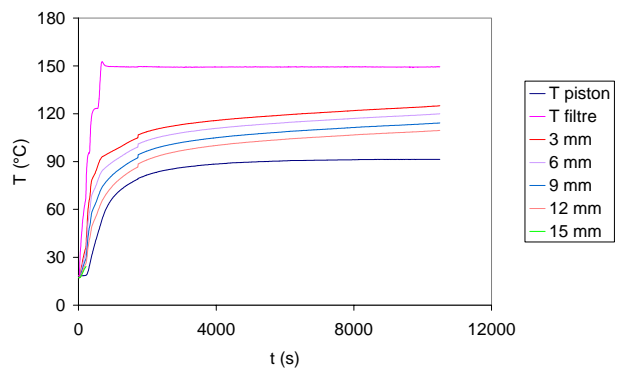
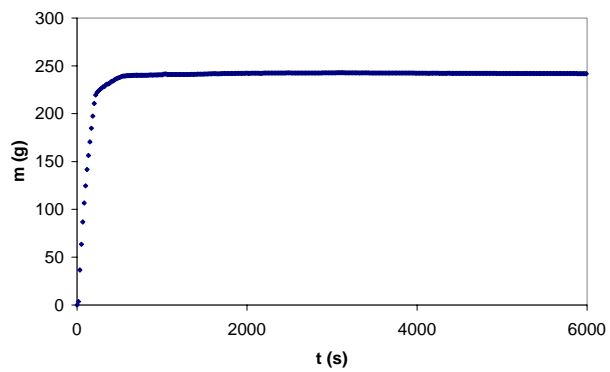
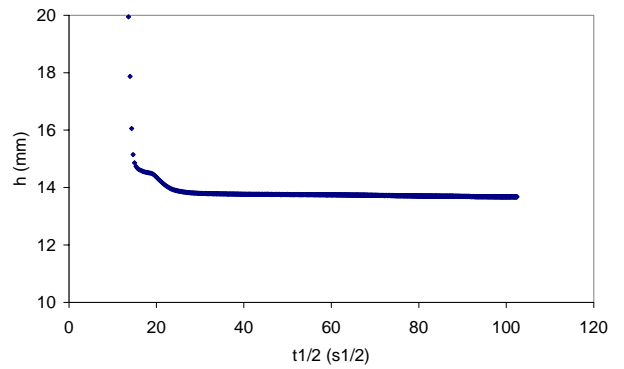
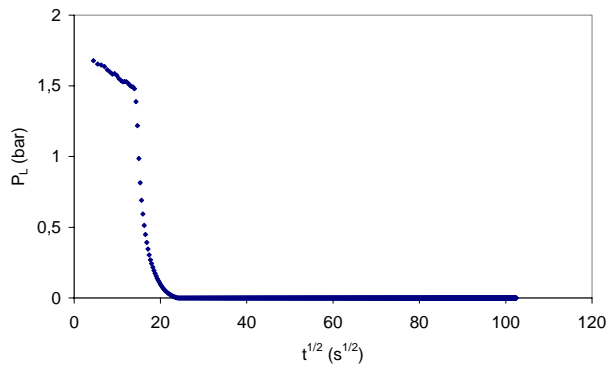
<i>Essai 17</i>	<i>Talc</i> (<i>s = 0,11</i>)	<i>125</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 18</i>	<i>Talc</i> (<i>s = 0,47</i>)	<i>125</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 19</i>	<i>Talc</i> (<i>s = 0,67</i>)	<i>125</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 21</i>	<i>Kaolin</i>	<i>38</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 22</i>	<i>Kaolin</i>	<i>50</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 23</i>	<i>Kaolin</i>	<i>70</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 24</i>	<i>Kaolin</i>	<i>90</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 31</i>	<i>Kaolin</i>	<i>125</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 32</i>	<i>Kaolin</i>	<i>170</i>	<i>1,4</i>
<i>Essai 33</i>	<i>Kaolin</i>	<i>125</i>	<i>3,6</i>



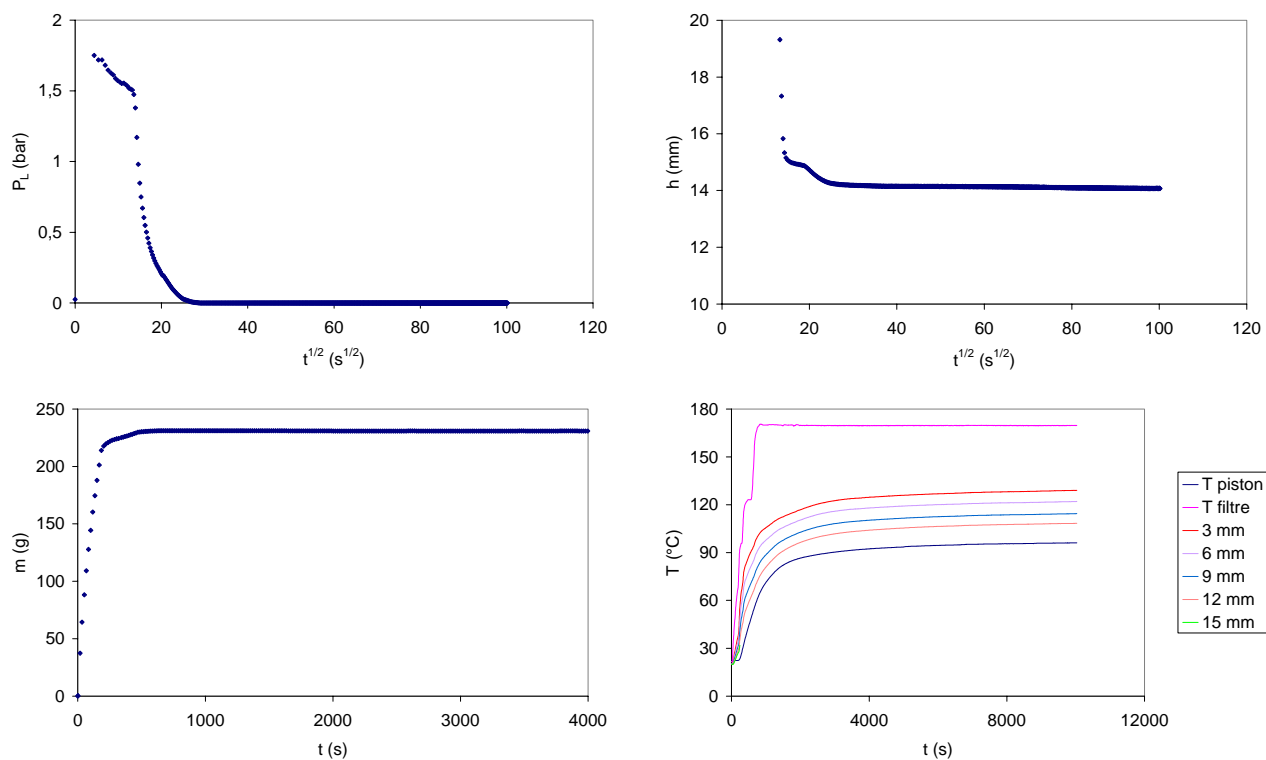
ESSAI 9	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	90
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	94,6
masse de gâteau sec (g)	65,6
siccité finale (%)	69,4
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,48\cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$5,35\cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,49



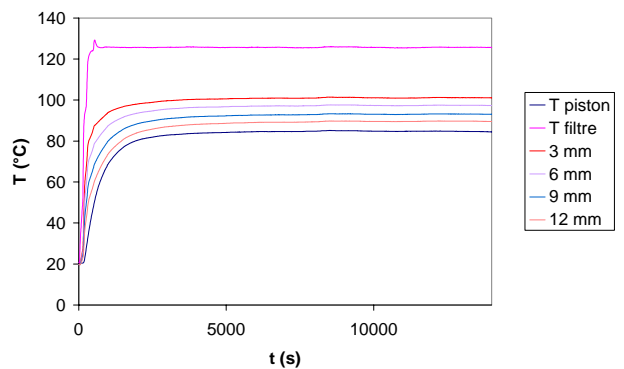
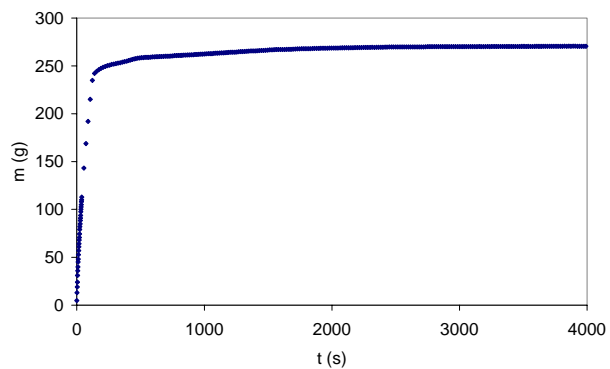
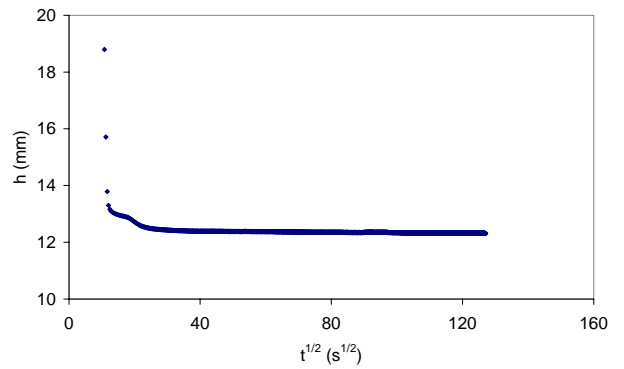
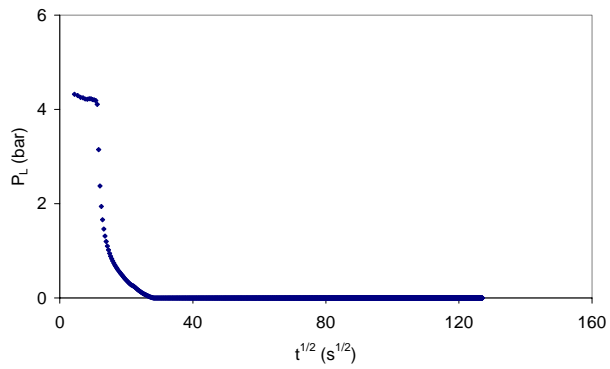
ESSAI 10	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C) (Début de manip)	125
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	74
masse de gâteau sec (g)	67,3
siccité finale (%)	89,7
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,40 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,33 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,45



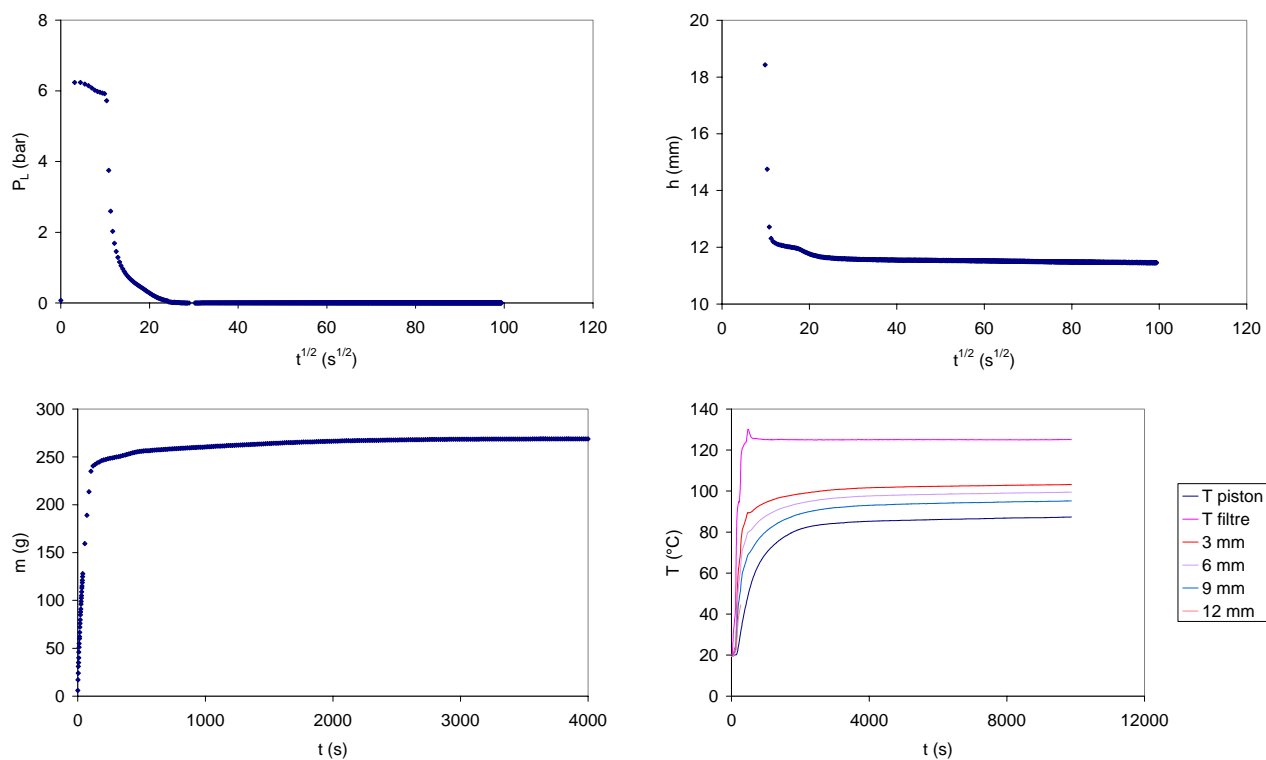
ESSAI 11	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	150
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	72
masse de gâteau sec (g)	66
siccité finale (%)	91,6
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,40\cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$5,30\cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,47



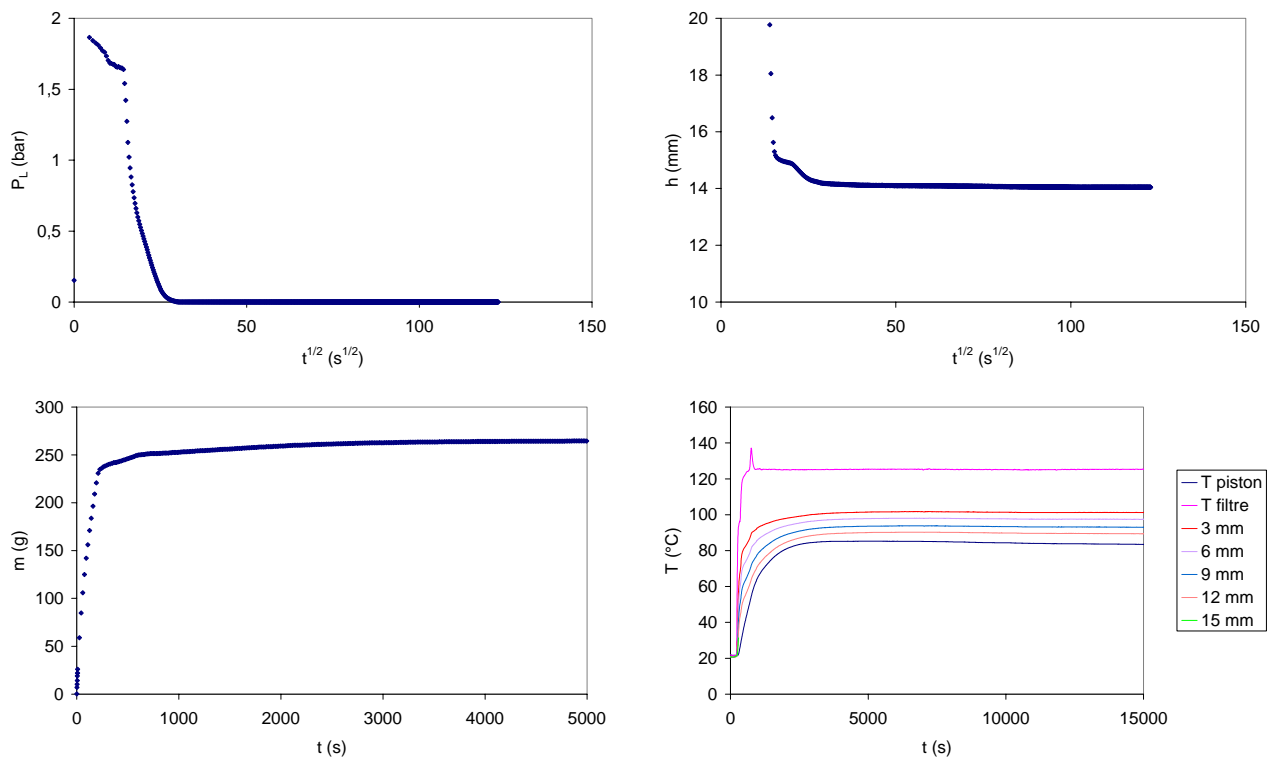
ESSAI 12	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	170
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	69
masse de gâteau sec (g)	66
siccité finale (%)	95,6
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,39 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,28 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,47



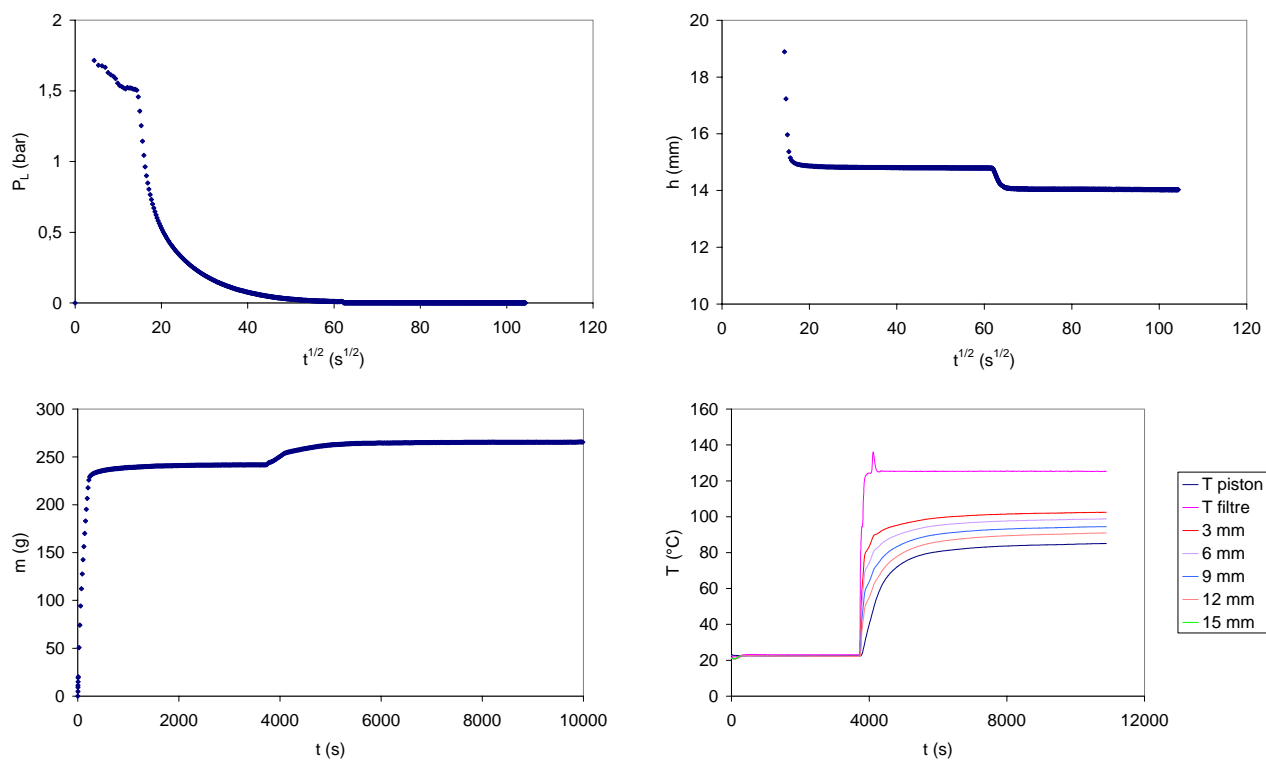
ESSAI 13	
pression de filtration (bar)	4,2
température de consigne (°C)	125
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	70,3
masse de gâteau sec (g)	66,3
siccité finale (%)	94,3
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,23\cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$4,67\cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,40



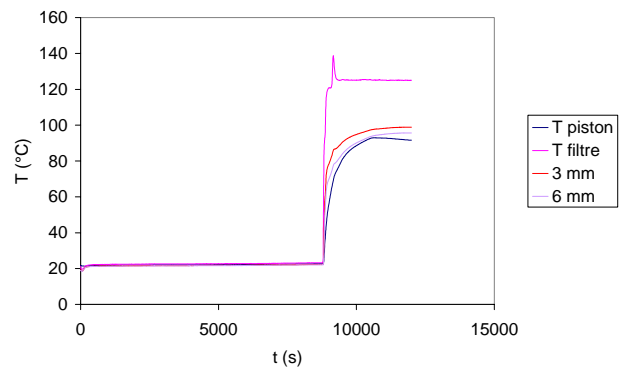
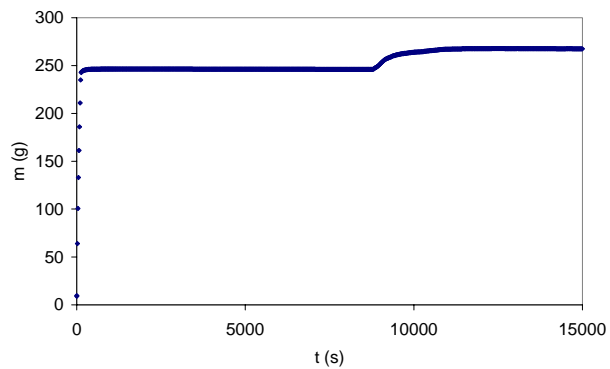
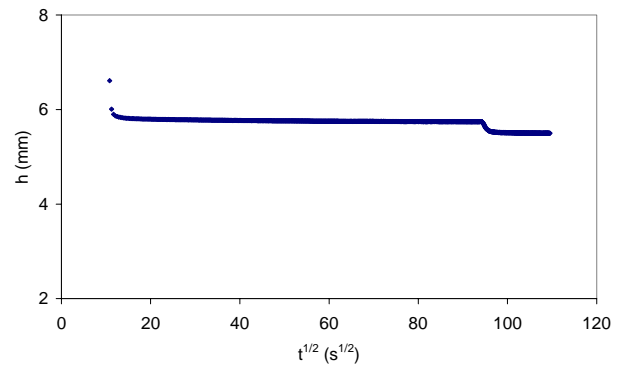
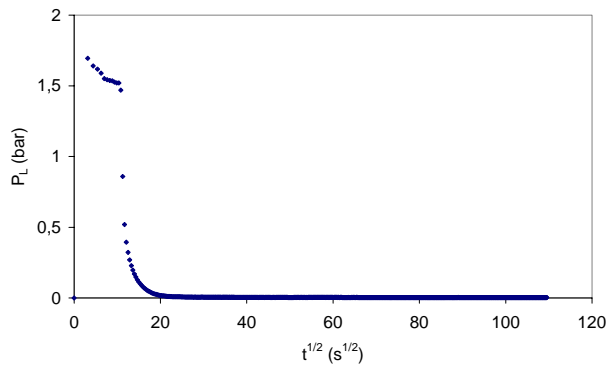
ESSAI 14	
pression de filtration (bar)	6
température de consigne (°C)	125
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	69
masse de gâteau sec (g)	64,3
siccité finale (%)	93,2
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,15 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$4,35 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,37



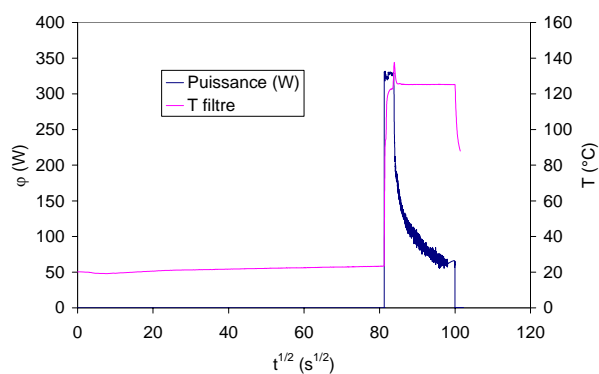
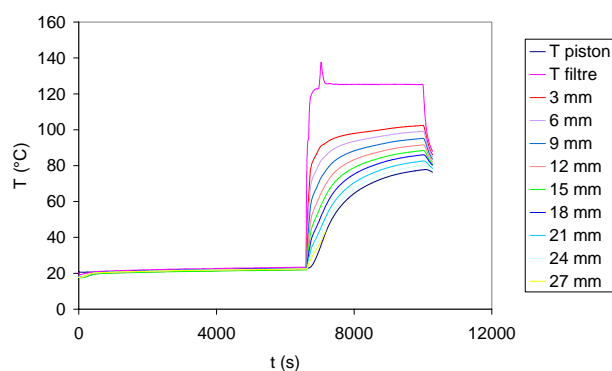
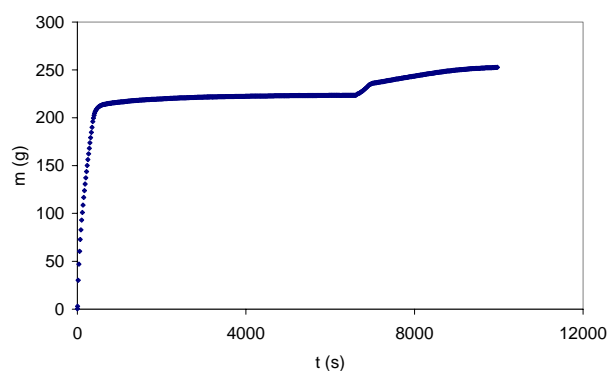
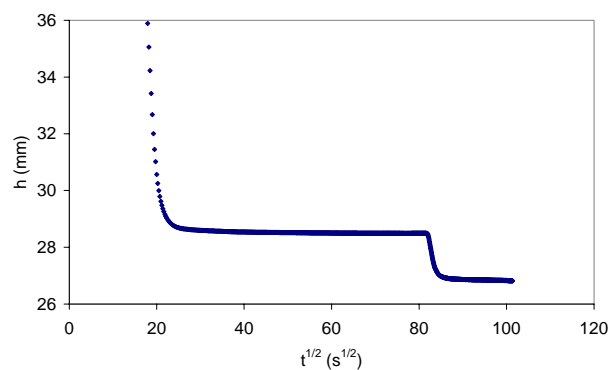
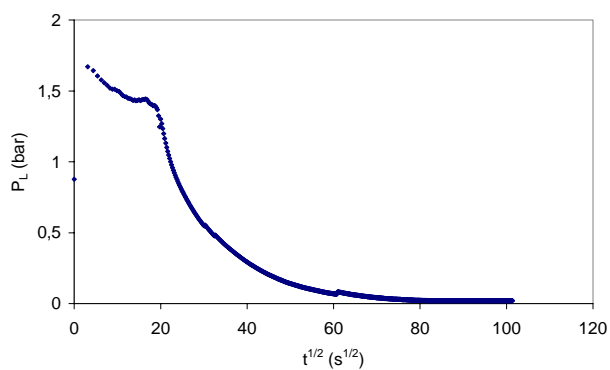
ESSAI 15	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne ($^{\circ}C$) (Début de compression)	125
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	69,4
masse de gâteau sec (g)	64,1
siccité finale (%)	92,4
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,40 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$5,33 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,48



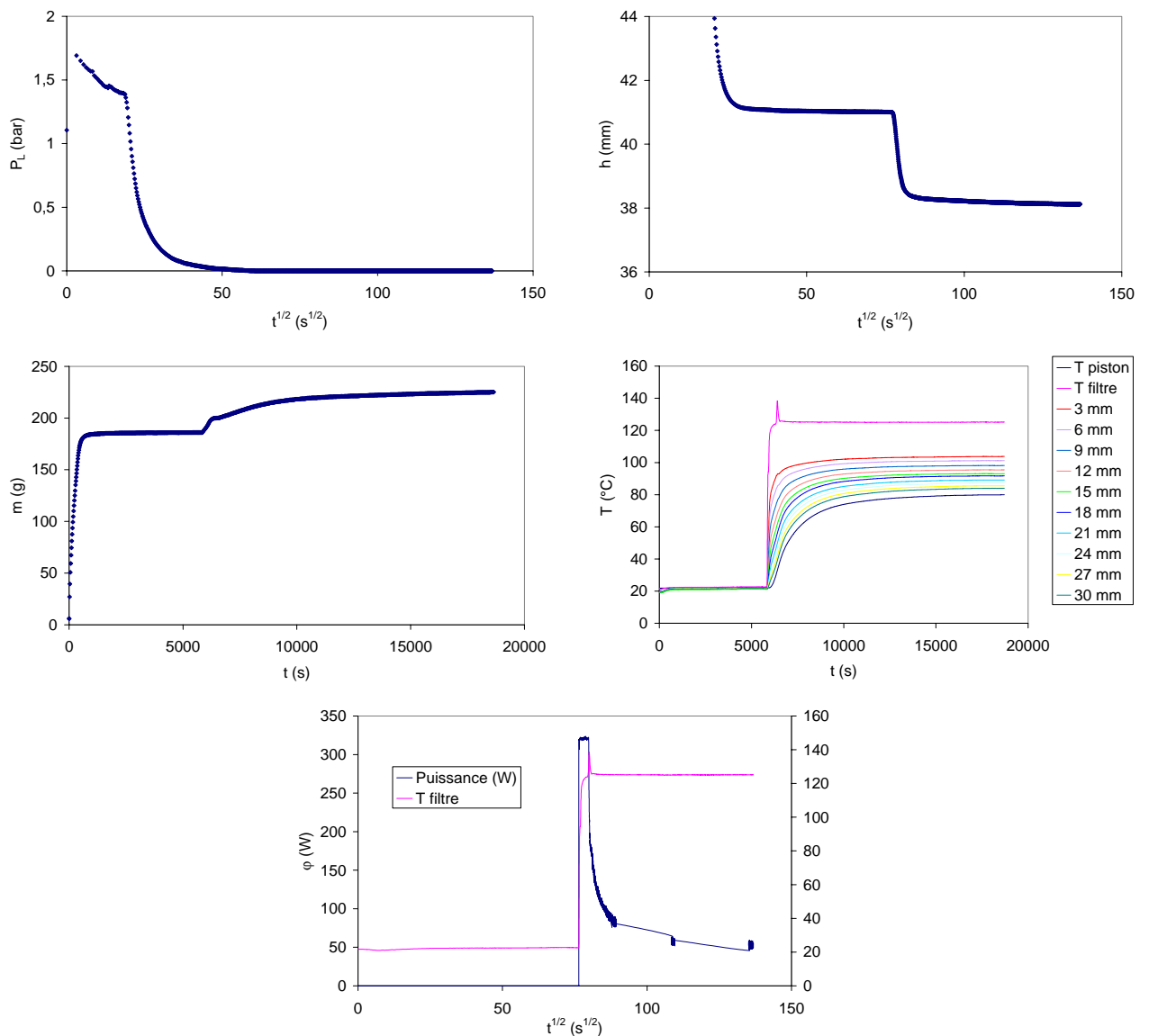
ESSAI 16	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C) (Fin de compression)	125
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	72
masse de gâteau sec (g)	66
siccité finale (%)	91,6
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	285,59
hauteur de gâteau (m)	$1,40 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,32 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,47



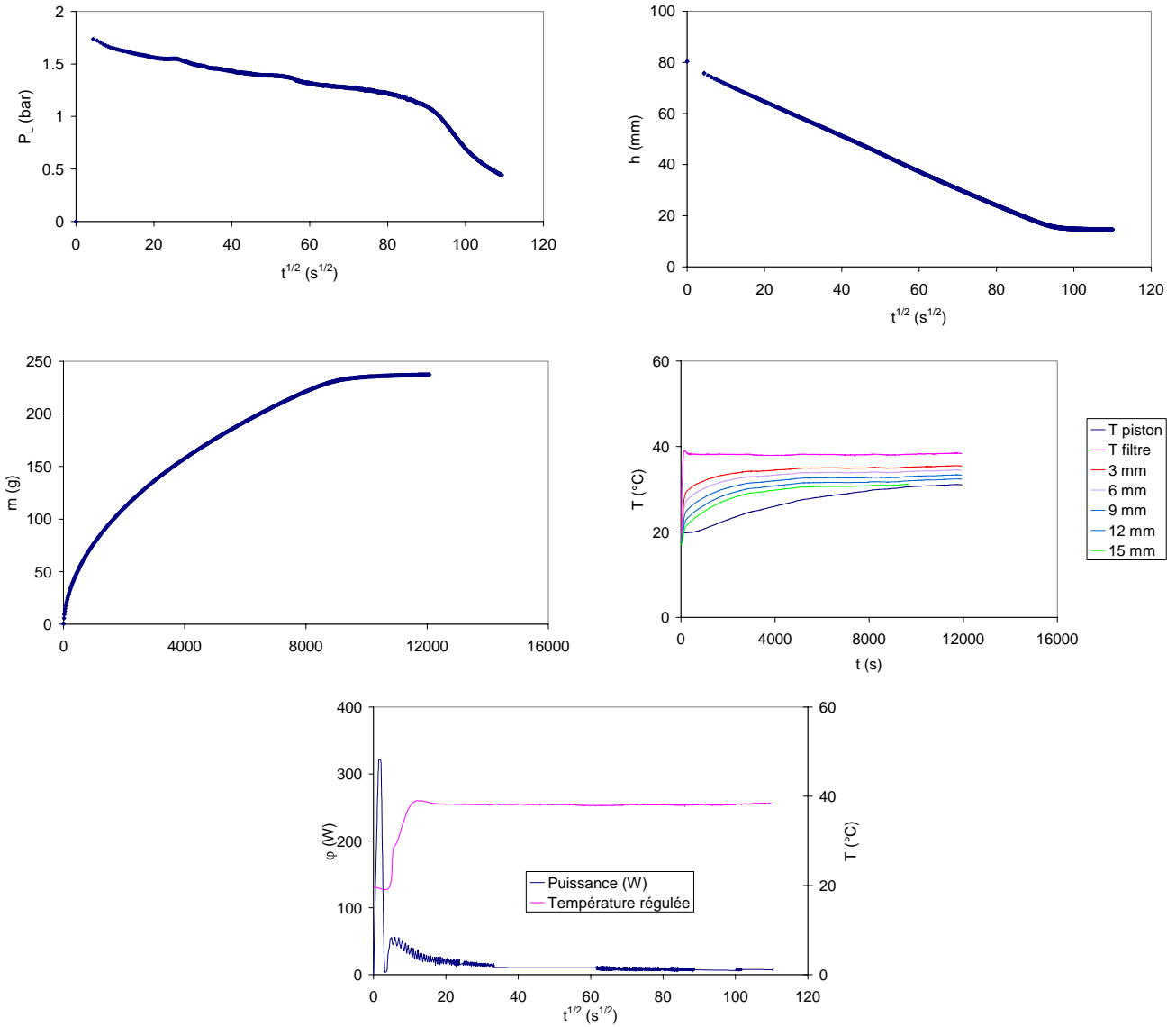
ESSAI 17	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	125
masse de Talc (g)	30
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	29,1
masse de gâteau sec (g)	26
siccité finale (%)	89,3
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	192,59
hauteur de gâteau (m)	5,5.10 ⁻³
volume de gâteau (m ³)	2,09.10 ⁻⁵
porosité moyenne finale (-)	0,47



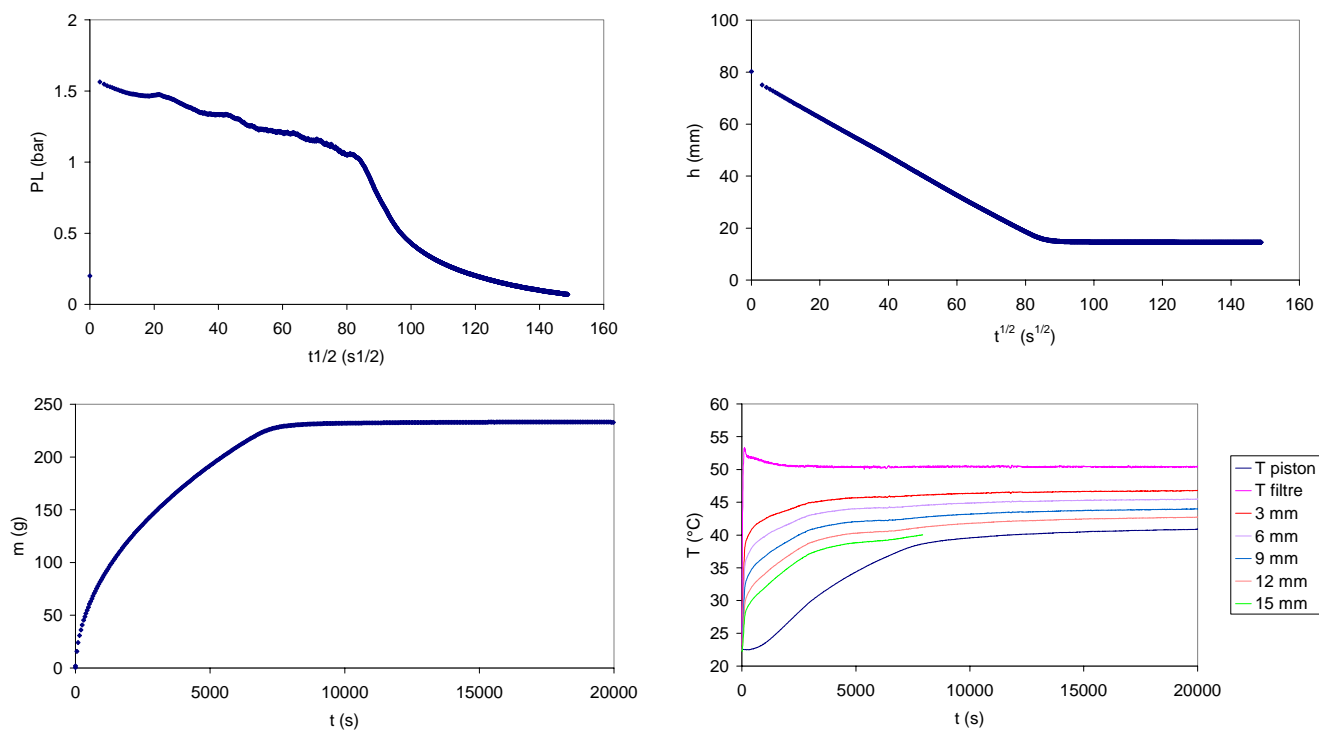
ESSAI 18	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	125
masse de Talc (g)	140
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	151,2
masse de gâteau sec (g)	129,3
siccité finale (%)	85,5
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	647,79
hauteur de gâteau (m)	2,68.10 ⁻²
volume de gâteau (m ³)	1,02.10 ⁻⁴
porosité moyenne finale (-)	0,46



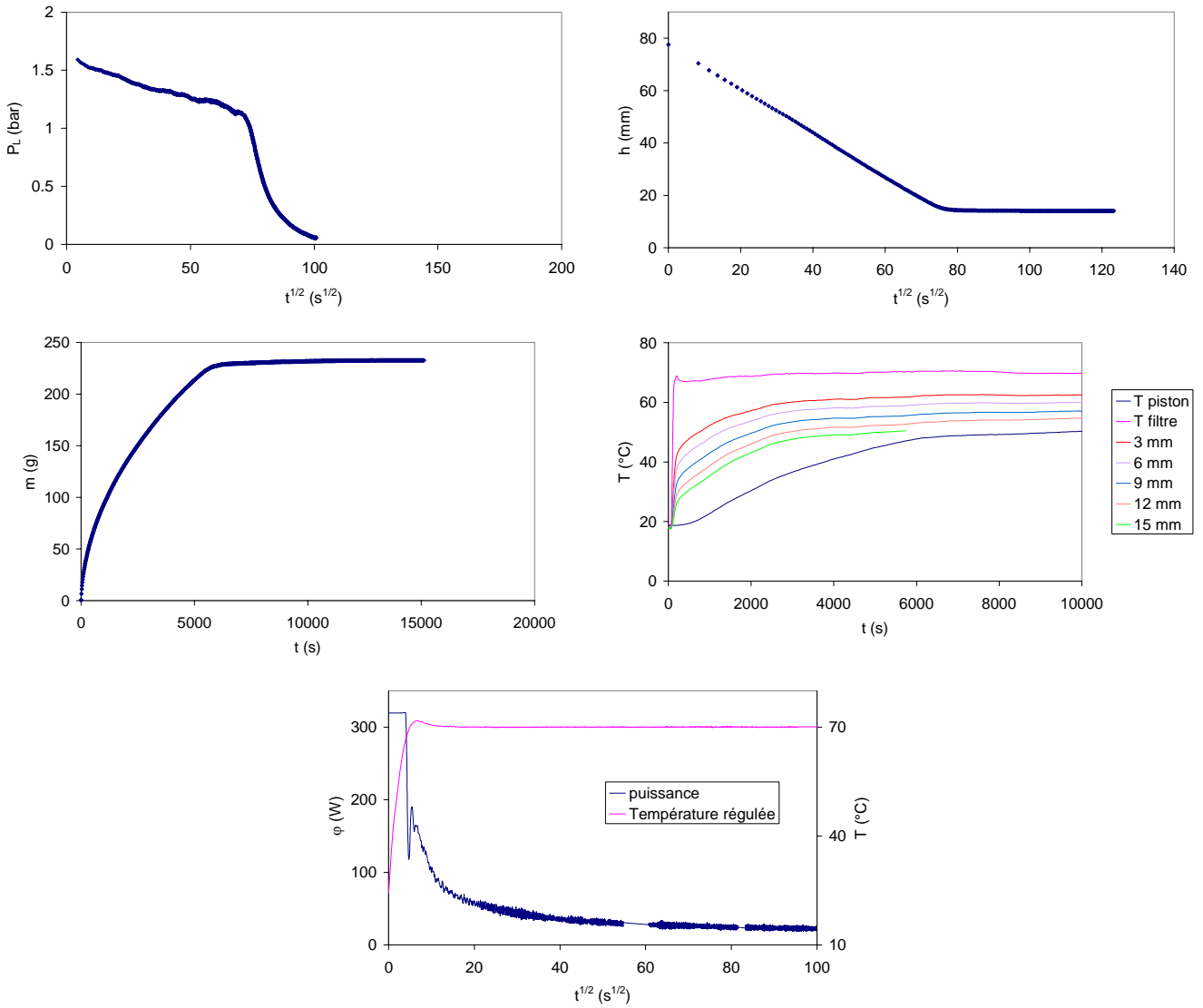
ESSAI 19	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	125
masse de Talc (g)	200
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	206,5
masse de gâteau sec (g)	178,9
siccité finale (%)	86,6
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	1163,20
hauteur de gâteau (m)	$3,81 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$1,45 \cdot 10^{-4}$
porosité moyenne finale (-)	0,47



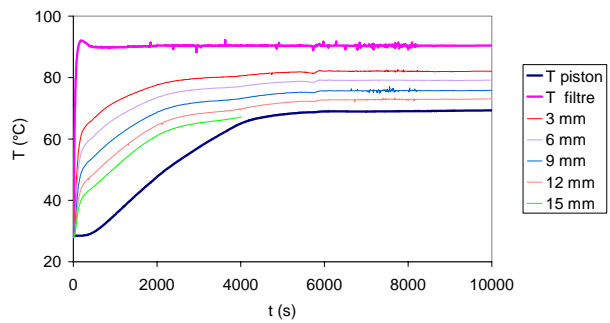
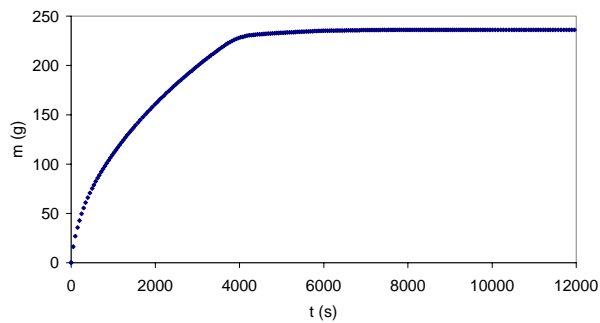
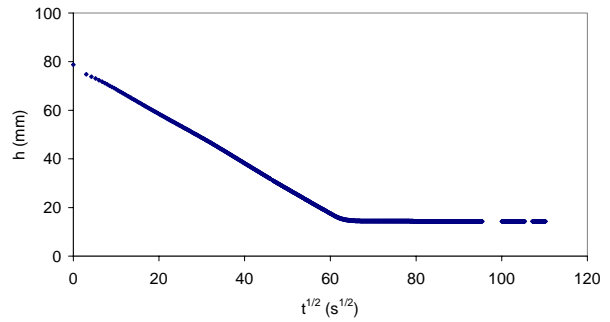
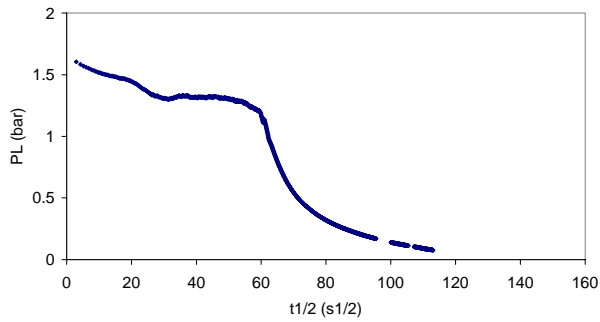
ESSAI 21	
pression de filtration (bar)	1,4
température de consigne (°C)	38
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	91,6
masse de gâteau sec (g)	61,6
siccité finale (%)	66,70
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	276,87
hauteur de gâteau (m)	$1,45 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,51 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,57



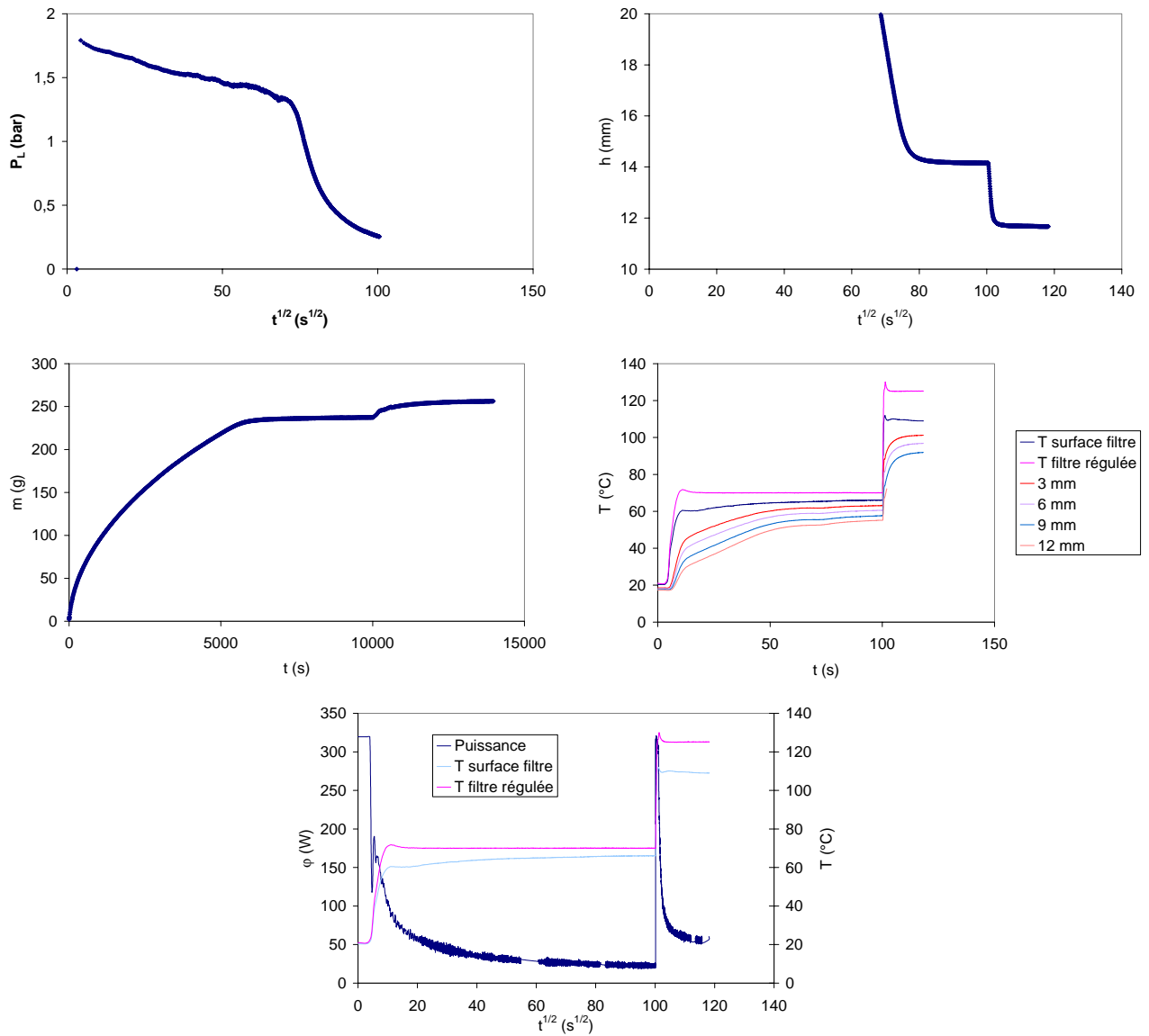
ESSAI 22	
pression de filtration (bar)	1,4
température de consigne (°C)	50
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	91,1
masse de gâteau sec (g)	60,7
siccité finale (%)	66,63
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	269,30
hauteur de gâteau (m)	$1,46 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,53 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,56



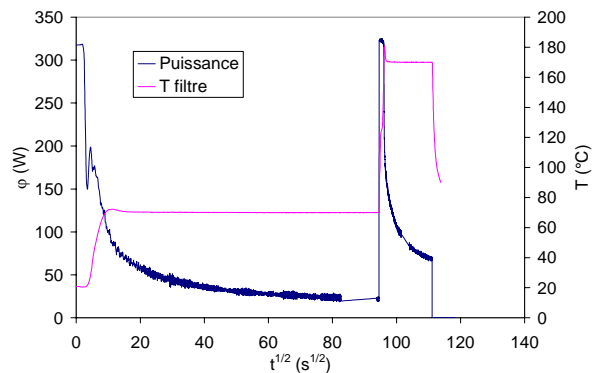
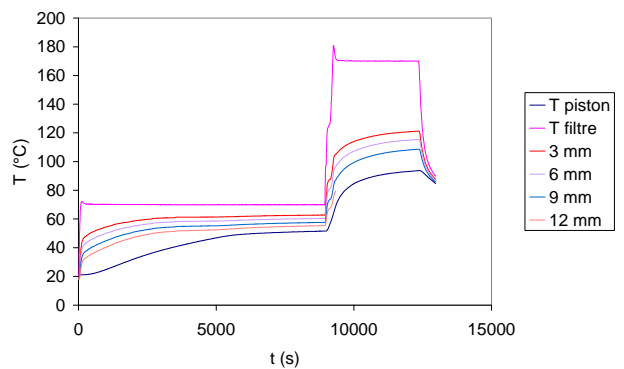
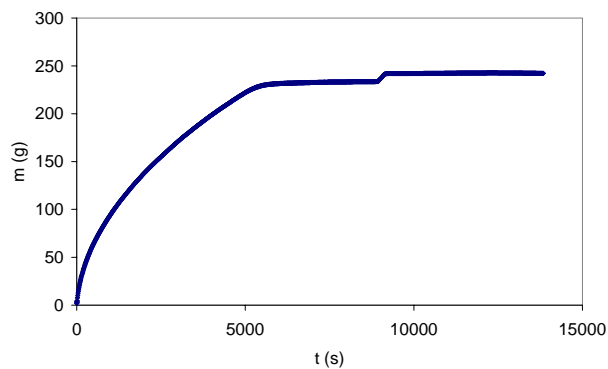
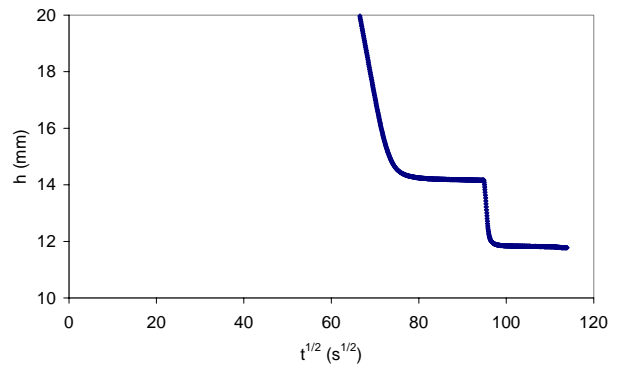
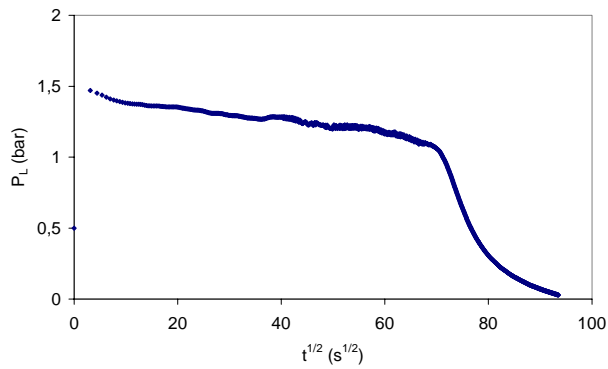
ESSAI 23	
pression de filtration (bar)	1,4
température de consigne (°C)	70
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	90,8
masse de gâteau sec (g)	60,6
Siccité finale (%)	66,74
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	277,09
hauteur de gâteau (m)	$1,43 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,44 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,56



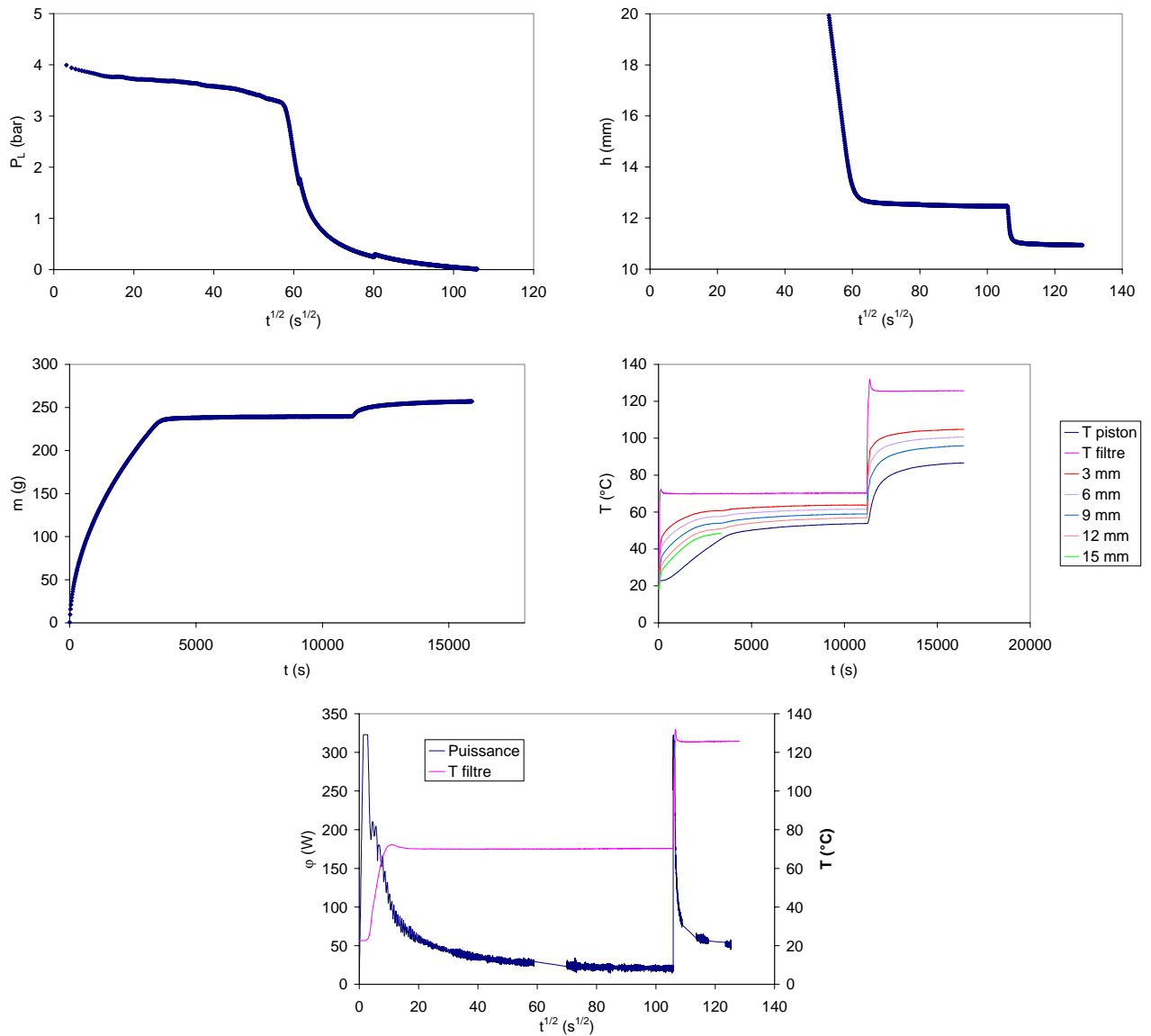
ESSAI 24	
pression de filtration (bar)	1,4
température de consigne (°C)	90
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	90
masse de gâteau sec (g)	61,3
siccité finale (%)	68,11
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	275,38
hauteur de gâteau (m)	1,43.10 ⁻²
volume de gâteau (m ³)	5,44.10 ⁻⁵
porosité moyenne finale (-)	0,55



ESSAI 31	
pression de filtration (bar)	1,4
température de consigne (°C)	70 et 125
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	71,8
masse de gâteau sec (g)	62,7
siccité finale (%)	87,4
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	281,29
hauteur de gâteau (m)	$1,17 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$4,42 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,46



ESSAI 32	
pression de filtration (bar)	1,4
température de consigne (°C)	70 et 170
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	70,2
masse de gâteau sec (g)	60,9
siccité finale (%)	86,8
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	274,32
hauteur de gâteau (m)	1,17.10 ⁻²
volume de gâteau (m ³)	4,42.10 ⁻⁵
porosité moyenne finale (-)	0,47

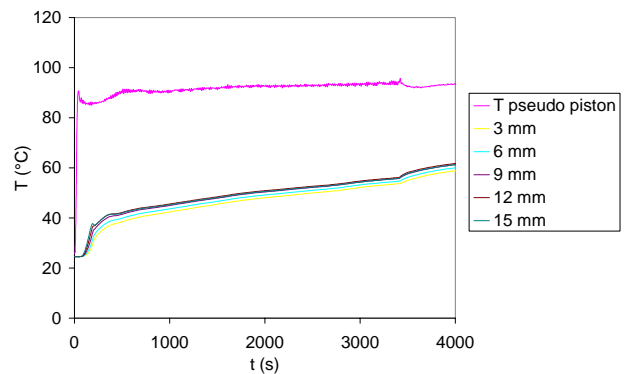
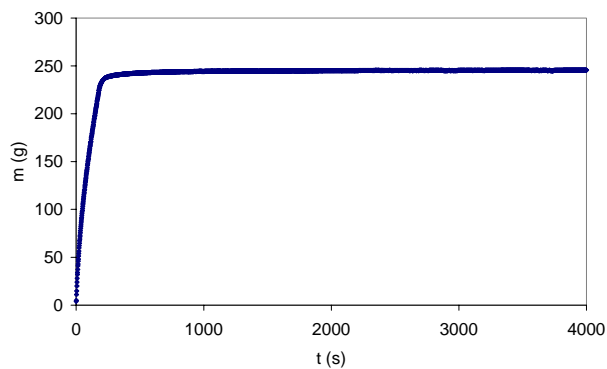
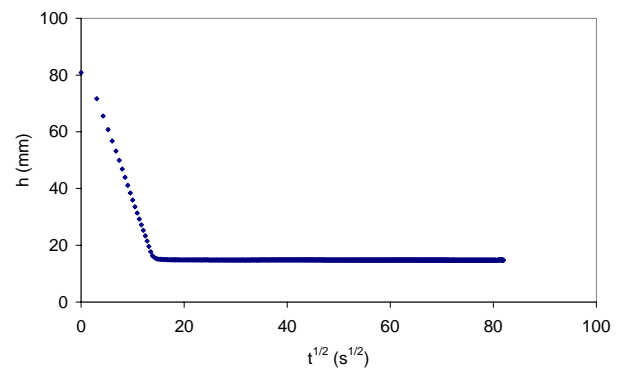
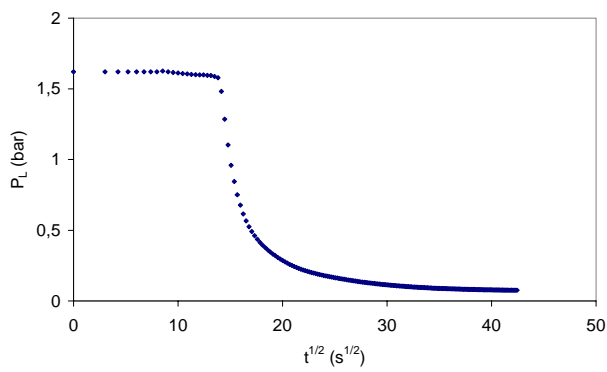


ESSAI 33	
pression de filtration (bar)	3,6
température de consigne (°C)	70 et 125
masse de Kaolin (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	70
masse de gâteau sec (g)	61,3
siccité finale (%)	87,6
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat ($kg \cdot m^{-3}$)	269,81
hauteur de gâteau (m)	$1,09 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m^3)	$4,15 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,43

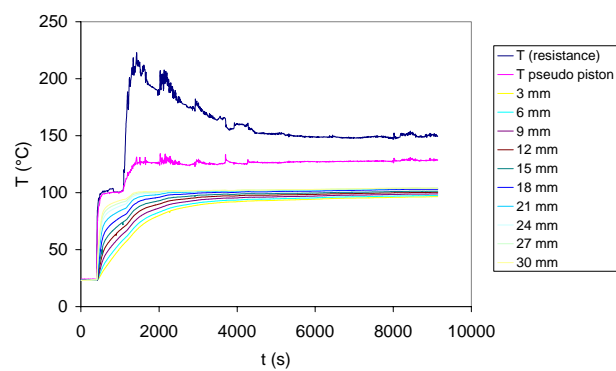
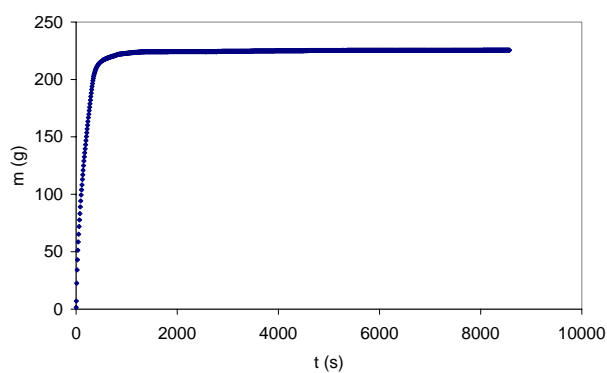
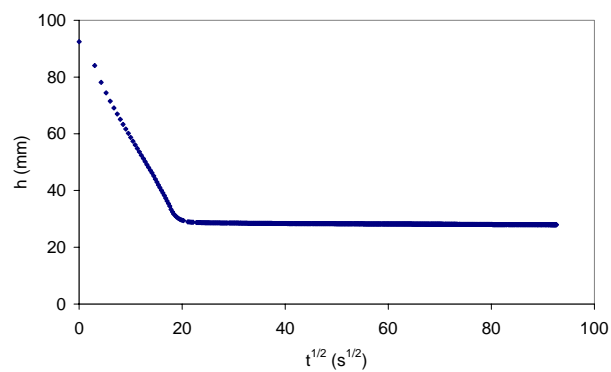
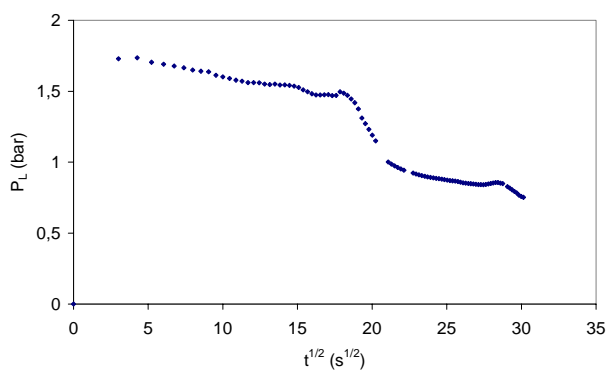
ANNEXE D**FILTRATION – COMPRESSION DES SUSPENSIONS DE
TALC ET KAOLIN AVEC LA CELLULE ASSISTEE
THERMIQUEMENT POUR UNE AIDE THERMIQUE AU
NIVEAU DU PSEUDO PISTON**

Dans cette annexe sont regroupés tous les essais réalisés dans la cellule de filtration – compression chauffante et présentée à la figure III.11 pour un mode de fonctionnement à température imposée au niveau du pseudo piston :

<i>Numéro de l'essai</i>	<i>Suspension</i>	<i>Température de consigne (°C)</i>	<i>ΔP (bar)</i>
<i>Essai 34</i>	<i>Talc</i>	<i>90</i>	<i>1,6</i>
<i>Essai 35</i>	<i>Talc</i>	<i>165</i>	<i>1,4</i>



ESSAI 34	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	90
masse de Talc (g)	70
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	91,8
masse de gâteau sec (g)	63,9
siccité finale (%)	69,61
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	276,50
hauteur de gâteau (m)	$1,48 \cdot 10^{-2}$
volume de gâteau (m ³)	$5,63 \cdot 10^{-5}$
porosité moyenne finale (-)	0,50



ESSAI 35	
pression de filtration (bar)	1,6
température de consigne (°C)	165
masse de Talc (g)	140
masse d'eau (g)	300
masse de gâteau humide (g)	166,5
masse de gâteau sec (g)	127,5
siccité finale (%)	76,5
masse de gâteau sec déposé par unité de volume de filtrat (kg.m ⁻³)	868,53
hauteur de gâteau (m)	2,77.10 ⁻²
volume de gâteau (m ³)	1,07.10 ⁻⁴
porosité moyenne finale (-)	0,46

ANNEXE E

METHODE DE LA PRISE DE MOYENNE VOLUMIQUE LOCALE

E.1. INTRODUCTION

E.1.1. Définition des différentes échelles

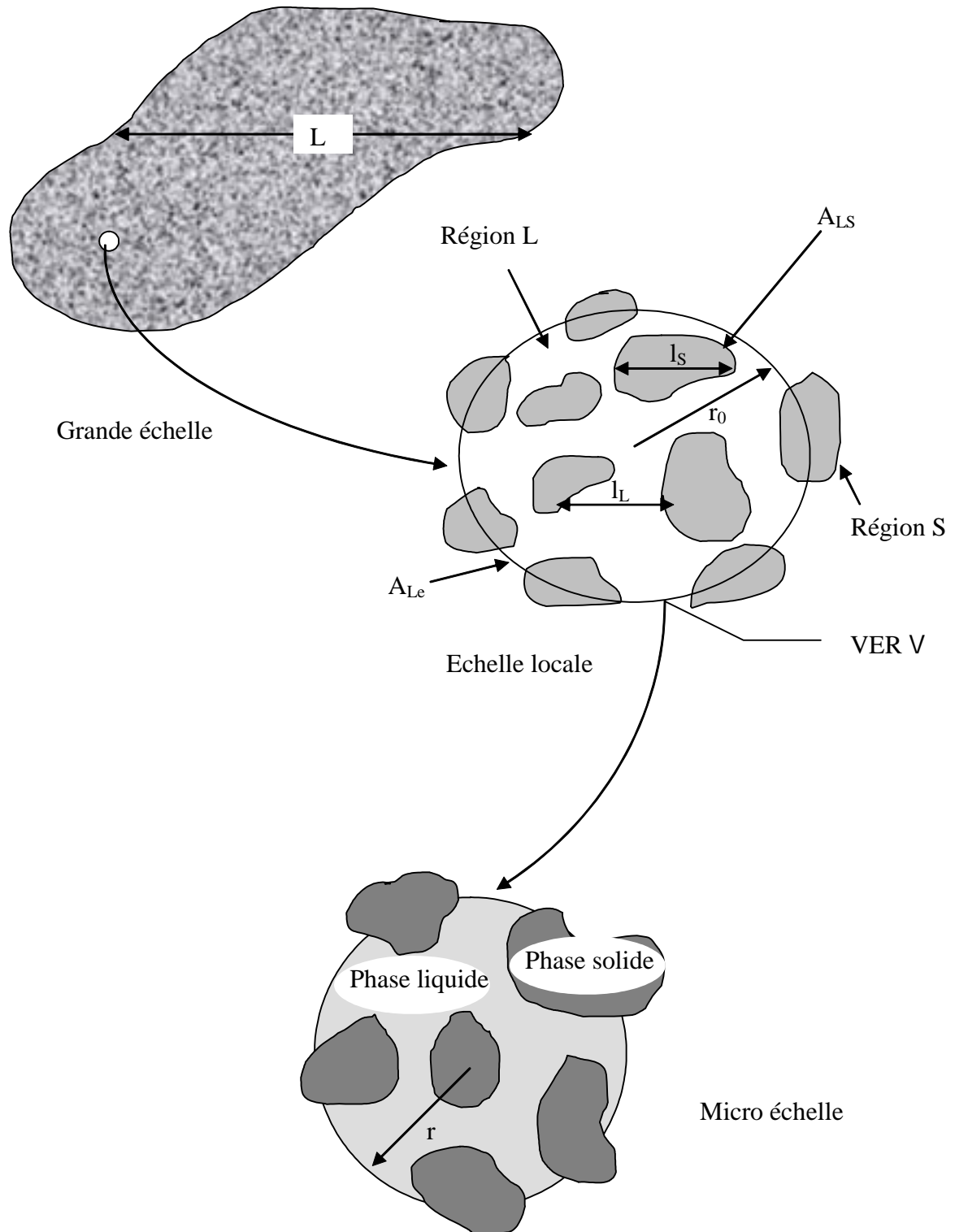


Fig. E.1. Représentation des différentes échelles pour un système à deux phases.

L'objectif de la technique de la prise de moyenne volumique locale est de décrire les transformations des équations d'une échelle à une autre. Cette transformation est réalisée en intégrant des équations à petite échelle pour obtenir la forme des équations à plus grande échelle. Cette technique est, dans l'absolu, exempte d'hypothèses constitutives quant à la micro-géométrie du milieu et confère aux variables macroscopiques une signification opérationnelle au sens des expériences de laboratoire. Ce problème de changement d'échelle, propre à la modélisation de phénomènes faisant intervenir plusieurs échelles de description, n'est pas spécifique aux écoulements en milieu poreux. Un exemple est la modélisation du climat à l'échelle globale. En effet, comment affecter des propriétés physiques à des mailles de plusieurs centaines de kilomètres carrés à partir de mesures quasi ponctuelles ?

La figure E.1 décrit le système étudié. Les différentes échelles représentées sur cette figure sont :

L'échelle microscopique (ou échelle du pore)

A cette échelle, l'écoulement des fluides peut être décrit par l'équation de Stokes. A cette échelle, le milieu est représenté par un système binaire (phase fluide ou phase solide). On admet généralement comme longueur caractéristique le diamètre moyen des pores ou le diamètre moyen des grains dans le cas d'un milieu non consolidé. Modéliser l'écoulement d'un fluide dans un gâteau de filtration à l'échelle microscopique nécessite de connaître de façon détaillée la géométrie des pores dans tout le gâteau. Il est alors nécessaire de travailler à une échelle plus grande.

L'échelle megascopique (ou grande échelle)

Cette échelle, de longueur caractéristique L , est, par exemple, l'échelle du gâteau de filtration. Elle englobe un grand nombre d'hétérogénéités.

L'échelle locale (ou échelle de Darcy)

Cette échelle se situe entre l'échelle microscopique et la grande échelle. Elle correspond à un bloc de milieu poreux suffisamment grand par rapport à la taille des pores pour pouvoir l'assimiler à un milieu continu. Des propriétés locales telles que la porosité ou la perméabilité sont alors définies en tout point de l'espace.

L'homologue macroscopique d'une fonction définie à la micro échelle est la moyenne de cette quantité microscopique sur un volume élémentaire représentatif (VER). La dimension caractéristique de ce VER (r_0) est telle que les propriétés macroscopiques (ou moyennes) sont insensibles aux petites variations dans la taille du volume d'intégration. Pour cela, le rayon du VER doit satisfaire la double inégalité (eq E.1) :

$$l_L, l_s \ll r_0 \ll L \quad (\text{E.1})$$

où l'inégalité de gauche suggère que les effets de nombreux grains et pores doivent être pris en compte pour obtenir des propriétés de transport représentatives, et où l'inégalité de droite traduit le concept de stationnarité locale de la micro-géométrie, restreignant l'approche à des milieux de type non fractal ou encore ne présentant pas de variations géométriques très importantes.

La porosité est une propriété particulièrement intéressante car elle n'existe pas à l'échelle microscopique. La figure E.2 montre que si le VER satisfait la double inégalité (E.1), la porosité devient constante à l'échelle locale.

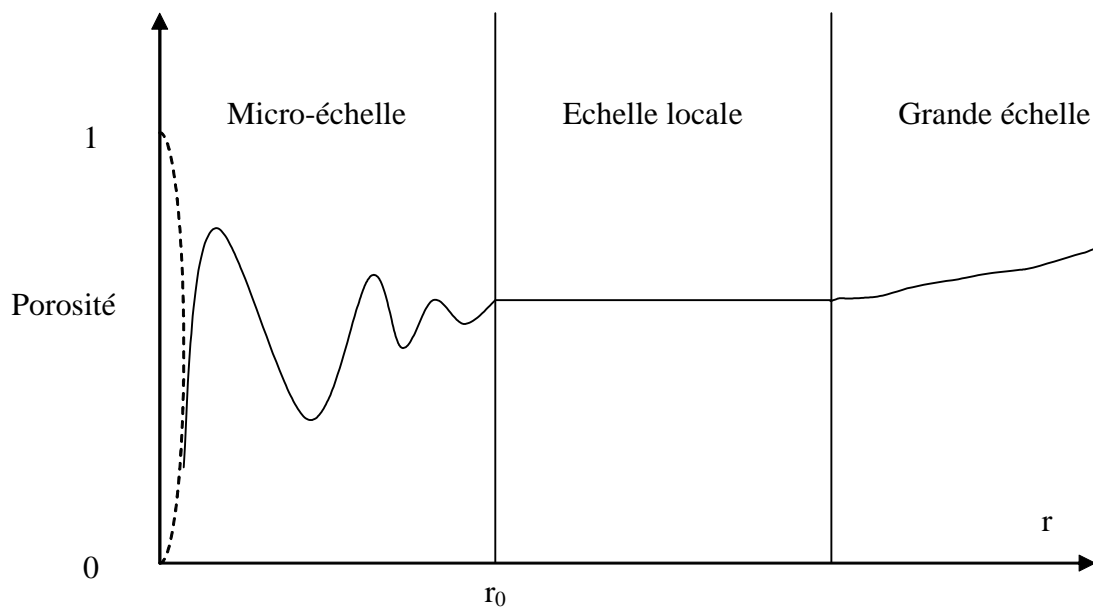


Fig.E.2. Porosité d'un milieu poreux en fonction de la dimension de l'échelle de mesure.

E.1.2. Modèle mathématique

Un lecteur désireux de plus d'information sur la prise de moyenne volumique locale trouvera des développements plus détaillés que les nôtres dans les travaux, par exemple, de Quintard et Whitaker (1994a, 1994b, 1994c, 1994d, 1994e) ou de Whitaker (1986a, 1986b).

On rencontre deux types de moyenne dans l'étude du phénomène de transport multiphasique. La première est la moyenne de phase qui est définie par :

$$\langle \Psi_L \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_L} \Psi_L dV \quad (\text{E.2})$$

Ici, V_L représente le volume de la phase L contenue dans le VER de volume V . En général, ce n'est pas la forme que l'on utilise car elle n'est pas égale à Ψ_L lorsque cette dernière est constante.

La moyenne intrinsèque de phase est, elle, définie par :

$$\langle \Psi_L \rangle^L = \frac{1}{V_L} \int_{V_L} \Psi_L dV \quad (\text{E.3})$$

Elle est plus représentative des conditions régnant dans la phase L. Les deux expressions sont liées par :

$$\langle \Psi_L \rangle = \varepsilon_L \langle \Psi_L \rangle^L \quad (\text{E.4})$$

où ε_L est la fraction volumique de la phase L, soit :

$$\varepsilon_L = \frac{V_L}{V} \quad (\text{E.5})$$

La technique de la prise de moyenne volumique locale s'appuie sur deux théorèmes qui permettent d'obtenir les gradients et les dérivées temporelles à l'échelle locale :

$$\langle \nabla \Psi_L \rangle = \nabla \langle \Psi_L \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \Psi_L dA \quad (\text{E.6})$$

$$\left\langle \frac{\partial \Psi_L}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle \Psi_L \rangle - \frac{1}{V} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \cdot \mathbf{w}_{LS} \Psi_L dA \quad (\text{E.7})$$

où A_{LS} représente l'aire interfaciale contenue dans le VER, \mathbf{w}_{LS} la vitesse de cette interface, et \mathbf{n}_{LS} la normale extérieure pour la phase L.

E.2. Ecoulement d'un fluide dans un milieu poreux déformable

E.2.1. Equations du problème

Considérons l'écoulement d'un fluide Newtonien isotherme dans un milieu poreux déformable (les particules solides étant individuellement considérées comme indéformables).

A l'échelle microscopique il vient :

$$0 = -\nabla p_L + \rho_L \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v}_L \quad (\text{E.8})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_L = 0 \quad (\text{E.9})$$

$$\text{C.L.1: } \mathbf{v}_L = \mathbf{v}_s, \text{ sur } A_{LS} \quad (\text{E.10})$$

$$\text{C.L.2: } \mathbf{n}_{LS} \mathbf{\Pi}_L = \mathbf{n}_{LS} \mathbf{\Pi}_s, \text{ sur } A_{LS} \quad (\text{E.11})$$

$$\text{C.L.3: } \mathbf{v}_L = \mathbf{f}(\mathbf{r}, t) \text{ sur } A_{Le} \text{ et } \mathbf{v}_s = \mathbf{h}(\mathbf{r}, t) \text{ sur } A_{se} \quad (\text{E.12})$$

$$0 = \rho_s \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbf{\Pi}_s \quad (\text{E.13})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_s = 0 \quad (\text{E.14})$$

E.2.2. Equations de continuité

Les expressions moyennées des équations (E.9) et (E.14) sont :

$$\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial t} + \nabla \cdot \varepsilon_L \langle \mathbf{v}_L \rangle^L = 0 \quad (\text{E.15})$$

$$\frac{\partial (1 - \varepsilon_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (1 - \varepsilon_L) \langle \mathbf{v}_s \rangle^s = 0 \quad (\text{E.16})$$

E.2.3. Equation de Darcy pour un milieu poreux déformable

Les variables macroscopiques $\langle \mathbf{v}_L \rangle^L$, $\langle \mathbf{v}_s \rangle^s$ et $\langle p_L \rangle^L$ sont introduites par la décomposition de Gray (1975) (éqs. (A1.17) et (A1.18)) :

$$p_L = \langle p_L \rangle^L + \tilde{p}_L \quad (\text{E.17})$$

$$\mathbf{v}_L = \langle \mathbf{v}_L \rangle^L + \tilde{\mathbf{v}}_L \quad (\text{E.18})$$

$$\mathbf{v}_s = \langle \mathbf{v}_s \rangle^s + \tilde{\mathbf{v}}_s \quad (\text{E.19})$$

avec une étude adimensionnelle et en admettant un champ de vitesse de la phase solide régulier (Whitaker, 1986b), l'équation (A1.8) s'écrit à l'échelle locale :

$$0 = -\nabla \langle p_L \rangle^L + \rho_L \mathbf{g} - \frac{1}{V_L} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \tilde{p}_L dA + \frac{\mu}{V_L} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \nabla \tilde{\mathbf{v}}_L dA \quad (\text{E.20})$$

Il faut maintenant exprimer les termes de fluctuations en fonctions des variables macroscopiques. Lorsque la géométrie du milieu poreux vérifie la double inégalité (E.1), il est raisonnable d'admettre que le champ de perturbation des vitesse à l'intérieur du domaine macroscopique n'est pas significativement influencé par la condition à la limite sur A_{Le} . Ceci suggère, pour \tilde{p}_L et $\tilde{\mathbf{v}}_L$ une solution de la forme :

$$\tilde{\mathbf{v}}_L = \mathbf{B} \cdot \left[-\langle \mathbf{v}_s \rangle^s - \langle \mathbf{v}_L \rangle^L \right] + \xi \quad (\text{E.21})$$

$$\tilde{p}_L = \mu \mathbf{b} \cdot \left[-\langle \mathbf{v}_s \rangle^s - \langle \mathbf{v}_L \rangle^L \right] + \mu \zeta \quad (\text{E.22})$$

avec ξ et ζ des fonctions arbitraires.

On montre que les champs \mathbf{B} et \mathbf{b} sont solutions du problème local (eq. (E.23)-(E.27)).

$$-\nabla \mathbf{b} + \nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{V_L} \int [-\nabla \mathbf{b} + \nabla^2 \mathbf{B}] dV \quad (\text{E.23})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{E.24})$$

$$\text{C.L.1 } \mathbf{B} = -\mathbf{I} \text{ sur } A_{LS} \quad (\text{E.25})$$

$$\text{C.L.1 } \mathbf{B} = \mathbf{G} \text{ sur } A_{Le} \quad (\text{E.26})$$

$$\langle \mathbf{b} \rangle^L = \langle \mathbf{B} \rangle^L = 0 \quad (\text{E.27})$$

En réinjectant les équations (E.21) et (E.22) dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement écrite à l'échelle locale (eq. (E.20), il vient :

$$0 = -\nabla \langle p_L \rangle^L + \rho_L \mathbf{g} + \left\{ \frac{\mu}{V_L} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \cdot (\nabla \mathbf{B} - \mathbf{Ib}) dA \right\} \cdot \left[\langle \mathbf{v}_L \rangle^L - \langle \mathbf{v}_S \rangle^S \right] \quad (\text{E.28})$$

En définissant :

$$\mathbf{C} = -\frac{1}{V_L} \int_{A_{LS}} \mathbf{n}_{LS} \cdot (\nabla \mathbf{B} - \mathbf{Ib}) dA \quad (\text{E.29})$$

$$\mathbf{K} = \varepsilon_L \mathbf{C}^{-1} \quad (\text{E.30})$$

où \mathbf{K} est la perméabilité, il vient

$$\langle \mathbf{v}_L \rangle^L = \langle \mathbf{v}_S \rangle^S - \frac{\mathbf{K}}{\mu \varepsilon_L} \left[\nabla \langle p_L \rangle^L - \rho_L \mathbf{g} \right] \quad (\text{E.31})$$

Nomenclature

Lettres romaines

A_{LS}	surface de l'interface L-S contenue dans le système macroscopique	(m^2)
A_{LS}	surface de l'interface L-S contenue dans le volume de prise de moyenne	(m^2)
A_{Se}	surface d'entrée et de sortie de la phase S associée au milieu macroscopique	(m^2)
A_{Le}	surface d'entrée et de sortie de la phase L associée au milieu macroscopique	(m^2)
\mathbf{B}	tenseur du second ordre utilisé pour représenter le terme de déviation relatif à la vitesse (eq. E.21)	
$\langle \mathbf{B} \rangle^L$	moyenne intrinsèque de phase du tenseur \mathbf{B}	
\mathbf{b}	vecteur utilisé pour représenter le terme de déviation relatif à la pression	(m^{-1})
$\langle \mathbf{b} \rangle^L$	moyenne intrinsèque de phase du vecteur \mathbf{b}	(m^{-1})
\mathbf{C}	tenseur défini par l'équation (E.29)	(m^{-2})
\mathbf{g}	accélération de la pesanteur	$(m.s^{-2})$
\mathbf{G}	tenseur défini par l'équation (E.26)	
\mathbf{I}	tenseur identité	
\mathbf{K}	tenseur de perméabilité	(m^2)
L	longueur caractéristique	(m)
l_l	longueur caractéristique associée à l'échelle locale associée à la région L	(m)
l_s	longueur caractéristique associée à l'échelle locale associée à la région S	(m)
\mathbf{n}_{LS}	normale sortante	
p_L	pression liquide	(Pa)
\tilde{p}_L	déviations spatiales de la pression liquide	(Pa)
$\langle p_L \rangle^L$	moyenne intrinsèque de phase de la pression liquide	(Pa)
r_o	rayon du VER	(m)
V	volume de prise de moyenne	(m^3)
\mathbf{v}_L	vitesse de la phase L	$(m.s^{-1})$
$\tilde{\mathbf{v}}_L$	déviations spatiales de la vitesse de la phase L	$(m.s^{-1})$
$\langle \mathbf{v}_L \rangle^L$	moyenne intrinsèque de phase de la vitesse de la phase L	$(m.s^{-1})$
V_L	volume de la phase L contenue dans le VER	(m^3)
\mathbf{v}_S	vitesse de la phase S	$(m.s^{-1})$
$\tilde{\mathbf{v}}_S$	déviations spatiales de la vitesse de la phase S	$(m.s^{-1})$
$\langle \mathbf{v}_S \rangle^S$	moyenne intrinsèque de phase de la vitesse de la phase L	$(m.s^{-1})$
\mathbf{w}_{LS}	vitesse de l'interface L-S	$(m.s^{-1})$

Lettres grecques

ε_L	porosité	$(-)$
$\mathbf{\Pi}_S$	tenseur total des contraintes sur le solide	Pa
ρ_L	masse volumique de la phase L	$(kg.m^{-3})$
ρ_S	masse volumique de la phase S	$(kg.m^{-3})$
μ	viscosité de la phase L	$(Pa.s)$
ξ	fonction arbitraire définie par l'équation (E.21)	$(m.s^{-1})$
ψ_L	propriété physique associée à la phase L	

$\langle \Psi_L \rangle$	moyenne de phase de la propriété physique associée à la phase L	
$\langle \Psi_L \rangle^L$	moyenne intrinsèque de phase de la propriété physique associée à la phase L	
ζ	fonction arbitraire définie par l'équation (E.22)	(s ⁻¹)

Opérateurs

$\langle \rangle$	moyenne de phase
$\langle \rangle^L$	moyenne intrinsèque de phase
∇	gradient
$\nabla \cdot$	Divergence

Abréviations

VER volume élémentaire représentatif

Références bibliographiques

Gray, W.G., 1975, A deviation of the equations for the multiphase transport, *Chemical engineering science*, 30, pp. 229-233.

Quintard, M., Whitaker, S., 1994a, Transport in ordered and disordered porous media I : the cellular averaged and the use of weighting functions, *Transport in porous media*, 14, pp. 163-177.

Quintard, M., Whitaker, S., 1994b, Transport in ordered and disordered porous media II : generalized volume averaging, *Transport in porous media*, 14, pp. 179-206.

Quintard, M., Whitaker, S., 1994c, Transport in ordered and disordered porous media III : closure and comparison between theory and experiment, *Transport in porous media*, 15, pp. 31-49.

Quintard, M., Whitaker, S., 1994d, Transport in ordered and disordered porous media IV : computer generated porous media, *Transport in porous media*, 15, pp. 51-70.

Quintard, M., Whitaker, S., 1994e, Transport in ordered and disordered porous media V : geometrical results for two-dimensional systems, *Transport in porous media*, 15, pp. 183-196.

Whitaker, S., 1986a, Flow in porous media I : a theoretical derivation of Darcy's law, *Transport in porous media*, pp. 3-25.

Whitaker, S., 1986b, Flow in porous media III : deformable media, *Transport in porous media*, pp. 127-154.

ANNEXE F

CARACTERISTIQUES DES TOILES FILTRANTES UTILISEES POUR L'ETUDE EXPERIMENTALE

TOILE FILTRANTE 25841 AN

Matière : polypropylène

Épaisseur : 510 µm

Densité : 0,91

Poids : 345 g.m⁻²

Chaîne : Monofilament 20/100 mm

Armure : Satin

Traitement : Calandré

Perméabilité à l'aire : 300 / 500 (m³.h⁻¹.m⁻²)

TOILE FILTRANTE 350 x 2180

Matière : Inox 304 L

Ouverture : 10 µm

ANNEXE G

ACQUISITION DES DONNEES

Le logiciel d'acquisition, TestPoint, est un outil étudié pour créer des applications de mesures et d'acquisitions de données. Il donne la possibilité de contrôler des appareils extérieurs, créer des interfaces utilisateurs, traitement, affichage de données, création de fichiers et échange de données avec d'autres applications Windows. Ce logiciel est basé sur la programmation par objets. Chaque objet est responsable de tâches spécifiques.

A la mise en service du logiciel, en version exécutable, apparaît en premier plan l'interface opérateur dont voici ci-dessous l'écran correspondant :

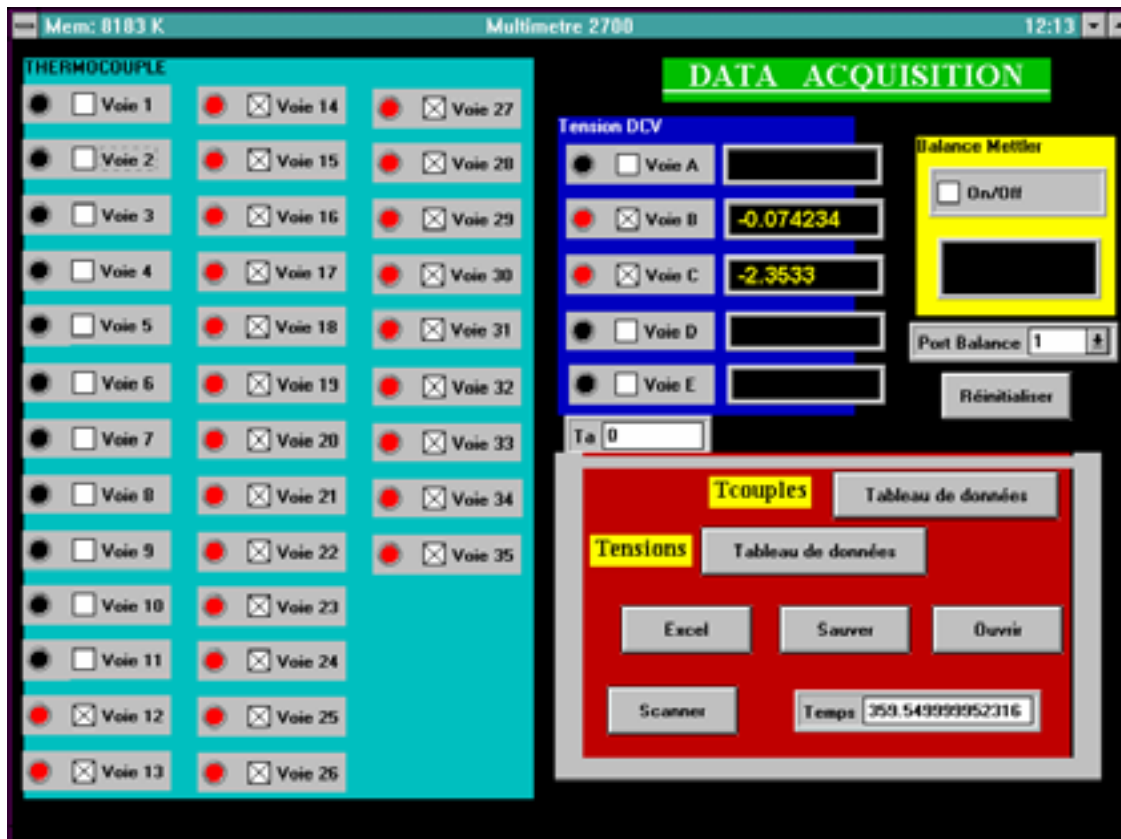


Fig. F.1. Interface utilisateur du programme d'acquisition réalisé.

Ce programme permet de faire l'acquisition de 35 thermocouples de type J ou K (voies 1 à 35) et 5 voies sont réservées à l'acquisition de capteurs délivrant un signal de copie en DCV (voies 36 à 40). Enfin, une balance munie d'une sortie RS-232 peut également rentrer dans la boucle d'acquisition.

Chaque type de mesures (température ou DCV) peut être édité sous forme de tableaux grâce aux deux boutons tableau de données. Le bouton Réinitialiser permet de remettre tous les paramètres de configuration à l'état zéro. Enfin, la touche SCANNER permet d'exécuter le programme.

RESUME

Ce travail s'inscrit dans un contexte général qui concerne les procédés de Séparation Liquide Solide (SLS) et plus particulièrement une technique de déshydratation mécanique : la filtration/compression. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet d'un apport thermique localisé sur l'opération de filtration compression.

Une synthèse bibliographique a permis de dégager les aspects importants des mécanismes de filtration et de compression en relation avec la structure des gâteaux.

Une part importante du travail de thèse a consisté en la conception et la réalisation d'un outil expérimental instrumenté permettant d'effectuer une opération de filtration/compression avec apport thermique au niveau du piston et/ou au niveau du support du media filtrant. La démarche suivie a consisté à faire évoluer une cellule classique de filtration-compression, pour permettre l'insertion des éléments chauffants et des capteurs adaptés. Cette évolution a nécessité notamment l'adjonction en avant du piston d'une pièce circulaire (appelée pseudo piston) destinée à protéger le capteur de pression placé à la surface du piston et à accueillir une résistance chauffante.

L'étude expérimentale a été réalisée avec des suspensions de Talc et de Kaolin. Les résultats obtenus ont montré une réelle efficacité d'un apport thermique localisé au niveau du media filtrant pour améliorer la cinétique de séparation. En effet, une diminution de la viscosité du filtrat dans la zone la plus résistive du procédé (partie basse du gâteau et media filtrant) permet d'accélérer de façon significative la filtration relativement à une opération de filtration effectuée à température homogène. Pendant la compression, une modification de la structure du gâteau (effondrement) s'opère lorsque la température au niveau du media filtrant atteint la température d'ébullition du liquide. Cet effondrement est rapide à l'échelle de la compression mécanique et son amplitude dépend des conditions opératoires et de la compressibilité du gâteau. De plus, ce phénomène permet d'obtenir rapidement des niveaux de siccité élevés. Les mécanismes complexes mis en jeu résultent d'un couplage fort entre mécanique et thermique et n'ont pas encore été interprétés.

Les résultats très encourageants obtenus à partir de suspensions modèles permettent d'envisager d'étendre l'étude à des suspensions formant des gâteaux extrêmement compressibles comme les boues biologiques floculées.

MOTS CLES

Filtration/compression - Procédés hybrides - Thermique – Pseudo piston - Gâteau de filtration - Résistance spécifique - Structuration - Compressibilité – Effondrement.

ABSTRACT

This work deals with liquid solid separation processes and specially with a technique of mechanical dehydration : filtration/expression. The aim of this work is to study the effects of a local thermal supply on the filtration expression process.

A bibliographic synthesis brought out important aspects of the filtration expression mechanisms and cake structuring.

A significant part of this work concerns the design of an experimental rig which allows to perform filtration/expression tests with a local thermal supply at filter medium and/or at cake surface level. The design step consisted in developing a classical filtration expression cell by adding a circular piece ahead of the piston (called pseudo piston) which protects the pressure sensor placed at the piston surface and receives a heat component.

Talc and Kaolin suspensions were used for the experimental study. Results obtained showed a great efficacy of a heat supply at filter medium level to enhance the separation kinetic. Indeed, a reduction of the filtrate viscosity in the more resistive part of the process (lower part of the cake and filter medium) enables to accelerate significantly the filtration compared to a test performed at homogeneous temperature. During expression, a modification of the cake structure (cake collapse) occurs when temperature of filter medium reaches temperature of liquid boiling. This cake collapse is quick at the expression scale and depends on experimental conditions and cake compressibility. Moreover, this phenomena enables to reach high dry matter content. Complex mechanisms involved come from a great coupling between thermal and mechanical effects and don't have any interpretation for the moment.

Results obtained with rutile suspensions enable to extend the study to suspensions forming extremely compressible cakes such as flocculated biological sludge.

KEY WORDS

Filtration/expression – Hybrid processes – Thermal supply – Pseudo piston – Filter cake - Specific resistance - Structuring – Compressibility – Cake collapse.