



HAL
open science

Dimensionnement d'un dispositif de séchage de grains à la ferme low-tech dans le cadre d'une autonomisation

Oumnia Belhorma, Sarah Clément, Emilien Foissey, Noémie Huber

► To cite this version:

Oumnia Belhorma, Sarah Clément, Emilien Foissey, Noémie Huber. Dimensionnement d'un dispositif de séchage de grains à la ferme low-tech dans le cadre d'une autonomisation. Insa Rouen. 2023. hal-04091757

HAL Id: hal-04091757

<https://hal.inrae.fr/hal-04091757>

Submitted on 9 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

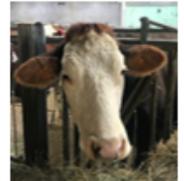
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet INSA Entreprise - Génie Énergétique - EP4

Dimensionnement d'un dispositif de séchage de grains à la ferme low-tech dans le cadre d'une autonomisation



INSA
ROUEN NORMANDIE



INRAE

Étudiants : Oumnia BELHORMA, Sarah CLEMENT, Emilien FOISSEY, Noémie HUBER

Encadrants : Bruno RENOU, Gilles L'HUILLIER, Thomas PUECH, Bénédicte AUTRET,
Corentin PINSARD

Mai 2023

Résumé

Ce rapport est le fruit d'un travail de groupe qui a été réalisé en 2^e année du cycle ingénieur en Génie Energétique à l'INSA Rouen, dans le cadre d'un Projet INSA Entreprise (PIE). Le sujet de ce projet, proposé pour la première fois comme PIE, traite du dimensionnement d'un séchoir de grains pour une ferme expérimentale diversifiée en recherche d'autonomie. Cette ferme, située à Mirecourt dans les Vosges (88), est rattachée à l'institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)¹.

Dans ce rapport, les caractéristiques du séchoir à dimensionner sont détaillées. De plus, l'instrumentation d'une première solution directement liée aux dynamiques de séchage est présentée, ainsi que des perspectives d'amélioration dans le cas d'une étude ultérieure du projet.

1. <https://www.inrae.fr/>

Table des matières

Résumé	1
Remerciements	1
1 Introduction	2
2 Étude du besoin	3
2.1 Cahier des charges	3
2.2 Présentation et visite de la ferme (ressources disponibles)	5
3 Dimensionnement	7
3.1 Tests du réchauffeur	8
3.2 Point de fonctionnement	11
3.3 Instrumentation	15
3.4 Fonctionnement séchage	17
3.4.1 Grandeurs intervenants dans le séchage	17
3.4.2 Étapes du séchage	18
3.5 Modélisation du temps de séchage	21
4 Perspectives	23
4.1 Poursuite du projet	23
4.2 Améliorations éventuelles	24
5 Conclusion	25
6 Bilan personnel	25
Annexes	i
A Grandeurs et unités	i
B Comparaison puissance de chauffe et puissance électrique	iii
C Point de fonctionnement en fonction de la hauteur	iv
D Trajectoire de l'air sur un diagramme psychrométrique	v
E Trajectoire réelle de la température du grain lors du séchage	v
F Courbe de sorption des céréales présentes à la ferme et normes d'humidité	vi
G Bibliographie	vii

Table des figures

1	Cahier des charges du séchoir	4
2	Illustration du dispositif de séchage pré-existant	6
3	Illustration de la vis sans fin	6
4	Illustration du banc d'essai	8
5	Puissance électrique consommée par l'installation en fonction de $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$ à $\dot{m}_{air} = 0.2 \text{ m}^3/s$	9
6	Débit d'air en fonction de $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$	10
7	Réduction de la plage de fonctionnement	11
8	les pertes de charges dans le séchoir	12

9	Plaque perforée présente dans le caisson	12
10	Manipulation de détermination de la porosité	13
11	Courbe du ventilateur et du circuit du séchoir	14
12	Schéma de l'installation instrumentée	15
13	Représentation des deux teneurs en eau (Source : Techniques de l'ingénieur)	18
14	Évolution schématique de la température des grains et de leur pression de vapeur au cours des périodes de séchage	21
15	Principe d'isotherme de sorption	22
16	Isotherme de sorption du sarrasin	22
17	Puissance en fonction $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$ à $\dot{m}_{air} = 0.2 \text{ m}^3/s$	iv
18	Point de fonctionnement pour différentes hauteurs de lit	iv
19	Chauffage de l'air dans un diagramme psychrométrique	v
20	Évolution de la température du grain au cours du temps de séchage	v
21	Isothermes de désorption pour différents grains	vi
22	Normes d'humidité des graines de la ferme INRAE	vi

Remerciements

Nous souhaitons remercier tous les membres de l'INRAE avec qui nous avons travaillé : M. Thomas PUECH, agronome, M. Gilles L'HUILLIER, technicien productions végétales et atelier mécanique, ainsi que Mme. Bénédicte AUTRET, agronome. Nous les remercions tout particulièrement pour leur bienveillance durant toute la durée du projet ainsi que pour leur chaleureux accueil à la ferme.

Nous voulons également remercier M. Corentin PINSARD, ingénieur systèmes énergétiques et docteur en agronomie des territoires, pour son soutien ainsi que M. Bruno RENOUE, professeur et directeur du département Génie Énergétique de l'INSA, pour son aide précieuse et sans qui rien n'aurait été possible.

Aussi, nous remercions M. Alexis VANDEL, ingénieur au CORIA², sur qui nous avons pu compter pour la réalisation d'un montage expérimental à l'INSA.

2. Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie

1 Introduction

L'agriculture représente aujourd'hui plus de 4 millions de tonnes équivalent pétrole et est largement dépendante des énergies fossiles. Ce secteur privilégie d'ailleurs des sources d'énergie telles que le fioul domestique ou encore le butane et le propane pour ses diverses applications. Parmi celles-ci nous retrouvons : l'alimentation des véhicules agricoles, le chauffage des élevages ou encore l'alimentation des systèmes de séchage. Cependant, l'augmentation de prix du gaz associée à l'impact environnemental de son utilisation, incitent les agriculteurs à vouloir réduire leur dépendance aux énergies fossiles en particulier pour ce qui est du séchage des végétaux. C'est le cas par exemple de la ferme expérimentale de Mirecourt, avec laquelle nous travaillons sur ce projet et qui est gérée par l'unité de recherche ASTER³. Cette dernière est notamment rattachée à l'INRAE qui oeuvre en faveur du développement durable dans le domaine agricole.

Par ailleurs, en plus de l'aspect économique et environnemental, la ferme souhaite également gagner en autonomie. En effet, les grains récoltés sont actuellement séchés par une coopérative voisine. Cependant, compte-tenu de leur faible volume de graines, ils ne sont pas prioritaires et le séchage peut donc prendre du temps. Il est pourtant primordial que celui-ci se fasse rapidement afin de conserver les produits agricoles et alimentaires susceptibles de se dégrader, en stabilisant leur humidité. En effet, même s'il est important de maintenir une certaine quantité d'eau dans les grains pour qu'ils conservent leurs caractéristiques (structure, métabolisme, qualité nutritionnelle), si celle-ci dépasse un certain seuil, cela peut entraîner des risques majeurs sur les récoltes. Parmi ceux-ci se trouvent le développement de moisissures, l'apparition de substances toxiques (mycotoxines) ou encore le démarrage du processus germinatif. Les normes qui recommandent des seuils d'humidité spécifique pour chaque végétaux rendent donc certaines récoltes non commercialisables en raison des risques évoqués.

Tous ces facteurs sont l'origine même du sujet proposé par l'INRAE. En effet, l'objectif principal de ce projet est de dimensionner une solution durable et low-tech permettant de sécher les grains directement à la ferme en limitant la consommation énergétique. Le dispositif proposé devra utiliser le matériel pré-existant sur site et respecter plusieurs contraintes (cf. cahier des charges 1). Néanmoins, cet objectif ne peut être réalisé sans la prise en compte du fonctionnement du séchage et des variables qui l'influencent. Ainsi, la compréhension et l'explicitation de ces notions constituent aussi un but majeur dans ce projet.

Dans ce rapport nous allons dans un premier temps présenter un état de l'art des dispositifs de séchage existants avant d'analyser le besoin de la ferme. Ensuite nous mettrons en avant le matériel disponible pour répondre à la problématique ainsi que les tests que nous avons pu effectuer sur ce dernier. Enfin, nous finaliserons l'instrumentation du séchoir que nous justifierons par l'explication des dynamiques de séchage. Pour finir, nous présenterons l'avenir du projet et les perspectives d'améliorations de la solution proposée.

3. Unité AgroSystèmes TErritoires Ressources

2 Étude du besoin

Dans cette partie, l'objectif est de définir avec précision le besoin de la ferme ainsi que les ressources disponibles sur site pour y répondre.

2.1 Cahier des charges

Afin de mener à bien ce projet de dimensionnement, un cahier des charges, disponible ci-dessous, regroupant la fonction principale (FP) et l'ensemble des contraintes (FC) que le séchoir doit respecter a été établi avec les encadrants de la ferme. C'est un outil de référence qui nous a permis de donner un cadre au projet. Il nous a servi de support dès le début de notre travail et a guidé chaque étape de notre étude dans la mesure où il regroupe les éléments clés à respecter.

CAHIER DES CHARGES DU DISPOSITIF DE SECHAGE			
Type de fonction	Enoncé	Critère d'appréciation	Niveau d'exigence
FP	Sécher efficacement plusieurs types de grains à différentes périodes de l'année, pour qu'ils soient conservés et/ou commercialisés	- Durée de séchage - Température adaptée aux grains - Teneur en eau	- t < 72 heures - T < 35° C - W ≈ 15 % (dépend du grain)
FC	Avoir un design sobre, peu onéreux et résistant	- Prix - Matériel utilisé	- Réutilisation du dispositif existant
FC	Etre autonome	- Fonctionnement sans intervention	- Utilisation de capteurs
FC	Etre adapté au volume à sécher	- Capacité du séchoir	- Caisson de 2 m ³
FC	Réalisation de la maintenance sur place	- Simplicité du système - Réparabilité	- Système compréhensible pour les usagers - Notice de fonctionnement détaillée, claire et didactique
FC	Respecter les normes de sécurité	- Analyse du risque	- Respectueux des normes - Dispositifs de sécurité (alarmes)
FC	Etre mobile	- Transport sur le site	- Facilement déplaçable
FC	Etre indépendant des énergies fossiles, utiliser une source d'énergie disponible sur site et peu onéreuse	- Source d'énergie, abondance, coût	- Utilisation d'énergie locale principalement

FIGURE 1 – Cahier des charges du séchoir

2.2 Présentation et visite de la ferme (ressources disponibles)

Par ailleurs, il a été nécessaire d'en apprendre davantage sur les caractéristiques de la ferme. En effet, pour assimiler la complexité du sujet il était important, aussi bien pour nos encadrants que pour nous-mêmes, de nous imprégner de l'état d'esprit de l'INRAE, du fonctionnement de la ferme ainsi que de l'environnement dans lequel elle se trouve.

C'est dans ce contexte, que nous avons eu l'occasion de nous rendre sur le site de Mirecourt afin de visiter la ferme, de visualiser l'agencement des bâtiments et d'échanger plus amplement sur les besoins auxquels notre système devait répondre.

L'environnement de la ferme :

Tout d'abord, il est important de noter que la ferme de Mirecourt est une ferme expérimentale gérée par l'unité de recherche INRAE - ASTER. C'est une ferme en polyculture-polyélevage⁴, en recherche d'autonomie en intrants⁵ (engrais, pesticides, eau, alimentation animale). Elle possède 240 hectares dont plus de 50% (135 hectares) de prairie permanente, contenant 100 vaches, 130 moutons et 30 cochons. Le reste des terrains (105 hectares) sont des terres arables, dont 70 hectares en cultures annuelles.

Par ailleurs, Mirecourt se trouvant dans les Vosges, en Lorraine, c'est une région où les conditions climatiques peuvent être particulièrement humides et froides. C'est un point qu'il n'a pas fallu négliger lors de notre étude puisque cela affecte grandement la puissance que nous devons fournir pour le séchage des graines. En effet, nous verrons plus tard que l'air doit être suffisamment chauffé pour atteindre un degré hygrométrique lui permettant d'enlever l'eau du produit à sécher (cf. Fonctionnement du séchage 3.4).

Remarque : Initialement, le personnel de la ferme a essayé de faire sécher des grains en utilisant simplement le dispositif présenté en figure 2. Cependant, cela ne pouvait fonctionner étant donné que l'hygrométrie de l'air extérieur était trop important pour retirer suffisamment d'humidité aux grains. Par exemple, d'après les données météorologiques, en octobre 2022, lors de la récolte des graines de sarrasin, l'humidité relative de l'air se trouvait entre 69 et 88%

Matériel existant :

Enfin, comme cela a été dit ultérieurement, un des critères à respecter pour notre séchoir est la réutilisation de matériels déjà disponible à la ferme. Lors de notre visite, nous avons donc pu nous rendre compte concrètement des équipements déjà présents sur place. Le dispositif de séchage pré-existant (figure 2) est placé à l'étage d'une grange ouverte, dans un environnement très poussiéreux et peu protégé des conditions extérieures.

4. fait de cultiver plusieurs espèces végétales et de pratiquer plusieurs élevages au sein d'une même ferme

5. ressources utilisés pour le fonctionnement d'une exploitation agricole



FIGURE 2 – Illustration du dispositif de séchage pré-existant

Parmi le matériel disponible, nous avons pu voir le ventilateur Denis D3, à gauche de la photo, ainsi que les caissons d'environ $2 m^3$ utilisés pour contenir les grains lors du séchage, à droite.

De plus, une vis sans fin permettant la recirculation des grains dans le caisson a également été mise à notre disposition (figure 3). Cette dernière, qui mesure 2.5 m a été fabriquée sur place à partir de matériaux existants. Elle permet une homogénéisation du lit de grains et évite ainsi un séchage par couche qui pourrait dégrader les graines situées dans la couche inférieure si elles sont exposées trop longtemps à un écoulement d'air chaud en attendant que celles du dessus sèchent.



FIGURE 3 – Illustration de la vis sans fin

L'ensemble de ces équipements a été conservé pour trouver notre solution de séchoir dans l'optique de

les coupler à d'autres composants. Cela permet de proposer une solution plus économique et de recycler le matériel pré-existant.

Sources d'énergie disponibles :

Pour ce qui est des sources d'énergie présentes naturellement à la ferme, nous en avons identifiées plusieurs :

- L'énergie solaire
- La biomasse
- L'électricité
- L'énergie éolienne

Les formes d'énergies semblent nombreuses au premier abord mais une sélection s'est rapidement opérée. En effet, compte tenu du climat de Mirecourt qui n'est pas forcément favorable, et des périodes de séchage qui peuvent être tardives, l'utilisation de l'énergie solaire avec l'installation de panneaux solaires n'aurait pas été rentable. Effectivement, la mise en place d'une telle installation pour un séchoir qui sèche des volumes de grains relativement faibles aurait été plutôt démesurée mais aussi très coûteuse même si les panneaux solaires auraient pu être utilisés pour d'autres applications à la ferme en parallèle. De même, l'énergie éolienne, qui aurait permis de produire de l'électricité propre pour alimenter une résistance, s'est aussi inscrite comme une technique trop onéreuse. Pour ce qui est de la combustion de biomasse avec les nombreux déchets organiques créés par l'agriculture et l'élevage du bétail, les dispositifs nécessaires pour mettre en place cette solution nous ont semblé trop complexe en raison de l'humidité de cette biomasse qu'il aurait été difficile de brûler. De plus, nos encadrants souhaitaient éviter d'utiliser la combustion comme moyen de chauffage de l'air.

Par ailleurs, il a aussi été évoqué la possibilité d'exploiter la chaleur du système de refroidissement du lait. En effet, Mirecourt, possédant une centaine de vaches, traite et refroidit le lait pour le conserver. Cela se fait à l'aide d'un système comportant un échangeur, nous avons donc envisagé de récupérer cette chaleur "inutile", et de la ramener vers notre dispositif de séchage. Cependant, la distance entre l'emplacement de la traite et celui du séchoir, source de pertes de charge et de pertes thermiques, nous ont rapidement poussé à évincer cette idée.

C'est ainsi, que nous nous sommes orientés vers la source d'énergie qui nous a paru la plus accessible : l'électricité. L'idée a donc été de mettre en place l'installation d'une résistance électrique entre le ventilateur et le caisson pour chauffer l'air.

Remarque : l'idée de réaliser un dispositif permettant de sécher les grains puis de récupérer la chaleur excédentaire pour éventuellement produire de l'eau chaude a été évoquée. Cependant, en raison de la complexité de ce projet, du temps sur lequel celui-ci s'est déroulé et de l'agencement des bâtiments de la ferme, il nous a semblé peu judicieux d'opter pour ce type de solution. En effet, l'installation d'un échangeur, au-dessus ou à côté du caisson, relié à des conduites de robinet, dans lesquelles de l'eau circule nous a paru trop onéreuse par rapport à la rentabilité du système. D'autant plus que l'air ne peut dépasser une température de 35 °C dans le séchoir

3 Dimensionnement

Comme cela a été dit ci-dessus, nous avons fait le choix d'opter pour une résistance électrique pour chauffer l'air extérieur. Cependant, pour mettre en place cette solution, il a été nécessaire d'analyser plus en détails l'ensemble de l'installation et de comprendre les dynamiques de séchage mises en jeu afin d'optimiser la consommation énergétique en termes de puissance consommée et de temps d'utilisation du séchoir.

3.1 Tests du réchauffeur

Une résistance de 18 kW étant déjà disponible à l'INSA, nous avons pu commencer cette partie de dimensionnement par des tests sur celle-ci. Pour cela, nous avons utilisé le banc d'essai de l'INSA ci-dessous.

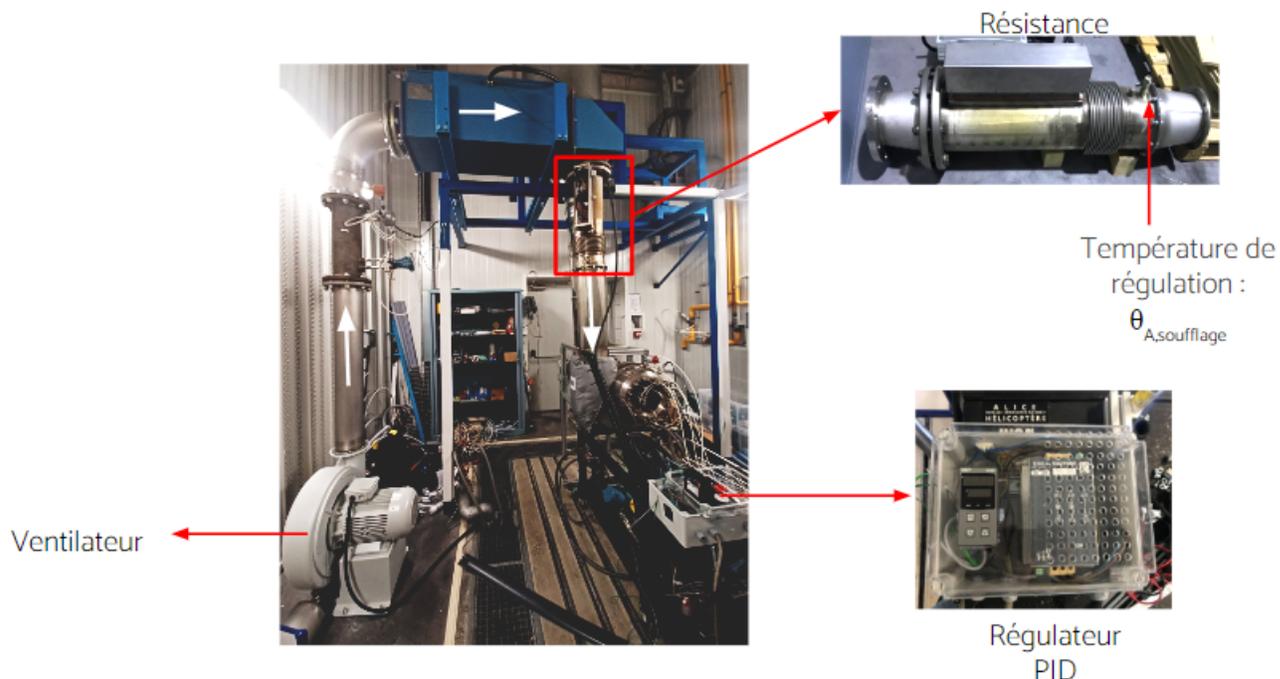


FIGURE 4 – Illustration du banc d'essai

Ce dernier est composé d'un ventilateur à débit réglable qui souffle de l'air dans les conduites jusqu'au réchauffeur (résistance de 18 kW). La résistance est contrôlée par une boucle de régulation PID qui compare une température du consigne, $\theta_{A,consigne}$, à la température de l'air mesurée en sortie de réchauffeur, $\theta_{A,soufflage}$. L'intérêt d'un tel régulateur est de pouvoir faire varier la puissance de la résistance. En imposant la température souhaitée, le gradateur de puissance, associé à la boucle de régulation, module la puissance électrique envoyée à la résistance. Cela a un impact direct sur la consommation électrique. En effet, en assimilant la puissance électrique à la puissance de chauffe⁶) de la résistance, nous voyons bien que la puissance dépend directement de la différence de température de l'air en amont et en aval de la résistance.

$$P_{elec} \approx P_{chauffe} = \dot{m}_{air} C_p (\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}) \quad (1)$$

Ainsi, si le delta de température nécessaire au séchage diminue, la puissance électrique aussi et par conséquent il en est de même pour la consommation électrique de l'installation. Il est donc primordial de vérifier que la boucle de régulation en température soit fonctionnelle si nous souhaitons optimiser la consommation énergétique de l'installation. De plus, il est aussi intéressant de savoir quelles sont les gammes de température accessibles dans l'installation puisqu'il s'agit d'un critère qui conditionne le séchage 3.4.

Régulation de l'installation :

Nous avons donc dans un premier temps cherché à vérifier que le système se pilotait bien. Pour cela, l'idée a été de mesurer le courant dans l'installation à l'aide de pinces ampèremétrique pour différentes températures

6. cohérents d'après nos résultats expérimentaux 17

de consigne et donc pour différents écarts de température. Le courant mesuré sur une nous a directement permis d'obtenir la puissance électrique mise en jeu sur cette phase à l'aide de la formule suivante :

$$P_{elec} = \sqrt{3}UI\cos(\varphi) \quad (2)$$

Pour un débit de $\dot{m}_{air} = 0.2m^3/s$, nous avons obtenu le graphe suivant.

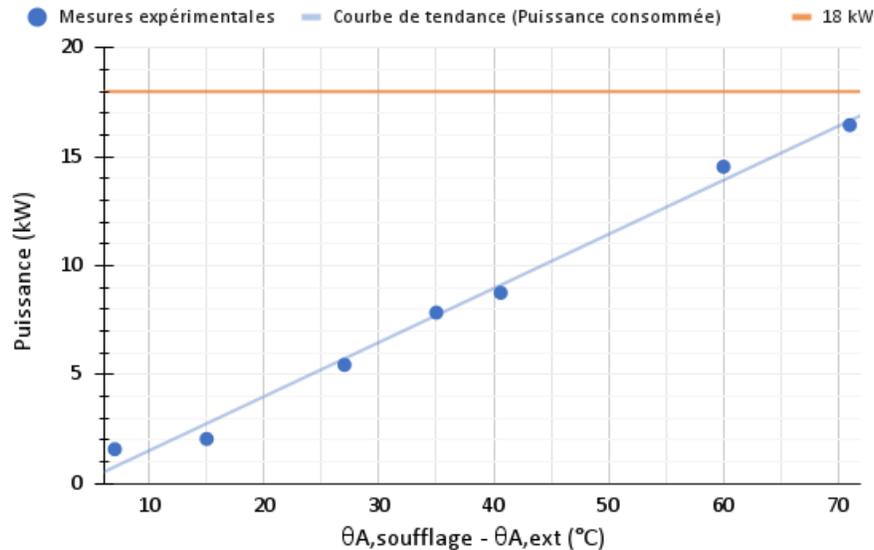


FIGURE 5 – Puissance électrique consommée par l'installation en fonction de $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$ à $\dot{m}_{air} = 0.2 m^3/s$

Nous remarquons bien que le puissance électrique consommée augmente de manière linéaire avec l'écart de température $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$. Ainsi, nous pouvons conclure que la résistance se pilote bien puisque nous pouvons faire varier le delta de température dans l'installation en jouant sur cette puissance. Par ailleurs nous remarquons aussi que cette dernière ne dépasse jamais les 18 kW. Ce résultat est rassurant puisque la puissance maximale qu'il est possible d'installer sur le réseau électrique de la ferme est de 22 kW pour le ventilateur (2.2 kW) et le réchauffeur.

Plage de fonctionnement du réchauffeur :

Enfin, pour déterminer les températures atteignables dans l'installation nous avons utilisé le logiciel informatique Labview. Sur l'interface de ce dernier nous avons pu, pour différents débits d'air, mesurer les écarts de température maximum entre l'extérieur et l'air soufflé dans l'installation qu'il est possible d'obtenir avec la résistance de 18 kW. Ces prises de mesures nous ont permis de tracer la plage de fonctionnement maximale du réchauffeur entourée en bleu sur le graphique suivant.

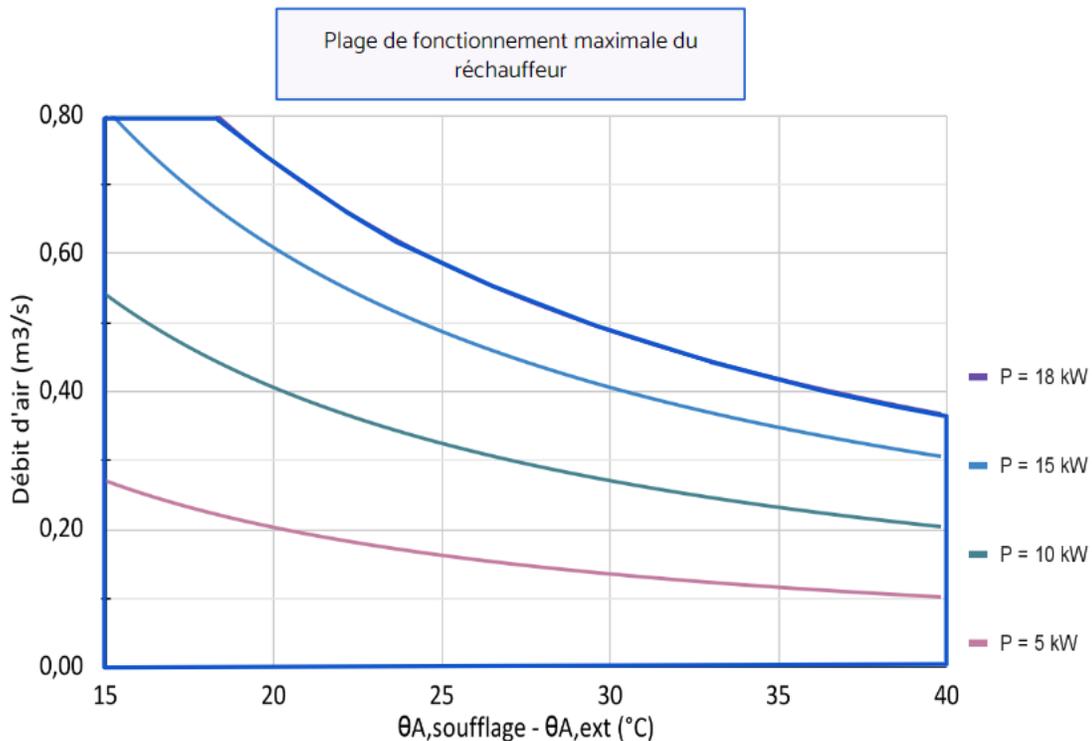


FIGURE 6 – Débit d'air en fonction de $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$

Néanmoins, il est important de noter que cette plage de fonctionnement est en réalité réduite. En effet, nous avons tout d'abord une contrainte de température dans l'installation. Il est impossible de dépasser les 35 °C dans le caisson pour ne pas détériorer les grains. Ainsi, en fonction de la température extérieure de l'air nous ne pourrions pas toujours atteindre le delta de température maximale. Par exemple, si $\theta_{A,ext} = 10$ °C, nous savons que l'écart de température $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$ sera au maximum de 25°C. Cela empêche donc d'être dans la partie grisée de la plage de fonctionnement ci-dessous 7.

Connaissant l'écart de température maximal, nous pouvons savoir si celui-ci est atteignable en fonction du débit d'air dans l'installation et à quelle puissance de fonctionnement. Nous remarquons par exemple que pour un débit de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ nous pouvons atteindre un delta de température de 25 °C pour une puissance légèrement supérieure à 15 kW (isopuissance bleue). En revanche, si nous sommes à un débit d'air de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ nous remarquons qu'il est possible d'avoir au maximum un delta de température de 21 °C environ pour la puissance maximale de 18 kW.

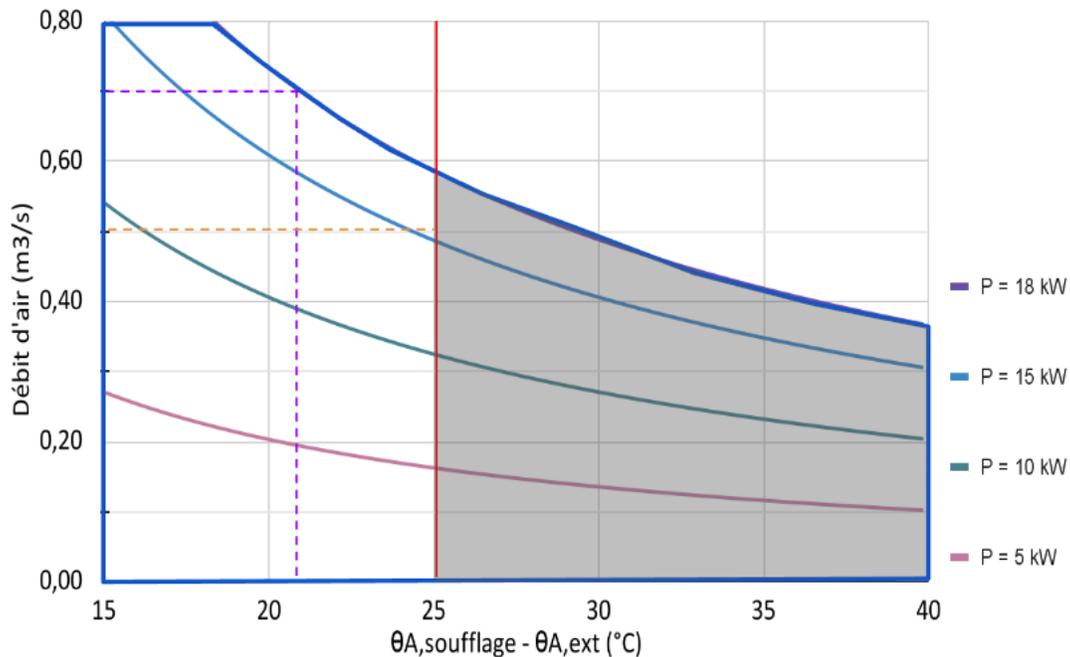


FIGURE 7 – Réduction de la plage de fonctionnement

Ainsi, le débit dans le séchoir et les conditions extérieures conditionnent directement les températures et la puissance qu'il est possible d'atteindre dans l'installation. Il est donc nécessaire de connaître la température extérieure de l'air ainsi que le débit d'air dans le système.

Remarque : A ce stade de l'étude nous pouvons donc penser que pour limiter la consommation électrique, il serait judicieux de travailler à un débit faible pour avoir des plus grands écarts de température à des puissances moindre. Cependant, nous verrons dans la partie explicative sur le fonctionnement du séchage 3.4 qu'il est nécessaire d'avoir un débit suffisamment élevé pour maximiser les échanges et donc pour favoriser le séchage.

3.2 Point de fonctionnement

Comme nous venons de l'expliquer, le débit d'air dans l'installation détermine directement les gammes de température et de puissance atteignables dans le séchoir. Ainsi, dans dans notre projet, il est important de déterminer le débit d'air réel qui va circuler dans le séchoir, pour ensuite avoir l'écart de température maximal qu'il sera possible d'obtenir dans le système. De ce fait, il est crucial de quantifier les pertes de charge du circuit⁷.

Nous pouvons recenser différentes pertes de charges dans le séchoir :

7. Les pertes de charge correspondent à une réduction de pression du fluide lorsqu'il s'écoule à travers une installation hydraulique

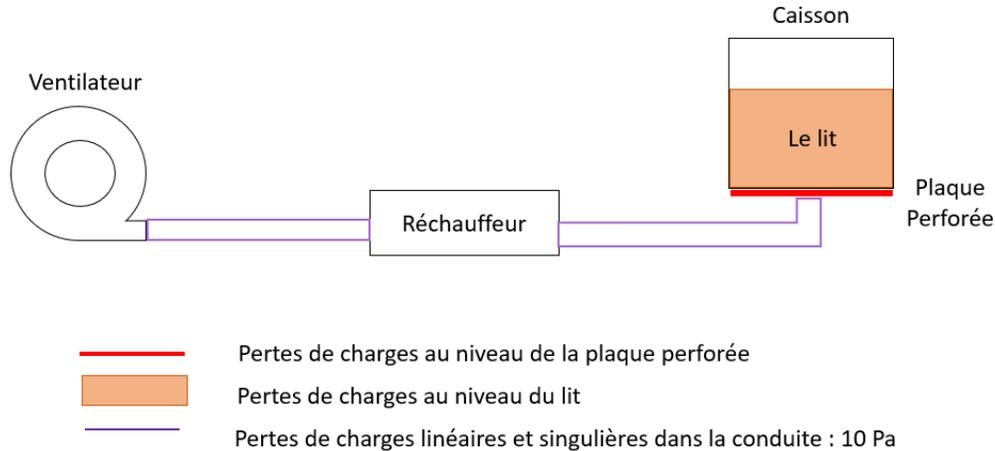


FIGURE 8 – les pertes de charges dans le séchoir

Les premières pertes de charges ont lieu dans les conduites entre le ventilateur et le caisson. La longueur des conduites étant relativement faible, pour la suite de notre étude nous considérons les pertes de charge dans ces dernières négligeables. En effet, une première approximation de ces pertes avait donné un résultat d'environ 10 Pa (calculé pour le débit maximal du ventilateur : $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ et pour une longueur de conduite surestimée à 10 m). Ensuite, l'air passe par une plaque perforée en entrant dans le caisson qui permet de maintenir les grains dans le caisson sans qu'ils passent dans les conduites.



FIGURE 9 – Plaque perforée présente dans le caisson

Celle-ci engendre nécessairement des pertes de charge à cause des frottements de l'air lors de son passage dans les trous de la plaque. Cependant, ayant peu d'informations sur le nombre de trous ainsi que sur la rugosité de cette plaque, il est difficile d'estimer les pertes de charges dans cette zone du séchoir⁸. Enfin, il y a des pertes de charges dans la couche de grains qui est considérée comme un lit fixe⁹. Ce sont ces pertes de charges que nous avons cherché à estimer car ce sont celles qui ont le plus d'importance.

Pour les quantifier nous avons utilisé l'équation d'Ergun, qui est une relation empirique utilisée pour modéliser le comportement des fluides à travers un lit fixe de particules solides, dans notre cas les grains. Cette équation est la suivante :

$$\Delta P = H \left(\frac{150 \cdot (1 - \epsilon)^2 \cdot \mu_{air}}{\epsilon^3 \cdot d_p^2 \cdot S_{caisson} \cdot \psi^2} \cdot Q_{v,air} + \frac{1,75 \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_{air}}{\epsilon^3 \cdot d_p \cdot S_{caisson} \cdot \psi^2} \cdot Q_{v,air}^2 \right) \quad (3)$$

8. L'idée est de déterminer ces pertes de charges par des mesures expérimentales (cf. Instrumentation3.3)

9. Mélange de grains et d'air sans que les grains soient en suspension

Dans l'équation d'Ergun, ϵ traduit la porosité. Cette dernière représente le rapport du volume occupé par le vide entre les particules solides par rapport au volume total du lit, généralement exprimée en pourcentage.

Dans le contexte de l'équation, la valeur de cette porosité influence grandement nos calculs de pertes de charges. En effet, une valeur faible indique un lit de particules dense, c'est-à-dire peu de vide entre ces dernières, ce qui peut entraîner une plus grande résistance au passage du fluide à travers le lit et donc des pertes de charge plus élevées. À l'inverse, une valeur élevée de la porosité décrit un lit de particules moins dense avec une plus grande fraction de vide, laissant l'air passer plus librement, et entraînant donc des pertes de charge moins importantes.

Il est important de noter que la porosité du volume de grains peut varier en fonction des conditions de fonctionnement du lit fixe, telles que la vitesse du fluide, la taille et la forme des particules, ainsi que les propriétés du fluide. Par conséquent, il est nécessaire d'adapter cette valeur de porosité, en fonction de nos conditions, mais surtout en fonction du type de graines pris en compte dans l'estimation des pertes de charge.

Dans le but d'obtenir une valeur précise de porosité valable pour notre cas (étude du sarrasin), nous avons réalisé une manipulation simple. Nous avons versé de l'eau dans un certain volume de sarrasin. Cette eau vient combler les interstices entre les grains comme ce serait le cas avec l'écoulement d'air. Par conséquent, le volume d'eau nous sert ici à quantifier le volume de vide, en remplissant tout l'espace où le grain ne se trouve pas. Nous avons répété plusieurs fois cette expérience pour réduire l'incertitude, puis calculé le rapport entre le volume d'eau moyen mesuré et le volume total du lit. Cela nous a donné une valeur expérimentale de la porosité du sarrasin d'environ $\epsilon=0,34$.



FIGURE 10 – Manipulation de détermination de la porosité

Par ailleurs, dans cette relation, la chute de pression peut être considérée comme résultant de la dissipation de l'énergie cinétique du fluide. Nous pouvons distinguer deux termes contribuant à cette perte de pression : les contributions des effets visqueux et inertiels.

Le premier terme, qui est une contribution laminaire, représente les pertes de charge dues à la friction des particules de l'air avec les particules solides, c'est-à-dire dues aux frottements visqueux influencés par la porosité notamment. Nous pouvons remarquer qu'il est proportionnel à la viscosité du fluide, au débit d'air et au diamètre des particules, et inversement proportionnel à la porosité. Cela signifie que plus la viscosité ou bien le débit sont élevés, ou encore plus le diamètre des particules ou la porosité sont faibles, plus les pertes de charge dues à la friction seront importantes.

De manière plus générale, lorsque le fluide s'écoule à travers le lit fixe, des frottements avec les grains viennent freiner son parcours. Ce sont ces pertes de charge qui sont représentées par le premier terme.

Le deuxième terme représente quant à lui les pertes de charges dues à la turbulence de l'écoulement. Il est proportionnel à la densité du fluide, au débit d'air, et est inversement proportionnel à la porosité. Cela signifie que plus la densité du fluide ou le débit sont élevés, ou plus la porosité est faible, plus les pertes de charge dues à la turbulence seront importantes. Lorsque le fluide s'écoule, il rencontre une contrainte au niveau de la section de passage. En effet, la présence des grains réduit la section de passage de l'air et freine donc son

parcours. Cela se traduit par une perte d'énergie sous forme de perte de charge. Plus la densité des particules solides est élevée, plus la résistance est importante donc plus les pertes de charge seront conséquentes

Enfin, la combinaison de ces deux termes permet de modéliser de manière plus précise les pertes de charge dans un lit fixe, en prenant en compte à la fois les interactions visqueuses (la première contributions) et inertielles (la deuxième contribution) entre le fluide et les particules du lit fixe. Elle permet de modéliser de manière plus complète et réaliste les interactions complexes entre le fluide et les particules solides dans le lit, ce qui peut être important pour limiter les erreurs d'estimations et ainsi prédire au mieux le comportement de fluide.

Pour faciliter la résolution de l'équation 3, nous avons émis plusieurs hypothèses :

- Nous considérons les grains comme sphériques, le paramètre de sphéricité $\psi = 1$ n'apparaît donc plus dans l'équation d'Ergun.
- Nous considérons les paramètres liés à l'air (ρ_{air} , μ_{air}) comme constants même s'ils varient en fonction de la température.

L'équation 3 définie plus tôt devient dans notre cas :

$$\Delta P = H(1045 \cdot Q_{v,air} + 2721 \cdot Q_{v,air}^2) \quad (4)$$

Dans le but de déterminer le débit réel, nous avons superposé la courbe caractéristique du circuit obtenue grâce à cette équation d'Ergun, à la courbe de fonctionnement du ventilateur fournie par le constructeur. L'intersection de ces deux courbes représente le point de fonctionnement du circuit couplé au ventilateur.

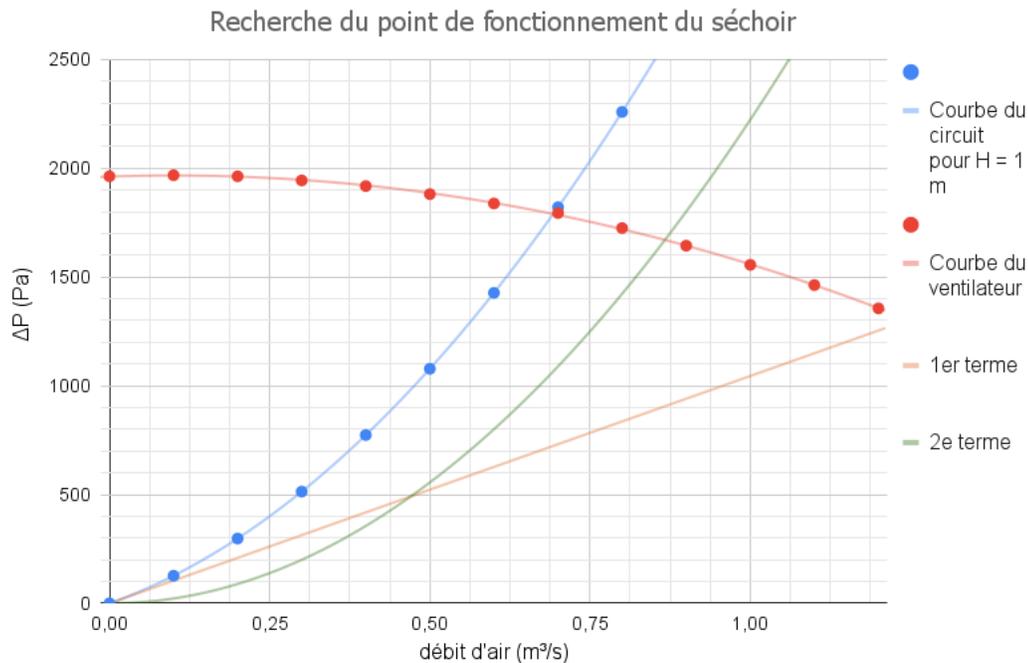


FIGURE 11 – Courbe du ventilateur et du circuit du séchoir

De plus, nous observons aussi que les deux termes de l'équation d'Ergun ont un poids relativement important dans le calcul des pertes de charges. En effet, en traçant d'un côté uniquement les pertes laminaires (en orange), de l'autre les pertes turbulentes (en vert) et finalement les pertes de charge totales (i.e. la somme des deux), nous remarquons que les deux termes influencent grandement la valeur de ces pertes. Cela traduit le fait que nous sommes dans le cas d'un écoulement en régime transitoire, entre la laminarité et la turbulence, et donc que les pertes de charges sont régies par les paramètres caractéristiques de ces deux régimes. Ces

dernières seront donc sensibles aux interactions visqueuses (première contributions) et inertielles (deuxième contribution).

L'intersection des courbes, pour une hauteur de $H=1\text{m}$, nous donne un débit maximum d'air égal à $0.70\text{ m}^3/\text{s}$. D'après la plage de fonctionnement de notre résistance, présentée dans la partie précédente, nous pouvons obtenir une différence de température de 21 °C maximum pour une puissance de 18 kW . Néanmoins, il est important de rappeler que ces valeurs restent approximatives. En effet, puisque nous avons estimé qu'une partie des pertes de charges dans le séchoir, le débit est ici surestimé. Cependant, ce résultat permet déjà d'affiner notre étude puisque nous savons à présent que nous aurons au maximum ce débit d'air dans l'installation.

Remarque : Pour trouver le point de fonctionnement, nous avons considéré une hauteur de lit de 1 m . Cependant, c'est un facteur qui va aussi influencer le débit d'air dans l'installation puisque les pertes de charges sont directement proportionnelles à cette hauteur dans l'équation d'Ergun3. Lorsque la hauteur augmente, les pertes de charge également ce qui déplace le point de fonctionnement vers la gauche du graphique et implique un débit plus faible dans l'installation (cf. Point de fonctionnement en fonction de la hauteur C). Ainsi, lors des mesures expérimentales à la ferme, il serait intéressant de créer des bases de données pour différentes hauteurs de grains afin de déterminer la hauteur optimale pour le séchage.

3.3 Instrumentation

Afin de poursuivre le dimensionnement de notre proposition de séchoir, il a fallu penser à son instrumentation. En effet, pour obtenir des informations en certains points de l'installation, plusieurs capteurs ont été judicieusement choisis. Pour certains d'entre eux leur utilité dépend directement du fonctionnement du séchage expliqué dans la partie suivante 3.4.

Un schéma détaillé du séchoir avec les différents capteurs à installer a été réalisé ci-dessous :

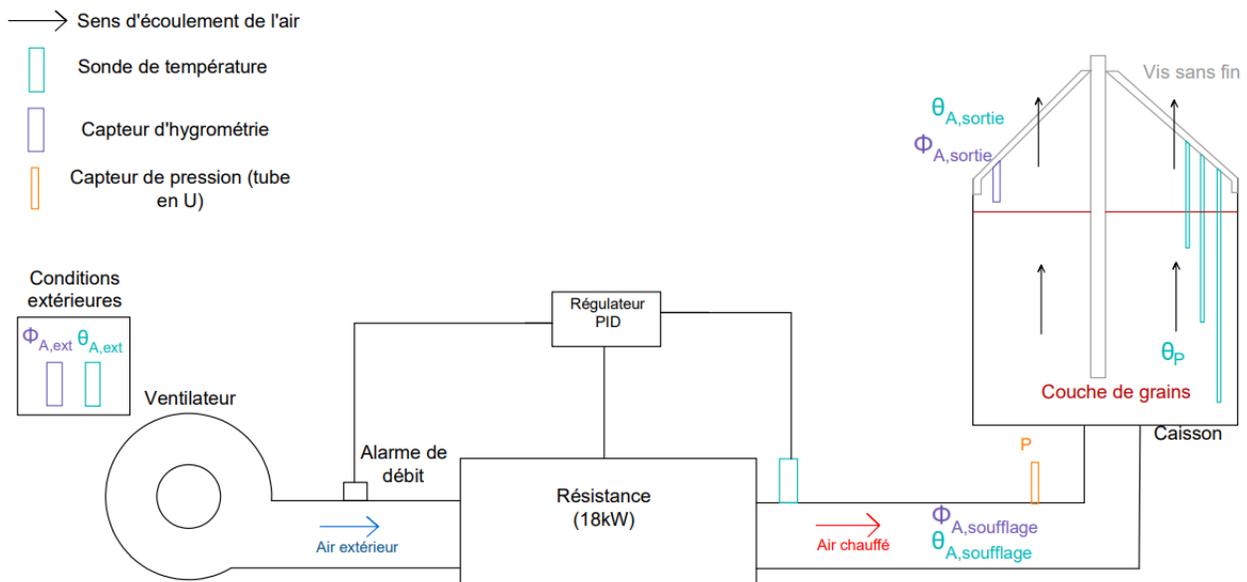


FIGURE 12 – Schéma de l'installation instrumentée

Tous les éléments du séchoir sont regroupés dans le tableau suivant :

Matériel	Utilité	Installation	Disponibilité
Ventilateur	Souffle l'air dans le séchoir	X	Ferme
Résistance	Chauffe l'air	A fixer sur la bride du ventilateur et au caisson	INSA
Caisson	Contient les grains	X	Ferme
Vis sans fin	Homogénéise la couche de grains	X	Ferme
Régulateur	Régule la puissance de la résistance à partir d'une température de consigne	A positionner proche du séchoir	INSA
Sonde de température (régulation)	Mesure la température de l'air, $\theta_{A,soufflage}$, en sortie de résistance	A fixer en sortie de réchauffeur ⁴	INSA
Alarme de débit	Coupe la résistance en l'absence de débit (système de sécurité)	A relier au régulateur et à fixer en sortie de ventilateur (trou à percer dans la conduite)	INSA
Sonde de température (extérieure)	Mesure de la température extérieure de l'air, $\theta_{A,ext}$	A fixer sur un mur ou à suspendre	A acheter
Hygromètre (extérieure)	Mesure l'hygrométrie de l'air extérieur, $\phi_{A,ext}$	A fixer sur un mur ou à suspendre	A acheter
Capteur de pression (tube en U)	Mesure une différence de hauteur donc une perte de charge	1 extrémité à fixer dans la conduite en amont du caisson, l'autre extrémité à l'extérieur le long du caisson	INSA
3 sondes de température (caisson)	Mesure la température du lit à des profondeurs différentes (110, 75 et 45 cm)	A fixer à la potence de la vis sans fin	A acheter
Hygromètre (sortie de séchoir)	Mesure l'hygrométrie de l'air en sortie de séchoir, $\phi_{A,sortie}$	A fixer sur la potence de manière à ce que le capteur se trouve à l'intérieur du caisson juste au-dessus des grains	A acheter

Remarque : Pour nous procurer les différents instruments de mesure nous avons contacter les entreprises

Corame et AOIP. Cependant, n'ayant toujours pas eu de retour sur le montant des équipements au moment de la rédaction du rapport, l'instrumentation sera finalisée par la professeur encadrant.

3.4 Fonctionnement séchage

L'instrumentation définie plus haut n'a pas été choisie au hasard. En effet, cette dernière résulte des phénomènes qui interviennent au cours du séchage, c'est pourquoi les étapes du séchage sont présentées dans cette partie.

3.4.1 Grandeurs intervenants dans le séchage

Dans un premier temps il est nécessaire de définir l'ensemble des grandeurs¹⁰ et des notions qui interviennent au cours du séchage, aussi bien pour l'air humide¹¹ que pour les grains.

GRANDEURS POUR L'AIR :

- **pression partielle de vapeur** : $P_{v,A}$ pression de la vapeur si elle occupait tout l'espace, contribution de la vapeur à la pression totale du mélange air sec/vapeur d'eau.
- **pression de vapeur saturante** : $P_{v,sat}$, pression à laquelle la vapeur d'eau est en équilibre thermodynamique avec son état condensé. Si la pression partielle de vapeur d'eau devient plus grande que la pression de vapeur saturante, il y a un phénomène de condensation.
- **humidité absolue** : x_v , quantité de vapeur d'eau présente dans l'air par rapport à la quantité d'air sec.
- **humidité relative/hygrométrie** : ϕ_v , contenu en vapeur d'eau de l'air humide par rapport à sa capacité maximale à en contenir dans des conditions définies.

$$\phi_{v,A} = \frac{P_{v,A}}{P_{v,sat}} \quad (5)$$

- **température sèche** : correspond à la température de l'air mesurée avec un thermomètre classique.
- **température humide** : température de l'air mesurée avec un thermomètre au bout duquel de l'eau s'évapore. (Puisque l'évaporation de l'eau nécessite un apport de chaleur de la part de l'air, la température humide est plus faible que la température sèche.)

GRANDEURS POUR LES GRAINS :

- **teneur en eau (base sèche)** : X , masse d'eau des grains par rapport à la masse de matière sèche des grains.
- **teneur en eau (base humide)** : W , masse d'eau des grains par rapport à la masse totale. C'est cette définition de teneur en eau qui est utilisée pour définir la teneur en eau des grains. Il est possible de passer d'une définition à l'autre grâce à la formule suivante :

$$X = \frac{W}{1 - W} \quad (6)$$

10. Toutes les grandeurs et leurs unités sont répertoriées en annexe

11. L'air humide est un mélange de vapeur d'eau et d'air sec

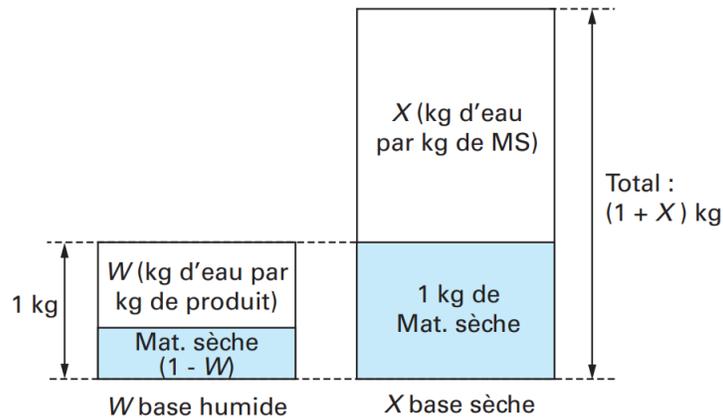


FIGURE 13 – Représentation des deux teneurs en eau (Source : Techniques de l'ingénieur)

- **eau libre** : eau absorbée en surface qui circule dans le produit, c'est celle qui s'évapore en premier.
- **eau liée** : eau fixée aux molécules et aux parois cellulaires¹², nécessite un apport d'énergie plus important pour s'évacuer (enthalpie de désorption¹³).
- **activité de l'eau** : a , degré hygrométrique des grains, caractérise la disponibilité en eau libre dans les grains.

$$a = \frac{P_{v,p}}{P_{v,sat}} \quad (7)$$

3.4.2 Étapes du séchage

Le séchage est une technique de déshydratation qui permet de retirer une partie d'un solvant d'un corps par processus de vaporisation. Il consiste en un couplage entre transferts de chaleur et transferts de matière puisqu'il faut apporter de l'énergie pour que l'eau puisse se vaporiser et par conséquent quitter les grains. Dans notre cas, le séchage est un séchage par entraînement, c'est-à-dire que le produit à sécher est soumis à un écoulement d'air sec chauffé.

Ce séchage se divise en 3 périodes au cours desquelles la température des grains ainsi que leur pression de vapeur évoluent.

Il est important de noter que, tout au long du séchage, un équilibre thermique et hydrique se crée. Ainsi, les propriétés thermodynamiques de l'air en sortie de séchoir sont égales à celle des grains. Nous avons donc $\theta_p = \theta_{A,sortie}$ et $P_{v,p} = P_{v,Asortie}$

Période 0 :

La première période, relativement courte, consiste en une **mise en température** des grains. Lorsqu'ils sont introduits dans le séchoir, ils sont souvent froids du fait de leur récolte tardive qui peut aller jusqu'à octobre. L'écart de température avec l'air est important et favorise par conséquent les transferts thermiques. Ainsi, nous observons une augmentation de la température des grains, θ_p , au cours de cette période 0.

Remarque 1 : cette période étant très rapide, elle est très souvent négligeable.

12. A cause de leur polarité électrique (forte charge négative en son centre et positive aux extrémités), les molécules d'eau se lient aux autres surfaces chargées telles que les biomolécules.

13. désorption : détachement des molécules absorbée par une surface

Remarque 2 : dans le cas où les grains auraient une température supérieure à celle de l'air, ils commenceraient par se refroidir.

Période 1 :

Au cours de cette deuxième période, c'est l'**eau libre** qui est évacuée des grains.

Deux hypothèses principales sont faites sur cette période :

- L'activité de l'eau dans les grains est maximale ($a_w = 1$) tout au long de cette étape de séchage.
- La température du grain est considérée constante.

Le première hypothèse traduit le fait qu'il y a de l'eau présente à la surface des grains tout au long de cette période. Nous sommes à dans un état dit saturé. De plus, en raison de l'équilibre qui se produit entre les grains humides et l'air durant le séchage, l'air en sortie de caisson est lui aussi à la saturation, c'est-à-dire $\phi_{v,Asortie} = 100\%$. La pression de vapeur saturante étant la même pour les grains et l'air en sortie de séchoir, les équations 5 et 7 nous donnent directement $P_{v,p} = P_{v,Asortie} = P_{v,sat}$.

La deuxième hypothèse, quant à elle, exprime le fait que toute l'énergie thermique apportée par l'air ne chauffe pas les grains mais est uniquement utilisée pour permettre à l'eau libre de s'évaporer. Cela se traduit notamment dans le bilan d'énergie suivant :

$$\dot{Q} = hS(\theta_{A,soufflage} - \theta_p) = \dot{m}_e L_{vap} \quad (8)$$

Le premier terme de cette équation correspond aux échanges thermiques convectifs. La surface S correspond à la surface de contact entre les grains et l'air. Elle dépend donc de chaque type de graines. Cet échange est aussi caractérisé par un coefficient de transfert convectif, h , qui quantifie le transfert de chaleur au sein de l'air en mouvement autour des graines. Il peut être déterminé à partir du nombre de Nusselt, N_u , qui représente le rapport entre les transferts convectifs et conductifs au niveau d'un fluide et d'un solide. Il peut s'exprimer de la manière suivante en utilisant les corrélations empiriques de Ranz-Marshall :

$$N_u = \frac{hL}{\lambda} = 2 + 1.8R_e^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Le deuxième terme de l'équation 8 représente quant à lui le débit d'eau évaporé au cours du temps. Ainsi, nous retrouvons bien à travers ce bilan que toute la chaleur apportée par les échanges convectifs entre l'air et les grains permet à l'eau de s'évaporer.

Par ailleurs, ce bilan d'énergie est aussi lié à un bilan de matière :

$$\dot{m}_e = k_p S (P_{v,p} - P_{v,Asoufflage}) \quad (10)$$

Cette équation montre que l'évaporation d'un certain débit d'eau est directement lié à un écart de pressions de vapeur entre l'air soufflé dans le caisson et les grains. Ce débit est également dépendant d'un coefficient de transfert de matière k_p relatif à un écart de pression. Ce dernier caractérise les transferts de masse et est relié au coefficient des transfert convectif h par la corrélation qui suit :

$$\frac{h}{k_p L_{vap}} = 65 Pa/^\circ C \quad (11)$$

Nous remarquons grâce à ces deux bilans que pour que le séchage ait lieu, il faut nécessairement un déséquilibre aussi bien température qu'en pression de vapeur (ou hygrométrie) entre l'air chaud soufflé vers les graines et les graines elles-mêmes.

De plus, afin de maximiser les échanges, il est aussi important de jouer sur les coefficients de transfert convectif et de matière, la surface S étant prédéterminée par les grains. En effet, nous remarquons que le nombre de Nusselt dépend directement du nombre de Reynolds 9. Ce dernier étant étroitement lié à la vitesse de l'air dans l'installation par la relation ci-dessous 12, nous comprenons que pour maximiser le h et donc le k_p d'après 11, il est important d'avoir une vitesse d'écoulement d'air assez élevée dans l'installation et par conséquent un débit également important.

$$R_e = \frac{\rho_{air} V_{air} D}{\mu_{air}} \quad (12)$$

Cela rejoint donc la remarque effectuée dans la partie sur les tests du réchauffeur 3.1.

Remarque 1 : sur cette période les grains se comportent ainsi comme un thermomètre humide, nous supposons donc que $\theta_p = \theta_h$.

Remarque 2 : cette période a lieu uniquement s'il y a de l'eau libre à la surface des grains sinon nous nous trouvons directement dans la période 2.

Remarque 3 : il est important de comprendre que ce sont les écarts des propriétés thermodynamiques entre l'air soufflé dans le caisson et les grains qui dominent le séchage mais que l'air en sortie de séchoir possède les mêmes propriétés que les grains suite à l'équilibre thermique et hydrique qui se crée durant le séchage. C'est pourquoi il est important de chauffer l'air soufflé pour augmenter sa température et diminuer son hygrométrie donc sa pression de vapeur.

Période 2 :

Enfin, la dernière période du séchage permet d'évacuer l'eau liée. Au cours de celle-ci, nous faisons l'hypothèse $a < 1$. Comme cela a été évoqué 3.4.1, l'eau liée étant fixée au niveau des parois cellulaires des cellules du grain, il est nécessaire durant cette période que l'eau se diffuse jusqu'à la surface des graines pour ensuite être évaporée. Ainsi, le bilan d'énergie au cours de ce processus devient le suivant :

$$\dot{Q} = hS(\theta_{A,soufflage} - \theta_p(t)) = \dot{m}_e L_{vap} + mC_p \frac{d\theta_p(t)}{dt} \quad (13)$$

Nous constatons qu'un terme en plus intervient à gauche du bilan. Celui-ci représente la diffusion de l'eau du centre des grains vers la surface et ainsi la montée en température des grains.

Le bilan de matière reste cependant inchangé :

$$\dot{m}_e = k_p S (P_{v,p}(\theta_p) - P_{v,air}) \quad (14)$$

En résumé, la chaleur apportée par l'air sur cette période sert à deux choses :

- Augmenter la température du grain jusqu'à atteindre $\theta_{A,soufflage}$ en fin de séchage pour permettre le transfert de masse d'eau du centre du grain jusqu'à sa surface.
- Évaporer cette eau une fois qu'elle atteint la surface.

En fin de période 2, la température et la pression de vapeur des grains atteignent celles de l'air soufflé. Cela implique la fin du séchage puisqu'il n'existe plus de déséquilibre indispensable au processus de séchage.

Résumé schématique des étapes du séchage :

Les graphiques suivants sont schématiques et servent uniquement à illustrer les propos évoqués concernant les différentes étapes du séchage. La trajectoire de la température des grains en période 0 pour la température n'est par exemple pas linéaire de même que celle en période 2. Un graphique plus représentatif de la réalité et disponible en annexe 20.

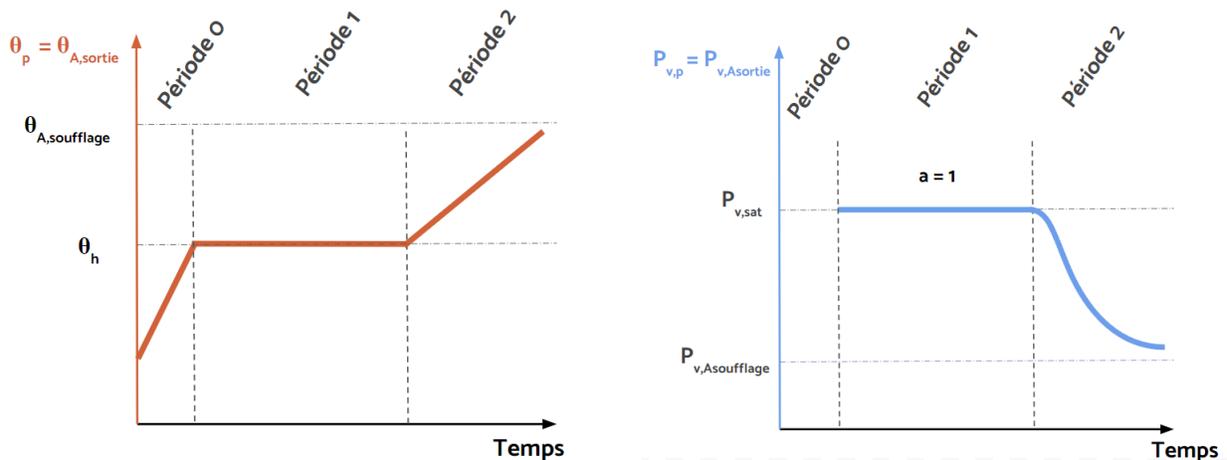


FIGURE 14 – Évolution schématique de la température des grains et de leur pression de vapeur au cours des périodes de séchage

3.5 Modélisation du temps de séchage

Dans cette partie, nous allons montrer les recherches préliminaires qui ont été effectuées pour parvenir à modéliser le temps de séchage et donc à améliorer le consommation énergétique du séchoir.

Tout d'abord, il est crucial de savoir dans quelle période de séchage nous nous trouvons car l'énergie nécessaire pour sécher ne sera pas la même, et les bilans valables changeront aussi. Nous pouvons utiliser les résultats des différentes périodes donnés dans la partie précédente ainsi que les courbes de sorption pour modéliser le temps de séchage restant.

Les isothermes de désorption et d'adsorption sont des courbes mettant en jeu :

- en abscisse : l'activité de l'eau du grain (a)
- en ordonnée : la teneur en eau du grain (X [% de matière sèche])

L'activité de l'eau du grain peut être remplacée par l'humidité relative de l'air en sortie du séchoir, cette dernière étant plus facile à mesurer. En effet, nous savons qu'en sortie du séchoir nous sommes à l'équilibre hydrique. De plus, les différentes caractéristiques des grains à l'intérieur du réservoir de séchage sont considérées comme homogènes car le volume est relativement peu conséquent, d'autant plus que l'ensemble est brassé par une vis sans fin, unifiant le tout.

Nous parlons d'isotherme d'adsorption si la courbe a été déterminée de façon expérimentale à partir d'un produit sec, et de courbe de désorption si le produit de départ est saturé en eau.

Sur la figure suivante, il est possible d'observer les différents trajets lors de la désorption ou de l'adsorption.

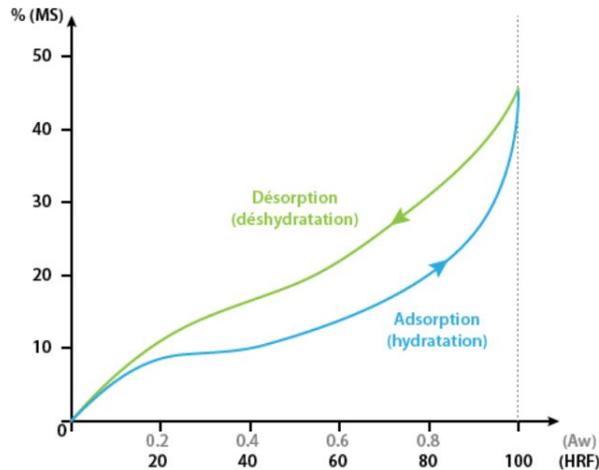


FIGURE 15 – Principe d'isotherme de sorption

14

En général, les courbes d'adsorption et de désorption sont différentes car lors du séchage, le produit peut être soumis à des phénomènes irréversibles comme une modification de structure et de porosité. Nous avons remarqué que dans notre cas, avec les différentes graines présentes à la ferme et leurs conditions initiales avant le séchage, nous nous trouvons la plupart du temps dans la période 2 dès le départ. Nous pouvons donc utiliser les hypothèses et équations propre à ce régime pour caractériser les phénomènes de séchage, c'est à dire la diminution de la teneur en eau du grain, de 20% à 15% dans le cas du sarrasin par exemple. Cela met donc en avant cette trajectoire, visible en vert sur le graphique ci-dessous, avec un grain récolté relativement froid et humide (ici 10°C et 20% d'humidité), qui devient plus chaud et sec au cours du processus de séchage.

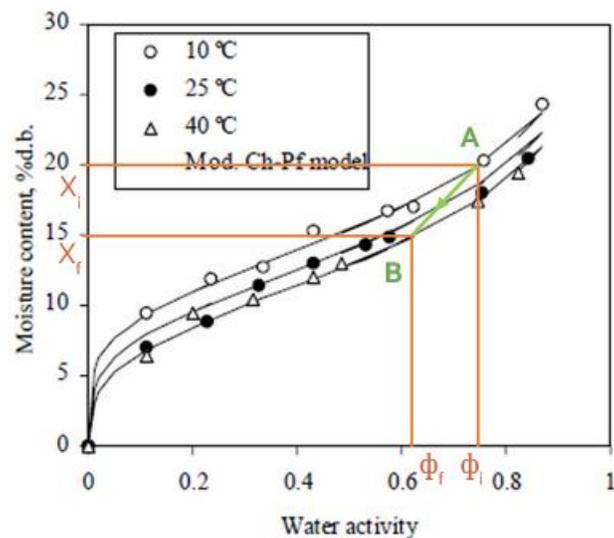


FIGURE 16 – Isotherme de sorption du sarrasin

15

14. Source Figure 13 : <https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/Chapitre12.html>

15. Source Figure 14 : MENKOV, N. D., K. DINKOV, A. DURAKOVA and N. TOSHKOV, 2009. Sorption characteristics of buckwheat grain

Le but ultérieur du projet est de modéliser le temps nécessaire pour effectuer cette trajectoire, notamment en utilisant les bilans de la période 2 de séchage.

- Energie : $\dot{Q} = hS(\theta_{A,soufflage} - \theta_p(t)) = \dot{m}_e L_{vap}$
- Matière : $mC_p \frac{d\theta_p(t)}{dt} \dot{m}_e = k_p S(P_{v,p}(\theta_p) - P_{v,air})$

Finalement, nous avons donc :

$$\dot{m}_e = \frac{hS}{L_{vap}}(\theta_{A,soufflage} - \theta_p(t)) - mC_p \frac{d\theta_p(t)}{dt} = k_p S(P_{v,p}(\theta_p) - P_{v,Asoufflage})$$

En résolvant cette équation différentielle, nous pourrions obtenir le θ_p , la température des graines, en fonction du temps. Ce dernier nous servira à déterminer, à l'aide du bilan de matière, le débit d'eau à évacuer, \dot{m}_e , dont dépend la teneur en eau du grain X. Finalement, nous pourrions modéliser le temps restant pour finaliser le séchage.

Cependant, il est difficile aujourd'hui de résoudre cette équation car beaucoup d'inconnues restent à être déterminées. En effet, la principale inconnue est θ_p , qui est une fonction du temps, résultant de la résolution de cette équation différentielle. Néanmoins, nous ne connaissons pas les valeurs de pression partielle de vapeur des graines à la température θ_p , ainsi que les valeurs exactes des coefficients k_p et h , qui ne sont pour l'instant que des estimations. De la même façon, les conditions extérieures de l'air varient grandement en fonction du temps, nous n'avons utilisé ici qu'une moyenne des conditions sur plusieurs mois. La valeur de L_{vap} est aussi incertaine car cette dernière peut augmenter de 3 à 5 fois sa valeur selon la quantité d'eau liée à évacuer, ce qui est difficile à déterminer.

Beaucoup d'incertitudes apparaissent donc lors de l'établissement de ce modèle, notamment à cause de nos hypothèses simplificatrices, nos estimations de certaines grandeurs ainsi que l'utilisation des courbes de sorption. D'où la nécessité de réaliser des mesures à la ferme, pour établir une base de données nous permettant ensuite de vérifier nos calculs et hypothèses.

La résolution de cette équation différentielle ainsi que les prises de mesures permettant la vérification et validation de notre modèle s'inscrivent dans une seconde partie de projet, que d'autres étudiants seront amenés à réaliser l'année prochaine.

4 Perspectives

4.1 Poursuite du projet

L'idée est à présent d'envoyer tout le matériel nécessaire à la ferme pour permettre une mise en route du séchoir d'ici quelques mois lors de la récolte du sarrasin par exemple.

Dans un premier temps, une partie du matériel sera prêté par l'INSA, notamment la résistance et sa boucle de régulation. La ferme pourra ainsi vérifier certains de nos résultats qui restent sensibles à des nombreuses incertitudes. En effet, les pertes de charge ont été estimées dans une seule partie de l'installation, et certaines grandeurs approximées. De plus, ces résultats étant aussi fortement dépendants du type de grains à sécher (porosité, sphéricité, diamètre, teneur en eau), il faudra établir une base de données regroupant les pertes de charge mesurées avec le tube en U pour chaque grain et par conséquent le débit attendu dans l'installation et donc l'écart de température maximal qu'il est possible d'obtenir.

Ensuite, si toute l'installation fonctionne bien sur place, l'INSA accompagnera la ferme pour investir dans le matériel adéquat. Il pourrait être intéressant à ce moment là d'évaluer le coût global de tous les instruments nécessaires, tout en trouvant un bon équilibre qualité/prix.

Enfin, comme cela a été évoqué dans la partie sorption et modélisation du séchage 3.5. Le deuxième objectif est à présent de réussir à trouver un modèle de temps de séchage pour chaque grain. Cela permettrait

d'optimiser la consommation énergétique du séchoir et trouver quels sont les gammes de température et de puissance nécessaires pour le séchage des différentes cultures de la ferme.

4.2 Améliorations éventuelles

Dans l'optique d'une suite à ce projet, nous avons quelques idées qui pourraient être mises en place pour parfaire l'installation.

Il serait par exemple intéressant de creuser la possibilité d'un recyclage de l'air vicié, en reprenant donc l'air chaud en sortie de séchoir et en le réinjectant avant le réchauffeur. Cela permettrait de diminuer la puissance de la résistance et par conséquent la consommation électrique puisqu'il faudrait moins chauffer l'air extérieur. Nous nous demandons cependant si l'air en sortie de séchoir n'était pas trop humide lorsqu'il est réinjecté pour permettre de sécher les grains, et aussi s'il n'allait pas perdre trop en température dans les conduites le menant à son recyclage. Sinon, il serait aussi possible de récupérer la chaleur de l'air en sortie de caisson en utilisant un échangeur de chaleur. Cela permettrait de préchauffer l'air extérieur sans que ce dernier soit en contact direct avec l'air humide qui sort du caisson. Néanmoins, nous nous questionnons là aussi sur la rentabilité de cette amélioration en raison des pertes thermiques dans les échangeurs. Enfin, il pourrait également être intéressant de songer à l'installation de gaines isolantes autour des conduites et du caisson pour les rendre adiabatiques et ainsi limiter les déperditions thermiques qui peuvent être importantes lors du séchage en période froide.

Pour ces différentes pistes d'amélioration, il paraît nécessaire d'évaluer le rapport entre le coût d'investissement et l'efficacité de la solution pour déterminer si de tels changements auraient une influence suffisamment significative pour être mis en place.

5 Conclusion

Pour conclure, ce projet a permis de commencer le dimensionnement et l'instrumentation d'un séchoir agricole pour une ferme expérimentale rattachée à l'INRAE.

Étant donné que ce sujet a été proposé pour la première fois, son lancement a commencé par une phase de recherche assez longue afin d'assimiler la théorie des phénomènes de séchage et les hypothèses que celle-ci implique. De plus au cours de cette période, un cahier des charges regroupant les caractéristiques de la solution à proposer a été réalisé. Cela a été possible avec notamment une visite sur le site de la ferme de Mirecourt pour échanger avec le personnel, s'imprégner du sujet et comprendre dans quel environnement celle-ci se situe. Toutes nos recherches ont abouti au choix d'une résistance électrique pour chauffer l'air par soucis de simplicité, de coût d'investissement et de temps.

Dans un second temps, puisqu'une résistance électrique de 18 kW était disponible à l'INSA, des essais sur cette dernière ont pu être effectués sur un banc d'essai à l'aide du logiciel Labview. Ils ont permis de vérifier que le réchauffeur se pilotait bien avec son régulateur en température de chauffage. De plus, ils ont aussi permis d'obtenir la plage de fonctionnement du réchauffeur à sa capacité maximale.

Ces résultats ont conduit à des estimations de pertes de charge dans le séchoir pour connaître le débit d'air qui y circule et aussi les gammes de température et de puissance qu'il est possible d'atteindre dans l'installation.

Enfin, l'objectif étant à terme d'avoir un séchoir optimisé d'un point de vue de sa consommation énergétique, un travail préliminaire sur la modélisation du temps de séchage a été présenté dans ce rapport et sera la source d'une étude ultérieure dans la continuité du projet l'année prochaine.

Par ailleurs, les calculs effectués sont la source de plusieurs incertitudes dues à un manque de connaissance sur certaines parties de l'installation mais aussi en raison des hypothèses effectuées sur les grains notamment. Ainsi, ce rapport présente aussi une instrumentation à implanter sur le séchoir qui permettra lors de sa mise en fonctionnement de vérifier nos calculs mais aussi d'établir une base de données pour chaque grain cultivés à la ferme.

Actuellement, nous sommes toujours dans l'attente de réponses de la part de certaines entreprises concernant la sélection des capteurs adéquats et leur coûts. Cependant, cette instrumentation sera poursuivie par B. Renou et A. Vandel.

Ce travail a donc permis de clarifier le besoin de la ferme, de se questionner sur le matériel à utiliser en fonction des dynamiques de séchage mises en jeu dans le séchoir, de réaliser une instrumentation, de faire des premières approximations et des tests sur le réchauffeur.

Il reste maintenant des objectifs d'améliorations du séchoir qui pourront être étudiés en termes de rapport efficacité/coût d'investissement l'année prochaine.

6 Bilan personnel

D'un point de vue plus personnel, ce projet nous a permis d'acquérir des compétences supplémentaires, aussi bien en termes de connaissances scientifiques qu'en termes de gestion de projet.

En effet, au cours de ce travail, nous avons été amenés à mobiliser des connaissances acquises au cours de notre formation mais aussi à nous intéresser à de nouvelles. Les dynamiques de séchage nous étaient par exemple inconnues au commencement du projet. De plus, ce projet nous a également permis de sortir du cadre scolaire et de nous initier au travail de groupe sur une longue durée. Il a ainsi été important d'apprendre à communiquer entre nous mais aussi avec le personnel de la ferme, chose qui n'était pas innée au début du projet.

En outre, la soutenance a également été un exercice formateur durant ce PIE. En effet, nous avons dû condenser de manière suffisamment claire le contenu de 4 mois de travail en 10 minutes. Cela nous a forcé à faire le tri parmi tous éléments sur lesquels nous avons travaillé afin de partager l'essentiel de notre étude.

Pour ce qui est des difficultés rencontrées, il a parfois été frustrant de ne pas réussir à avancer comme nous le souhaitions. Cela a surtout été le cas au début de projet lorsque nous avons dû nous approprier le sujet mais aussi lorsque nous attendions les réponses des fournisseurs pour continuer l'instrumentation de notre séchoir. Par ailleurs, il n'a pas toujours été évident de trouver un fil conducteur sous l'amas d'informations que nous avons accumulé durant cette étude. C'est pourquoi il a été nécessaire d'établir des objectifs intermédiaires à chaque réunion mais aussi d'apprendre à changer notre organisation en fonction des aléas rencontrés au cours du projet.

En définitive, ce projet nous a beaucoup apporté par la complexité du sujet mais aussi par les attentes auxquelles nous devons répondre, à savoir transmettre de manière concise et didactique notre travail auprès de nos encadrants mais aussi de nos camarades.

Annexes

A Grandeurs et unités

SYMBOLE	UNITE	DEFINITION
P_{elec}	kW	Puissance électrique consommée par l'installation
U	V	Tension
I	A	Intensité du courant
φ	-	Déphasage des 3 phases du courant
$P_{chauffe}$	kW	Puissance thermique de la résistance
C_p	$kJ/K/kg$	Capacité thermique massique à pression constante de l'air
\dot{m}_{air}	kg/s	Débit massique d'air dans l'installation
$Q_{v,air}$	m^3/s	Débit volumique d'air dans l'installation
$\theta_{A,ext}$	$^{\circ}C$	Température extérieure de l'air
$\theta_{A,soufflage}$	$^{\circ}C$	Température de l'air soufflé dans le caisson
$\theta_{A,sortie}$	$^{\circ}C$	Température de l'air en sortie de caisson
θ_p	$^{\circ}C$	Température du produit (grain)
θ_h	$^{\circ}C$	Température humide de l'air dans le caisson
μ_{air}	$kg/m/s$	Viscosité dynamique de l'air
ρ_{air}	kg/m^3	Masse volumique de l'air
d_p	m	Diamètre des grains
ψ	-	Paramètre de sphéricité des grains

TABLE 1 – Grandeurs et unités

SYMBOLE	UNITE	DEFINITION
$S_{caisson}$	m^2	Section du caisson
ϵ	—	Porosité du lit
H	m	Hauteur du lit
ΔP	Pa	Pertes de charge
\dot{m}_e	kg/s	Débit d'eau qui s'évapore
h	$W/m/K$	Coefficient de transfert convectif de l'air
S	m^2	Surface de contact entre l'air et les grains
$P_{v,Aext}$	bar	Pression de vapeur de l'air extérieur
$P_{v,Asoufflage}$	bar	Pression de vapeur de l'air soufflé
$P_{v,Asortie}$	bar	Pression de vapeur de l'air en sortie de caisson
$P_{v,p}$	bar	Pression de vapeur du produit (grain)
$P_{v,sat}$	bar	Pression de vapeur saturante
$\phi_{v,Aext}$	%	Hygrométrie de l'air extérieur
$\phi_{v,Asoufflage}$	%	Hygrométrie de l'air soufflé
$\phi_{v,Asortie}$	%	Hygrométrie de l'air en sortie de caisson
a	—	Activité de l'eau des grains (degré hygrométrique des grains)
L_{vap}	kJ/kg	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
\dot{Q}	kW	Puissance mise en jeu dans les transferts de chaleur
k_p	$kg/m^2/s$	Coefficient de transfert de matière convectif

TABLE 2 – Grandeurs et unités

SYMBOLE	UNITE	DEFINITION
t	s	Temps de séchage
m	kg	Masse totale du produit
X	%	Teneur en eau (base sèche)
W	%	Teneur en eau (base humide)
x_v	kg de va- peur/kg d'air sec	Humidité absolue
N_u	-	Nombre de Nusselt
λ	$W/m/K$	Coefficient de conductivité thermique de l'air
L	m	Longueur caractéristique du caisson
R_e	-	Nombre de Reynolds de l'écoulement d'air
P_r	-	Nombre de Prandtl
V_{air}	m/s	Vitesse de l'air dans le caisson

TABLE 3 – Grandeurs et unités

B Comparaison puissance de chauffe et puissance électrique

Nos mesures de puissance électrique consommée par l'installation (courbe bleue) est relativement proche de la courbe de puissance de chauffe (courbe orange). Nous supposons donc que ce sont les mêmes dans le cas de notre étude.

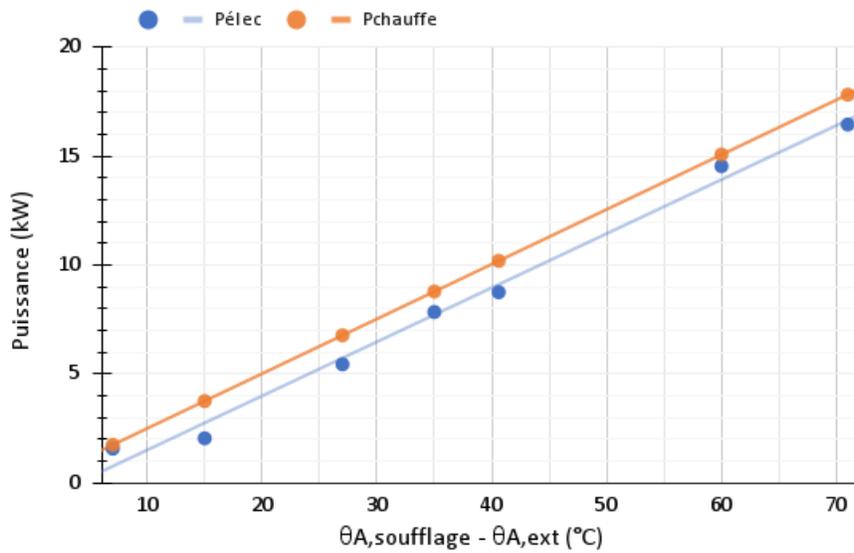


FIGURE 17 – Puissance en fonction $\theta_{A,soufflage} - \theta_{A,ext}$ à $\dot{m}_{air} = 0.2 \text{ m}^3/s$

C Point de fonctionnement en fonction de la hauteur

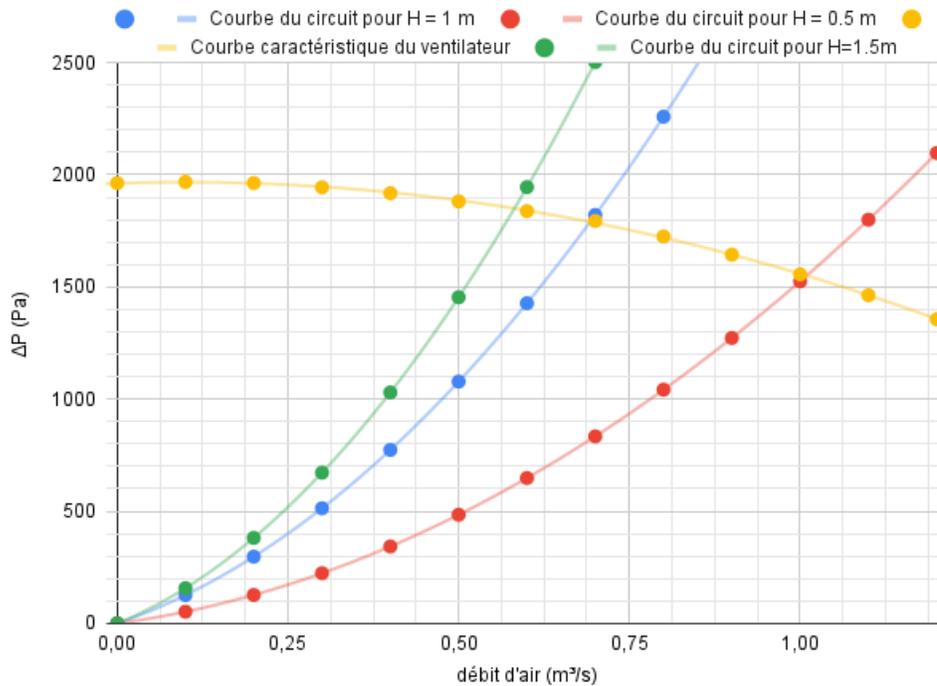


FIGURE 18 – Point de fonctionnement pour différentes hauteurs de lit

Sur ce graphique, les pertes de charges dans le lit ont été représentées pour plusieurs hauteurs : 0.5 m, 1 m et 1.5 m. Nous remarquons que plus la hauteur augmente, plus le débit dans l'installation sera faible. Ce

résultat a une incidence directe sur les températures dans l'installation (cf. Tests du réchauffeur 3.1).

D Trajectoire de l'air sur un diagramme psychrométrique

Ci-dessous est représentée la trajectoire de l'air lors de son chauffage par la résistance dans un diagramme psychrométrique. Au cours de ce chauffage aucune quantité de vapeur d'eau n'est retirée, x_v est constant, d'où la trajectoire horizontale. En revanche, ϕ_v diminue. En passant, d'un air à $\theta_{A,ext} = 10^\circ C$ et $\phi_{A,ext} = 80\%$ à un air chaud à $\theta_{A,soufflage} = 35^\circ C$, nous constatons que l'hygrométrie a baissé de 60 % ($\phi_{A,ext} = 20\%$). Ainsi, l'air est capable de retirer une plus grande quantité d'eau comme cela a été défini dans la partie Grandeurs intervenants dans le séchage 3.4.1

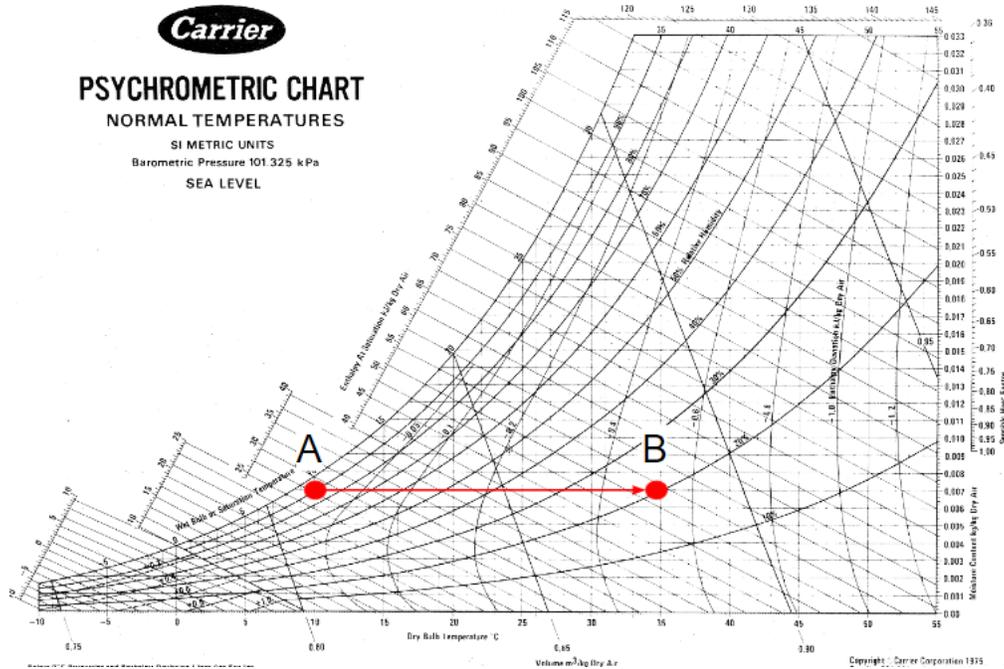


FIGURE 19 – Chauffage de l'air dans un diagramme psychrométrique

E Trajectoire réelle de la température du grain lors du séchage

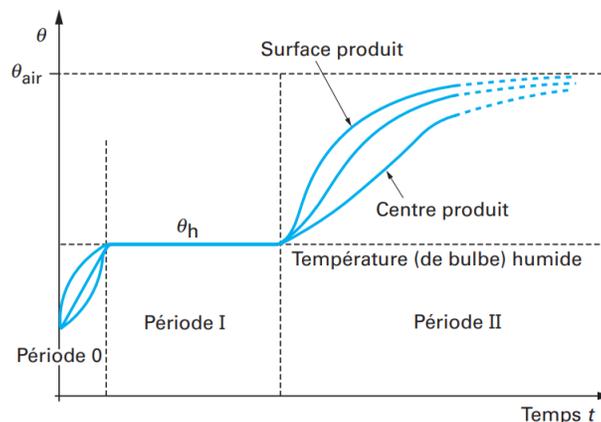


FIGURE 20 – Évolution de la température du grain au cours du temps de séchage

F Courbe de sorption des céréales présentes à la ferme et normes d'humidité

Ertugay/Certel: Moisture sorption isotherms of cereals

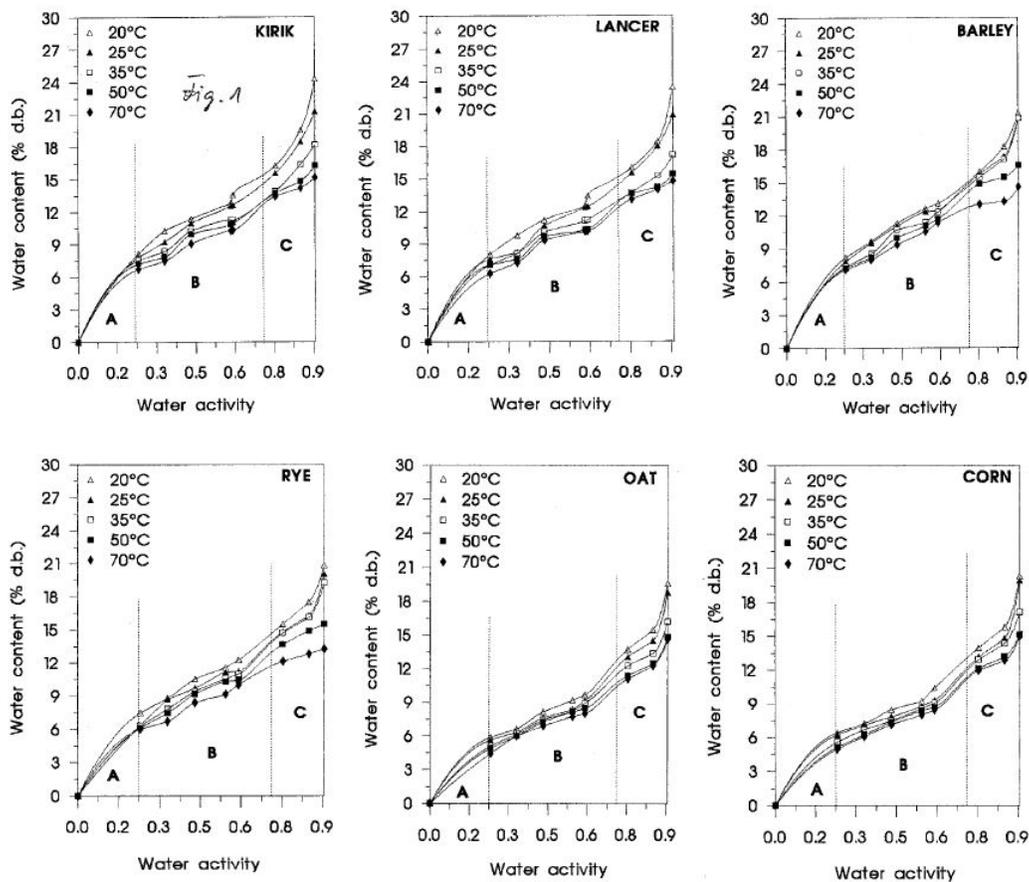


Figure 1. Sorption isotherms of Kirik, Lancer, Barley, Rye, Oat and Corn at 20, 25, 35, 50 and 70°C.

FIGURE 21 – Isothermes de désorption pour différents grains

16

Espèce	Humidité en entrée de séchage (%)	Humidité attendue en fin de séchage (%)
Sarrasin	20	15
Blé	17	15
Tournesol	11	9
Lentille	20	15

FIGURE 22 – Normes d'humidité des graines de la ferme INRAE

16. Source Figure 17 : Ertugay/Certel : Moisture sorption isotherms of cereals

G Bibliographie

Source, lien	Techniques de l'ingénieur : https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-evaporation-et-sechage-42316210/sechage-principes-et-calcul-d-appareils-j2451/sechage-convectif-par-air-chaud-par-entrainement-j2451niv10003.html
Titre + Auteur + Date	Séchage : principes et calcul d'appareils - Séchage convectif par air chaud, J. Vasseur, 2009
Notions utilisées pour notre étude	Grandeurs qui interviennent dans le processus de séchage : teneur en eau, activité de l'eau,
Source, lien	Techniques de l'ingénieur : https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-et-process-de-fabrication-de-produits-alimentaires-42430210/sechage-des-produits-alimentaires-f3000/
Titre + Auteur + Date	Séchage des produits alimentaires - Principes, C. Bonazzi, 2003
Notions utilisées pour notre étude	Périodes de séchage, bilans sur les séchoirs, cinétique de séchage
Source, lien	Thèse Université de Bretagne : https://hal.inria.fr/tel-01297965/
Titre + Auteur + Date	Etude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux, Thu Ha Nguyen, 2016
Notions utilisées pour notre étude	Explication du couplage des transferts de masse et de chaleur
Source, lien	ADEME : https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3319-utilisation-rationnelle-de-l-energie-pour-le-sechage-des-grains-et-des-fourrages.html
Titre + Auteur + Date	Utilisation rationnelle de l'énergie pour le séchage des grains et des fourrages, ADEME, 2011
Notions utilisées pour notre étude	Techniques de séchage, contexte et état des lieux des séchoirs en France
Source, lien	ADEME : https://www.bioenergie-promotion.fr/44055/le-sechage-de-vegetaux-pour-valoriser-la-chaleur-d-une-unite-de-methanisation/
Titre + Auteur + Date	Le séchage de produits végétaux pour valoriser la chaleur d'une installation de méthanisation, ADEME Bourgogne, 2015
Notions utilisées pour notre étude	Caractéristiques de l'eau dans les végétaux, différents types de séchoirs
Source, lien	INSA : cours de diphasique
Titre + Auteur + Date	Polycopié de diphasique, B. Renou, 2011
Notions utilisées pour notre étude	Notions sur les lits fluidisés
Source, lien	Thèse Université de Toulouse : https://www.theses.fr/2017INPT0114
Titre + Auteur + Date	Simulation numérique directe et analyse des transferts de chaleur dans les lits de particules fixes et mobiles, F. Euzenat, 2017
Notions utilisées pour notre étude	Corrélation pour le calcul du nombre de Nusselt

Source, lien	Thèse Ouvrage : https://www.nzdl.org/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0unesco--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-01--11-en-50---20-help---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-0utfZz-8-10&c1=CL2.4&d=HASH01f9bd2054c2aae11bff6149.8.33
Titre + Auteur + Date	Sécher des produits alimentaires, J.F Rozis, 1995
Notions utilisées pour notre étude	Pertes de charge dans la couche de grains
Source, lien	Cours : https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/Chapitre1_2.html
Titre	Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau
Notions utilisées pour notre étude	Sorption, image du principe d'isotherme d'adsorption et désorption de l'eau
Source, lien	Thèse : Ertugay/Certel : Moisture sorption isotherms of cereals
Titre	Moisture sorption isotherms of cereals at different temperatures
Notions utilisées pour notre étude	Sorption, isothermes de desorption pour différents grains
Source, lien	Thèse : MENKOV, N. D., K. DINKOV, A. DURAKOVA and N. TOSHKOV, 2009. Sorption characteristics of buckwheat grain
Titre	Sorption characteristics of buckwheat grain temperatures
Notions utilisées pour notre étude	Sorption, isothermes de desorption du sarrasin