

Comportement en séchage des éponges : Étude expérimentale

Cette ressource est issue du travail réalisé par Camille Martin--Cavallé étudiante en quatrième année à l'ENS Paris-Saclay dans le cadre de la première expérience immersive de recherche du diplôme de l'école sous la direction de Farid Benboudjema, Professeur des universités au département Génie Civil et Environnement de l'ENS Paris-Saclay. Les conditions sanitaires dues à la pandémie du Covid-19 ont faits que ce projet s'est déroulé entièrement à distance avec du matériel courant.

Les éponges que nous possédons dans nos cuisines sont principalement constituées de cellulose, et ont un comportement mécanique particulier facilement observable à l'œil nu : lorsque celles-ci sont saturées en eau, elles se compriment sous une force très faible ; cependant lorsque ces mêmes éponges sont sèches, il faut une force bien plus importante pour réussir à les comprimer. Ce comportement est dû à leur module de compressibilité qui augmente lorsque l'éponge sèche. Cette augmentation peut être due à plusieurs phénomènes :

- Le rapprochement des parois des pores de l'éponge pouvant créer de nouvelles liaisons plus résistantes lors de l'évacuation de l'eau ;
- L'évolution de la porosité de l'éponge au cours de son séchage qui sera l'objet de cette étude.

Cette étude peut être mise en parallèle avec les études réalisées sur les mortiers de façade qui sont également soumis à des phénomènes de séchage pouvant parfois entraîner des fissurations de ces mortiers. On suppose également que dans les matériaux cimentaires, les feuillettes de C-S-H pourraient se rapprocher en cours de séchage et ainsi créer de nouvelles liaisons.

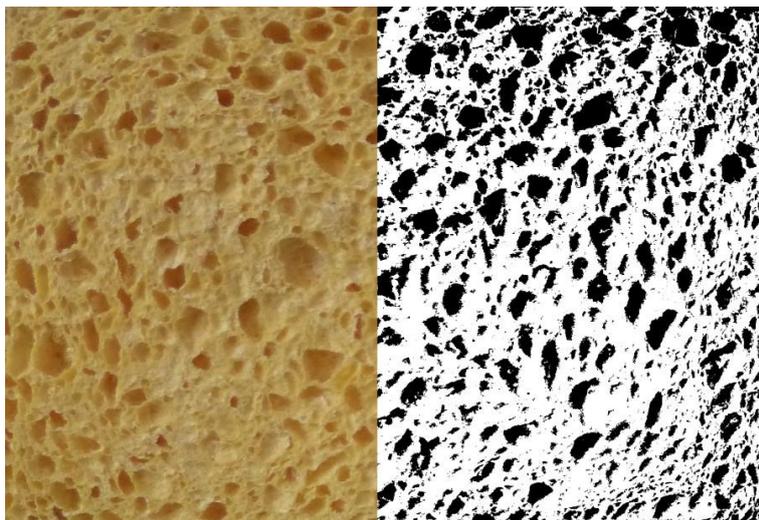


Figure 1 : Photo d'une éponge analysée grâce à ImageJ, source [1]

Ce projet d'initiation à la recherche se décompose en deux parties : une étude bibliographique, publiée dans la ressource « *Comportement en séchage des éponges : État de l'art* » [2], et une étude expérimentale, objet de cette publication, afin d'étudier plusieurs phénomènes :

- L'évolution de la masse d'une éponge et de sa taille au cours du séchage ;

- L'évolution de la porosité en surface d'une éponge au cours de son séchage étudiée grâce à de l'analyse de photographies sur *ImageJ* [1] ;
- L'évolution de la masse de l'éponge soumise à plusieurs cycles de séchages ;
- Par analogie avec ce que l'on connaît des matériaux cimentaires, nous verrons si l'utilisation de différentes solutions aqueuses modifie le comportement de l'éponge au cours de son séchage. Les solutions utilisées seront de l'eau avec un tensio-actif (utilisé comme entraîneur d'air dans les bétons), un épaississant (utilisé pour augmenter la viscosité du béton), du sel (accélérateur de la réaction dans les bétons) et du sucre (retardateur de la réaction dans les bétons).

Cette ressource présente les différentes expériences réalisées ainsi que les résultats obtenus. Afin de compléter les études sur les éponges présentées dans la ressource « *Comportement en séchage des éponges : État de l'art* » [2], nous étudierons l'évolution du séchage des éponges au cours du temps ainsi que l'évolution de la porosité en surface des éponges. Nous allons utiliser un logiciel de traitement d'images pour identifier les porosités en surface des éponges. Pour cela nous prendrons des images en couleur des éponges et nous chercherons à les transformer en image en noir et blanc pour que les porosités apparaissent en noir avec un fond blanc. Afin d'effectuer ce seuillage, nous allons utiliser l'algorithme d'Otsu [3] [4]. Cet algorithme consiste à prendre en compte toutes les valeurs de seuils possibles et à calculer pour chacune d'entre elles la variance associée. Le seuil permettant d'obtenir la plus petite variance est le seuil retenu.

1 – Caractérisation des solutions utilisées

1.1 - Solutions utilisées

Nous avons choisi d'étudier l'influence de l'utilisation de différentes solutions aqueuses sur le séchage des éponges. Les produits retenus sont analogues aux produits ayant des effets sur le séchage des bétons :

- Un tensio-actif : du produit vaisselle dosé à 5% et à 10% de la masse d'eau. Les tensio-actifs servent d'entraîneur d'air dans les bétons ;
- Des épaississants : de l'agar-agar dosé à 2% de la masse d'eau puis à 0,7% et de la gélatine dosée à 2% de la masse d'eau. Les épaississants permettent d'augmenter la viscosité des bétons ;
- Du sel dosé à 5% et 10% de la masse d'eau. Le sel est un accélérateur de prise dans les bétons ;
- Du sucre dosé à 5% et 10% de la masse d'eau. Le sucre est un retardateur de prise dans les bétons.

1.2 - Mesure de tension superficielle

Afin de caractériser les solutions utilisées, nous avons souhaité obtenir une estimation de leur tension de surface. Nous allons pour cela utiliser la formule de Jurin qui relie la hauteur de liquide dans un tube fin à la tension de surface de ce liquide. Nous avons commencé par essayer d'utiliser des tubes fins en plastique (comme ceux qui contiennent l'encre des stylos) mais le niveau du fluide dans le tube était alors inférieur au niveau de la surface libre du liquide, ce qui rendait les mesures trop difficiles à faire.

Nous avons trouvé des tubes en verre borosilicates de diamètre $D = 1,15$ mm pour lesquels le niveau d'eau dans le tube était cette fois supérieur au niveau d'eau de la surface libre.

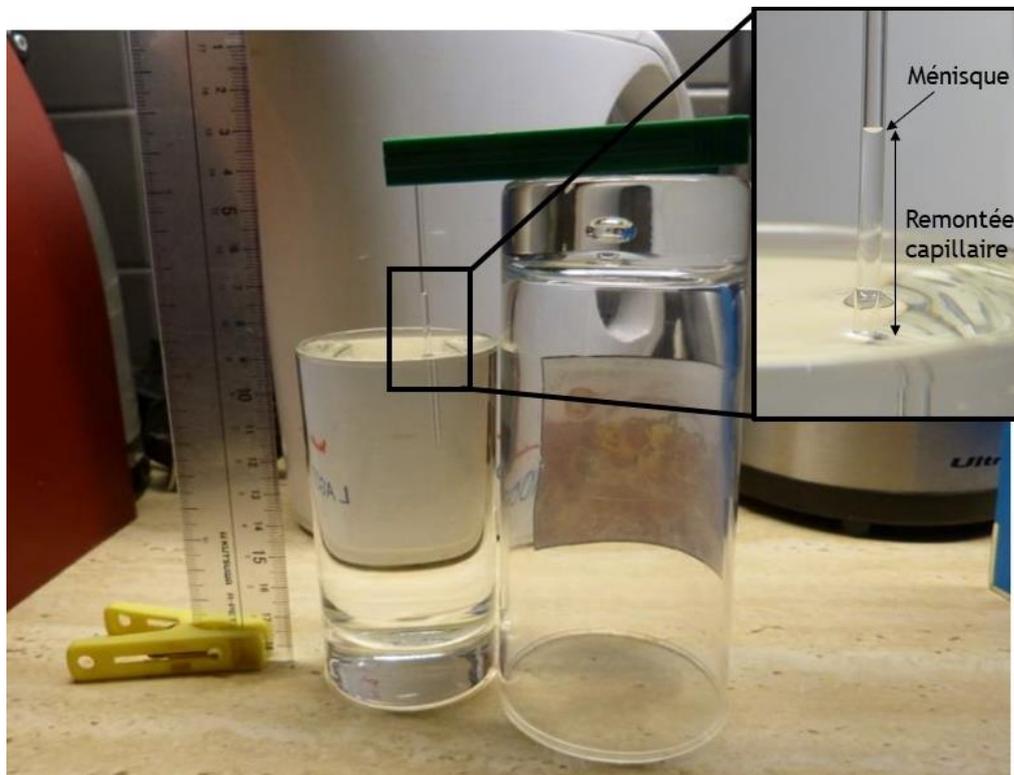


Figure 2 : Dispositif expérimental de mesure de tension superficielle

Pour chaque solution, nous avons plongé le tube dans l'eau et pris une photo puis sur un logiciel de traitement d'image tel que *ImageJ*, nous avons mesuré la hauteur de fluide dans le tube ainsi que l'angle de contact entre la paroi du tube et le fluide. Enfin comme la hauteur de Jurin dépend de la masse volumique du fluide considéré, nous avons estimé les masses volumiques des solutions utilisées.

Les masses volumiques obtenues sont les suivantes :

	Eau seule	Éponge C 10% produit vaisselle	Éponge I 5% produit vaisselle	Éponge H 5% sucre	Éponge G 10% sucre	Éponge F 5% sel	Éponge E 10% sel	Éponge J 0,7% agar-agar	Éponge K 2% gélatine
ρ [kg/m ³]	1000	1000	946	963	977	1003	1017	890	910

Enfin, les tensions de surface obtenues sont :

	Eau seule	Éponge C 10% produit vaisselle	Éponge I 5% produit vaisselle	Éponge H 5% sucre	Éponge G 10% sucre	Éponge F 5% sel	Éponge E 10% sel	Éponge J 0,7% agar-agar	Éponge K 2% gélatine
γ [N/m]	0,061	0,033	0,036	0,039	0,033	0,043	0,037	0,031	0,031

On remarque que la valeur théorique de tension de surface de l'eau pure est 0,073 N/m, ce qui nous donne un écart de 16% avec la valeur théorique : on peut expliquer cette différence en partie parce que l'eau du robinet utilisée n'est pas de l'eau pure. Les tensions superficielles obtenues pour les solutions contenant du sel sont également proches de celles référencées dans des précédentes études [5].

De plus, les mesures de volume (afin de calculer la masse volumique) sont effectuées au verre doseur et sont donc relativement peu précises. Les mesures d'angle de contact, même effectuées sur *ImageJ* restent également assez peu précises.

Ainsi, on peut observer que l'eau seule est la solution ayant la plus grande tension de surface. Dans toutes les autres solutions, la présence des ajouts fait diminuer la tension de surface de la solution.

1.3 - Estimation de la viscosité des solutions

Nous avons également cherché à mesurer une estimation de la viscosité des solutions. Pour cela, nous nous sommes inspirés de l'utilisation du cône de Marsh, c'est-à-dire que nous avons mesuré le temps d'écoulement d'un volume connu de fluide au travers d'un entonnoir.



Figure 3 : Dispositif pour estimer la viscosité d'un fluide

Afin de moyenniser les résultats nous faisons plusieurs mesures pour chaque solution et nous obtenons les résultats suivants, pour un volume de 350 mL :

	Eau seule	Éponge C 10% produit vaisselle	Éponge I 5% produit vaisselle	Éponge H 5% sucre	Éponge G 10% sucre	Éponge F 5% sel	Éponge E 10% sel
Temps moyen [s]	5,39	5,59	5,52	5,31	5,29	5,30	5,34

On observe que pour les solutions contenant du produit vaisselle, du sucre et du sel, les temps moyens d'écoulement pour un même volume sont du même ordre de grandeur que le temps d'écoulement de l'eau. On peut en déduire que les viscosités de ces solutions sont à peu près les mêmes.

On effectue les mêmes mesures, pour un volume de 300 mL, afin de comparer les temps obtenus en présence d'agar-agar et de gélatine. Les résultats obtenus sont les suivants :

	Eau seule	Éponge J 0,7% agar-agar	Éponge K 2% gélatine
Temps moyen [s]	4,82	5,13	4,60

Pour l'agar-agar on obtient bien un temps d'écoulement supérieur à celui de l'eau, ce qui nous confirme que la solution contenant de l'agar-agar est plus visqueuse que l'eau seule (observable à l'œil nu). Cependant, pour la gélatine, les résultats sont assez surprenants. Étant donné la faible précision des temps mesurés, il est possible que les incertitudes soient trop grandes pour pouvoir conclure sur la solution contenant de la gélatine.

2 – Suivi des éponges au cours du séchage

2.1 - Description de l'expérience

Dans cette partie, nous allons nous intéresser au comportement des éponges en séchage au cours du temps. Pour cela, nous allons imbiber les éponges des solutions décrites précédemment et nous allons mesurer leur masse au cours du temps. À l'état initial, les éponges sont totalement imbibées mais elles ne gouttent plus, si bien qu'on peut les déplacer et les peser sans que leur masse ne varie.

Le séchage est réalisé dans une pièce dont les conditions de température et d'humidité relative sont relativement stables autour de 22,2°C et 42% d'humidité. La température et l'humidité relative de la pièce ont été mesurées au cours des expériences de séchage :

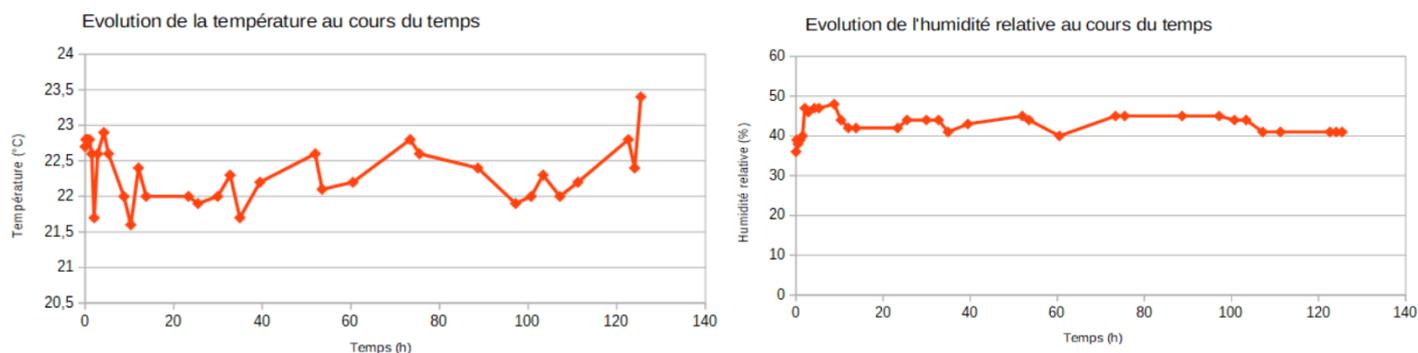


Figure 4 : Évolutions de la température et de l'humidité relative au cours des expériences

2.2 - Séchage d'une éponge avec de l'eau seule

Pour analyser les résultats, on trace l'évolution de la masse de l'éponge en fonction du temps et l'évolution de la variation de masse de l'éponge en fonction du temps puis en fonction de la raciné carrée du temps.

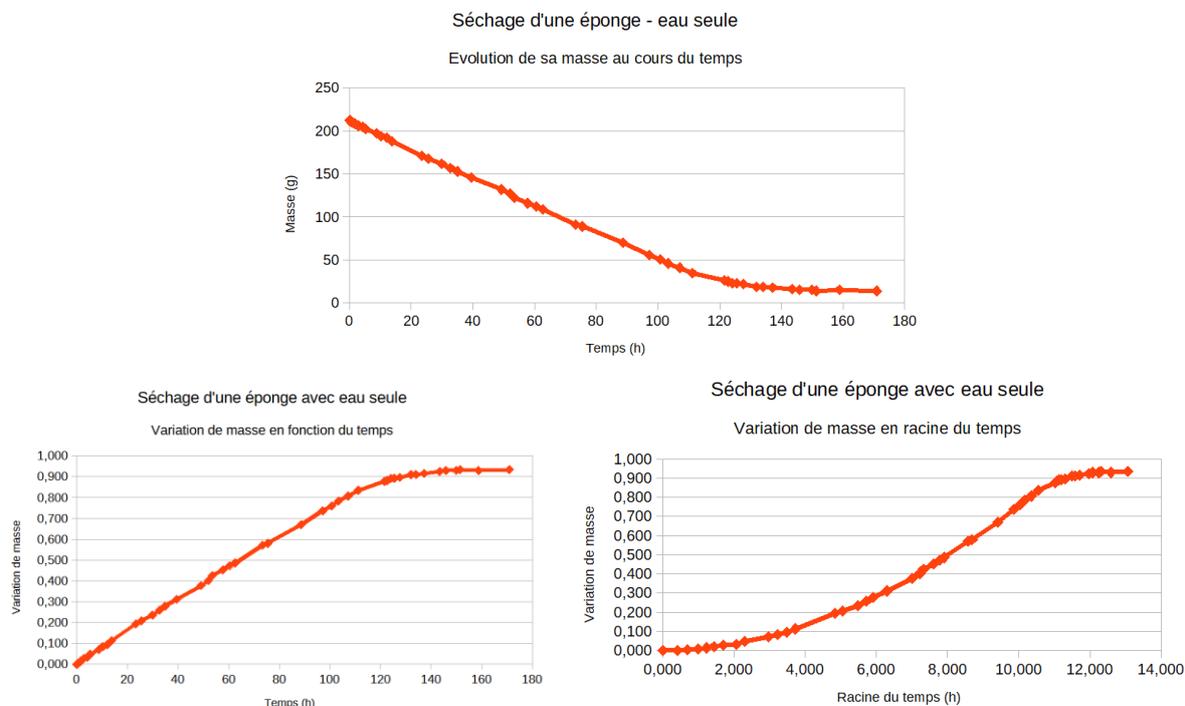


Figure 5 : Masse et variation de masse d'une éponge imbibée d'eau seule au cours du temps et en racine carrée du temps

On remarque tout d'abord que la variation de masse est supérieure à 90% de la masse de l'éponge. De plus, en étudiant l'évolution de la variation de masse de l'éponge en fonction du temps, celle-ci semble linéaire en fonction du temps. Ceci semble indiquer que le régime de séchage dans l'éponge est principalement évaporatif, ce qui signifie que les phénomènes d'évaporation dominent dans l'éponge (voir ressource « *Comportement en séchage des éponges : État de l'art* » [2] pour plus d'informations sur les régimes de séchage). De plus, comme le milieu de l'éponge n'est pas infini, on observe une stabilisation de la masse de l'éponge en fin de séchage : l'éponge est alors en équilibre avec le milieu ambiant.

La masse finale de l'éponge est la même que la masse de l'éponge avant son imbibition (14g) ce qui signifie que l'éponge est revenue à son état avant imbibition.

2.3 - Éponge soumise à des cycles de séchage

Nous avons soumis la même éponge à deux cycles de séchage. Les résultats sont les suivants :

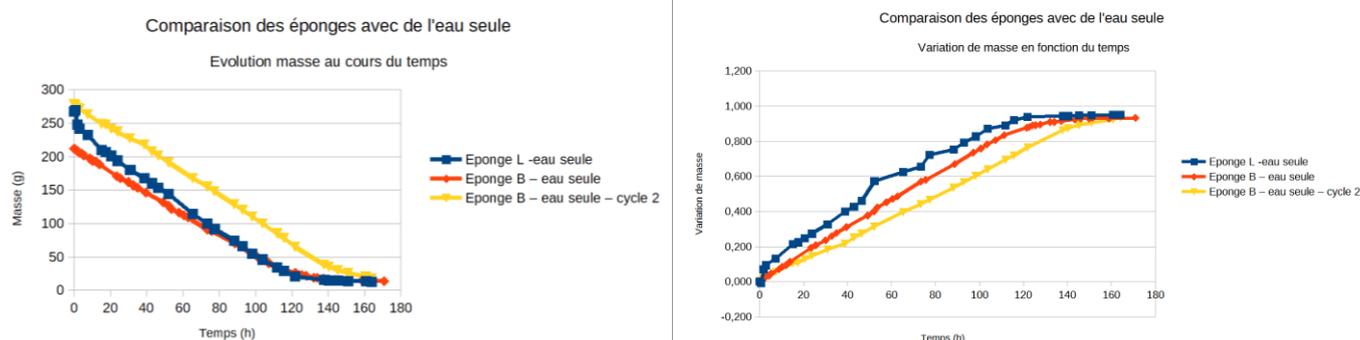


Figure 6 : Masse et variation de masse de plusieurs éponges imbibées d'eau seule au cours du temps et en racine du temps pour deux cycles d'imbibition/séchage

On remarque qu'au cours des deux cycles, les deux masses initiales des éponges mouillées ne sont pas les mêmes : cela peut s'expliquer par le fait que la masse d'eau initiale dans l'éponge n'est pas fixée et qu'elle dépend de la manière dont les éponges ont été imbibées. On remarque aussi que même si les cinétiques de séchage ne sont pas exactement confondues (notamment dû au fait que les masses initiales ne sont pas les mêmes), les valeurs finales de masse de l'éponge sont les mêmes. Ainsi, on observe des phénomènes d'hystérésis sur le séchage des éponges mais l'état final de l'éponge sèche après deux cycles de séchage est le même que celui après un cycle de séchage.

2.4 - Impact des solutions utilisées

2.4.a - Produit vaisselle

Nous étudions maintenant les résultats obtenus pour les solutions contenant du produit vaisselle à 5% et 10% de la masse d'eau que nous comparons avec les résultats obtenus pour l'eau seule.

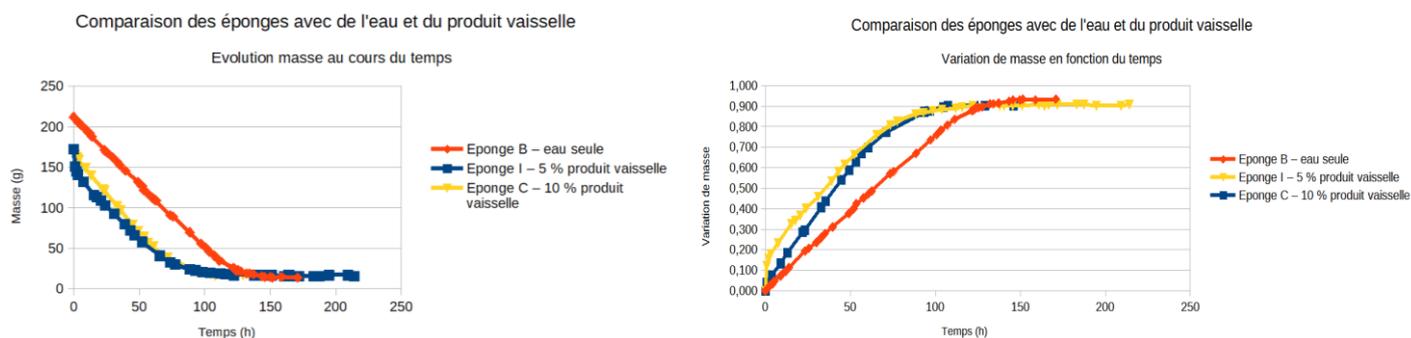


Figure 7 : Masse et variation de masse d'une éponge imbibée d'eau avec du produit vaisselle au cours du temps et en racine du temps

On remarque tout d'abord qu'en présence de produit vaisselle, les masses d'eau initiales contenues dans les éponges sont bien inférieures à la masse contenue dans l'éponge avec de l'eau seule. On peut imaginer que la présence du produit vaisselle dans l'eau modifie les pressions capillaires mises en jeu et le volume d'eau pouvant être adsorbé par l'éponge.

On remarque aussi que le séchage est plus rapide en présence de produit vaisselle. Cependant, la vitesse de séchage ne semble pas dépendre de la concentration en liquide vaisselle dans l'eau.

Les valeurs finales de masses des éponges sont de 17g (au lieu de 14g à l'état initial) pour l'éponge à 10% de produit vaisselle et de 16 g (au lieu de 15g à l'état initial) pour l'éponge à 5% de produit vaisselle. Ce qui signifie que l'éponge a gagné en masse au cours du processus de séchage.

II.4.b - Sucre

On s'intéresse maintenant aux éponges pour lesquelles on a utilisé des solutions à 5% et à 10% de sucre. Les résultats sont les suivants :

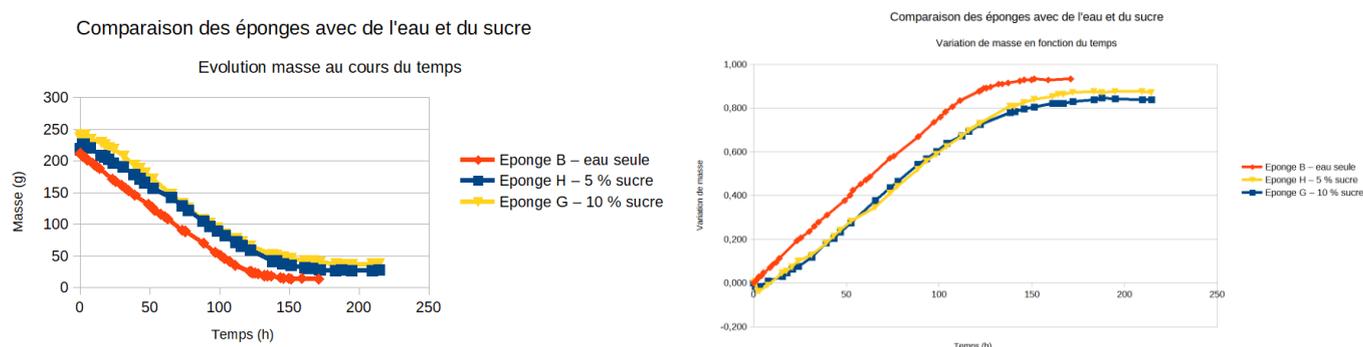


Figure 8 : Masse et variation de masse d'une éponge imbibée d'eau avec du sucre au cours du temps et en racine du temps

On remarque que les masses initiales d'eau incluses dans les éponges sont environ les mêmes mais que la cinétique de séchage est plus lente pour les éponges contenant du sucre. Cependant, on remarque encore une fois que la cinétique de séchage ne semble pas varier linéairement en fonction de la concentration en sucre dans l'eau.

Enfin, on remarque que les masses finales des éponges sont très différentes des masses initiales, les différentes masses mises en jeu sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	5% sucre	10% sucre
Masse eau [g]	300	300
Masse sucre[g]	15	30
Masse initiale[g]	14	14
Masse finale [g]	28	38
Ajout masse [g]	14	24

Ainsi, on remarque que la masse ajoutée en fin de séchage est une grande partie de la masse de produit solide ajoutée au début du séchage. On peut faire l'hypothèse que cette augmentation de masse est due à des dépôts de sucre formés sur les parois des pores de l'éponge au cours du séchage.

II.4.c - Sel

Lorsque l'on ajoute du sel dans les solutions, les résultats sont les suivants :

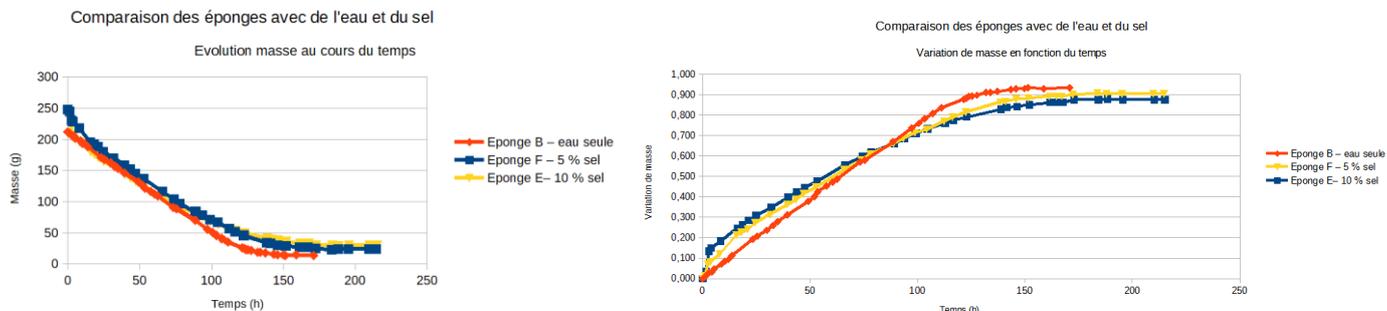


Figure 9 : Masse et variation de masse d'une éponge imbibée d'eau avec du sel au cours du temps et en racine du temps

On remarque que la cinétique de séchage lorsque l'eau est mélangée avec du sel est également ralentie mais qu'elle ne semble pas varier linéairement en fonction de la concentration en sel.

Les masses mises en jeu sont les suivantes :

	5% sel	10% sel
Masse eau [g]	300	300
Masse sucre [g]	15	30
Masse initiale [g]	14	14
Masse finale [g]	24	30
Ajout masse [g]	10	16

On remarque que les variations de masse sont également importantes mais que pour une même quantité de produit solide ajouté, la masse de l'éponge contenant du sel a moins augmenté que la masse de l'éponge contenant du sucre.

II.4.d - Agar-agar et gélatine

Pour l'agar-agar, deux expériences ont été réalisées : une à 2% et une à 0,7% :

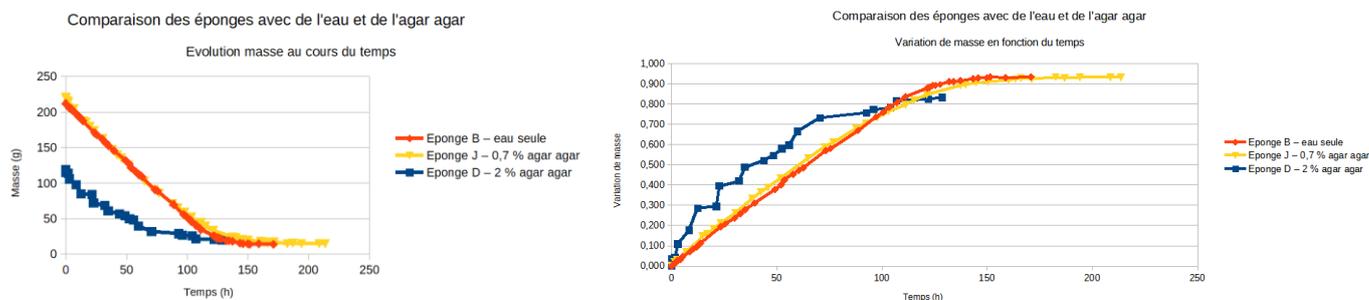


Figure 10 : Masse et variation de masse d'une éponge imbibée d'eau avec de l'agar-agar au cours du temps et en racine du temps

Les résultats obtenus pour de l'agar-agar à 2% sont assez inhabituels : la masse initiale de solution dans l'éponge est en effet très faible et le séchage n'est pas aussi régulier que celui des autres éponges. En effet, à cette concentration, le fluide est devenu trop visqueux pour pouvoir imbiber correctement l'éponge et les résultats en sont alors largement modifiés. L'augmentation de masse de l'éponge dans ce cas est de 5g pour 8g d'agar-agar ajouté dans la solution en eau.

L'expérience réalisée à 0,7% d'agar-agar ne souffre pas des mêmes problèmes : les résultats obtenus sont très similaires à ceux obtenus pour une éponge imbibée avec de l'eau. On en déduit donc que la présence d'agar-agar si il est en faible quantité n'intervient pas sur le phénomène de séchage alors que si il est en grande quantité, il peut empêcher l'imbibition et le séchage de se dérouler de façon classique.

Afin de comparer avec un autre gélifiant, nous avons choisi de réaliser la même expérience avec de la gélatine.

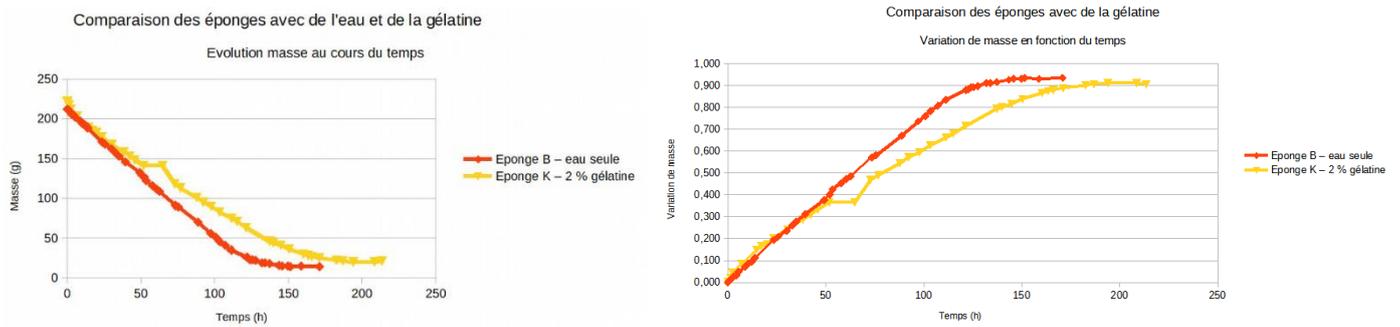


Figure 11 : Masse et variation de masse d'une éponge imbibée d'eau avec de la gélatine au cours du temps et en racine du temps

La cinétique de séchage est ralentie par la présence de la gélatine (on remarque d'ailleurs un point aberrant sur la courbe qui au vu de l'alignement de tous les autres points est sans doute dû à une mauvaise tare de la balance).

On peut noter également que l'on a introduit 6g de gélatine dans la solution et que la variation de masse de l'éponge est d'environ 5g.

2.5 - Taille et aspect des éponges après séchage

L'annexe : *Taille et aspect des éponges après séchage*, paragraphe 5, contient les photos des éponges en fin de séchage et permet de comparer la taille finale des éponges dans lesquelles la solution utilisée est de l'eau pure et la taille des éponges dans lesquelles on utilise d'autres solutions. On remarque que les tailles finales des éponges sont très variables : toutes les éponges contenant une solution avec des ajouts sont de tailles plus grandes que les éponges ayant été imbibées d'eau seule. La seule exception concerne l'éponge ayant été imbibée avec une trop grande concentration d'agar-agar : on remarque d'ailleurs que la déformée de cette éponge est très particulière. Au moment même de l'imbibition l'éponge n'a pas pu retrouver une forme classique et a gardé cette déformée tout au long du séchage.

On peut dans ce cas essayer faire un lien entre la tension de surface mesurée en première partie et les tailles finales des éponges mesurées. En effet, comme on l'a vu dans la ressource « *Comportement en séchage des éponges : État de l'art* » [2], plus la tension de surface est élevée et plus les déformations sont importantes (l'éponge se contracte donc davantage). Le graphique présenté ci-dessous montre l'évolution de l'aire finale des éponges en fonction de leurs tensions de surface.

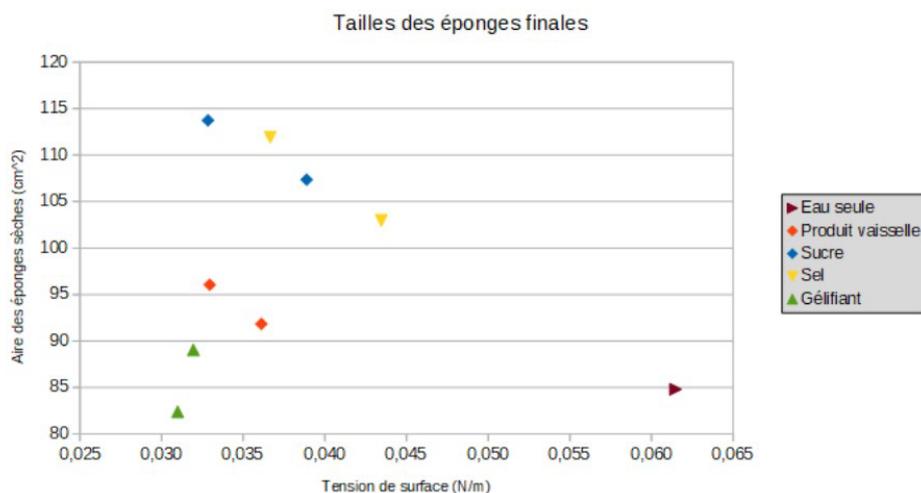


Figure 12 : Tailles finales des éponges après séchage

On remarque que cette relation fonctionne très bien pour les éponges dans l'eau seule, l'eau et le sucre et l'eau et le sel pour lesquelles on obtient une relation quasi linéaire entre l'aire finale de l'éponge et la tension superficielle mesurée. Cependant, lorsque la solution est un gélifiant ou contient du produit vaisselle, cette équation n'est plus du tout vérifiée. On peut imaginer qu'un autre phénomène entre en jeu avec ce type de produits.

Enfin, on remarque que l'on observe des dépôts sur les faces extérieures des éponges dans lesquelles on a mis des solutions contenant du sucre et du sel. Ceci confirme le fait qu'une partie au moins des produits ajoutés dans ces éponges se sont précipités et sont restés dans les porosités de l'éponge.

2.6 - Interprétation

Pour résumer les observations faites, on remarque que le séchage des éponges suit principalement un régime évaporatif.

L'ajout de sucre, sel, produit vaisselle et gélifiant fait diminuer la tension superficielle de la solution aqueuse. La taille finale des éponges après le séchage varie et les solutions ayant les plus petites tensions de surface sont celles pour lesquelles les éponges ont les plus grandes tailles finales, ce qui est cohérent avec la théorie de la pression capillaire dans les pores. Pour le produit vaisselle et le gélifiant, cette relation n'est pas vérifiée.

L'ajout de produit vaisselle fait diminuer la masse d'eau totale que l'éponge peut imbiber. Le séchage est quant à lui accéléré. Pour le sucre, le sel et le gélifiant, le séchage est ralenti par l'ajout de ces produits.

Enfin, pour des solutions où on ajoute un composé solide comme le sucre, le sel ou l'agar-agar, une partie de ce composé se précipite à l'intérieur de l'éponge et provoque une augmentation de masse importante dans l'éponge.

3 – Évolution de la taille des pores

3.1 - Protocole

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à l'évolution de la taille des pores entre les éponges imbibées des solutions et les éponges sèches. L'objectif de cette partie est de voir si la taille des pores macroscopiques de l'éponge varie au cours du séchage.

Pour cela, on prend en photo l'éponge avant et après séchage et on utilise un logiciel de traitement d'image de type *ImageJ*. On utilise un algorithme de seuil pour transformer l'image couleur en une image noir et blanc où les pores ressortent (figure 13). On utilise ensuite un module intégré à *ImageJ* permettant d'analyser les particules mises en avant par l'algorithme de seuil. On récupère ainsi les aires des pores identifiés ainsi que leurs positions.

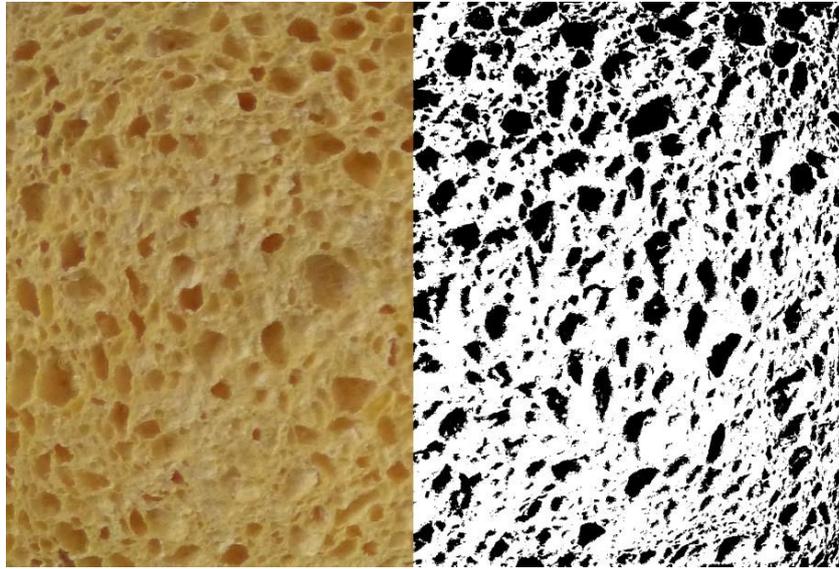


Figure 13 : Transformation de l'image par seuil

3.2 - Travail préliminaire : choix de la méthode de seuil

Il existe différents algorithmes dans *ImageJ* permettant d'effectuer la transformation de l'image présentée ci-dessous. Les recherches bibliographiques et les premiers essais ont montré que l'algorithme d'Otsu est le plus efficace. Il reste à choisir la manière dont on décrit l'image : celle-ci peut par exemple être décrite en RGB (Rouge, vert, bleu) ou en LAB (espace CIELAB où les couleurs sont décrites avec un paramètre de clarté et les deux écarts par rapport à une surface grise de même clarté). Les résultats permettant de comparer les deux techniques sont présentes ci-dessous :

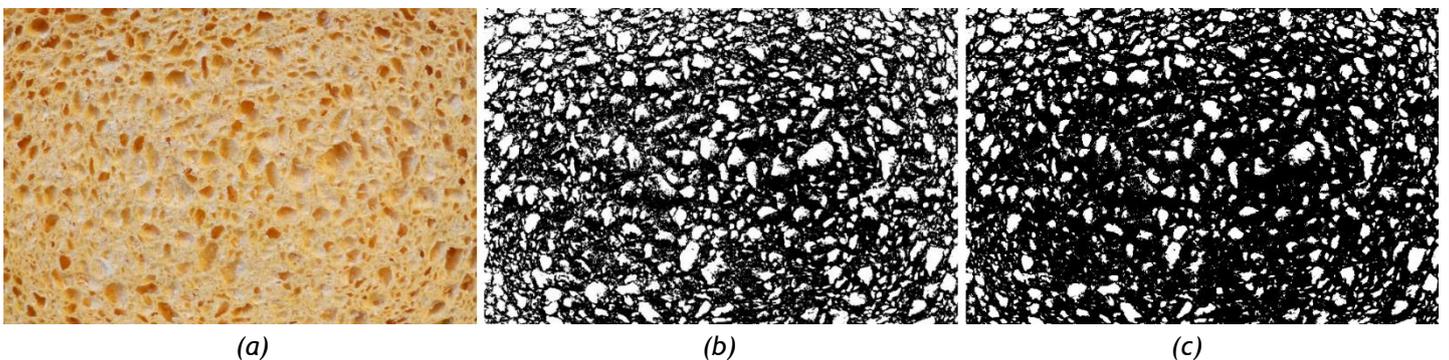


Figure 14 : Photo originale (a), et résultats des deux techniques : Otsu+RGB (b) et Otsu+LAB (c)

En comparant les résultats obtenus pour ces deux distributions de couleur, on se rend compte que la description de couleurs LAB donne des résultats plus intéressants car on retrouve moins d'erreurs numériques de pores de petites tailles détectés ne correspondant pas à des pores de l'éponge. On fait ce même travail sur les quatre descriptions disponibles et on choisit la description LAB. Toutes les études suivantes sont faites avec la même méthode dans *ImageJ*.

3.3 - Solution avec de l'eau seule

On s'intéresse tout d'abord à l'évolution des tailles de pores dans une de nos éponges imbibées avec de l'eau seule. On trace les histogrammes de répartitions des pores dans l'éponge sèche et humide ci-dessous. On remarque qu'il y a une grande quantité de pores de toutes petites dimensions (inférieures à 1 mm^2). Ces pores sont très probablement des erreurs de détection numérique résultant de l'algorithme de seuillage. Afin de pouvoir mieux distinguer les évolutions des tailles de pores, on choisit de tracer la distribution inverse des tailles de pores dans l'éponge : pour une

aire donnée, on représente le nombre de pores ayant une aire supérieure à cette aire donnée dans l'éponge.

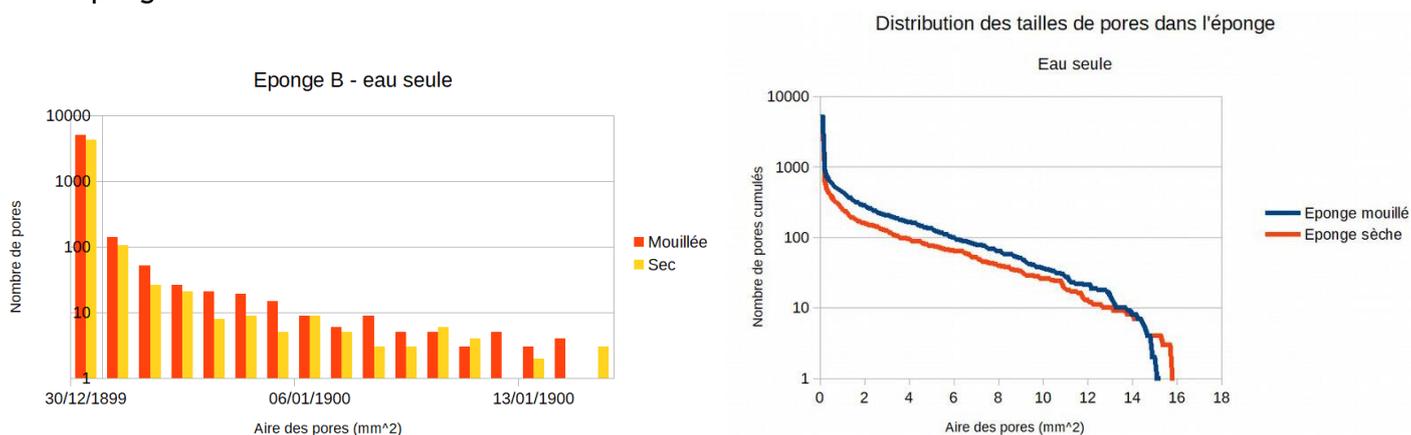


Figure 15 : Répartition des pores dans l'éponge sèche et humide, et distribution inverse des tailles de pores dans l'éponge

On fait le même travail pour cette éponge après son deuxième cycle et pour l'autre éponge n'ayant été mouillée qu'avec de l'eau :

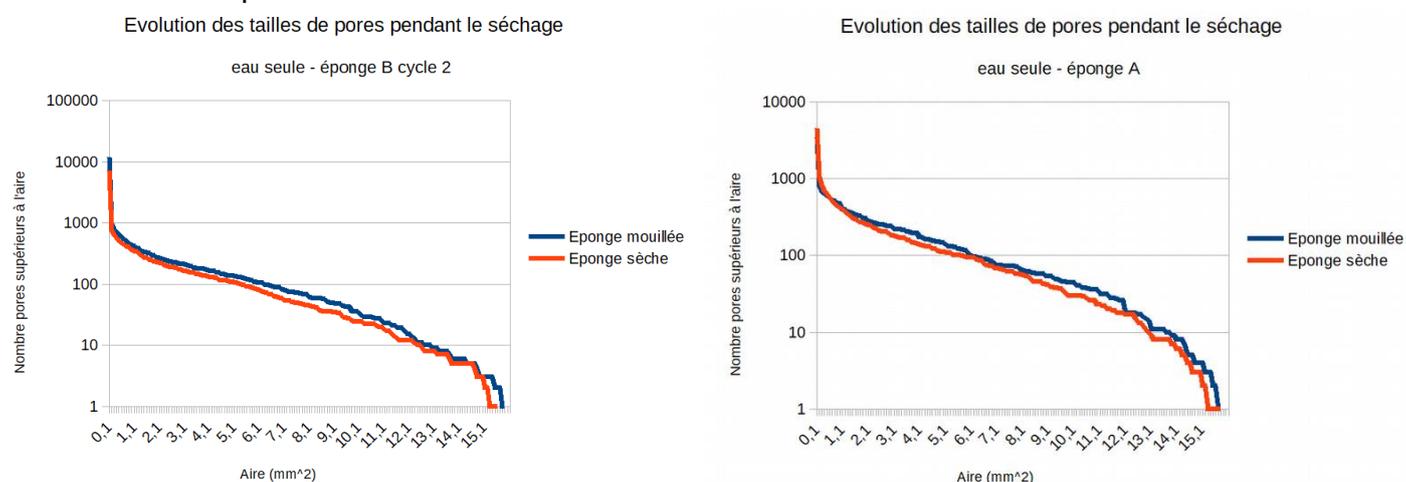


Figure 16 : Évolutions des distributions inverses des tailles de pores dans l'éponge B après son deuxième cycle et dans l'éponge A

On remarque qu'il y a bien un décalage de la taille des pores vers les pores de plus petite taille lorsque l'éponge sèche mais celui-ci varie d'une éponge à l'autre. Afin d'être sûrs que ce changement n'est pas dû à des erreurs numériques, nous allons estimer les incertitudes de ce problème.

3.4 - Comparaison de deux images de la même éponge

Afin de comprendre quelle est la précision de la méthode employée, on prend deux photos de la même éponge dans le même état au même moment et on applique aux deux images l'algorithme précédemment décrit. On remarque qu'il existe des décalages importants au niveau des pores de très petites (amas de quelques pixels détectés comme des pores) et de très grandes tailles (amas de pores détectés comme un seul pore). Cependant, les deux distributions de pores sont assez proches.

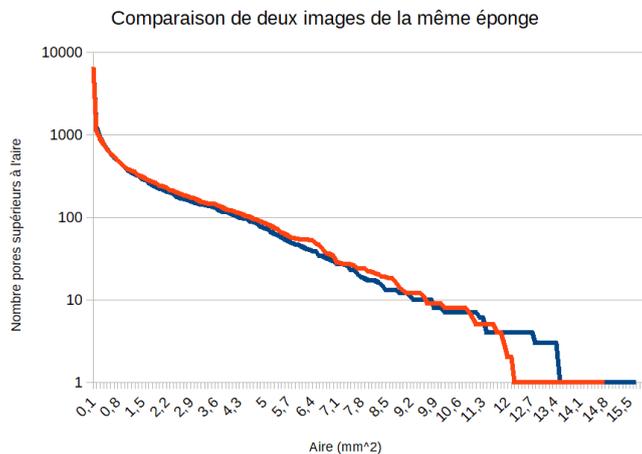


Figure 17 : Évolutions des distributions inverses des tailles de pores dans la même éponge mais analysées avec deux photos différentes

3.5 - Impact des solutions utilisées

On effectue le même travail pour toutes les solutions utilisées précédemment. Les résultats sont présentés en *Annexe : Évolution des tailles de pores pour les solutions choisies, paragraphe 6*.

On remarque que les variations de tailles de pores sont très faibles lorsque la solution utilisée est composée de sucre, sel ou produit vaisselle. Cependant, lorsque la solution utilisée est de la gélatine on observe une différence plus importante au niveau des tailles de pores. Les concentrations en produit semblent jouer un rôle mineur dans la variation des tailles de pores.

3.6 - Interprétation

On remarque que les tailles des pores semblent en effet diminuer au cours du séchage. On peut également faire un parallèle entre les éponges les plus contractées (eau seule et gélatine) et les éponges dont les pores ont le plus diminué au cours du séchage.

Cependant les incertitudes du problème restent assez importantes car de nombreux facteurs entrent en compte :

- L'éclairage de la photo : celui-ci doit être uniforme (des essais avec le flash ont montré que celui-ci perturbait l'identification des pores par l'algorithme de seuil) ;
- La déformée de l'éponge : si l'éponge est trop déformée dans certaines zones, la lumière arrivant sur cette zone peut ne plus être uniforme et compliquer la reconnaissance des pores ;
- La reconnaissance des pores par l'algorithme d'Otsu qui peut interpréter des pixels comme des pores ou des amas de pores comme un seul grand pore.

4 - Conclusion et perspectives

En conclusion, nous avons pu mener un travail intéressant sur le séchage des éponges dans le cadre d'une première expérience immersive de recherche réalisé entièrement à distance et avec du matériel que tout le monde peut avoir chez soi.

Nous avons pu étudier la cinétique de séchage des éponges et nous avons pu observer les différents régimes de séchage. Nous avons compris que certains produits comme le produit vaisselle peuvent accélérer le séchage des éponges et que d'autres produits comme le sucre ou le sel vont avoir tendance à ralentir le séchage.

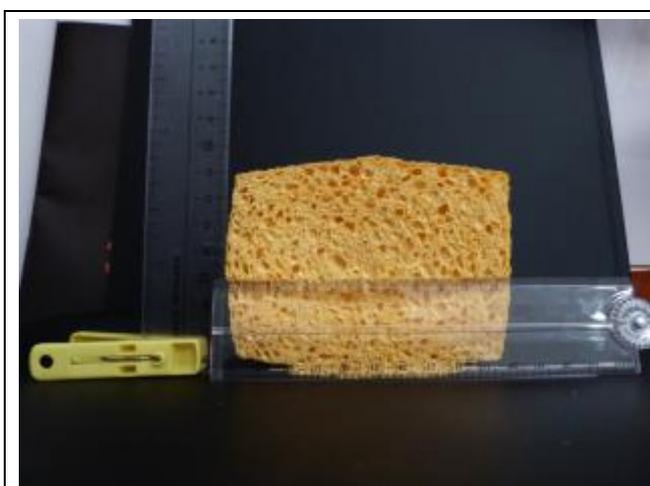
Nous avons également observé que des dépôts pouvaient se former dans les pores de l'éponge lorsque les solutions ne contiennent pas uniquement de l'eau et que cela modifie la structure finale de l'éponge après séchage.

Nous avons pu étudier les phénomènes de contraction des éponges et voir que pour des solutions comme l'eau ou l'eau et du sel ou l'eau et du sucre, la contraction peut être reliée à la tension de surface du liquide.

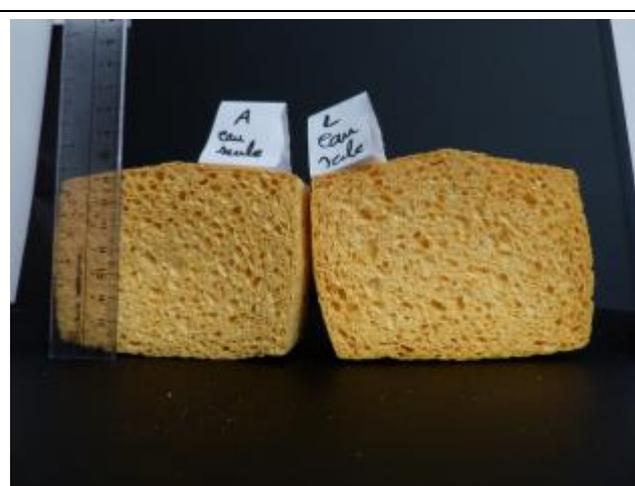
Enfin, nous pouvons établir que les pores d'une éponge rétrécissent lorsque celle-ci sèche. Cette diminution en taille est d'autant plus importante que l'éponge ne change de taille elle-même.

Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étudier des configurations dans lesquelles la microstructure de l'éponge serait contrôlée et serait toujours la même afin de retirer les variabilités d'une éponge à l'autre.

5 – Annexe : Taille et aspects des éponges



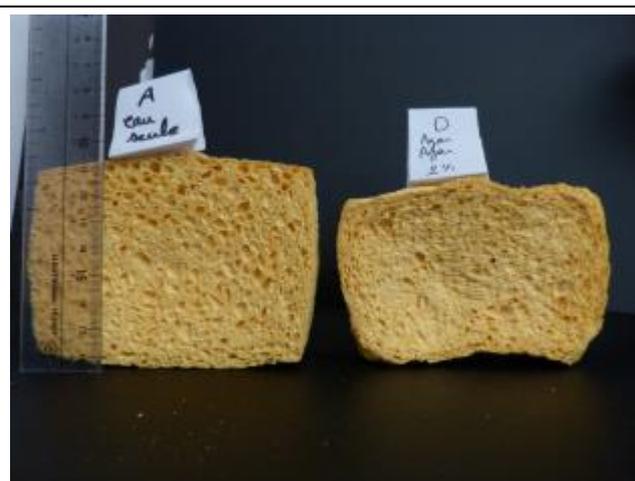
Taille de l'éponge A avec de l'eau seule après séchage



Comparaison des tailles finales entre deux éponges mouillées à l'eau seule après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge J (agar-agar à 0,7%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge D (agar-agar à 2%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge E (sel à 10%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge F (sel à 5%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge G (sucre à 10%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge H (sucre à 5%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge I (produit vaisselle à 5%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge C (produit vaisselle à 10%) après séchage

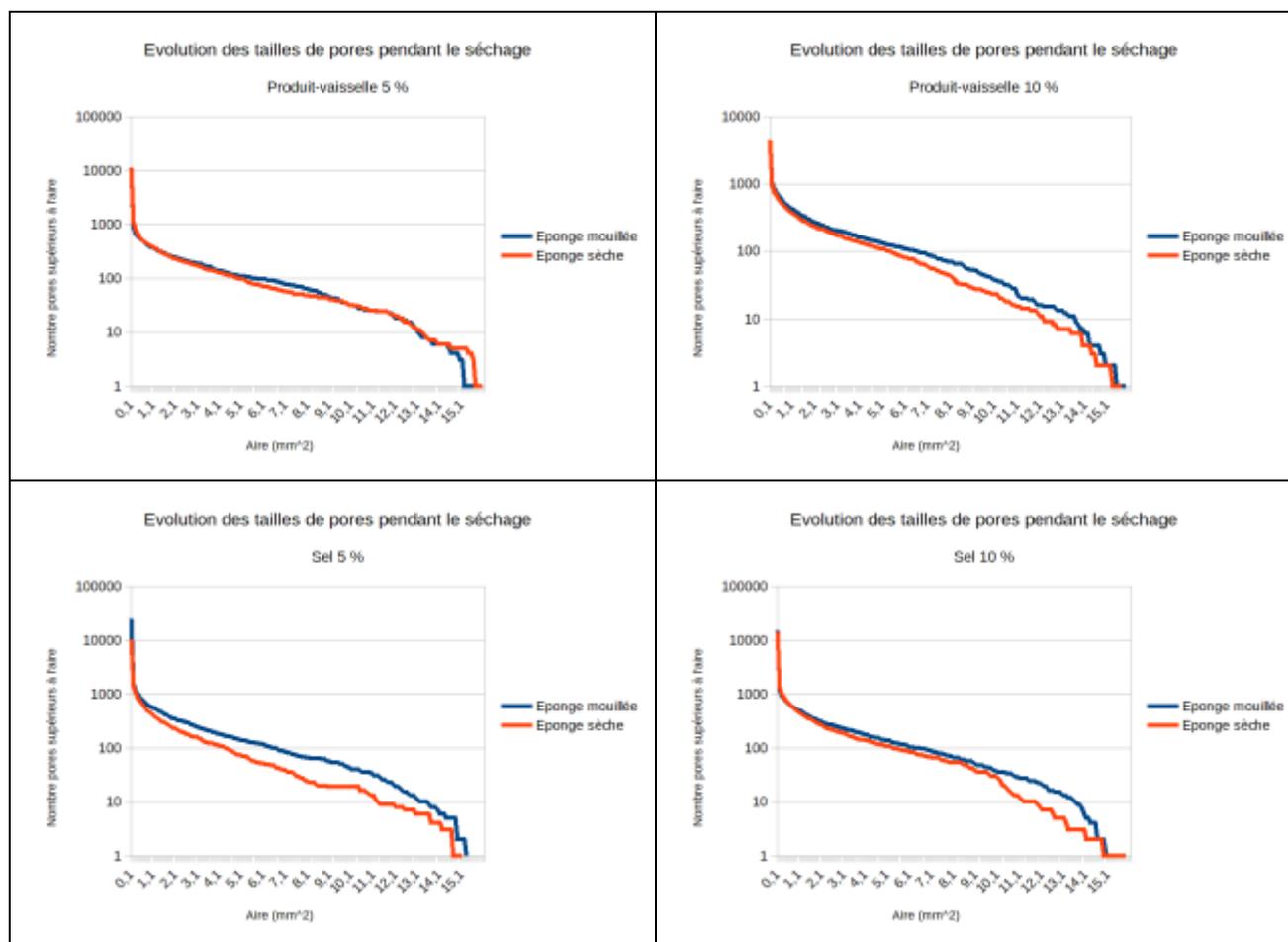


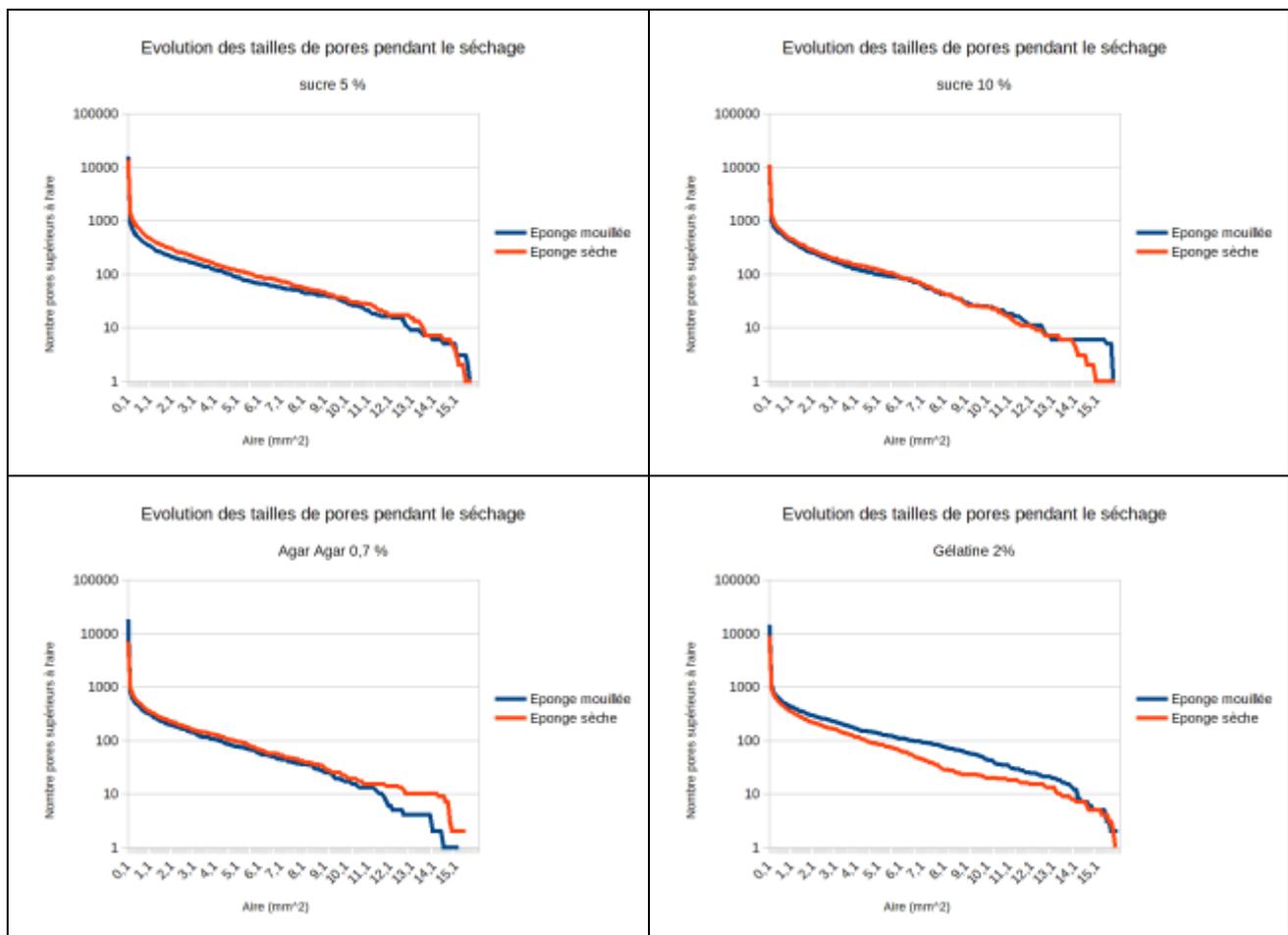
Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule) et de l'éponge K (gélatine à 2%) après séchage



Comparaison des tailles de l'éponge A (eau seule après un cycle de séchage) et de l'éponge B (eau seule après deux cycles de séchage)

6 – Annexe : Évolution des tailles de pores pour les solutions choisies





Références :

[1]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/ImageJ>, <https://imagej.nih.gov/ij/>

[2]: Comportement en séchage des éponges : État de l'art, C. Martin-Cavaillé, F. Benboudjema, mai 2021, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/comportement-en-sechage-des-eponges-etat-de-lart

[3]: X. Xu, S. Xu, L. Jin, et E. Song, « Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications », Pattern Recognition Letters, vol. 32, no 7, p. 956-961, mai 2011, doi: 10.1016/j.patrec.2011.01.021

[4]: T. Y. Goh, S. N. Basah, H. Yazid, M. J. Aziz Safar, et F. S. Ahmad Saad, « Performance analysis of image thresholding: Otsu technique », Measurement, vol. 114, p. 298-307, janv. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.052

[5]: « Tension superficielle et salinité », tpegaetanhibaut, consulté le févr. 09, 2021, <https://campistrouthibaut.wixsite.com/tpegaetanhibaut/tension-superficielle-et-salinit>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>