

UFR SCIENCES & TECHNIQUES COTE BASQUE

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Licence Physique Chimie appliquée

Stage obligatoire de fin de L3

PEIRANO, Marion

Stage effectué du 20/04 au 10/06 2015 à

**IMFT allée du professeur Camille SOULA 31300 TOULOUSE
sous la direction scientifique de Mr MARCOUX Manuel**



"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Manuel Marcoux, pour le temps et la patience qu'il m'a accordé pendant ces quelques semaines de stage, bien qu'il fût très occupé.

Je souhaite également remercier tout particulièrement l'enseignant chercheur de l'UPPA, Frédérique Plantier, sans qui je n'aurais probablement jamais entendu parler de cet institut.

Mes remerciements s'adressent aussi à mon professeur de mécanique des fluides Jean-Philippe Larre, qui a consenti à me donner les noms de trois de personnes travaillant au sein de ce laboratoire de recherche, dont celui de Mr Marcoux, et avec qui il a travaillé pendant plusieurs années. Je tiens à y associer celui d'Alice Terrade qui fut la première à me soutenir pour décrocher ce stage et m'a permis un premier contact avec des chercheurs du laboratoire par l'intermédiaire de son propre professeur, Pascal Fede. Car même si cette première démarche n'a pas abouti, elle fut très encourageante, et a entretenu ma motivation.

Je remercie également Ruddy Soeparno, ingénieur à l'IMFT, qui s'est rendu disponible pour répondre à mes questions lorsque Manuel Marcoux était en déplacement, et qui m'a permis de l'assister dans la fabrication des modèles réduits.

Je remercie tous les membres du groupe GEMP de l'IMFT pour leur accueil, et en particulier Caroline Dubois, étudiante en dernière année à l'INSA Toulouse, avec qui j'ai partagé mon bureau, et Mauricio Duenas Velasco, doctorant, avec qui j'ai partagé la salle de TP, et qui m'a notamment aidé sur quelques problèmes informatiques.

Enfin, je voudrais remercier Marie Stacey Alvarez et Alice Terrade de m'avoir hébergée pendant ces quelques semaines, je suis consciente que sans leur aide ce stage aurait été beaucoup plus éprouvant.

Sommaire

1) Présentation de l'IMFT

page 2

2) Première mission : étude du phénomène d'évaporation dans les milieux poreux

a) Présentation du sujet et notions importantes

- i) Etude de l'évaporation de l'eau pour des terres agricoles en Israël page 6
- ii) Qu'est-ce qu'un milieu poreux ? page 6
- iii) Rappel sur les différences de propriétés en fonction de l'échelle micro, méso ou macro page 7
- iv) Qu'est-ce que l'évaporation ? page 8
- v) Rappel sur les nombreuses propriétés de l'eau page 8

b) Facteurs à prendre en compte

- i) Diffusion binaire page 9
- ii) Effet de gravité page 11
- iii) Mouillabilité, angle de contact, capillarité page 11
- iv) Compactage page 12
- v) Hétérogénéité de l'évaporation de l'eau page 13
- vi) Viscosité page 14
- vii) Humidité ambiante page 15

c) Expériences, Résultats et interprétation

- i) Protocoles page 15
- ii) Graphes, photos et conclusions page 18
- iii) Solutions envisageables page 22

3) Deuxième mission : mise en évidence des phénomènes de drainage primaire et imbibition primaire

a) Présentations et définitions

- i) Quelques définitions page 22
- ii) Drainage primaire et imbibition primaire page 23
- iii) Processus page 24

b) Protocoles

- i) Processus de réflexion page 25
- ii) Expériences réalisées page 26

c) Résultats et interprétations

page 27

4) Conclusion du rapport

a) Ouverture envisageable

page 30

b) Enrichissement personnel

page 31

Introduction

Au cours du stage que j'ai effectué au sein du laboratoire de recherche en mécanique des fluides, il m'a été donné la possibilité d'étudier plusieurs phénomènes physiques liés aux écoulements fluides.

Tout d'abord, nous ferons une présentation assez détaillée du laboratoire qui m'a accueilli pendant les sept semaines de stage, afin de mettre en avant le rôle d'un tel organisme dans notre société.

Puis, nous nous intéresserons à une demande d'approfondissement d'étude de la part d'Israël, datant de 2011. Celle-ci porte sur l'évaporation de l'eau sur des terres agricoles au cours du temps. Dans un souci d'économie, d'écologie et de rentabilité, il nous est demandé de comprendre le phénomène mis en jeu, afin de pouvoir proposer une solution pour ralentir cette évaporation et ainsi limiter le gaspillage d'une ressource difficile d'accès dans une zone aride de ce type. Nous verrons d'ailleurs que beaucoup de facteurs influent ce phénomène et nous procéderons à plusieurs expériences témoins afin de tous les mettre en évidence. Pour citer quelques facteurs majeurs, on prendra en compte la gravité, la diffusion binaire, le taux d'humidité ambiant... Nous exploiterons tous les résultats grâce à différents graphes qui nous permettront d'identifier l'importance de l'influence des différents facteurs étudiés. Et enfin, nous essayerons de proposer des solutions pour répondre à la problématique de départ, à savoir : l'évaporation prématurée de l'eau

Ensuite, nous étudierons le phénomène de drainage et d'imbibition qui ne devait au départ pas être abordé au cours de l'étude, mais qui est finalement devenu important pour prendre conscience des phénomènes en présence dans le projet initial. D'ailleurs, comme nous pourrons le voir plus tard, il s'agit de l'expérience qui a demandé le plus de réflexion, en cause, les nombreux problèmes de montage, de connectique et de projets exploitations.

Pour finir, nous proposerons un élargissement d'exploitation des expériences et résultats que nous mettons en avant au cours de ce rapport, sur l'étude de la vitesse d'écoulement de l'eau dans des milieux réels tels qu'une route (milieu poreux), son temps de stagnation et donc l'érosion dont est victime celle-ci.

1) Présentation de l'IMFT

L'institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT) est un laboratoire de recherche qui se situe sur l'île du ramier en plein cœur de Toulouse. Les origines de l'actuel IMFT remontent au XX^e siècle, et faisait alors partie intégrante de l'ENSEEIH (école nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique, et des télécommunications), près du canal du midi. C'est en 1910, que Charles CAMICHEL, titulaire de la chaire d'électricité industrielle de Toulouse, est sollicité pour mener des recherches en hydraulique portant notamment sur les coups de bélier (ondes de pression dans les canalisations) pour répondre à une demande de l'industrie hydroélectrique en pleine expansion dans les Pyrénées. Mais c'est seulement en 1913, encore sous l'impulsion de Charles CAMICHEL, qu'est créé le premier laboratoire d'hydraulique au sein de l'institut d'électrotechnique de Toulouse. Et certains travaux en mécanique des fluides de son équipe sont publiés dans le compte-rendu de l'académie des sciences. A partir de 1918, des fonds sont accordés pour agrandir et équiper le laboratoire (construction du modèle réduit de la Garonne et du pont Neuf dans la cour, modèle réduit de turbine hydraulique...). Puis en 1920, l'acquisition d'un terrain sur l'île du ramier permet d'implanter un second laboratoire. Qui plus est, est un endroit propice aux expériences et développement des barrages très à la mode (1925 : étude du seuil du barrage du Pinet (Tarn), 1928 : construction du grand canal et projet de similitude des écoulements qui étudie la transposition des résultats obtenus sur les modèles réduits aux ouvrages réels, technique encore utilisée aujourd'hui pour comprendre des phénomènes à taille réelle, comme dans le sujet que je vais vous présenter).

1930 : naissance de L'IMF de Toulouse, il y en a 4 autres : Paris, Lille, Strasbourg et Marseille.



L'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) est une unité mixte de recherche associant le CNRS, l'INP de Toulouse et l'Université Toulouse 3. Fort d'environ 200 personnes (65 chercheurs et enseignants-chercheurs, 35 personnels d'appui à la recherche, 80 doctorants et 20 post-doctorants) il représente l'un des plus forts potentiels de recherche et de formation avancée français voire européen dans le domaine de la mécanique des fluides, tant par sa taille que par le spectre des thématiques de recherche qui y sont

abordées et des champs d'application qu'elles recouvrent. Le laboratoire développe un large éventail de recherches qui couvrent autant les aspects fondamentaux associés aux phénomènes physiques mis en jeu dans les écoulements et à leur description mathématique, qu'un vaste champ d'applications.

Les recherches menées par le laboratoire, qui allient modélisation mathématique, expériences fines de laboratoire et simulation numérique intensive, sont particulièrement actives dans les domaines suivants :

- Les écoulements avec interfaces déformables et les écoulements polyphasiques.
- Les écoulements et transferts dans les milieux hétérogènes.
- Les écoulements avec changement de phase, réactions chimiques ou biochimiques.
- Les instabilités hydrodynamiques, la transition vers la turbulence et la turbulence développée.
- Les écoulements à grande échelle dans les milieux naturels et leur interaction avec le vivant.

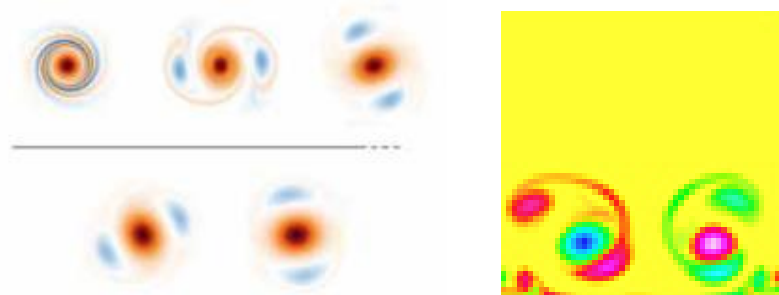
Ces thématiques trouvent pour la plupart de vastes champs d'application dans les secteurs :

- du transport terrestre et aérien,
- de la conversion et du transport de l'énergie,
- des procédés de transformation,
- du génie biomédical, (dont Caroline faisait l'expérience en étudiant les brûlures et son transfert de chaleur)
- de la prédiction des écoulements environnementaux et des études d'impact, auquel j'ai été sensibilisé

Le laboratoire est divisé en 6 groupes de recherches dont les rôles sont décrits ci-après. D'ailleurs lors de mon stage, j'ai fait partie du groupe de recherche GEMP, présenté ci-après. J'ai eu presque le même rôle que les autres doctorants ou chercheurs, la seule différence étant au niveau de la durée et la complexité de l'étude ,c'est-à-dire, étudier un sujet donné, et proposer des solutions en s'appuyant sur des démarches théoriques et expérimentales réfléchies tout au long du projet.

EMT2 : écoulements monophasiques transitionnels et turbulents

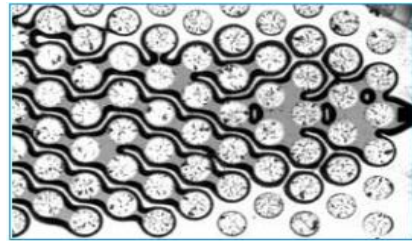
Le but de ce groupe est d'améliorer la compréhension et la modélisation des phénomènes aérodynamiques ou hydrodynamiques et de transferts de chaleur rencontrés typiquement dans les domaines des transports, de l'énergie, de l'environnement et des procédés. Les applications privilégiées ont pour objectif l'amélioration des performances globales des véhicules terrestres, aériens ou marins en termes de consommation, de pollution, de sécurité et de confort ou de celles des systèmes de production d'énergie et de transformation de la matière. Dans les écoulements mis en jeu, la complexité provient soit des instabilités ou de la turbulence, soit des propriétés physiques des fluides. Parmi les objectifs applicatifs figurent, entre autres, la réduction de la traînée ou des émissions acoustiques, l'augmentation de la portance, la maîtrise des turbulences de sillage et des phénomènes aéroélastiques, ou encore la promotion et le contrôle des transferts thermiques.



GEMP : groupe d'étude sur les milieux poreux

Les activités du groupe GEMP sont orientées vers l'analyse et la modélisation des phénomènes à l'intérieur ou à la surface de milieux poreux. Le groupe étudie des milieux poreux très variés : biologiques (os, cartilage, peau, tumeur...), géologiques (roches, sols, gisements...), manufacturés (fibres, membranes...). Ces milieux hétérogènes à différentes échelles sont le siège d'écoulements liquides ou gazeux, de transferts de matière ou de chaleur, de réactions chimiques ou biologiques, de changements de phase (dissolution, cristallisation, évaporation, ébullition, condensation), qui jouent un rôle fondamental dans leur comportement à l'échelle de l'utilisateur. Les méthodologies génériques ainsi développées permettent d'aborder les thèmes de recherche suivants :

- Transferts en milieux réactifs
- Écoulements polyphasiques, changements de phase
- Transferts en milieux géologiques
- Mécanique du vivant
- Instabilités
- Effets du confinement



HYDROECO

Les recherches du groupe HYDROECO répondent à des attentes sociétales dans les domaines de l'environnement et du développement durable. Elles portent essentiellement sur la prévision des crues, l'analyse des risques d'inondation, l'hydrologie opérationnelle, la restauration de la continuité écologique (libre circulation des poissons), et celle des habitats piscicoles soumis à des perturbations hydrologiques. Elles font appel à des technologies innovantes comme la télédétection et les modélisations fines à différentes échelles. L'activité du groupe est structurée autour des trois thèmes suivants :

- L'Hydrologie de Surface vise la compréhension et la description des mécanismes influant sur la dynamique des crues à cinétique rapide : Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes (MARINE).
- L'Hydrodynamique à Surface Libre à haute résolution analyse la propagation des crues en zone urbaine et, à des échelles plus petites, les écoulements dans des géométries complexes afin de quantifier les fortes dissipations d'énergie autour d'obstacles.
- L'Ecohydraulique caractérise les relations entre les organismes aquatiques et l'hydrodynamique notamment en système complexe. Les applications portent sur la définition de solutions technologiques pour la restauration de la libre circulation des poissons au droit des barrages ainsi que celles des habitats aquatiques soumis à des contraintes hydrologiques.



Interface : mon premier choix

Les activités de recherche développées dans le groupe Interface portent sur les écoulements multiphasiques, dans lesquels une ou plusieurs interfaces jouent un rôle central dans la dynamique de l'écoulement. L'interface peut séparer un gaz et un liquide, deux liquides de composition ou de densités différentes ou même un lit de grains et un fluide. Le moteur de la dynamique peut résulter de la gravité (nuage de bulles, courants de gravité, avalanches), d'une instabilité de sillage ou de

cisaillement, d'un changement de phase (ébullition), du mouvement d'une ligne triple. L'activité du groupe est aujourd'hui structurée autour des six thèmes scientifiques suivants :

- Bulles, gouttes et corps mobiles.
- Écoulements dispersés : agitation, mélange & dynamique d'interface.
- Transfert, changement de phase & interfaces réactives.
- Tourbillons, turbulence & interfaces.
- Écoulements capillaires & mouillage.
- Milieux granulaires, fluides complexes & transition d'échelle.

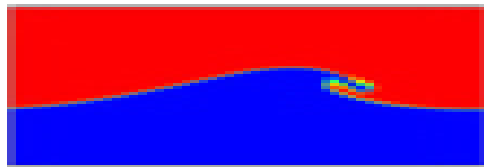


OTE : ondes, turbulences et environnement

Le groupe se consacre à l'étude de l'hydrodynamique en milieu océanique profond ou zones littorales, dans l'atmosphère et en rivière, en particulier aux ondes de gravité de surface et internes, aux tourbillons et à la turbulence. Sont également étudiés des phénomènes physiques comme le transport de sédiments, des processus biologiques et non-newtoniens ainsi que la dispersion conditionnée par les écoulements turbulents. L'objectif de ces études est de contribuer à la compréhension et à la modélisation de processus hydrodynamiques de «petites» et «moyennes» échelles qui interviennent dans ces systèmes et qui peuvent avoir une influence sur les plus grandes échelles, ou sur le milieu environnant. L'approche s'appuie à la fois sur les expériences en laboratoire et sur les simulations numériques.

Les activités du groupe OTE sont organisées en deux thèmes scientifiques :

- Hydrodynamique sur fonds naturels : Turbulence sur fonds rugueux, Ondes de gravité internes et de surface, Courants de gravité, Tourbillons confinés.
- Transferts, Transport et Morphodynamique : Fonds vivants, Dispersion turbulente, Transport et morphodynamique.



PSC : particules, spray et combustion

Le champ scientifique du groupe PSC couvre l'analyse des écoulements à phases dispersées en mécanique des fluides (sprays, gouttes, cellules et particules) ainsi que les écoulements réactifs complexes (combustion, polymérisation) incluant les aspects thermiques et énergétiques.

Les applications industrielles se situent dans le domaine d'activités du Génie Chimique/Génie des Procédés et de la Combustion en particulier les opérations de transformation de la matière et de l'énergie où les transferts couplés ont un rôle central : transports, turbines à gaz, foyers industriels, centrales thermiques, fours, réacteurs chimiques. Plus récemment, les problèmes appliqués s'orientent vers l'environnement et le vivant (bio-fluides et suspension de micro-organismes). Le groupe est structuré autour de trois thèmes:

- Modélisation et simulation des écoulements particuliers.
- Combustion et contrôle des transferts en écoulements turbulents réactifs polyphasiques.
- Analyse d'écoulement de suspensions de fluides biologiques.



2) Première mission : étude du phénomène d'évaporation dans les milieux poreux

a) Présentation du sujet et notions importantes

i) Etude de l'évaporation de l'eau pour des terres agricoles en Israël

« Impacts of heterogeneity on evaporation from bare soils. A way to reduce water losses »

Le sujet proposé est une demande d'approfondissement d'étude de la part d'Israël, datant de 2011. Celle-ci porte sur l'évaporation de l'eau sur des terres agricoles au cours du temps. Dans un souci d'économie, d'écologie et de rentabilité, il nous est demandé de comprendre le phénomène mis en jeu afin de pouvoir proposer une solution pour ralentir cette évaporation et ainsi limiter le gaspillage d'une ressource difficile d'accès dans une zone aride de ce type.

Il s'agira donc de modéliser, en laboratoire, le type de sol que l'on trouve sur place, puis de le soumettre à différentes contraintes dont on évaluera l'impact, puis dans le meilleur des cas de proposer une solution viable pour une plus grande économie d'eau, en parti grâce au contrôle des hétérogénéités du sol, et à ses propriétés de mouillabilité.

Mais avant toute démarche scientifique, il est important de rappeler quelques notions qui seront très utiles au cours de cette étude.

ii) Qu'est-ce qu'un milieu poreux

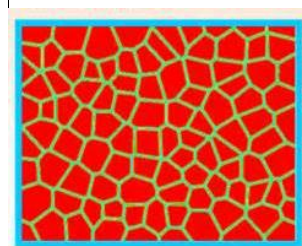
Un milieu poreux est un ensemble de cavités, qui sont généralement de formes compliquées et sont distribuées à l'intérieur de la structure solide. Un milieu poreux est donc un milieu se composant d'une matrice solide et de son complément géométrique, l'espace poreux, ce dernier pouvant être occupé par un fluide (liquide, gaz, parfois solide) ou du vide.

On peut distinguer 2 grandes catégories de milieux poreux, suivant la morphologie de la matrice solide :

- Les poreux consolidés : cohésion de la phase solide (l'espace poreux est « creusé » dans la matrice solide : roche, béton mousse...) (1)
- Les poreux granulaires : absence de connexité de la phase solide (empilement de billes, de grains, ou de formes quelconques : sable, silos...) (2)



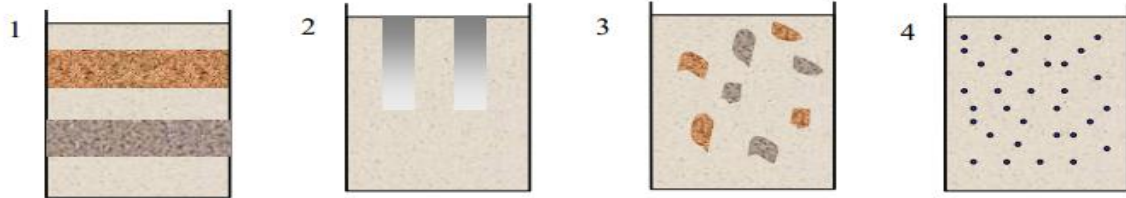
(1)



(2)

Au cours de notre étude, nous ne serons amenés à étudier que les poreux granulaires, puisqu'ici notre milieu poreux étudié est le sol agricole donc il s'agit d'un empilement de poussières liées par un fluide, liquide (eau) ou gazeux (air), dont le pourcentage de chaque élément diffère suivant l'état d'avancement de l'assèchement, et donc du phénomène d'évaporation.

Il existe 4 types de sols poreux différents :



1 : strates horizontales (multicouches à conductivités hydrauliques différentes)

2 : hétérogénéité 2-D (bandes alternées compactées ou non, ex : roues d'un tracteur)

3 : mélange de domaine aux propriétés différentes

4 : Hydrophobie (grappes de pores hydrophobes répartis de façon aléatoire dans une matrice hydrophile)

iii) Rappel sur les différences de propriétés en fonction de l'échelle micro, méso ou macro

Dans cette étude il est également nécessaire de rappeler l'importance du choix de l'échelle choisie puisque nous n'observons pas les mêmes propriétés pour chaque type d'échelle.

En effet, les études réalisées directement sur place en Israël sont à taille réelle, mais celles-ci ne permettent pas de conclure parfaitement sur le phénomène mis en jeu. Tandis qu'en laboratoire nous travaillerons à échelle méso qui est à mi-chemin entre l'échelle micro et l'échelle macro.

On reste dans le domaine des micropores tant qu'il s'agit de cavités ne pouvant contenir que quelques unités de petites molécules de fluide. Un pore de cette taille pourrait même être qualifié de site d'adsorption. Et des propriétés de fluide comme la viscosité ou la tension interfaciale ne sont plus valables dans des pores aussi petits.

A l'échelle méso, le liquide contenu dans les pores est alors qualifié de capillaire, ce qui signifie que son état (sa pression) est directement lié à la tension interfaciale du liquide qui règne à l'interface avec l'atmosphère environnante et à la forme de celle-ci.

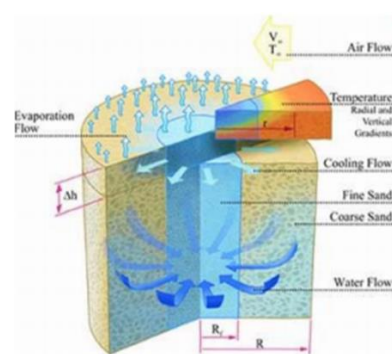
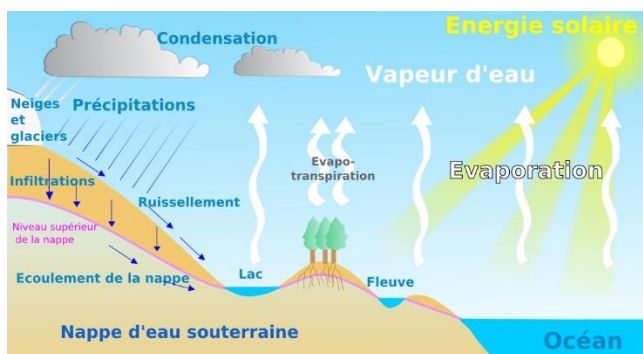
Puis on passe dans l'échelle des macropores dès l'ordre de 50 ou 100 nanomètres, lorsque la pression de vapeur au contact du liquide qui y est confiné devient pratiquement indiscernable de la pression de vapeur saturante.

Ensuite il faut se poser la question du volume à prendre en compte, qu'on appelle volume élémentaire représentatif structurel. C'est l'échantillonnage. On doit alors s'imposer une marge d'erreur possible, au niveau de la reproductibilité de l'expérience. Évidemment, plus ce volume est grand, plus les fluctuations des résultats s'atténuent. Pour illustrer ce problème, prenons l'exemple d'un mur de briques (pleines). C'est un empilement structuré de briques

précis, liées par un mortier. Si on s'intéresse à la brique en particulier, on définira un VER beaucoup plus petit que la brique elle-même, car elle est homogène et toutes les briques sont statistiquement identiques. On pourra procéder de même pour le mortier qui lie les briques entre-elles. Par contre, aucun de ces deux VER ne peut caractériser le mur entier, et il faut procéder à l'homogénéisation à une échelle supérieure avec un VER de l'ordre du mètre.

Dans notre cas, le VER sera toujours un carré de 5 à 7 centimètres de côté. Cette plaque est une surface moulée de petits carrés d'environ 1mm de côté, d'épaisseur 1mm et séparés par 0.5mm. Ceci est valable pour l'étude d'un sol homogène, et non travaillé, mais la taille des pores et des séparations peut varier et même devenir complètement hétérogène en fonction de l'état du sol étudié.

iv) Qu'est-ce que l'évaporation ?



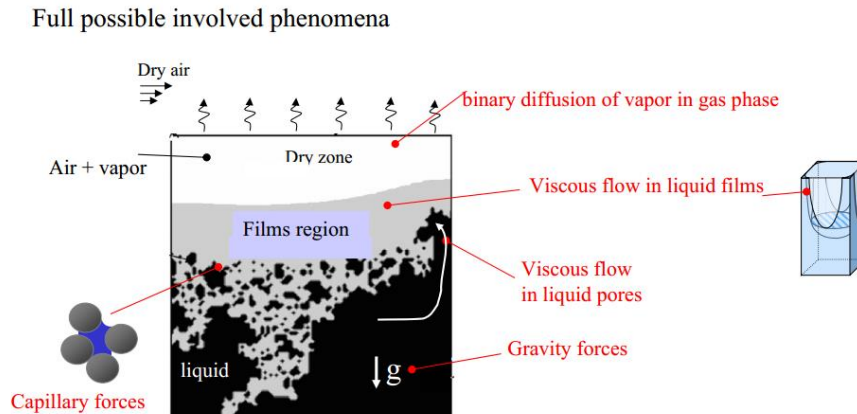
L'évaporation est une étape primordiale du cycle de l'eau, c'est l'échange entre la terre et l'atmosphère. Ce phénomène dépend des conditions atmosphériques telles que la température, le taux d'humidité et la vitesse d'écoulement dont nous essayerons de contrôler les fluctuations tout au long de nos manipulations. C'est un phénomène qui traduit une réaction de la structure du sol interne aux conditions atmosphériques.

v) Rappel sur les nombreuses propriétés de l'eau

- L'eau possède un fort pouvoir mouillant qui lui donne des propriétés capillaires particulièrement importantes (Voir mouillabilité en 1) b) iii)).
- En outre, sa viscosité, très variable selon sa composition chimique ou sa température, est à l'origine de caractéristiques de miscibilité remarquables.
- L'eau est l'élément naturel dont la chaleur spécifique est presque la plus élevée sur terre.
- La grande stabilité de la molécule est assurée par la saturation de la couche externe lors de la mise en commun des électrons de l'atome d'oxygène avec les atomes d'hydrogène. Mais même si la couche électronique externe reste saturée, les électrons ont tendance à migrer vers l'oxygène O^{2-} , délaissant l'hydrogène H^+ à cause du caractère très électronégatif de l'oxygène. En outre, le déséquilibre électronique a pour effet de rendre possible des liaisons entre l'atome d'hydrogène d'une molécule avec l'atome d'oxygène d'une autre molécule. C'est l'existence de cette liaison hydrogène qui explique pourquoi il faut fournir beaucoup d'énergie pour vaporiser l'eau, puisque avant qu'elle le puisse, il faut d'abord casser ces liaisons dites faibles. Ceci explique pourquoi l'évaporation de l'éthanol est plus rapide que celle de l'eau.

- Cette " disponibilité " électronique potentielle rend la molécule d'eau très affine pour de multiples substances qu'elle peut ainsi dissoudre. L'eau est donc de nature corrosive, elle attaque systématiquement tous les matériaux qu'elle côtoie. L'oxygène qu'elle contient réagit avec les métaux et crée un processus d'oxydo-réduction.

b) Facteurs à prendre en compte



i) Diffusion binaire

L'évaporation est un problème de diffusion. Au cours de notre étude, on observera la diffusion du mélange binaire : air + eau. On considérera qu'il n'y a pas d'interaction entre le fluide et le milieu poreux. Pour modéliser ce phénomène, on utilisera une méthode de changement d'échelle : la prise de moyenne volumique.

Tout d'abord, il faut formuler le problème à l'échelle des pores et introduire quelques notations : la vitesse de diffusion sera notée $\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}$.

$\mathbf{u}_i$ = vitesse de diffusion de l'espèce i par rapport à la vitesse moyenne $\mathbf{v}$

Dans notre approche du phénomène, il n'y a pas de source de perturbation du phénomène (entrée de matière, extraction, réaction chimique...), on peut donc établir qu'il y a conservation de la matière en tout point : $\frac{dm}{dt} = 0$ avec $m = \iiint_{\Omega} \rho d\Omega$

Ensuite, avec le théorème de transport de Leibniz, et celui de Green-Ostrogradsky, on obtient l'équation bilan local de l'espèce k : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

Puis, en introduisant le flux de diffusion $\mathbf{J}$ de l'espèce k , on obtient la forme générale de la loi de conservation de la masse de l'espèce k dans un système multi-constituant :

$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{J}$ avec $\mathbf{J}$ qui découle de la loi de Fick : $\mathbf{J} = -\rho D_{AB} \nabla \omega$
où D_{AB} est le coefficient de diffusion binaire de l'espèce A dans l'espèce B.

On a donc finalement, l'équation de conservation : $\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{Variations temporelles}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})}_{\text{Flux advectif}} = \underbrace{\nabla \cdot (\rho D \nabla \omega)}_{\text{Flux diffusif}}$

A l'échelle microscopique, on a toujours $\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla c)$ dans V_f (volume occupé par le fluide) **1**

Et on a maintenant la condition initiale : $c = H(r)$ sur V_f

Ainsi que les deux conditions limites : $c = G(r, t)$ sur A_{fe} (frontière du domaine occupé par le fluide)

$$-\mathbf{n}_{fs} \cdot D \nabla c = 0 \text{ sur } A_{sf} \text{ (surface interfaciale solide/fluide dans } V)$$

Avec $\mathbf{n}_{fs}$ vecteur normal en un point de la surface A_{sf} dirigé du solide vers le fluide, et $G(r, t)$ et $H(r)$ dépendent du problème étudié.

Enfin, à l'échelle macroscopique, l'idée est de profiter du fait que $d \ll L$ (d =taille des pores ; L = libre parcours moyen) pour effectuer un changement d'échelle de description, c'est-à-dire remplacer le milieu hétérogène finement divisé par un milieu continu équivalent. Ici, nous allons utiliser la méthode de la prise de moyenne volumique). $c = \langle c \rangle^f + c''$

Pour cela, il faut définir une nouvelle variable, la moyenne intrinsèque de phase de la fraction volumique microscopique c : $\langle c \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_f} c dV = \varepsilon \langle c \rangle^f$ **2** où ε représente la porosité ($\varepsilon = V_f/V$).

En couplant **1** et **2**, et par application de théorèmes de la moyenne :

$$\varepsilon \frac{\partial \langle c \rangle^f}{\partial t} = \nabla \cdot [\varepsilon \nabla \langle c \rangle^f + \frac{1}{V} \int_{V_f} \mathbf{n}_{fs} c'' dV]$$

!! Il faut trouver une équation fermée pour établir la périodicité spatiale : $\mathbf{b}(r + l_i) = \mathbf{b}(r)$

$c'' = \mathbf{b} \cdot \nabla \langle c \rangle^f$ avec $\mathbf{b}$ un vecteur de fermeture.

On pose donc : $\nabla^2 c'' = 0$ dans V_f

$$-\mathbf{n}_{fs} D \nabla c'' = -\mathbf{n}_{fs} D \nabla \langle c \rangle^f \text{ sur } A_{sf}$$

$$c'' = g(r, t) \text{ sur } A_{sf}$$

Et on obtient : $\varepsilon \frac{\partial \langle c \rangle^f}{\partial t} = \nabla \cdot [\varepsilon \mathbf{D}_{eff} \cdot \nabla \langle c \rangle^f]$

$$\text{avec } \mathbf{D}_{eff} = D [\mathbf{I} + (1/V_f) \times \int_{A_{fs}} \mathbf{n}_{fs} \mathbf{b} dA] \text{ où } \mathbf{I} \text{ est le tenseur unité}$$

La détermination de $\mathbf{D}_{eff}$ est purement expérimentale et diffère selon le type de milieu étudié. Dans notre cas, il s'agira uniquement de milieux homogènes non consolidés, isotrope ou non.

Pour le milieu isotrope, la solution empirique est : $\varepsilon^{1.4} = (\varepsilon \times D_{eff}) / D$ pour $\varepsilon \in [0 ; 0,5]$

Quant aux solutions de l'équation de diffusion, elles dépendent également du milieu étudié.

Pour un milieu poreux homogène isotrope, il suffit de résoudre l'équation de la diffusion

selon z : $\frac{\partial \langle c \rangle^f}{\partial t} = D_{eff} \times \frac{\partial^2 \langle c \rangle^f}{\partial z^2}$, or si l'on compare les ordres de grandeurs, on peut écrire :

$$(\langle c \rangle^f / t) = O(D_{eff} \times \langle c \rangle^f / \delta^2) \quad \text{donc } \delta = \sqrt{(D_{eff} \times t)}$$

Où δ est la longueur caractéristique de l'étalement.

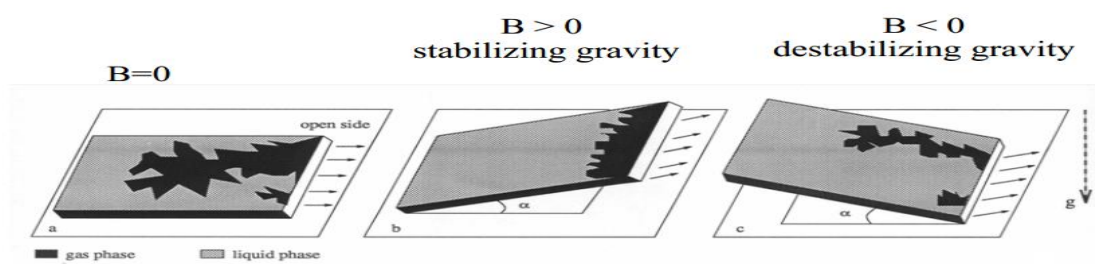
Pour un milieu poreux homogène non-isotrope, cela nécessite une résolution numérique avec un maillage et une connaissance de la concentration en fluide à chaque pore (= nœud).

ii) Effet de gravité

Le but de nos manipulations n'est pas de déterminer si la gravité a un impact ou non sur le phénomène d'évaporation, puisque la réponse est évidemment oui. Le fluide est attiré par des altitudes plus basses, et on pourrait penser que l'eau aurait tendance à s'accumuler dans le fond sans ce phénomène de diffusion, ce qui n'est pas le cas. Le but est plutôt de le comparer aux autres facteurs qui rentrent en jeu, pour évaluer le niveau d'influence et savoir si on peut faire l'hypothèse d'un système sans forces de gravité.

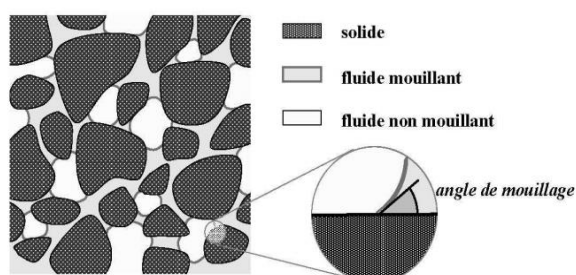
Pour cela, on introduit le coefficient $B = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces de capillarité}} = \frac{\Delta \rho g}{\gamma} \alpha^2$ et on étudie 3 configurations d'inclinaisons, $B < 0$; $B = 0$; $B > 0$ où γ est la tension de surface.

Pour $B=0$, il s'agit d'une installation à l'horizontal, mais celle-ci a peu d'intérêt puisque ce cas est très peu probable, on rencontrera le plus souvent $B \gg 0$. En revanche, le motif d'évaporation qu'elle fournit pourra servir de témoin pour nos interprétations. En outre, pour faciliter les prises de mesures, nous ne ferons qu'une seule position impliquant la gravité : $\alpha = 90^\circ$



iii) Mouillabilité, angle de contact, capillarité = perméabilité

Lorsque deux fluides non miscibles se partagent l'espace poreux, leur localisation dans celui-ci est déterminé par les phénomènes interfaciaux appelés capillarité. L'un des deux fluides est appelé « mouillant » et l'autre sera dit « non-mouillant » et se détermine par l'angle de mouillage qui traduit le mouillage des parois du solide par chacun des fluides. Lorsque l'un des deux fluides est un gaz, le liquide est dans la plupart des cas le mouillant, dans le cas contraire, on dira que la surface solide est hydrophobe (ex :mercure).

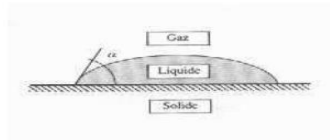


L'angle α est mesuré par convention dans le fluide le plus dense.
Le comportement du fluide sera dit

Mouillant	si $\alpha < 90^\circ$
Non mouillant	si $\alpha > 90^\circ$
Neutre	si $\alpha = 90^\circ$ (pas d'effet capillaire)



Figure 5 a) Goutte d'eau sur du Téflon (matériau hydrophobe),
b) Goutte d'eau sur du plexiglas (matériau légèrement hydrophile)



L'interface entre les deux fluides est quant à elle soumise au phénomène de tension interfaciale, qui se comporte comme une membrane sous pression. Cette tension est notée γ , et ne se manifeste que lorsque l'interface présente une courbe appréciable, ce qui est le cas dans les espaces poreux comme ceux que nous étudions.

L'une des conséquences de l'existence de cette tension de surface est l'existence d'une différence de pression de part et d'autre de l'interface notée ΔP .

Considérons par exemple une bulle de savon, de rayon r , suffisamment petite pour qu'on puisse la considérer comme sphérique, alors sa surface sera $4\pi r^2$ et son coefficient de tension de surface est γ . Pour une diminution de dr de son rayon, la variation de l'énergie libre de surface sera $8\pi\gamma r dr$. Le travail associé pour une diminution du rayon de la bulle de dr est donc $\Delta P \cdot 4\pi r^2 = 8\pi\gamma r dr \Rightarrow \Delta P = 2\gamma/r$. La pression dans la bulle est donc d'autant plus grande que son rayon est petit.

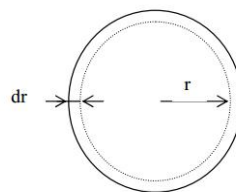


Figure 3 Section d'une bulle

Lorsque deux fluides sont en contact, il existe donc une discontinuité des pressions à travers l'interface qui les sépare et dépend de la courbure de l'interface et nous l'appelons pression capillaire P_c , $P_c = P_{nm} - P_m$

La pression dans le fluide non mouillant est supérieure à celle qui règne dans le fluide mouillant et cette condition se traduit par la loi de Laplace : $P_c = \gamma/R_c$ où R_c est le rayon de courbure moyen, et dépend de la forme des pores.

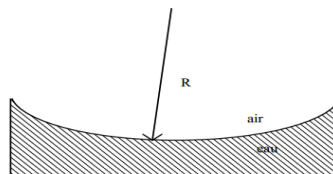
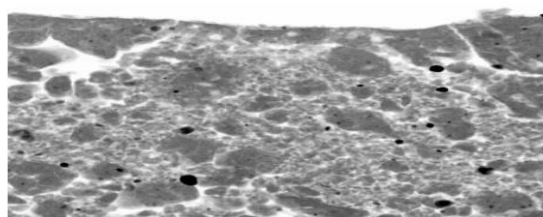


Figure 6. Interface entre deux fluides non-miscibles

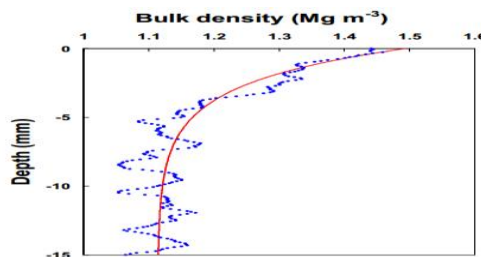
iv) Compactage

Le compactage peut avoir plusieurs origines, prendre différentes formes et donc influencer le phénomène étudié : l'évaporation de l'eau. D'ailleurs nous le mettrons en évidence à travers l'utilisation de deux modèles réduits différents, l'un homogène, l'autre hétérogène.

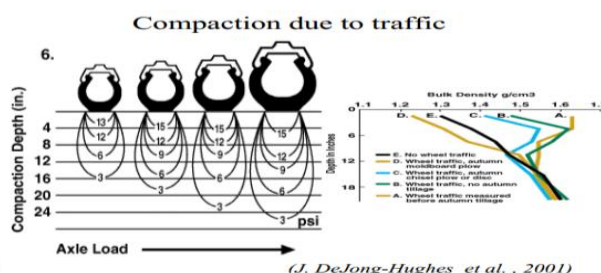
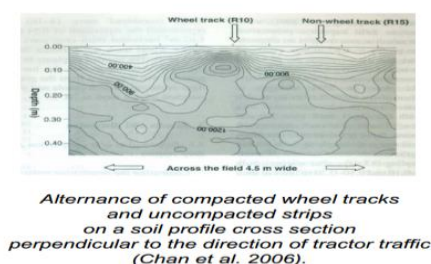
Le compactage peut survenir ou être modifié à la suite de chute de pluies plus ou moins fortes ;



(Bresson et al., SSSAJ (2004))



Ou après le passage d'un engin agricole (2) :

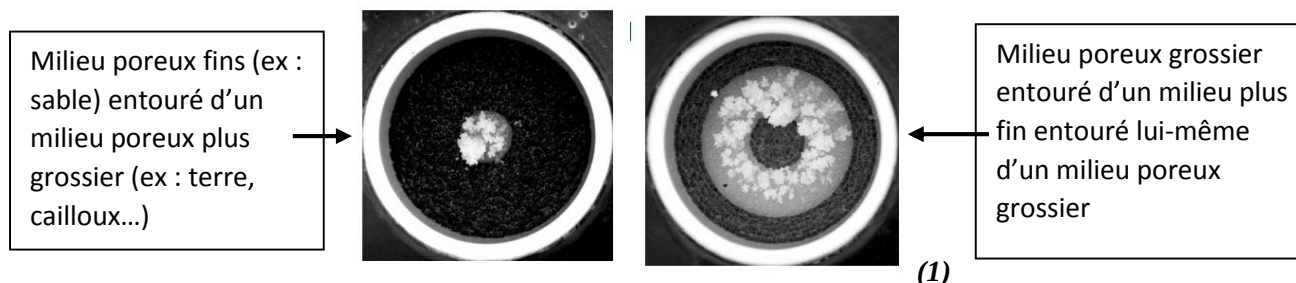


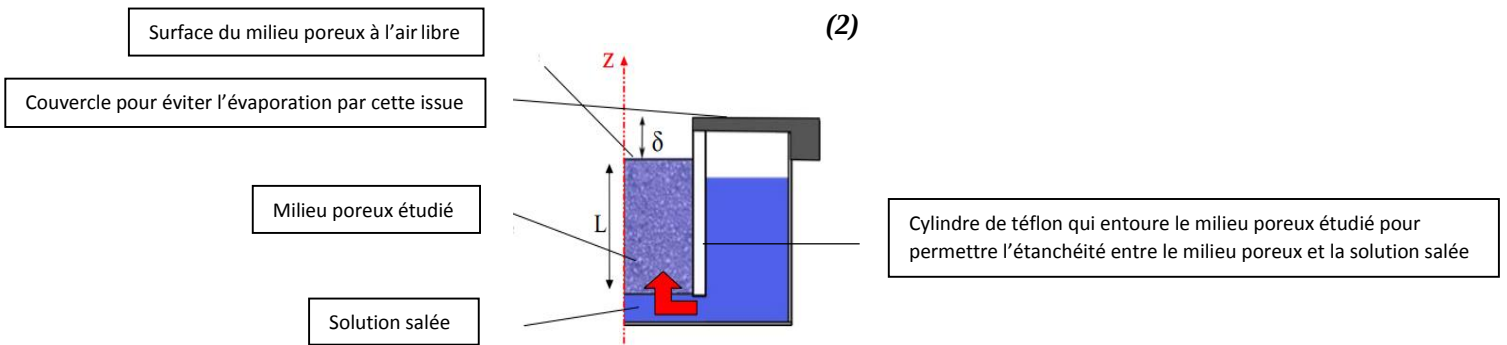
v) Hétérogénéité de l'évaporation de l'eau

L'évaporation de l'eau est bien sûr un phénomène hétérogène, et nous ne l'étudierons pas au cours de nos manipulations. Néanmoins, c'est un sujet intéressant qui pourrait être mis en évidence par l'intermédiaire de la cristallisation du sel au contact de gouttes d'eau. D'ailleurs, j'ai pu observer de près cette cristallisation puisqu'il s'agissait du sujet de thèse du doctorant avec qui je partageais la salle de TP.

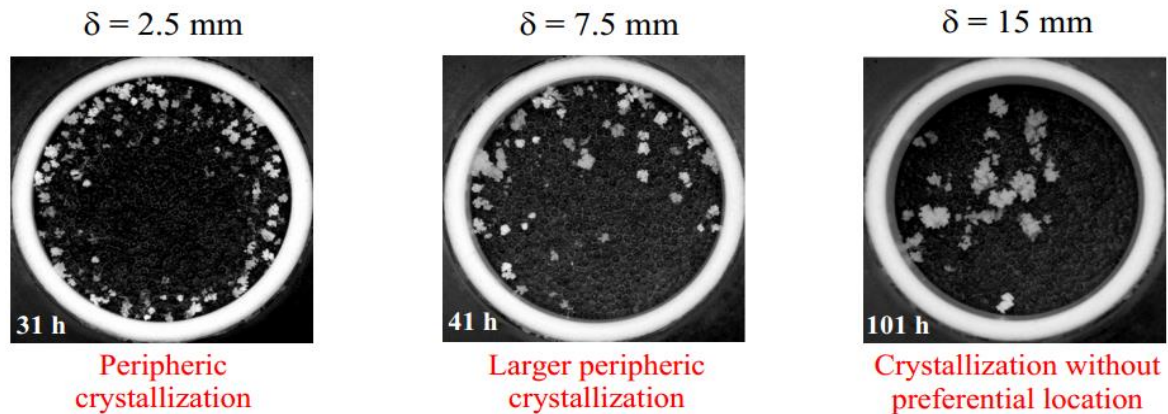
Pour plus de précisions sur cette cristallisation, on peut citer quelques facteurs qui influent sur l'évolution du processus :

- la nature du milieu poreux étudié puisque la cristallisation peut aussi être utilisée pour différencier plusieurs types de sols (1)
- la distance δ entre l'entrée du cylindre et la surface du milieu poreux étudié (2)





Et pour bien mettre en évidence l'influence de δ , voici quelques vues de dessus qui l'illustrent :



vi) Viscosité

La viscosité dépend de la force des liaisons qui entrent en jeu tel que les liaisons hydrogènes, les liaisons de Van Der Waals..., comme c'est déjà expliqué dans le paragraphe sur les propriétés de l'eau. Et c'est en utilisant deux fluides différents qu'on la mettra en évidence : eau ; éthanol.

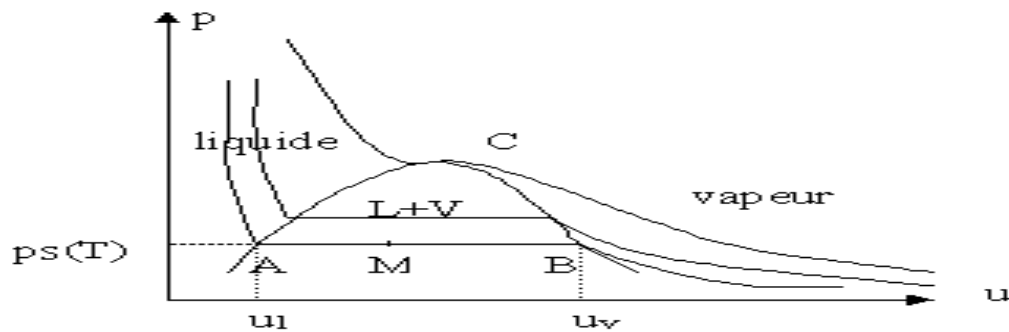


Coefficients de viscosité dynamique : $\text{H}_2\text{O} = 1.02 \cdot 10^{-5}$ / $\text{Eau} = 1.00 \cdot 10^{-3}$
 $\text{Ethanol} = 1.20 \cdot 10^{-3}$ / $\text{N}_2 = 1.76 \cdot 10^{-3}$

A 20° , la tension superficielle de l'éthanol est de $22 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$, tandis que pour l'eau, elle est de $72,8 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

vii) Humidité ambiante

L'humidité est également un facteur à prendre en compte dans l'étude de l'évaporation, puisque si l'atmosphère est déjà saturée en eau, l'évaporation mettra beaucoup plus de temps à se réaliser, ou n'aura peut-être même pas lieu. Il est donc fortement déconseillé de réaliser ces manipulations lorsqu'il pleut, et même si on se trouve dans une pièce fermée car le taux d'humidité extérieur, 100% en cas de pluie, impacte sur les expériences en intérieur. C'est ce qu'exprime le diagramme de Clapeyron suivant :



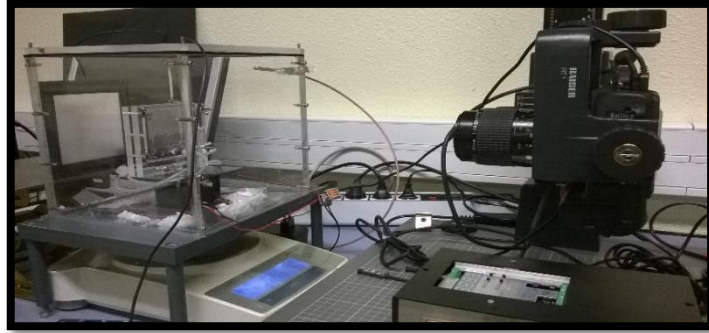
Pour remédier à ce problème, nous utiliserons une sonde qui relève le taux d'humidité du milieu dans lequel elle se trouve. Mais nous ne ferons pas que mesurer cette grandeur, nous la contrôlerons, en installant notre réseau à l'intérieur d'une cuve étanche tapissée de silice sur le fond (absorbe les gouttes d'eau, et fond lorsqu'elle sature, il faut alors remplacer la silice). L'humidité sera alors toujours comprise entre 6 et 10%. Afin de vraiment mettre en évidence l'influence de l'humidité de l'air ambiant sur l'évaporation de l'eau, nous comparerons des expériences réalisées avec et sans contrôle d'humidité.



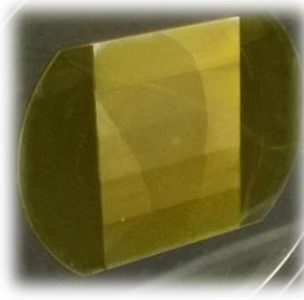
b) Résultats et interprétations

i) Protocoles

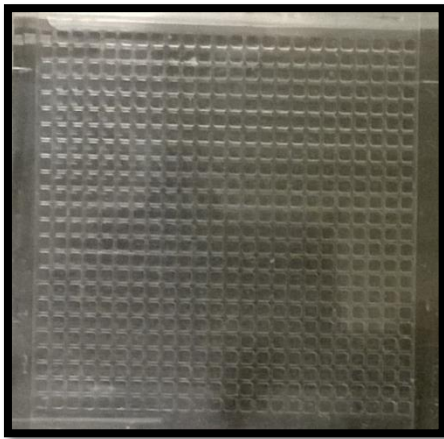
Lors de nos manipulations, nous procéderons toujours à un suivi de la pesée avec une balance pour déterminer la quantité d'eau évaporée au bout d'un certain temps t . En parallèle, il y aura un suivi visuel toujours en fonction du temps par l'intermédiaire d'un appareil photo qui nous permettra ensuite de réaliser des vidéos et d'observer le schéma de l'évaporation. Nous ferons d'abord une première batterie d'expériences avec l'éthanol (temps d'évaporation plus court), pour la raison explicitée dans le paragraphe précédent, puis nous procéderons avec l'eau.



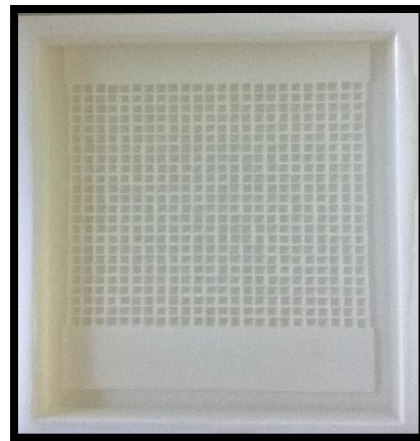
L'étude aura lieu principalement sur un modèle réduit gravé représentant le premier type de milieu poreux : les strates horizontales, qui dans notre étude est le cas le plus probable.



Malheureusement, le modèle étant très fragile, il fut cassé très rapidement. Nous avons donc continué les manipulations sur d'autres types de modèles réduits comme le milieu homogène **(1)** et le milieu hétérogène **(2)** ci-dessous.



(1)



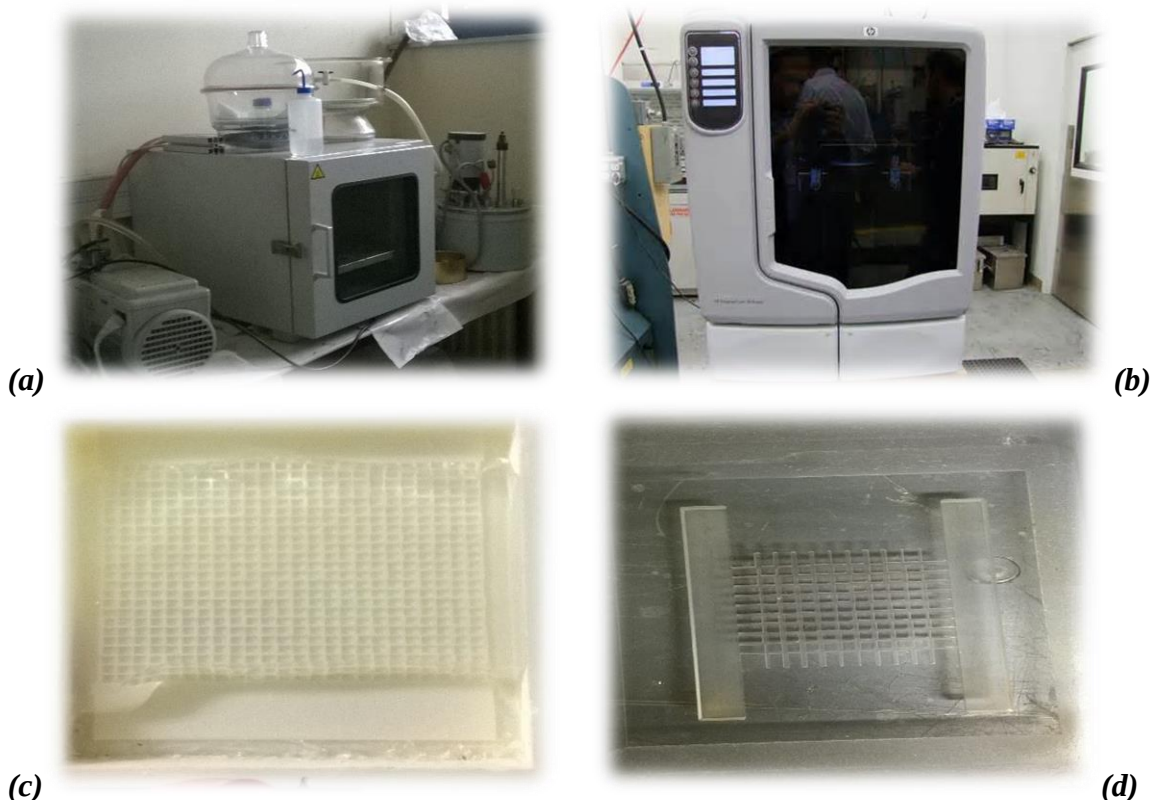
(2)

Le modèle homogène est réalisé à partir d'un moule modélisé sur maths-lab puis gravé, sur lequel on coule une résine PDMS, de composition présentée juste après. Ce modèle fut donc très vite obtenu (il était déjà prêt lors de mon premier jour de stage).

C'est nous qui avons réalisé le modèle hétérogène en résine. Il a d'abord fallu réaliser le modèle numérique du moule sur maths-lab que nous avons matérialisé avec l'imprimante 3D**(b)**. Ensuite, nous avons fabriqué la résine PDMS : 1g de durcisseur pour 10g de base (le durcisseur n'est pas indispensable, mais sans lui, la prise durerait plusieurs jours). Une fois mélangée, cette résine est saturée de bulles d'air, il faut donc la tirer au vide**(a)** pour les enlever. Cette fois, on peut remplir notre moule, et comme de nombreuses bulles d'air sont encore coincées, on repasse le moule avec la résine à la pompe à vide ; les dernières bulles

seront éclatées à la main avec une aiguille très fine. La dernière étape consiste à cuire la résine, qui a désormais pris sa forme finale, pendant au moins 30 minutes à 60°, mais comme nous en avons la possibilité, nous l'y avons laissé pendant 4 jours.

Malheureusement lors du démoulage, ce modèle réduit s'est cassé, nous avons tenté de le refaire à 3 reprises, qui ont toutes été un échec. Nous pensons que le problème vient de la composition de la résine utilisée pour l'impression du moule. Elle a été remplacée juste avant l'impression de ce moule. Il se produit une réaction chimique entre les deux résines dont nous ne connaissons pas les détails puisque la composition de la résine pour imprimer est secrète. En effet, après plusieurs jours de séchage, la surface au contact du moule reste liquide. Pour tenter de contourner ce problème nous avons tenté de traiter l'impression avec un bain d'éthanol, ce qui ne pose plus de problème par rapport au durcissement de la résine coulée. Par contre, celle-ci ne se rétracte pas, elle adhère donc trop bien au moule, il est donc impossible de démouler le modèle réduit hétérogène **(c)**. La solution envisagée est donc de traiter la surface avec un lubrifiant avant de couler la résine dans le moule, mais cela signifie aussi qu'il faut recommencer le processus depuis l'impression. Les deux autres options que nous explorons en parallèle se concentrent sur l'utilisation de nouvelles résines, et l'une des deux a enfin pu aboutir, et même si celle-ci donne un modèle réduit moins transparent, il reste exploitable grâce à l'utilisation de bleu de méthylène. Le modèle réduit hétérogène n'a donc pu être utilisable que la veille de mon départ, son exploitation sera donc assez limitée.

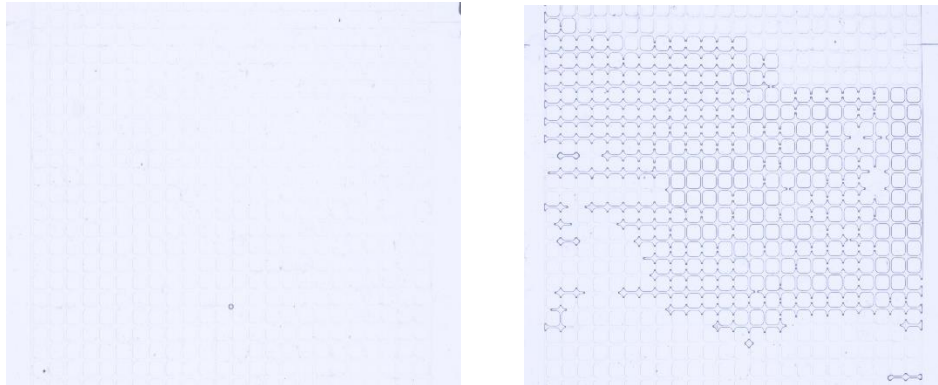


C'est pourquoi, afin de pouvoir quand même étudier l'influence du compactage, et même si on ne pourra pas conclure précisément à cause des grosses différences de taille de modèle, j'ai réalisé quelques expériences sur un modèle hétérogène existant gravé à même le support de VER beaucoup plus réduit **(d)**. Ces résultats ne seront présentés qu'en annexe, au vu de leur potentiel d'exploitation.

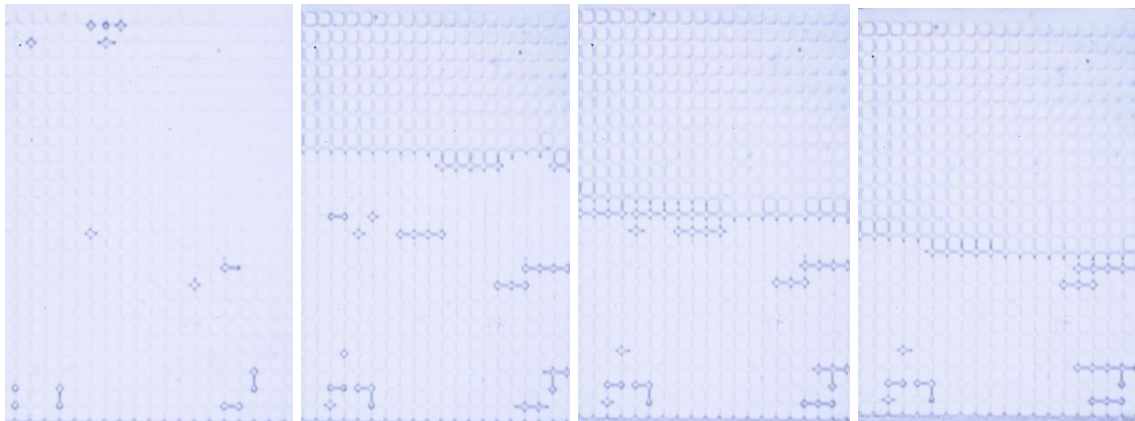
ii) Graphes, vidéos et conclusions

Pour le modèle homogène :

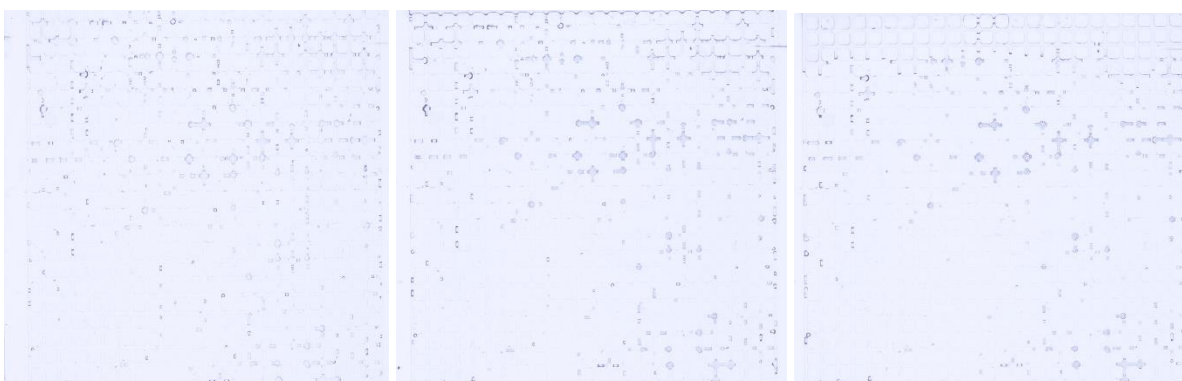
Diffusion seule (éthanol, à l'horizontal) : à $t = 0$ et $t = 17h$

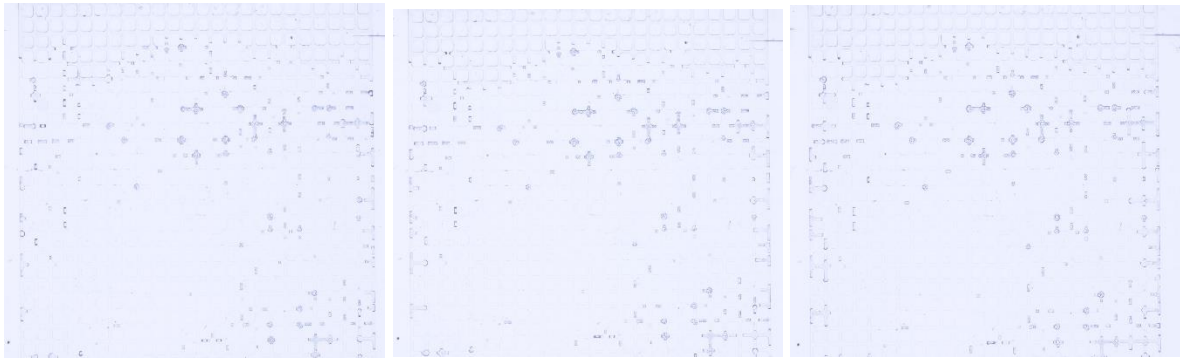


Diffusion et gravité (éthanol, à la verticale) : à $t = 0$, $t = 17h$, $t = 33h$ et $t = 45h$

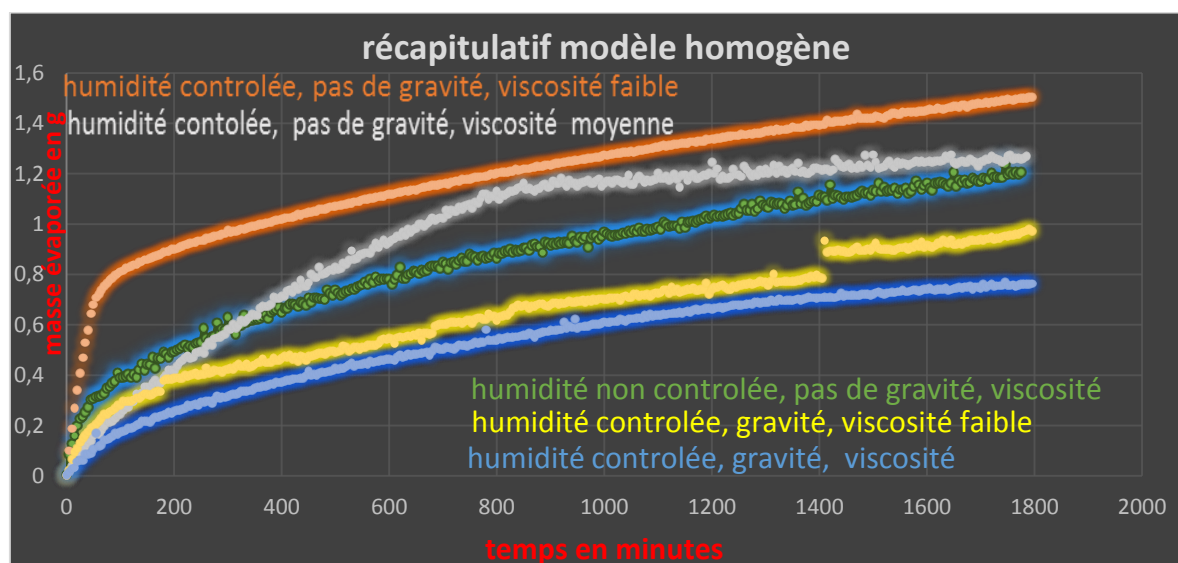
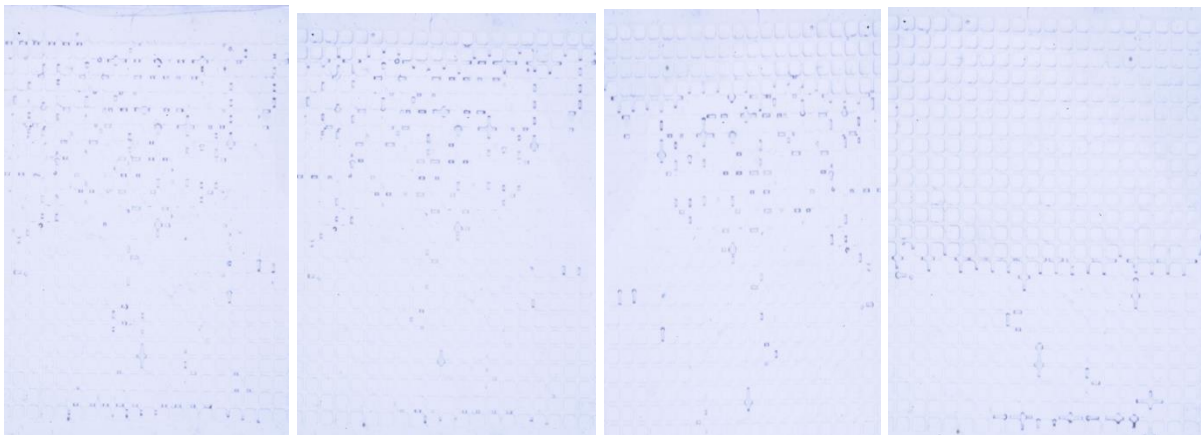


Diffusion et viscosité (eau, horizontal) : à $t = 0$, $t = 16h$, $t = 33h$, $t = 50h$, $t = 67h$, $t = 89h$





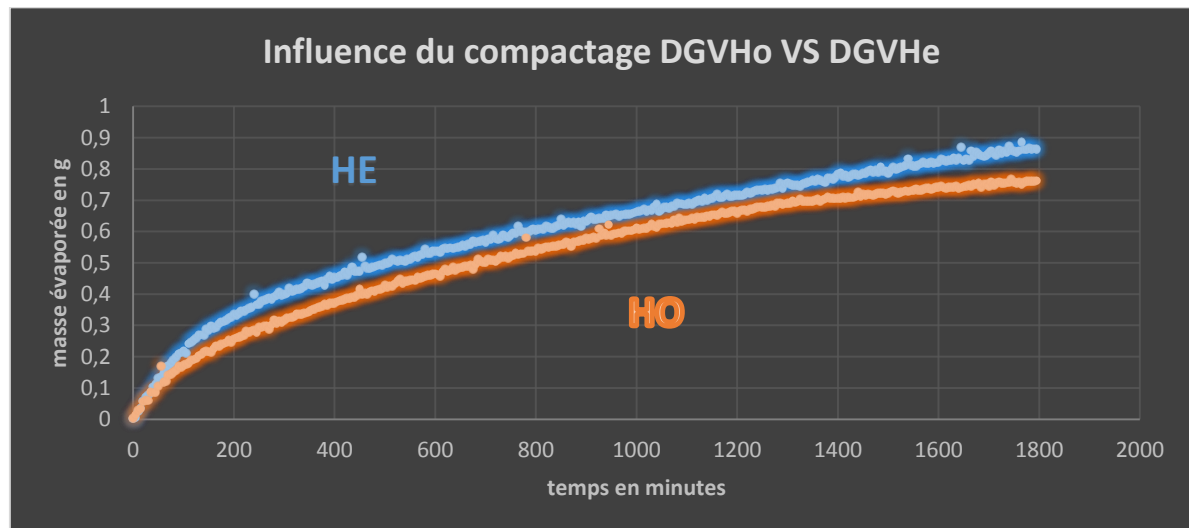
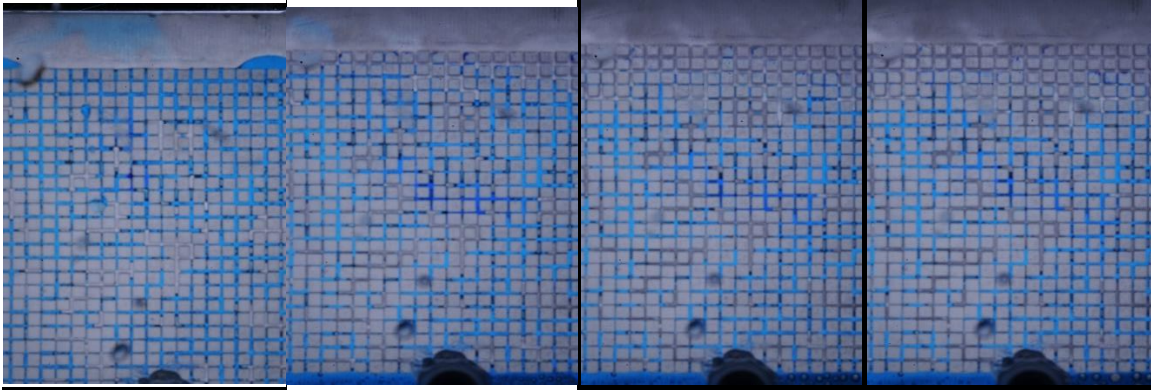
Diffusion gravité et viscosité (eau, vertical) : à $t = 0$, $t = 16h$, $t = 33h$ et $t = 110h$



A partir des résultats, autant massiques que visuels, on observe que plus la viscosité est élevée, plus l'évaporation est difficile. De même, si on augmente l'influence de la gravité. D'ailleurs, il aurait été intéressant, si le matériel en avait permis la réalisation, de faire des mesures pour $\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 60^\circ$. On remarque surtout que dans toutes les configurations, la majorité de l'évaporation a lieu dans les 3 à 4 premières heures. Il est donc primordial, de bien choisir l'heure d'arrosage des cultures. Ensuite, le processus est toujours le même, et il est trop tard pour agir. De plus, le seul paramètre mis en évidence qui peut être contrôlé est le taux d'humidité de l'atmosphère. On verra dans la partie suivante quelles sont solutions imaginables pour le maîtriser.

Pour le modèle hétérogène :

Diffusion gravité et viscosité (eau, vertical) : à $t = 0$, $t = 16h$, $t = 33h$ et $t = 40h$



Pour ce qui est de l'influence du compactage, on peut dire que celui-ci n'est pas le plus important, mais il n'y a pas de petites économies, et il semble qu'un milieu homogène sera plus à même de piéger le fluide en attente d'évaporation. Cependant, pour s'assurer de ce résultat, il faudrait comparer les moyennes des tailles de pores des deux modèles réduits. On verra dans le 2) c), comment remonter à la distribution des tailles de pores d'un milieu inconnu.

Mais tous ces résultats n'ont pas été obtenus aussi facilement qu'il n'y paraît, en effet, au cours des expériences, il y a eu un certain nombre de difficultés à dépasser et c'est à leur énumération que se consacrera la suite de cette partie.

Le deuxième problème technique concerne la longueur des manipulations, puisque certaines expériences, pour ne pas dire toutes, durent plusieurs jours. Et au vu de la durée du stage, il est difficile de toutes les réaliser en seulement 7 semaines, surtout si on doit en refaire certaines, si on est en pénurie de matériel, ou si celui-ci ne fonctionne pas ; ce qui a été le cas. Puisque chaque balance est associée à un logiciel particulier, et que celle que l'on m'avait passée ne s'adaptait pas à mon logiciel, il a fallu en trouver une autre, mais très peu étaient disponibles. De plus, il y a eu un gros problème de connectique car dès que l'on branche ou débranche n'importe quel port com, ils changent tous de port d'entrée, il faut donc toujours

vérifier dans le gestionnaire de périphérique de l'ordinateur que le port com qu'on lit est bien celui qui correspond à celui que l'on a sélectionné sinon il faut le modifier. Il est donc plus prudent de très peu toucher au montage.

Ensuite, pour ce qui est de la manipulation en elle-même, elle n'est pas très difficile à mettre en place. La seule difficulté intervient au niveau du remplissage du milieu poreux par le fluide choisi (eau filtrée ou éthanol). Il faut que le fluide étudié prenne la place de l'air dans les canaux et plus ceux-ci sont petits, plus cette opération est délicate. Et elle se complique encore plus le fluide est visqueux ; ce qui donne encore un avantage à l'utilisation de l'éthanol par rapport à l'eau. Pour parer ce problème il suffirait d'utiliser une pompe à vide comme lorsque l'on coule la résine dans le moule imprimé en 3D, ainsi il n'y aurait plus aucune bulle d'air piégée comme le montre toutes les photos à $t = 0$. Cependant, cette solution est délicate à mettre en place car le modèle réduit n'étant pas fermé sur les côtés, le fluide s'échappe sur les côtés. Il faut donc être vigilant et minutieux lorsqu'on remplit les pores, et ne pas hésiter à tout recommencer si on considère que trop de bulle d'air sont piégées. Cette opération ne serait pas nécessaire s'il n'y avait pas du tout de viscosité. En théorie, cela ressemble à cette photo :



Une dernière remarque sur cette première mission porte sur l'éclairage. En effet, on ne peut pas utiliser le flash par-dessous car la balance a une limite de pesée de 500g, et l'accumulation de la plaque qui flash lorsque l'appareil photo se déclenche, du modèle et de l'enceinte qui permet de contrôler l'humidité sature la balance. J'ai choisi de faire l'impasse sur la qualité de l'éclairage, et c'est pourquoi les clichés sans gravité ne sont pas très nets.



Bien sûr, pour valider la précision et la justesse des résultats et pouvoir appuyer nos conclusions, il aurait fallu calculer toutes les incertitudes, réitérer chaque expérience entre 3 et 4 fois, en extraire les moyennes et les écarts-types, mais au vu du temps imparti, et des nombreux contretemps, il est aisé d'admettre que cela aurait été compliqué à réaliser. Toutes les informations d'incertitudes seront donc issues des données constructeurs fournies sur les appareils : - balance : $\pm 1\text{mg}$

Un autre paramètre qu'il aurait été intéressant d'étudier, est la température, et par la même occasion la pression, ce qui sera en partie étudié lors de la deuxième mission.

Enfin, pour mettre en évidence le phénomène de mouillabilité, il aurait fallu réaliser les mêmes expériences sur un 3^{ème} modèle homogène de même VER que le premier, mais de taille de pores inférieurs ou supérieurs à celui-ci.

i) Solutions envisageables

Pour répondre au sujet qui nous a amenés à mettre ces expériences en place, deux solutions majeures sont proposées.

Une première solution envisageable se situe au niveau du contrôle de l'humidité, en effet nous avons vu que si le milieu dans lequel on évolue a un fort taux d'humidité, l'eau s'évaporerait beaucoup plus difficilement. Il faudrait envisager d'installer les sols cultivés sous de grandes bâches ou serres pour isoler le milieu de l'extérieur et le rendre étanche. On pourra augmenter le taux d'humidité en installant des seaux des récipients d'eau le long des bancs de culture, ainsi l'air sera déjà en partie saturé d'eau et elle s'évaporerait plus lentement. On pourra surveiller ce taux d'humidité avec des sondes adaptées.

Une autre idée repose sur les propriétés de l'interface air-eau, et plus précisément sur la tension superficielle entre l'air et l'eau. Augmenter cette tension superficielle permettrait de repousser la limite de pression que peuvent supporter les gouttes d'eau avant de céder et s'évaporer. D'ailleurs dans le tableau qui suit, on peut constater, comme on peut s'y attendre, à une baisse de cette tension superficielle lorsque la température augmente. Alors, soit on trouve une solution pour refroidir le sol en surface, pour rester sur des tensions superficielles plus avantageuses. Soit on traite le sol, avant qu'il ait plu, ou avant arrosage, pour modifier cette tension superficielle, et pour ça, il existe le traitement CORONA (*annexe*). Le problème est qu'il faudrait vérifier que ce traitement ne compromet pas l'activité agricole pour laquelle nous réalisons l'étude.

T (°C)	0	20	25	37	50	100
Tension superficielle eau-air (10^{-3} N.m^{-1})	75,64	72,8	71,97	70	67,91	58,85

3) Deuxième mission : mise en évidence des phénomènes de drainage primaire et imbibition primaire

Pour l'instant, nous nous sommes essentiellement intéressés au temps d'évaporation, mais il est également important de qualifier le schéma du modèle d'évaporation qui prend exemple sur la théorie de la percolation. Bien sûr, il faut être conscient que lorsqu'on ne compte que sur l'évaporation, beaucoup trop lente, la visualisation du phénomène est difficile, et c'est donc nous qui contrôlerons la durée de l'expérience. Le rôle de cette partie sera donc d'expliquer quel est cette théorie, et de la mettre en évidence sur les modèles réduits que nous utilisons. Enfin, dans l'issue la plus favorable, nous essayerons de remonter à la distribution actuellement inconnue de la taille des pores du modèle hétérogène grâce à la loi de Laplace.

a) Présentations et définitions

i) Quelques définitions

(1) Porosité

La porosité, notée ε , est la propriété d'un corps ou d'un milieu de comporter des vides interconnectés ou non, et est exprimée quantitativement par le rapport de volume de ces vides au volume total du milieu (généralement le VER) : $\varepsilon = \frac{V_f}{V_t} \in [0 ; 1]$.

Dans le cas de milieux poreux contenant un fluide, elle équivaut à la teneur en eau volumique du milieu saturé => mesure par pesée.

(2) Teneur en eau

Dans les milieux poreux non saturés, des sols par exemple, l'espace des pores est rempli partiellement par de l'eau sous forme liquide et partiellement de l'air humide (mélange d'air et de vapeur d'eau). Pour caractériser le contenu en eau liquide du sol, on utilise la teneur en eau liquide, notée θ_l , qui est le rapport de volume d'eau liquide contenu dans un élément de volume de milieu poreux et le volume de l'élément de volume du milieu poreux :

$$\theta_l = \frac{V_l}{V} \in [0 ; \varepsilon].$$

(3) Saturation

Dans certains domaines, il sera d'usage d'utiliser plutôt le concept de saturation, notée S_l , exprimé par le rapport des volumes d'eau contenu dans un élément de volume de milieu poreux sur celui occupé par l'ensemble des phases fluides dans l'élément de volume de milieu poreux :

$$S_l = \frac{V_l}{V - V_s} \quad \text{où } V_s \text{ désigne le volume occupé par la phase solide dans } V$$

On peut voir ces trois grandeurs sont liées par la relation : $\theta_l = \varepsilon \times S_l$

ii) Drainage primaire et imbibition primaire

Lorsqu'on se retrouve en présence de deux fluides dans un milieu poreux, l'un des deux sera appelé mouillant et l'autre le non-mouillant suivant leurs angles de contact (notion présentée précédemment). Leur saturation volumique dépend de ces angles et de la pression interfaciale, néanmoins on sait que cette pression est constante, et nous l'appelons pression capillaire. Quantitativement le volume de chacun des fluides délimité à l'intérieur du VER se traduit par une relation entre la pression capillaire P_c et la teneur volumique en fluide mouillant θ . $P_c = P_{nm} - P_m$

La relation entre la pression capillaire et la saturation pour un poreux donné n'est cependant pas univoque, car les contraintes géométriques imposées à l'interface capillaire ne donnent pas lieu à une solution unique. En effet, l'évolution de la saturation en fonction de la pression capillaire dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels le sens de l'évolution de celle-ci, l'histoire antérieure de la saturation du poreux (voir paragraphe : conclusions et critiques ; on a jamais la même hystérésis comme l'indique la théorie), la structure de l'espace poreux et les phénomènes de piégeage auxquels elle donne lieu, la nature compressible ou non, volatile ou non des fluides en présence. Ces phénomènes complexes sont appelés hystérésis capillaires, et ce sont eux que nous allons mettre en évidence lors de nos expériences ainsi que l'erreur de l'hypothèse sur la réversibilité.

Nous ne nous intéresserons qu'au cas le plus simple, celui où deux fluides sont rigoureusement incompressibles et immiscibles, même si cette dernière hypothèse peut être discutée puisqu'on est dans le cas liquide-gaz et non liquide-liquide. Et les seuls rôles des films interfaciaux se limitent à leur tension interfaciale et la valeur de l'angle de mouillage : solide/gaz, solide/liquide, liquide/gaz.

On appellera déplacement immiscible, une évolution de l'occupation de l'espace poreux par chacun des deux fluides. Cette évolution est conçue comme un processus quasi-statique, au cours duquel la pression capillaire varie de façon assez lente pour que les fluides restent à l'équilibre à tout moment. La détermination de la courbe peut alors se concevoir comme un problème purement géométrique dans un espace poreux de morphologie donnée : courbure interfaciale imposée en fonction de la pression capillaire par la loi de Laplace (paragraphe du mouillage), et respect des angles de mouillage, considéré constant. Ce problème géométrique simplifié a néanmoins une infinité de solutions par la morphologie complexe qui est celle de la plupart des espaces poreux réels, ce qui donne lieu à tout un domaine d'hystérésis dans le plan (P_c, θ) , à l'intérieur duquel une infinité de trajectoires peuvent être décrites.

On définit deux trajectoires limites :

- le drainage primaire : processus de déplacement dans lequel le fluide mouillant occupe initialement la totalité de l'espace poreux. Il est progressivement chassé et remplacé par le fluide non-mouillant à mesure que la pression capillaire P_c augmente.
- l'imbibition primaire : processus inverse, se produisant dans l'espace poreux initialement saturé en fluide non-mouillant par diminution lente de la pression capillaire.

Une infinité d'autres catégories de drainage ou d'imbibition peuvent être décrites lorsque la pression capillaire varie par valeurs respectivement croissantes ou décroissantes à partir d'un état initial qui est lui-même le résultat de l'historique des imbibitions et drainages successifs.

iii) Processus

Aux premiers stades du processus, une petite partie de la distribution porométrique est potentiellement accessible au liquide non mouillant. Les pores envahissables sont à ce stade isolés ou forment des amas de faible extension spatiale en moyenne et isolés les uns des autres. La pénétration du fluide non-mouillant n'est effective que pour ceux qui communiquent avec la phase exposée au liquide non-mouillant. Le début du drainage est donc un phénomène superficiel affectant une épaisseur limitée au voisinage de la surface d'injection de l'ordre de la taille des amas. A mesure que la pression capillaire croît, le volume poreux potentiellement envahissable augmente, les amas de pores envahissables développent entre eux de nouvelles connexions, se regroupent en amas de plus grande extension, et simultanément, l'épaisseur de la région contaminée par le fluide non-mouillant augmente. La façon dont les pores sont répartis et interconnectés dans l'espace poreux est donc un aspect de la morphologie qui joue un rôle essentiel pour la forme des diverses caractéristiques capillaires.

Arrive un stade appelé seuil de percolation où apparaît un amas de pores envahissables (et effectivement envahis) qui traverse l'échantillon, appelé amas percolant. Dans les lacunes du domaine envahi se trouvent des amas de tailles diverses potentiellement envahissables mais non connectés. A partir de ce stade, le drainage effectif devient rapidement un phénomène homogène qui, se propageant à partir de l'amas infini, affecte uniformément tout le volume de l'échantillon. Ce stade peut aussi être appelé percée, c'est-à-dire arrivée du fluide non-mouillant à la face de sortie de l'échantillon. A mesure que la pression capillaire augmente, l'amas percolant agglomère une part de plus en plus grande du volume envahissable au détriment des amas isolés dont l'extension diminue et qui sont bientôt quasiment éliminés. A partir de ce moment, la saturation en fluide non-mouillant tend à se

confondre pratiquement avec le volume disponible dans le réseau, et la caractéristique capillaire coïncide avec la capillarité de référence.

Simultanément, un autre phénomène apparaît et gagne en importance, le piégeage du liquide non-mouillant. En effet pour que le fluide non-mouillant puisse se substituer au fluide mouillant en place dans une région potentiellement envahissable donnée, deux conditions sont requises :

- la région considérée doit être reliée à la face d'injection par l'amas percolant préalablement envahi.

- pour que le liquide mouillant puisse être expulsé, il faut que cette région soit reliée à l'extérieur par un domaine contigu encore occupé par celui-ci.

Or à mesure que le drainage progresse, le volume restant occupé par le fluide mouillant se réduit et se fractionne. Des régions isolées encore non envahies par le fluide non mouillant apparaissent, jusqu'à la rupture de la connexité à grande distance de la phase mouillante (disparition de l'amas infini de fluide mouillant). Le fluide mouillant contenu dans les amas qui se sont trouvés isolés au cours du drainage est définitivement piégé. Au stade final du drainage, un volume ε_m de fluide mouillant appelé saturation résiduelle (ou irréductible) demeure dans l'échantillon. La teneur volumique en fluide est alors $\theta_s = \varepsilon - \varepsilon_m$

Aux derniers stades du drainage comme aux premiers, l'état de saturation dans l'échantillon est inhomogène. En effet, l'isolement de poches de fluide mouillant est moins important à proximité de la face de sortie que de la face d'entrée, car les amas potentiellement isolables communiquent en plus grand nombre avec le réservoir aval. C'est pourquoi la saturation résiduelle observée dépend de la taille de l'échantillon. Ces phénomènes sont d'autant moins visibles que l'échantillon est long.



Jusqu'ici, nous avons expliqué exclusivement le cas du drainage mais en réalité il s'agit exactement du même déroulement d'étapes pour l'imbibition.

b) Protocole

i) Processus de réflexion sur le montage

Pour ce qui est du drainage, l'expérience est assez simple à imaginer puisqu'il suffit de créer une surpression en envoyant une pression supérieure à P_{atm} au niveau de l'eau. Non, le vrai problème se pose au niveau de l'imbibition puisqu'il s'agit de créer une dépression, c'est-à-dire $P_{eau} < P_{air} = P_{atm}$ fixé à 1013 mbar, dans des états de pression et de température standard, pour en quelque sorte, aspirer l'eau. Le problème est que lorsque nous faisons varier la pression, on l'augmente de 0 mbar à 80 mbar, par exemple. Mais en réalité le 0 mbar correspond déjà à 1013 mbar puisque lorsqu'on démarre l'expérience on est à l'équilibre :

$P_{\text{air}} = P_{\text{eau}}$, ce qui ne pose aucun problème pour le drainage mais est très embêtant pour l'imbibition puisque notre MFCS ne permet que d'envoyer des pressions positives. Il est donc impossible dans ces conditions de mettre en évidence l'hystérésis. Pour pallier à ce problème, j'ai donc imaginé plusieurs solutions.

La première consiste à utiliser la loi de l'hydrostatique, à savoir : $P_b = P_c + \rho gh$, à notre avantage en modifiant l'altitude des différents éléments du montage en fonction de la pression désirée. Le programme du MFCS serait alors réduit à un seul ordre, une pression constante fixé par l'utilisateur. Malheureusement, la taille des jonctions entre les éléments étant assez réduite, la distance h que nous pourrions utiliser, ne semble pas assez conséquente pour permettre une visualisation nette des phénomènes.

Une autre solution s'inspire en partie de l'idée précédente. En effet, il faudrait accentuer l'importance de h en augmentant en imposant un facteur ρg plus important. On ne peut bien sûr pas toucher à g , il faut donc s'intéresser à ρ . Il faudrait plonger tout le mécanisme de contrôle de pression dans un fluide de masse volumique suffisamment inférieure à celle de l'air, sans endommager le matériel électronique, ce qui est difficilement réalisable. Ou bien plonger le modèle réduit dans un fluide de masse volumique suffisamment supérieure à celle de l'air. Mais il subsiste le même problème que précédemment cela endommagerait le matériel qui permet de réaliser les mesures et donc les exploitations.

Puisqu'il semble donc qu'on ne puisse pas toucher à la pression de l'eau autrement qu'avec le MFCS, il faut s'intéresser à la pression de l'air qui est pour l'instant la même que la pression atmosphérique.

Une première idée s'inspire du fonctionnement d'une éolienne ou d'un hélicoptère (suivant l'axe qu'on préfère). On positionne une hélice (au préalable enfermée dans une enceinte étanche), par exemple un ventilateur, à laquelle on impose une certaine vitesse, et par application des théorèmes de Bernoulli, sur plusieurs lignes de courant, applicable grâce à plusieurs hypothèses : écoulement parfait, incompressible, homogène et stationnaire, on pourra connaître la pression que l'on contrôle grâce à la vitesse de l'hélice. Le principal problème de cette méthode concerne la transmission de la pression au modèle poreux dont l'espace d'entrée est assez restreint, et il nous sera assez compliqué de s'assurer de la pression réellement appliquée au fluide non-mouillant. Dans ce protocole, le MFCS ne sert qu'à imposer une certaine pression à l'eau et à contrôler celle-ci tout au long de l'expérience.

L'idée la plus convaincante est celle-ci, il faut augmenter P_{air} pour qu'au début de la manipulation, $0 \text{ mbar} < P_{\text{MFCS}} = P_{\text{eau}} = P_{\text{air}} > P_{\text{atm}}$

(par exemple : $P_{\text{MFCS}} = 15 \text{ mbar}$ donc $P_{\text{eau}} = P_{\text{air}} = 1013 + 15 = 1028 \text{ mbar}$)

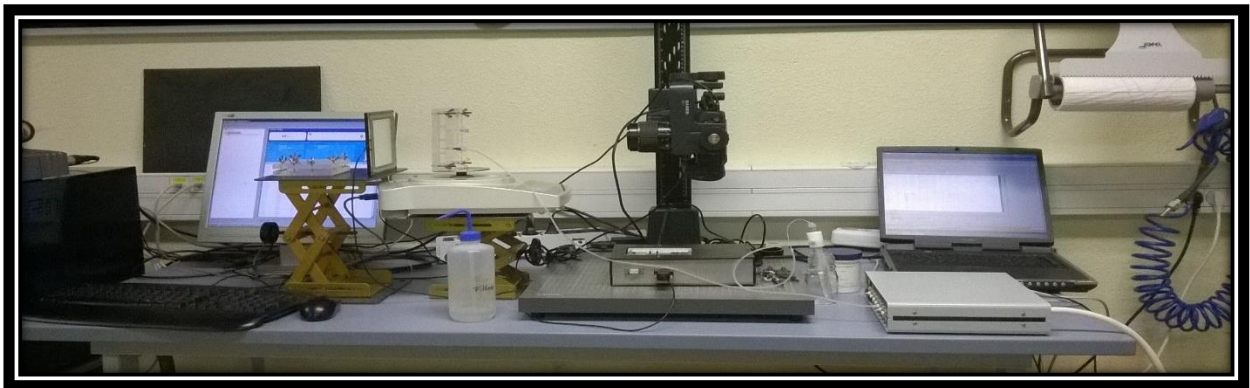
Pour ça, il faut une enceinte étanche reliée à un deuxième contrôleur de pression qui impose P_{air} . Quand ce montage est réalisé, on impose un certain P_{air} , qu'il faut aussi compenser du côté de P_{eau} . Une fois l'équilibre trouvé, il suffit de lancer le programme du MFCS relié à l'eau (on augmente : drainage, on diminue : imbibition).

Finalement, après discussion avec mon maître de stage, il m'a fait réaliser qu'il n'était pas nécessaire de faire un montage aussi complexe. En effet, nous allons juste réaliser le montage initial (MFCS relié à l'entrée prévu dans le modèle réduit) mais à la verticale, ainsi on espère que la hauteur de l'eau entre l'entrée et la sortie du fluide sera suffisante pour faire apparaître une différence de pression et permettra d'observer à la fois le phénomène de drainage et celui de l'imbibition en profitant de la loi de l'hydrostatique (inspiration issue du projet de physique du semestre 6). Il s'est avéré que cette différence de hauteur de hauteur n'est pas suffisante, et c'est

pourquoi nous surélevons le modèle réduit d'une vingtaine de centimètres, comme sur la photo du montage du paragraphe suivant.

ii) Expériences réalisées

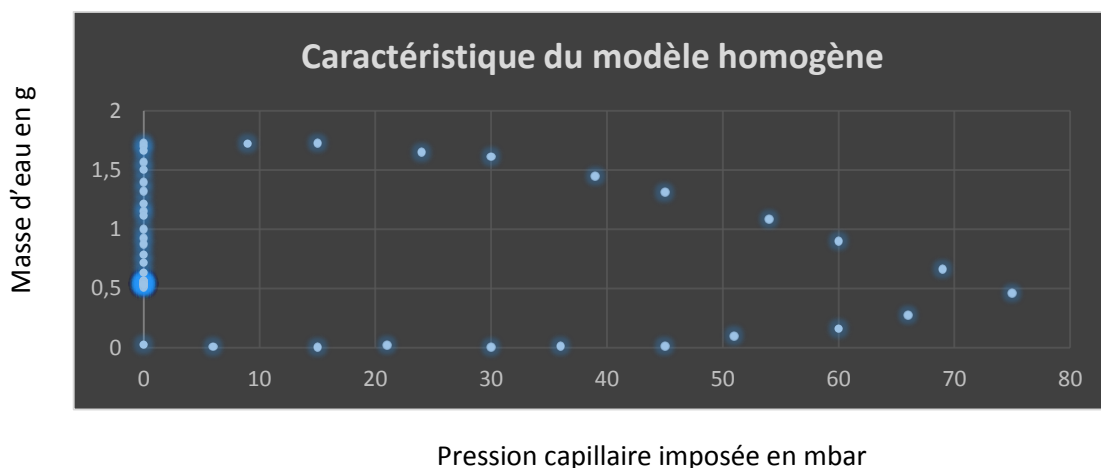
Pour cette étude nous avons eu besoin à nouveau d'effectuer un suivi visuel et massique au cours du temps, nous avons donc réutilisé une grande partie des outils de la première étude, à savoir : un appareil photo adapté au logiciel « camera control », une balance et le logiciel compatible « labX », un polariseur qui se déclenche en même temps que la photo, la cuve remplie de silice avec la sonde qui mesure le taux d'humidité. Nous avons seulement rajouté un contrôleur de pression de type MFCS (MicroFluidic Control System) qui nous permet de superviser la pression appliquée à l'eau en fonction du programme que l'on fabrique et qui répond à nos besoins, ici, la mise en évidence du drainage et de l'imbibition, primaires et autres.

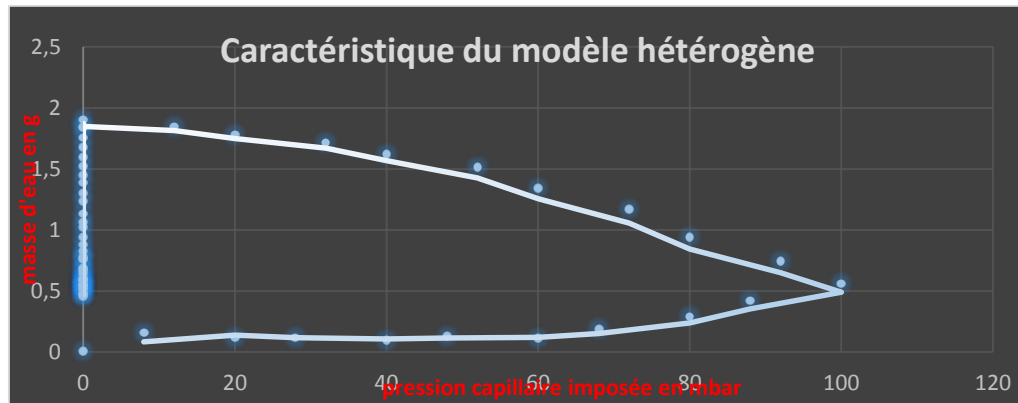


Grâce au logiciel du contrôleur de pression, nous avons pu réaliser un programme adapté à nos besoins : mise en évidence du drainage et de l'imbibition. Pour ça il suffit d'augmenter petit à petit la pression capillaire puis de la diminuer de façon quasi-stationnaire, seuls quelques mbar sont suffisant puisqu'ici : $P_c = P_{atm} - P_{eau}$, et on répète l'opération plusieurs fois pour obtenir une hystérésis fiable. Nous pouvons également relever la pression envoyée à chaque instant grâce au bouton « RECORD ». Dans la suite de ce paragraphe, vous pourrez trouver quelques prises d'images du logiciel et du contrôleur de pression ainsi que du montage réalisé.

c) Résultats et interprétations

A partir des résultats expérimentaux, nous avons pu tracer la caractéristique des milieux :





Attention : ici, le 0 mbar qui sert d'origine n'est pas la valeur réelle de la pression capillaire imposée, puisqu'il faut rajouter la pression due à la différence de hauteur entre la sortie du contrôleur de pression et l'entrée du modèle réduit soit : $\rho_{\text{eau}}gh$.

Une exploitation intéressante de ces résultats aurait été de remonter à la distribution inconnue de la taille des pores dans le milieu hétérogène puis de comparer nos résultats avec le modèle numérique sur maths-lab, utilisé pour réaliser le moule du milieu hétérogène. Pour y parvenir, nous aurions utilisé la loi de Laplace.

Explication : tout élément d'aire microscopique découpé sur l'interface entre les deux fluides occupant l'espace poreux doit être en équilibre mécanique sous l'effet des forces de tension interfaciale s'exerçant sur son périmètre et des forces de pression agissant de part et d'autre de sa surface. Une interface capillaire est nécessairement une surface gauche dont la courbure est constante. La concavité est toujours tournée vers le fluide non mouillant, sinon l'angle de mouillage au contact des parois solides ne peut être respecté, et le fluide mouillant sature l'espace poreux. Dès lors que la courbure interfaciale est non nulle, il règne une différence de pression entre les deux côtés de l'interface. La pression dans le fluide non mouillant est supérieure à celle qui règne dans le fluide mouillant. Cette condition se traduit par la loi de Laplace (issu du PFS, on est à l'équilibre et on néglige l'effet de la gravité) :

$P_c = P_{nm} - P_m = \gamma/R_c$, où R_c est le rayon de courbure moyen et σ la tension superficielle.

Dans notre cas, on se trouve avec une interface sphérique, s'appuyant tangentiellement sur un cylindre de diamètre, donc $R_c = d/4$

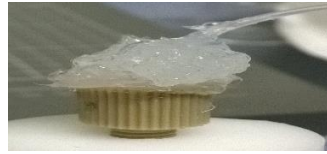
Donc la loi de Laplace s'écrit : $P_c = 4\gamma/d$ avec $\gamma = 72,8 \text{ N/m}$ pour l'eau dans l'air à 25°C

Or $P_c = P_{nm} - P_m = P_{\text{air}} - P_{\text{eau}} = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{air}}gh - P_{\text{atm}} - 4\gamma/d - \rho_{\text{eau}}gh = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{eau}})*gh - 4\gamma/d$

Donc : $d = 4\gamma / [(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{eau}})*gh]$

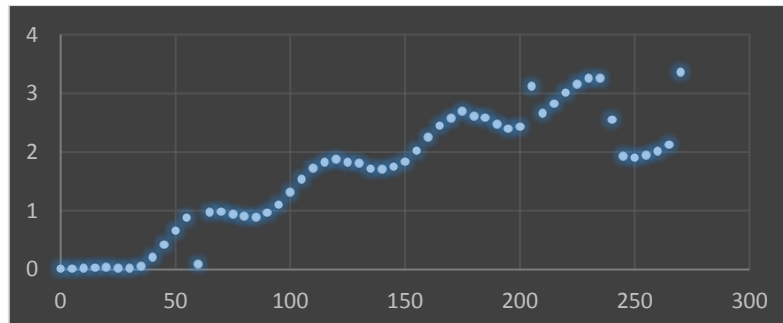
Au vu du temps disponible restant pour exploiter le modèle hétérogène, cette distribution des tailles des pores ne sera pas présente sur ce rapport. Néanmoins, pour vous faire une idée d'un exemple de résultat, vous pourrez trouver en annexe, un histogramme qui rend compte de la distribution déterminée expérimentalement sur un autre modèle hétérogène que celui que nous étudions. Bien sûr, il existe d'autres techniques plus fiables et efficaces que celle-ci, comme la tomographie, mais il n'est même pas question de comparer les coûts de chaque méthode. Ils sont très, très différents.

Pour cette expérience, il y a également eu quelques problèmes de montage, et notamment au niveau de son étanchéité, ce qui a nécessité la pose de joints silicones en plusieurs points du montage.



De plus, tous nos résultats doivent être interpréter avec précautions et beaucoup de recul car ceux-ci sont l'objet d'un certain nombre d'approximations expliquées ci-après :

Remplissage différé irréversible, effet « bouteille d'encre » : Bien qu'elle soit supposée quasi-statique et obtenue par décroissance infiniment lente de la pression capillaire, l'imbibition telle qu'elle est décrite ici est un phénomène irréversible. La pénétration lente du fluide mouillant dans un pore cylindrique à la pression capillaire précise prévue par la loi de Laplace est réversible. Mais ce n'est pas toujours ainsi que se remplissent les pores en raison de l'interdépendance des pores pour l'accessibilité au fluide mouillant. La pénétration différée dans les amas potentiellement remplissables, mais restés isolés tant qu'ils n'ont pas été atteints par un amas en communication avec la face d'entrée, est irréversible. En effet, elle a lieu sous une pression capillaire inférieure à celle qui permet l'équilibre de l'interface dans les pores composants cet amas. Ces irréversibilités sont à l'origine de l'hystérésis. Ce schéma a cependant l'inconvénient de présenter le phénomène à l'échelle d'un pore et de ses voisins immédiats. La théorie de la percolation montre de façon beaucoup plus juste que l'accessibilité effective se joue à l'échelle de tout l'échantillon et met en jeu de façon coopérative tous les pores potentiellement accessibles à un stade donné, et non les seuls voisins immédiats d'un pore. Et c'est cette irréversibilité que nous mettons en évidence ci-après :



Effets de taille : La quantité de fluide mouillant présent à une pression capillaire donnée dans ces régions proches des frontières, liée à l'extension et à la structure des amas finis, est déterminée par la morphologie de l'espace poreux. Le corps de l'échantillon n'étant pas affecté par l'imbibition superficielle, ces effets de bord se manifestent d'autant moins sur la saturation moyenne de l'échantillon portée que celui-ci est plus long. Lorsque la taille de l'échantillon tend vers l'infini, il y a disparition de tout effet superficiel : saturation nulle tant que le seuil de percolation n'est pas franchi, et piégeage total du fluide non-mouillant dès que l'amas percolant de fluide non mouillant disparaît. En principe, la trajectoire correspondant à un hypothétique échantillon de taille infinie devrait présenter une saturation strictement nulle jusqu'au seuil de percolation, suivi d'une rupture de pente et d'une croissance brutale de la saturation. Aucun échantillon réel, aussi grand soit-il ne peut contenir une partie représentative de l'amas percolant. Le voisinage du seuil de percolation se traduit donc, sur les trajectoires expérimentales, par un arrondi suivi d'une inflexion. Cette région de la courbe est fortement dépendante de la distribution spatiale particulière des pores dans l'échantillon utilisé, c'est une région critique, médiocrement reproductible d'un échantillon à un autre. Seule la caractéristique limite correspondant à un échantillon de taille infini caractérise l'espace poreux

indépendamment de la taille d'échantillon considéré, et c'est pourquoi, elle seule sera retenue. En ce qui concerne le drainage primaire, tous les phénomènes qui se succèdent lors de l'imbibition se reproduisent, pour des valeurs croissantes cette fois de la pression capillaire.

Du schéma théorique à la réalité : les formes de caractéristiques capillaires observées expérimentalement pour des matériaux poreux réels peuvent être assez différentes de l'allure théorique attendue. L'un des causes est l'hypothèse d'une forme prismatique pour la modélisation des pores. Il y en a d'autres mais comme nous avons choisi de nous intéresser principalement à l'aspect expérimental, nous n'avons pas réalisé de simulation numérique, donc nous ne présenterons pas toutes les sources qui entrent en jeu dans l'éloignement de la réalité par rapport à la théorie.

Le couple liquide-gaz : les phénomènes de déplacement immiscibles tels qu'on vient de les décrire sont modifiés lorsque l'un des deux fluides est un gaz, c'est notre cas. La compressibilité du fluide non-mouillant gazeux donne lieu à certaines modifications caractéristiques capillaires, mais on conserve la condition d'immiscibilité si le gaz est rigoureusement insoluble. On sort du domaine de l'immiscibilité si le gaz est soluble dans le liquide. Lorsque le liquide est volatil, une situation encore nouvelle apparaît et se subdivise en deux nouveaux cas :

- la vapeur du liquide est seule en présence du liquide dans l'espace poreux ;
- elle est mélangée à un gaz non condensable (mais le cas échéant soluble).

De plus la vapeur peut se condenser en film adsorbé à la surface des pores dont le volume est occupé par le gaz (sorption). Enfin les effets de ces diverses situations sur le processus de déplacement sont différents selon qu'il s'agit de drainage ou d'imbibition. Une grande variété de situations peut donc se présenter selon les propriétés des fluides en présence, s'ajoutant à la diversité déjà mentionnée due à la structuration de l'espace poreux dans son ensemble.

4) Conclusion du rapport

a) Ouverture envisageable

Je tiens à ajouter que cette étude peut faire l'objet d'une base de renseignement pour une nouvelle étude. Exemple : le temps d'usure de la chaussée et de la perte de ses propriétés d'adhérence. En effet, le bitume est un milieu poreux qui se dégrade au fil du temps, et le sujet que nous pouvons imaginer concerne la détermination de la vitesse d'écoulement de l'eau, ou parfois son temps de stagnation en fonction des conditions météorologiques ambiantes (humidité, température, vitesse du vent...), du milieu où on se trouve (altitude, taille des pores du goudron,...). Car contrairement à ce que l'on pourrait croire, l'usure de chaussée n'est pas uniquement dû au passage de voitures ou autres moyens de locomotion, c'est plutôt une conséquence des propriétés de l'eau. L'eau attaque tout type de matériaux, plus ou moins rapidement, mais elle la détruira nécessairement. Sujet : étude de l'érosion de la route et de la perte de ces propriétés d'adhérence.

D'ailleurs, voilà un exemple de manipulation que nous avons mis en place pour illustrer le phénomène.



Rq : lors de la manipulation avec ce modèle réel, nous nous sommes aperçus que le remplissage est bien plus délicat que prévu. En effet, les pores ne se remplissent pas aussi vite et

uniformément qu'espéré, même en utilisant une pompe à vide. L'étanchéité en PDMS serait donc à retravailler. Et lorsqu'on retire la cale qui retient le fluide, celui-ci s'échappe infiniment lentement, et c'est pourquoi on peut être amenés à se demander si cela n'est étudié pour que les pores soient suffisamment petits pour que l'eau ne puisse pas s'écouler mais seulement s'évaporer, et ainsi limiter l'érosion du bitume. La question serait donc de savoir si cette solution est toujours d'actualité, ou s'il serait plus sage de permettre à l'eau de s'écouler, et permettrait peut-être de sauver des vies en réduisant les risques d'aquaplaning.

Bien sûr, ceci n'est qu'un exemple d'approfondissement, libre aux personnes suivantes de s'approprier le sujet, on pourrait tout aussi bien imaginer une étude sur le temps de séchage d'éponges ou de serviettes (serviettes de bain, de plage, microfibre...)

b) Enrichissement personnel.

Avec ce stage, j'ai eu l'occasion de me mettre dans la peau d'un vrai chercheur, et je dois avouer que j'ai trouvé l'expérience assez déstabilisante, ce qui n'a rien de négatif, au contraire. Et pour cause, je m'attendais à simplement assister un doctorant, et l'aider dans ses travaux, et non pas à creuser un sujet seule.

Aujourd'hui, mon principal regret est de ne pas pouvoir présenter un travail réellement achevé et complet ; en cause, la durée du stage et de nombreux problèmes, notamment de matériel comme expliqués dans les paragraphes précédents, et donc des manipulations qui ont pris du retard.

En effet, pour améliorer toutes ces démarches, il aurait fallu réaliser toutes les expériences plusieurs fois, entre 3 et 5 fois, puis réaliser un tableau avec des écarts-types et des moyennes afin de pouvoir quantifier les sources d'incertitudes car la seule source d'erreur possible que nous avons pu mettre en évidence concerne la 2ème mission sur la mise en évidence du drainage et de l'imbibition, et qui est présentée *en annexe*

Ce que je retiens de ces 7 semaines, c'est l'autonomie totale dont j'ai pu bénéficier, autant au niveau des horaires que du planning de travail, le principal c'est que le travail soit fait. Pour ma part, je trouve que mon stage ressemblait aux projets de physique et de chimie du S6, mis à part l'autonomie totale, et l'absence de groupe de travail. C'est d'ailleurs ce dernier aspect qui m'a beaucoup handicapé, car même si je savais précisément dans quelle direction je souhaitais avancer, un peu de concertation avec un groupe de travail m'aurait peut-être permis de gagner du temps et d'éviter quelques erreurs grossières.

Ceci dit, mon sujet m'a beaucoup plu. J'ai découvert que je suis capable de mener des projets à terme sans aide majeure extérieure. J'ai pu tester mon autonomie, ma capacité d'adaptation et ma motivation, et expérimenter grandeur nature le métier de chercheur. Je ne suis d'ailleurs pas certaine de vouloir me lancer dans une carrière de chercheur, tant le manque d'équipe de travail m'a handicapé. Bien sûr, on peut toujours demander de l'aide aux personnes qui nous entourent mais elles ne réfléchissent pas avec vous sur les problèmes rencontrés.

Quand je fais allusion à l'adaptation dont j'ai dû faire preuve, je parle en parti des cours de M1 que j'ai dû assimiler pour réaliser ce projet, et dont vous retrouverez les références ci-après.

Bibliographie

- 1- MARCOUX Manuel, *Introduction : les milieux poreux et tout ce qui s'y passe*, Toulouse, UPS, [s.d], 10p
- 2- MARCOUX Manuel, *Description et caractérisation géométrique des milieux poreux*, Toulouse, UPS, [s.d], 12p
- 3- MARCOUX Manuel, *Diffusion en milieu poreux*, Toulouse, UPS, [s.d], 22p
- 4- MARCOUX Manuel, *Ecoulements monophasiques en milieu poreux*, Toulouse, UPS, [s.d], 16p
- 5- MARCOUX Manuel, *Dispersion en milieu poreux*, Toulouse, UPS, [s.d], 12p
- 6- MARCOUX Manuel, *Les fluides à l'équilibre dans les milieux poreux*, Toulouse, UPS, [s.d], 12p
- 7- MARCOUX Manuel, *Comportement capillaire et porométrie*, Toulouse, UPS, [s.d], 14p
- 8- J.-F. Daïan, *Equilibres et transferts en milieu poreux*, [s.l], [s.e], 2013, 642p
- 9- BERKOWITZ Brian et Robert P. EWING, *Percolation theory and network modelling applications in soil physics*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1998, 64p
- 10- SHMUEL Assoulin et al, *Impact of heterogeneity from bare soils, a way to reduce losses ?*, Israël-France, [s.e], 12/12/2011, 85p
- 11- FUIGENT, *MSFC User Manual version 2.0*, [s.l], [s.e], 2009, 39p
- 12- B.Bonnel. *Tension superficielle et capillarité. Chapitre V. In Cours de mécanique des fluides*, université de Lille **[en ligne]**. Disponible sur : < http://www-lemm.univ-lille1.fr/physique/mecaflu_stat/cours/chap5.pdf > (consulté le 29 juin 2015)
- 13- ODIMAP. *Pourquoi le traitement CORONA : Principe de fonctionnement*. **[en ligne]**. Disponible sur : < <http://www.odimap.com/nos-produits/traitement-corona-plus/principe-de-fonctionnement/> > (consulté le 29 mai 2015)
AMG solution. *Le traitement de surface de Corona et Plasma*. **[en ligne]**. Disponible sur : < <http://www.amg-solution.fr/details-le+traitement+de+surface+de+corona+et+plasma-69.html> >
- 14- Wikipédia. *Tension superficielle* **[en ligne]**. Disponible sur : < http://fr.wikipedia.org/wiki/Tension_superficielle > (consulté le 26 mai 2015)

Résumé du rapport de stage

J'ai effectué mon stage à l'IMFT, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, au cours duquel il m'a été donné la possibilité d'étudier plusieurs phénomènes physiques liés aux écoulements fluides dans certains milieux poreux.

Vous trouverez d'abord, une présentation détaillée du laboratoire de recherche, ses activités, et notamment son rôle au sein de la société. Il représente l'un des plus forts potentiels de recherche et de formation avancé français voir européen dans le domaine de la mécanique des fluides, tant par sa taille que par le spectre des thématiques de recherche qui y sont abordées et des champs d'application qu'elles recouvrent. Le laboratoire développe un large éventail de recherches qui couvrent autant les aspects fondamentaux associés aux phénomènes physiques mis en jeu dans les écoulements et à leur description mathématique, qu'un vaste champ d'applications.

Dans ce rapport, nous nous intéressons principalement au phénomène d'évaporation, et à tous les facteurs qui peuvent l'influencer, comme la gravité, la viscosité, les conditions atmosphériques, entre autres, et dont nous nous efforçons de montrer l'importance tout au long d'une deuxième partie autant au niveau théorique qu'expérimental. Pour étudier et comparer ces différents facteurs, on s'appuiera essentiellement sur des résultats expérimentaux obtenus par l'intermédiaire de suivis massiques et visuels. Ces travaux ont pour support une étude débutée en Israël en 2011, et ont pour objectif de trouver une solution pour ralentir l'assèchement des terres cultivées et qui mettent en péril ces activités agricoles.

Dans une troisième partie, nous nous attarderons plus sur le schéma visuel du phénomène et aux caractéristiques des milieux poreux. Dans le meilleur des cas, nous proposerons un moyen de remonter à la géométrie des milieux poreux étudiés, par l'intermédiaire des phénomènes de drainage et d'imbibition, de la théorie de la percolation ainsi que de la loi de Laplace.

Tout au long de ce rapport, nous nous attacherons à expliquer toute les notions qui pourraient être utiles à la compréhension de celui-ci, et à son exploitation future. Surtout, nous veillerons à mettre en garde contre toutes les précautions à prendre quant à l'exploitation des résultats, et aux problèmes que nous avons rencontrés. En effet, pour aboutir cette étude, il aurait fallu beaucoup plus, de temps, de résultats et de matériel adapté.

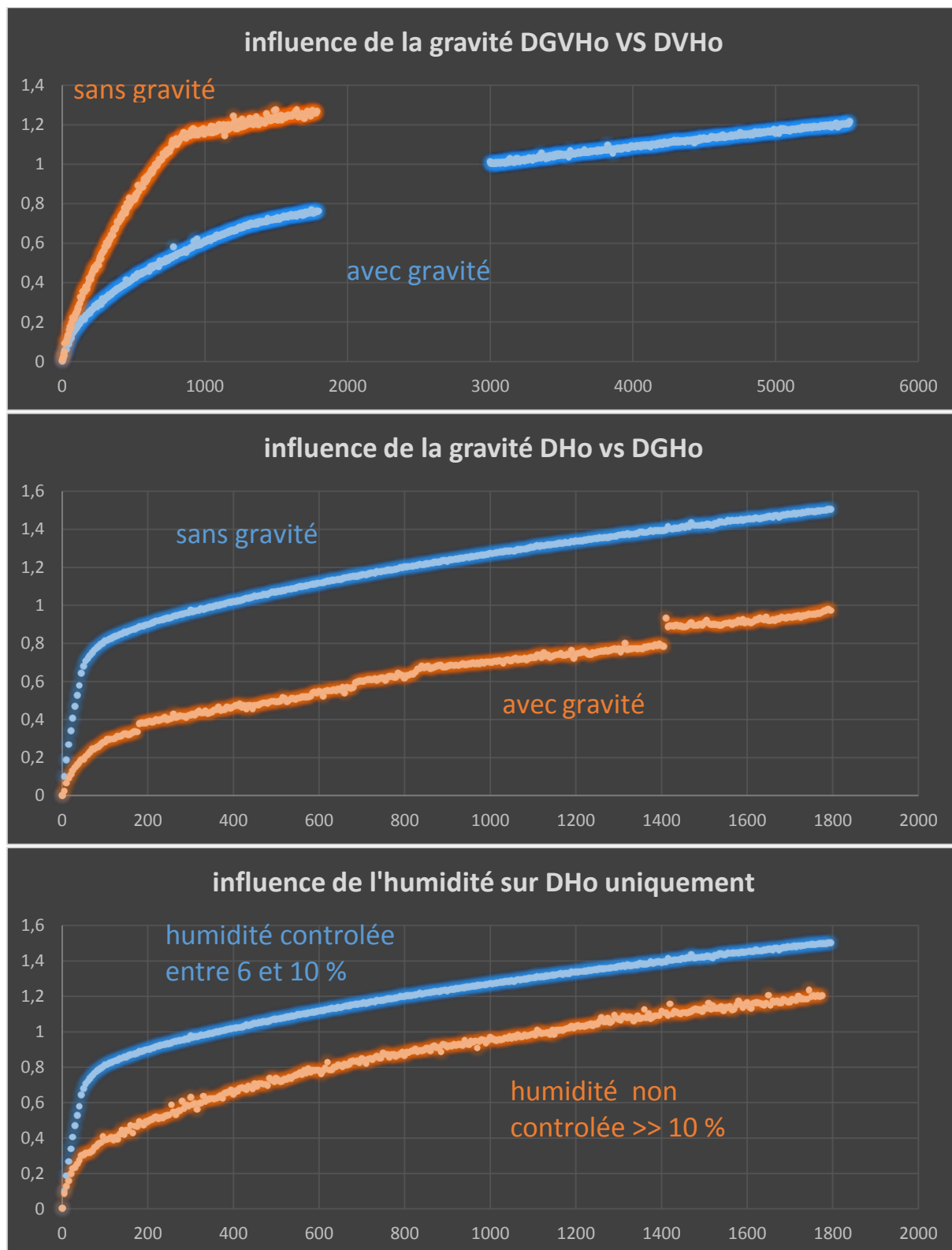
Vous trouverez également des propositions d'élargissement du sujet, et des exemples de manipulations à mettre en place pour ces études.

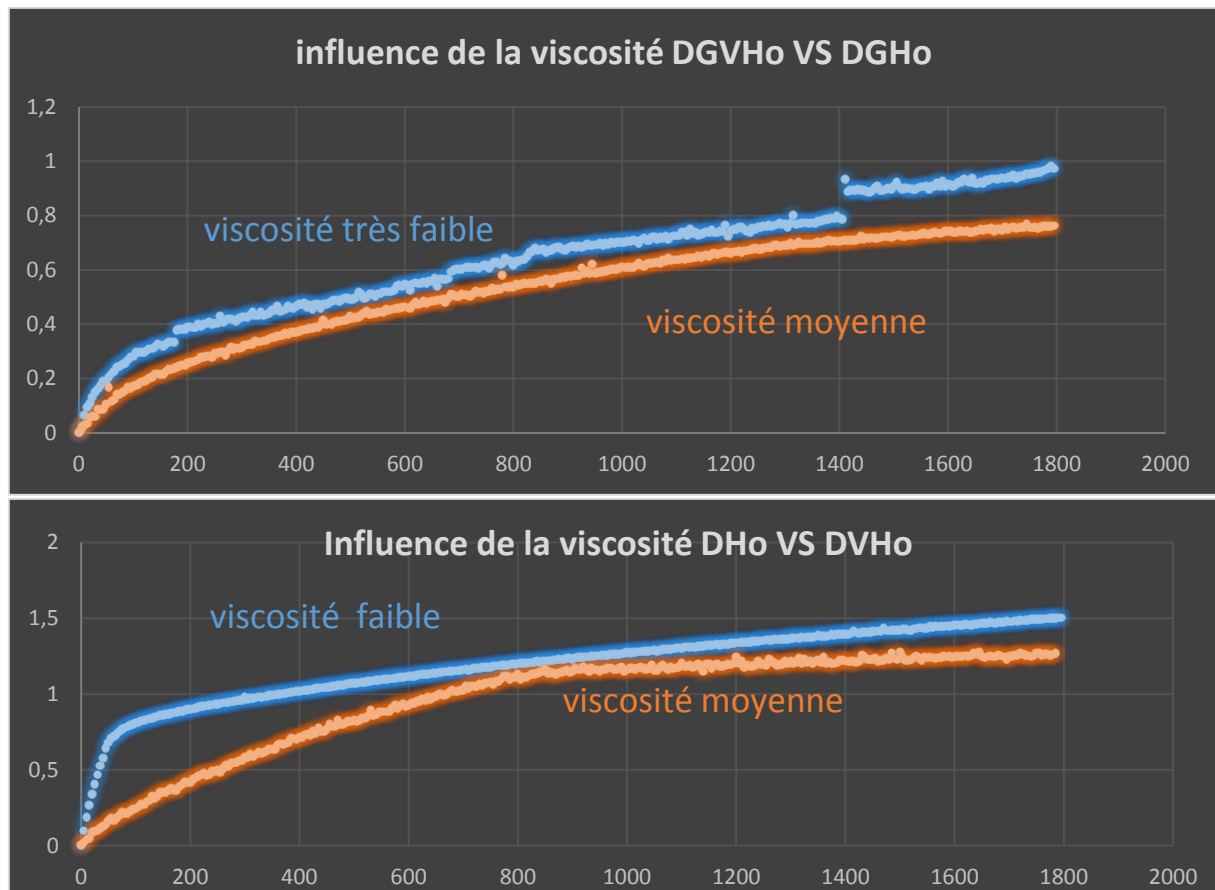
Mots clés : évaporation, modèle réduit, porosité, diffusion, diffusion, drainage, imbibition, théorie de la percolation

Annexes

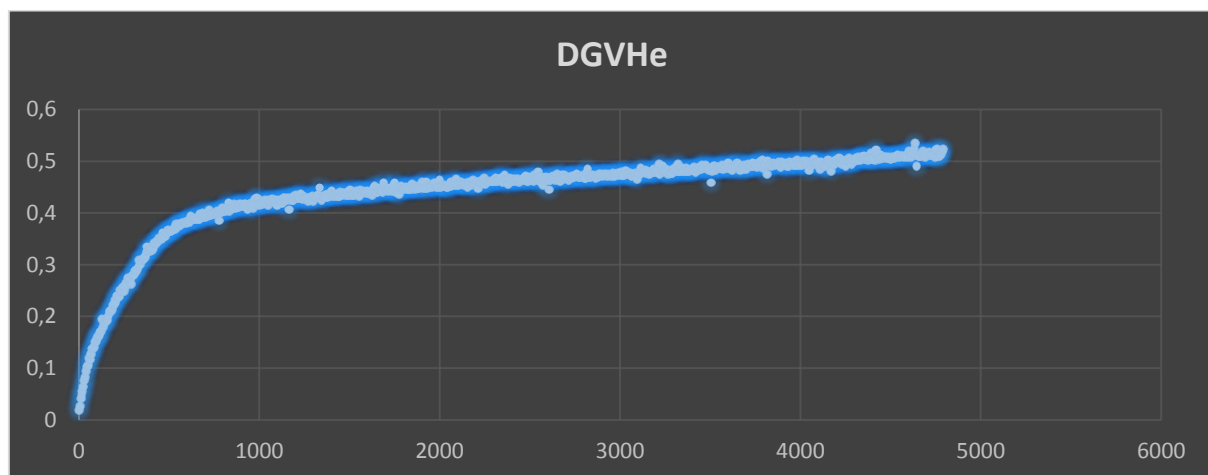
Première mission : résultats complémentaires

Modèle homogène :





Modèle hétérogène (gravé)



Pour tous les graphes précédents, on lira : $\dot{f}(t \text{ en min}) = m$ masse de fluide évaporé en g

Deuxième mission :

Il est fourni avec le document suivant la caractéristique théorique d'un milieu poreux :

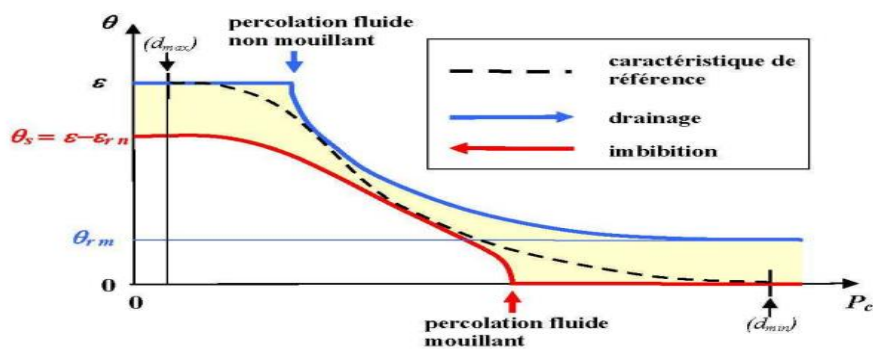
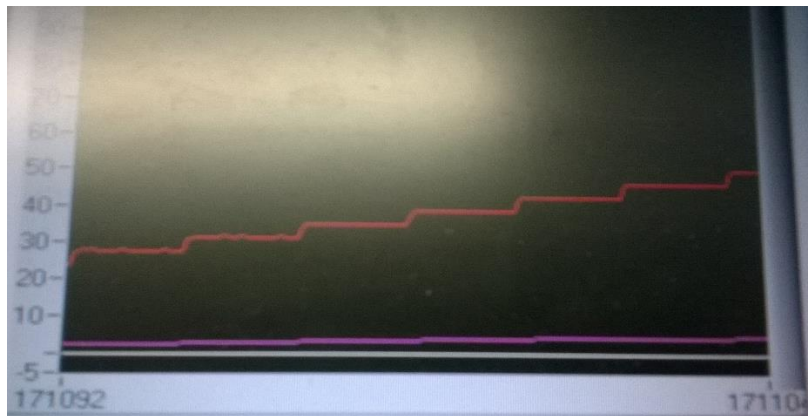
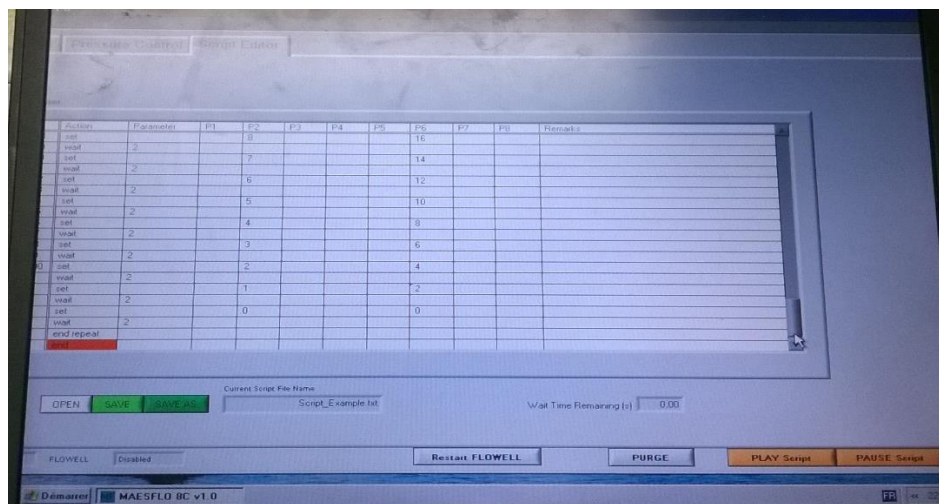


Figure 9. Allure théorique des caractéristiques primaires d'imbibition et de drainage

Rq : ici, la caractéristique prend en compte la teneur en eau et non la masse contenue dans le milieu dont on trace la caractéristique, comme celle que nous avons fait. Pour ce faire, il faudrait appliquer la formule du 3) a) i) (1).

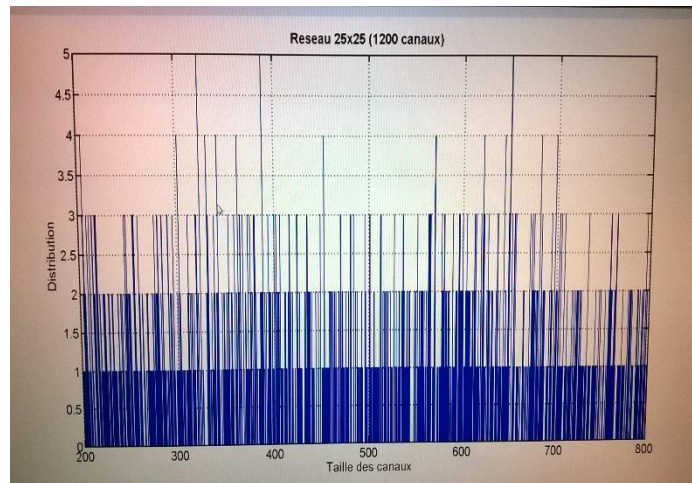
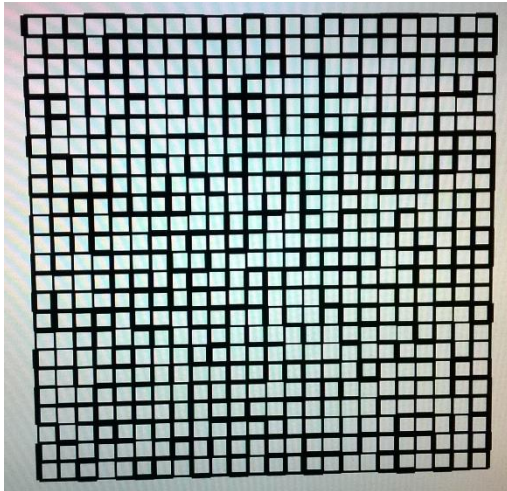


La photo ci-dessus représente $\mathbf{f}(\mathbf{t}) = \mathbf{P}_c$, et atteste de la fiabilité du contrôleur de pression puisqu'il met environ 0,1 (un trait horizontal représente 2s) s à exécuter l'ordre programmé que j'ai réalisé et qui est donné ci-après ; soit une erreur de seulement 5%.



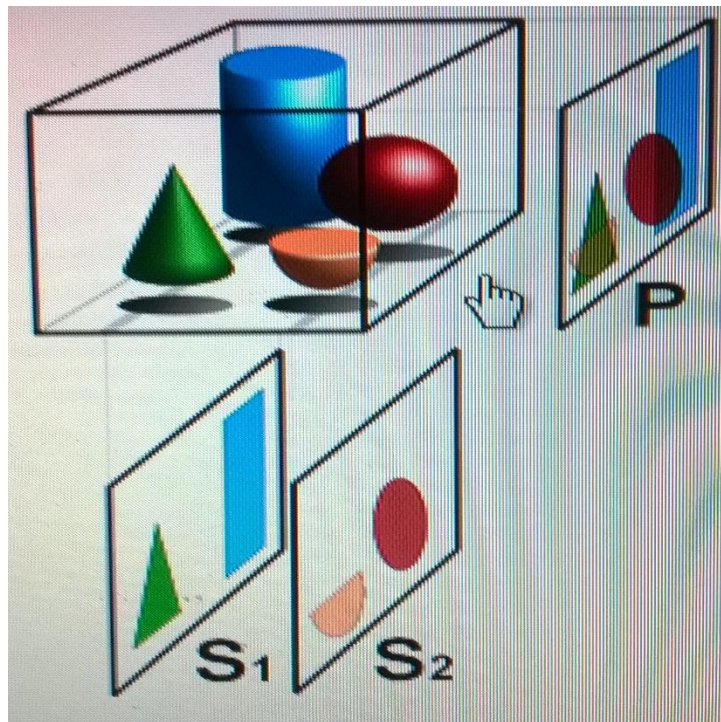
Enfin, si le temps l'avait permis, le but final aurait été de retrouver expérimentalement la distribution avec la méthode de la loi de Laplace, et de comparer ces résultats, regroupés sous la forme d'un histogramme, à la distribution de la modélisation numérique qui a servi à réaliser le moule du modèle réduit hétérogène.

Modélisation numérique :



Une autre idée aurait été d'utiliser un tomographe pour retrouver là aussi, la distribution porométrique du réseau et de la comparer avec la distribution théorique, et la distribution issue de la méthode de Laplace, et de conclure sur la précision de deux méthodes, et des sources d'erreurs possibles.

Principe d'un tomographe :



Définitions :

- **La chaleur spécifique** étant la quantité d'énergie qu'il faut fournir à une masse d'eau donnée pour élever ou abaisser sa température de 1° C, cela revient à dire que l'eau est difficile à chauffer, tout autant qu'elle est difficile à refroidir.

- **Les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation** représentent les quantités de chaleur qu'il faut fournir soit pour fondre de la glace, soit pour produire de la vapeur d'eau.

- **Théorème de transport de Leibniz :**

$$\begin{aligned}\frac{dI_U}{dt} &= \int_{\Omega_U} \frac{\partial b}{\partial t} d\Omega + \int_{\partial\Omega_U} b \underline{U} \cdot \underline{n} da \\ \frac{dI_V}{dt} &= \int_{\Omega_V} \frac{\partial b}{\partial t} d\Omega + \int_{\partial\Omega_V} b \underline{V} \cdot \underline{n} da \\ \Rightarrow \quad \frac{dI_V}{dt}(t_0) &= \frac{dI_U}{dt}(t_0) + \int_{\partial\Omega_V} b(\underline{V} - \underline{U}) \cdot \underline{n} da\end{aligned}$$

■ $\Omega_V(t)$: domaine géométrique "de contrôle", vitesse de $\partial\Omega_V$
= $\underline{V}$

■ $\Omega_U(t, t_0)$: domaine matériel coïncidant avec Ω_V en $t = t_0$,
vitesse $\partial\Omega_U = \underline{U}$

Théorèmes de transport - Bilans intégraux - p.

- **Théorème de Green-Ostrogradsky :** $\iiint_V \operatorname{div} \mathbf{F} \cdot dV = \oint_{\partial V} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}$

- **Diffusion** : transport relatif par rapport au milieu environnant en mouvement

- **Advection** : transport de chaleur, de matière... à la vitesse du milieu environnant

- **Libre parcours moyen** : distance moyenne parcourue entre deux collisions successives avec d'autres particules en mouvement

- **Connexité** : corrélation, correspondance, relation, concordance

- **Electronégativité** : capacité des éléments chimiques à attirer les électrons d'un doublet liant vers eux

- **réaction de la silice au contact de l'humidité** : Le gel de silice se compose de dioxyde de silice pratiquement pur. Le gel de silice se présente comme de petites billes qui semblent imperméables comme des billes de verre, mais sous le microscope la structure interne ressemble à des éponges. C'est ce qui explique la grande capacité d'absorption. Le gel de silice peut absorber environ 50% de son poids en eau. La silice se lie chimiquement à l'eau. Les billes se désagrègent quand on les verse dans de l'eau à cause de la forte réaction, mais pas en utilisation normale.

- Quelques méthodes de mesure de la tension superficielle :

Méthode de pesée de goutte. Cette méthode consiste à peser une goutte qui tombe d'un capillaire de rayon r connu. En première approximation¹, les forces qui s'appliquent sur la goutte sont son poids, $P=mg$, et la force due à la tension superficielle γ au niveau du capillaire, $F=2\pi r\gamma$. Au moment précis où la goutte se détache, le poids de la goutte est égal aux forces capillaires, $P=F$. On retrouve la loi de Tate, $m = 2\pi r\gamma/g$.

Connaissant la masse m de la goutte, on peut remonter à la tension de surface γ .

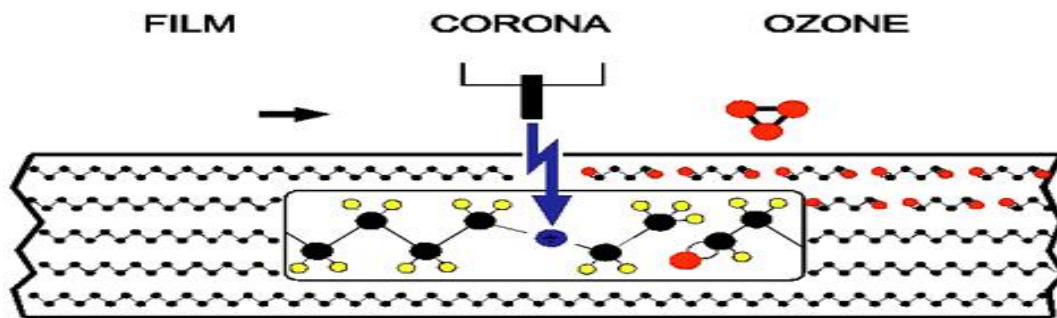
Méthode de la plaque de Wilhelmy. On tire hors du liquide une plaque tout en mesurant la force exercée. On note la valeur de la force juste avant que le ménisque se détache. On divise la force ainsi obtenue par la largeur de la plaque, et on obtient la valeur de la tension superficielle modulo un facteur trigonométrique.

Il existe aussi la **méthode de la goutte tournante**, et la **méthode des pressions**, que nous n'expliquerons pas ici.

- Traitement CORONA :

Le principe

En cas de tension de surface et de mouillabilité trop faible d'un support, un pré traitement de surface de type Corona ou Plasma est requis. Le traitement corona est une décharge électrique à haute fréquence vers la matière. Ce traitement consiste en une très forte oxydation de la surface du matériau. Cette oxydation permet d'enlever les molécules en surface qui diminuent la mouillabilité. Il en résulte une amélioration de la connexion chimique (dyne/cm) entre les molécules dans le milieu traité et le liquide. Le traitement Corona ou Plasma va ainsi augmenter la mouillabilité en augmentant la tension de surface.



Dans les cas du Corona la « flamme » est produite entre les deux électrodes qui reçoivent la haute tension et qui sont visibles à l'extrémité de la tête.

Le Plasma concentre plus d'énergie sur une plus petite surface. Il se distingue du Corona par l'absence d'électrode visible sur la tête de traitement. En effet le « Plasma » est un gaz qui contient une forte concentration d'ions (atomes dont la neutralité électrique a été cassée) ce qui le rend conducteur. Le gaz est donc utilisé pour conduire la charge électrique haute tension et ainsi obtenir une oxydation de surface du support plus forte que dans le cas du Corona. Plus il y a une forte agitation des atomes plus il y a production d'ion et donc plus il y a d'énergie contenu dans un volume et de capacité d'oxydation. Le gaz utilisé peut être de l'air, de l'argon etc.

En règle générale les supports ne sont traités qu'entre 1/100 et 1/10 de seconde. Le traitement de surface ne réduit pas ou ne change pas la résistance de la matière. Il n'y a aucune apparition de trous. Les propriétés mécaniques, visuelles et électriques ne sont en rien modifiées. Le procédé entraîne simplement une production d'ozone.

Détermination du niveau de traitement

L'efficacité du traitement corona dépend de la spécificité de la matière traitée. Il n'y a pas de limite au traitement corona d'une matière. Cependant, l'intensité requise pour le traitement peut varier fortement. Le niveau de traitement dépend de la matière utilisée, du niveau dyne requis, de la vitesse machine et du nombre de face à traiter. Selon la matière, il doit être également pris en considération les points suivants : l'âge et la largeur de la matière ainsi que son niveau de prétraitement.

Durée de vie du traitement corona

Après un certain temps le niveau dyne de la matière chute et il peut être nécessaire de la retraiter Corona juste avant utilisation, et plus spécialement si la matière contient des additifs, car le niveau dyne chutera plus rapidement. Les stocks de films épais et âgés sont plus difficiles à traiter du fait que les agents additifs peuvent migrer vers la surface de la matière. Les matières qui n'ont pas été traitées à l'extrusion peuvent être difficiles à traiter par la suite. La tension de surface va décroître dans le temps après traitement. Ce phénomène doit être pris en compte afin d'éviter au maximum le stockage après traitement.

