

Résumé de la revue de littérature et de son analyse

Réalisé par

Clément Vigneault, PhD, Ing.

Ingénierie post récolte des produits horticoles frais

Ingenierie.Postrecolte@outlook.com

Pour Ail Québec

Table des matières

1. Conditions optimales de développement des maladies et traitement thermique	2
2. °T et durée du séchage ou des traitements thermiques pour le contrôle des maladies	3
3. Effet de la température sur le développement du pathogène	4
4. Traitement qui semble le mieux adapté pour l'ail	5
5. Tolérance thermique de l'ail	5
6. Chaleur de respiration de l'ail en fonction de la température	6
7. Taux de respiration de l'ail pendant l'entreposage	7
8. Perte théorique de masse de l'ail pendant l'entreposage vs la durée d'entreposage	8
9. Densité apparente de l'ail vs son humidité	9
10. Porosité de l'ail vs sa teneur en humidité	9
11. Température de l'ail pendant son surefroidissement	10
12. °T de congélation ou °T minimale de surefroidissement de l'ail vs sa teneur en humidité	10
13. Statique et dynamique des fluides	11
14. Perte de pression à travers une ou deux caisses de produit	12
15. Comment mesurer la pression statique dans un système à l'air forcé	13
16. Où mesurer la pression statique sans un système à l'air forcé	14
17. Progression théorique de la °T en refroidissement ou l'humidité en séchage pendant le procédé	15
18. Portion transfert de chaleur ou masse restante	16
19. Exemple avec un Temps de Demi Refroidissement de 10 min	17
20. La différence entre chauffage et refroidissement de l'ail	18
21. Exposition d'un produit à l'air chaud et humide	19
22. Contrôle de l'humidité à l'aide de l'évaporateur	20
23. Performance de ventilateurs en fonction de la pression statique	21
24. Performance des déshumidificateurs	22
25. Efficacité énergétique vs pression hygroscopique de l'air	23
26. Conception d'un séchoir	24
27. Ce qui limite l'uniformité dans le temps et l'espace	25
28. Point à respecter pour améliorer la qualité de l'ail conditionné et entreposé	25

1. Conditions optimales de développement des maladies et traitement thermique

Traitement thermique

Définition: Réchauffement et/ou refroidissement **rapide** du produit et maintien de °T sur une **courte** période

But : Éliminer certains pathogènes, sinon les contrôler

Qui : Potentiellement mais à vérifier pour les compatibilités des températures et temps d'exposition à utiliser pour chaque pathogène et celle que l'ail peut supporter : *Aspergillus niger*, *Botrytis allii*, *Embellisia allii*, *Fusarium*, *Penicillium spp.*, *Sclerotium cepivorum*, *Pseudomonas spp.*

Conditionnement et contrôle potentiel de maladies selon la littérature

Références	Durée	°T, °C	HR, %	Fluide	Débit, m s ⁻¹	Commentaires
Goldy, 2017		Amb.	n.d.	Air	0.025	Ail à replanter
Erard et al, 2012	21 j	Amb.	n.d.	Air		
Macdonald, 2016		Amb.	n.d.	Air		En tresse ou en petit paquet
Maser et al, 1988		Amb.	n.d.	Air	0.13	
Guide de Stand., 2017*; Dufresne et al, 2009	7 à 10 j	Amb.	n.d.	Air		Laisser le bulbe entier permet translocation sucres de tige → bulbe Ne pas laver les bulbes
Dufresne et al, 2009	15 j	Amb.	n.d.	Air	Air forcé	Durée varie selon conditions climatiques
Leblanc, 2014	≥ 12 j	20 à 25	n.d.	Air	0.13	Les 2 à 3 premiers jours à 30°C puis continuer avec cette condition
GF, 2017	14 j	27	n.d.	Air		
Boundary Garlic, 2017	14 j	27	n.d.	Air		
Ware, L. 2015	3 à 4 j	27	<55	Air	1	27°C vital pour 3-4 premiers jours, après ça peut baisser un peu.
Mishra et al., 2014	48 h	27 à 35	n.d.	Air		Efficace pour contrôler <i>Embellisia allii</i> dont la sporulation est maximum à 20°C et 99.5% HR, mais très limitée à 30°C
Leblanc, 2014	2 à 3 j	30	n.d.	Air	0.13	Seulement les 2 à 3 premiers jours
Lu et al, 2009	1 j	38	n.d.	Air		Efficace pour contrôler <i>Botrytis</i> . Succès impossible sans uniformité de °T.
Lurie et al, 1997	1 j	38	n.d.	Air		Meilleur que si °T > 38°C, °T _{max} dépend de la compatibilité du produit avec °T
Fraser, 2017		≤ 43	n.d.	Air		Même avec fréquentes °T↑, aucun dommage thermique identifié
Cantwell, WFLO, 2008	8 à 12 h	43 à 46	60 à 70	Air		Important de contrôler HR pendant ce traitement pour éviter les moisissures
Erard et al, 2012	1 h	48-50	n.d.	Eau		Suivi d'un séchage à l'air forcé : élimine larve+adulte acarien et nématode, sclérotés de certains champignons (<i>Fusarium</i> , <i>Penicillium</i> , autres?)
Cantwell et al., 2003; Cantwell, 2008; HB66, 2017	150 s 60 min.	60 55	n.d.	Eau		Pour contrôler germination et développement de racine chez l'ail qui a déjà commencé à germer, et sans produire des dommages thermiques (sauf que certains traitements ont diminué l'intensité de la couleur de l'ail)

Amb. = ambiant

H_{max} = hauteur maximum d'ail dans les contenants min. = minutes

ΔP = perte de pression à travers l'ail, mm d'eau °T = température, °C

°T↑ = température élevée

2. °T et durée du séchage ou des traitements thermiques pour le contrôle des maladies

Références	Durée**	°T (°C)	HR (%)	Commentaires : **Durée en mois
James et al., 2015	9	-6 à -4	Pas d'info	Surrefroidir à partir de °T = 21°C = meilleur qu'à partir de 4°C. Ail utilisé = 36% ms. Vitesse air = 5 m s ⁻¹ autour des petits contenants isolés, devrait équivaloir à 0.005 m s ⁻¹
UCDavis, 2017*	6 à 7	-1 à 0	60 à 70	Pour entreposage long terme; congèle à -0.8°C
Leblanc, 2017		-1 à 0	60 à 70	Entreposage au froid : important de ventiler pour uniformiser °T et HR
HB66, 2017*	9 ≤ ≥ 9	-1 à 0	60 à 70	Bon débit d'air à l'intérieur des contenants pour éviter HR↑. Entreposage long terme exige un excellent conditionnement; un mauvais conditionnement et/ou HR↑ favorise moisissures.
Bartz et Brecht, 2002	6	0		
ASHRAE, 2010.	6 à 7	0	65 à 70	
Maser +, 1988	6 à 7	0	65 à 70	
L'ail, 2017*	4 à 5	0	70	
Refr. & Frzg Fd, 2017*		0	65 à 70	
Cantwell, WFLO, 2008	6 à 7	0	60 à 70	Entreposer en sac/boîte bien ventilé : 0.005 m s ⁻¹ ; ne pas entreposer à 4.4 à 18°C pour éviter la germination prématurée. Pour 12 mois, demande conditionnement parfait.
Goldy, 2017*		0	65 à 70	↑HR et ↑°T = problème. Développement de racine fort à 4.4°C + ↑HR.
Ware, 2015		12 à 18	40 à 60	
Macdonald, 2016		13 à 14		
GGG, 2017	≥6	13 à 18	40 à 60	Si HR < 40% pour + de 2-3 sem. : l'ail sèche trop vite. HR > 60% longtemps : développement de moisissures. °T < 13°C longtemps : l'ail germe même hors saison. °T > 21°C longtemps : ail sèche trop. La majorité des ails se conservent > 6 mois à °T = 18 à 24°C et HR = 50%, sauf Rocamboles
L'ail, 2017*	3	15	70	
Garlic Farm, 2017	6 à 8	15 à 18	Modérée	Si °T + HR parfait, ail de bonne qualité = 6 à 8 mois et +. Conservation très dépendant de variété. 15 à 18°C + HR modérée + ventilation = succès. Ail = sac-filet, bulbille = sac-papier
Boundary Garlic, 2017	6 à 8	15 à 18		
HB66, 2017*	3 à 4	Amb.		Si °T↓ + HR↓ = ventiler la nuit à bon débit; mais si °T= 5 à 18°C, ail perd sa dormance et germe
Leblanc, 2017		15 à 25	70	Entreposage au chaud : °T entre 15 à 18°C convient à plupart des variétés du Québec. Plus °T est ↑, plus il est difficile de maintenir HR recommandée
Dufresne et al, 2009	10**	18 à 21	50 à 60	**Durée pour 'Music'. Durée autres variétés? Bonne circulation d'air = meilleure conservation.
HB66, 2017*	1 à 2	20 à 30	75	Pour quelques mois seulement, sinon bulbe devient mou, spongieux et flétri, trop de perte d'eau
Guide de Std, 2017*		21	50 à 60	
L'ail, 2017*	12	25	80 à 90	Très court terme
Bartz et Brecht, 2002	1	30		
Ware, 2015		5 à 18		Ail pour replanter, °T optimum = 10°C
Goldy, 2017*		11.11	60 ou -	Ail pour replanter; si °T trop ↓ = changement physiologique + rendement ↓; si trop ↑ = moisissure
Goldy, 2017*	≤1	0	95 à 100	Fleurs d'ail et ail vert

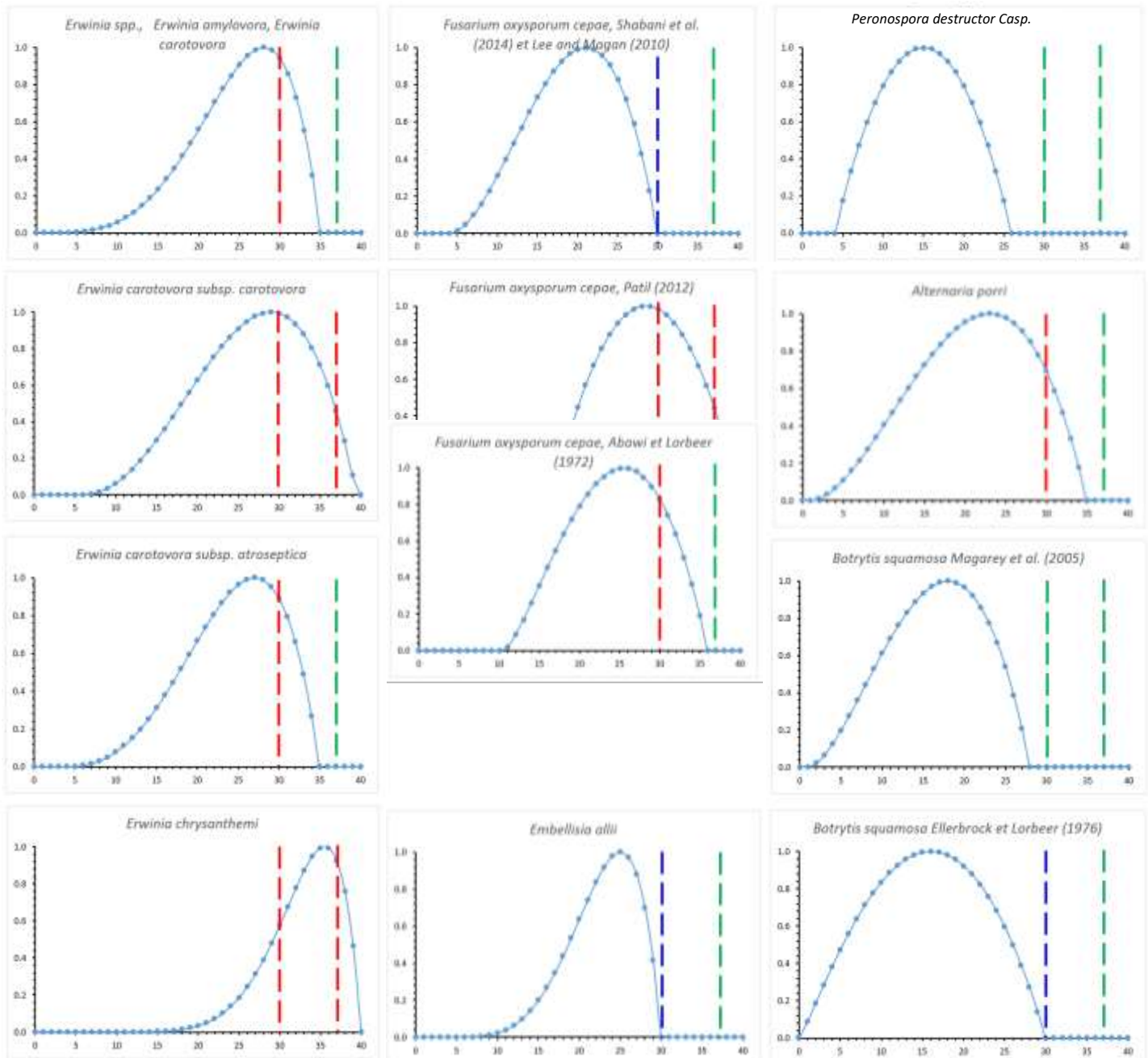
Amb. = air ambient H_{max} = hauteur max. empilement d'ail HR = humidité relative, % ms = matière sèche, %
mts = minutes ΔP = perte de pression à travers l'ail, mm d'eau °T = température, °C
°T↑ = température élevée et °T↓ = température basse

3. Effet de la température sur le développement du pathogène

D'après les références scientifiques trouvées, les auteurs s'accordent pour dire qu'un traitement thermique de 24 h à 30°C devrait être efficace pour contrôler le développement de *Peronospora destructor* Casp., *Botrytis squamosa*, *Embellisia allii*. Par contre, ce ne sont pas tous les auteurs qui prétendent que ce même traitement serait efficace pour contrôler le développement *Fusarium oxysporum cepae*.

D'après les mêmes références, les auteurs s'accordent pour dire qu'un traitement thermique de 24 h à 37°C devrait être efficace pour contrôler le développement de *Erwinia* spp., *Erwinia amylovora*, *Peronospora destructor* Casp., *Alternaria porri*, *Botrytis squamosa*, *Embellisia allii*

Par contre, ce ne sont pas tous les auteurs qui prétendent que ce même traitement serait efficace pour contrôler le développement *Erwinia carotovora*, *Fusarium oxysporum cepae*.

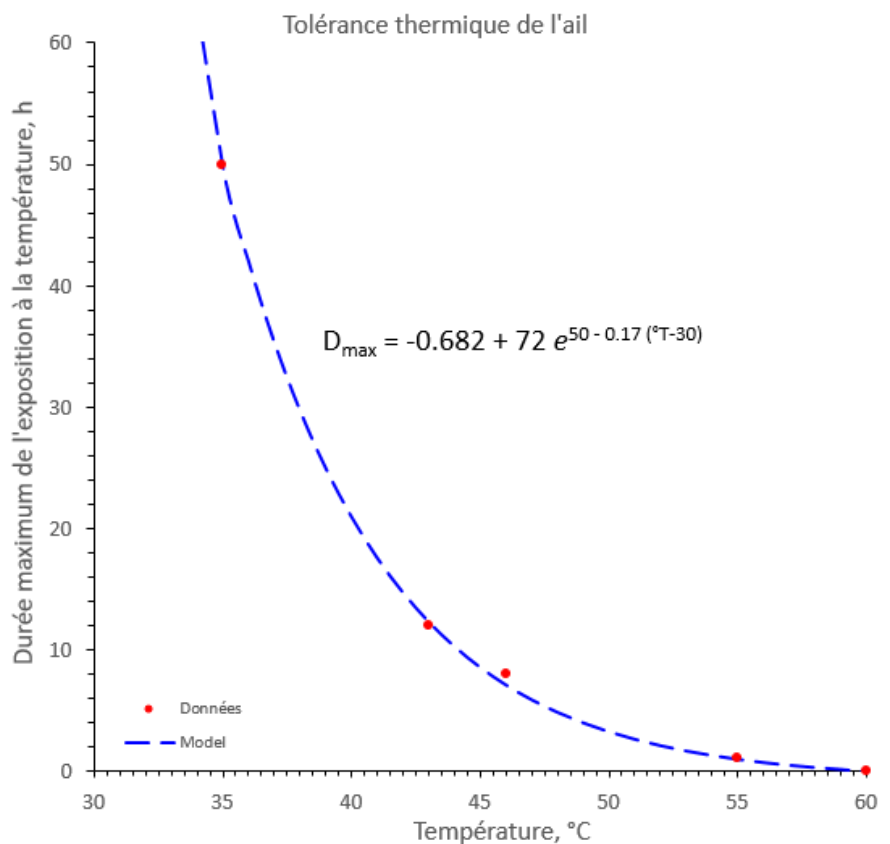


4. Traitement qui semble le mieux adapté pour l'ail

Suite à de nombreuses lectures et discussions avec des producteurs, plusieurs pathogènes présents sur ou dans les bulbes d'ail à la récolte pourraient être contrôlés par un traitement thermique de 24 H à 30°C et d'autres par un traitement de 24 H à 37°C. Par contre, l'exposition de l'ail pour une plus longue période ou une température plus haute peut comporter des risques de produire des dommages thermiques et/ou encourager la prolifération de certains autres pathogènes. En considérant les pour et contre des traitements thermiques pour contrôler les pathogènes, le traitement à 37°C pendant 24 h semble le plus avantageux si l'ail peut supporter cette température pendant 24 h sans en diminuer la qualité. Ce qui est à vérifier avant d'encourager cette pratique à grande échelle. De plus, il est nécessaire de comprendre qu'avec l'élévation de la température de l'ail immédiatement après sa récolte, il sera très difficile de maintenir l'humidité en bas de 70%. En effet, cette élévation de température d'un ail humide à 65% provoquera la libération d'une très grande quantité d'eau à surface de l'ail. La conception d'un séchoir capable à la fois d'élever la température et maintenir l'humidité à 65% demanderait l'utilisation d'une très grande quantité d'air, entraînant un besoin pour une grande puissance de chauffage et de ventilation. Alors, comme les séchoirs ne seront pas conçus pour de si grande puissance de chauffage et de ventilation, il sera très important de ne pas dépasser la période de 24 h pour ne pas laisser le temps aux pathogènes non contrôlé de se développer. Le traitement thermique terminé, il sera aussi très important d'abaisser le plus rapidement possible la température à 21°C et de maintenir l'humidité relative à 65%. À cette température, l'ail devrait être sec et prêt à entreposé en 14 jours.

5. Tolérance thermique de l'ail

La tolérance thermique de l'ail est déterminée par deux termes : la température à laquelle il est exposé et la durée de l'exposition. Normalement, plus la température est élevée, plus la durée de l'exposition devrait être courte. La revue de littérature n'a pas permis de trouver ces valeurs pour l'ail. Un modèle a donc été développé à partir de données de plusieurs auteurs qui présentaient des températures et des temps d'exposition pour le traitement de maladies appliqués à l'ail et où ils réclamaient n'avoir pas eu de dommage thermique en bas d'une certaine température, ou d'en avoir eu à partir d'une autre température. Le modèle devrait donc être utilisé avec une certaine prudence. Il peut servir de guide pour décider du temps d'exposition à utiliser en fonction des températures utilisées lors des premiers essais dans le développement de nouveaux traitements thermiques s'appliquant à l'ail.



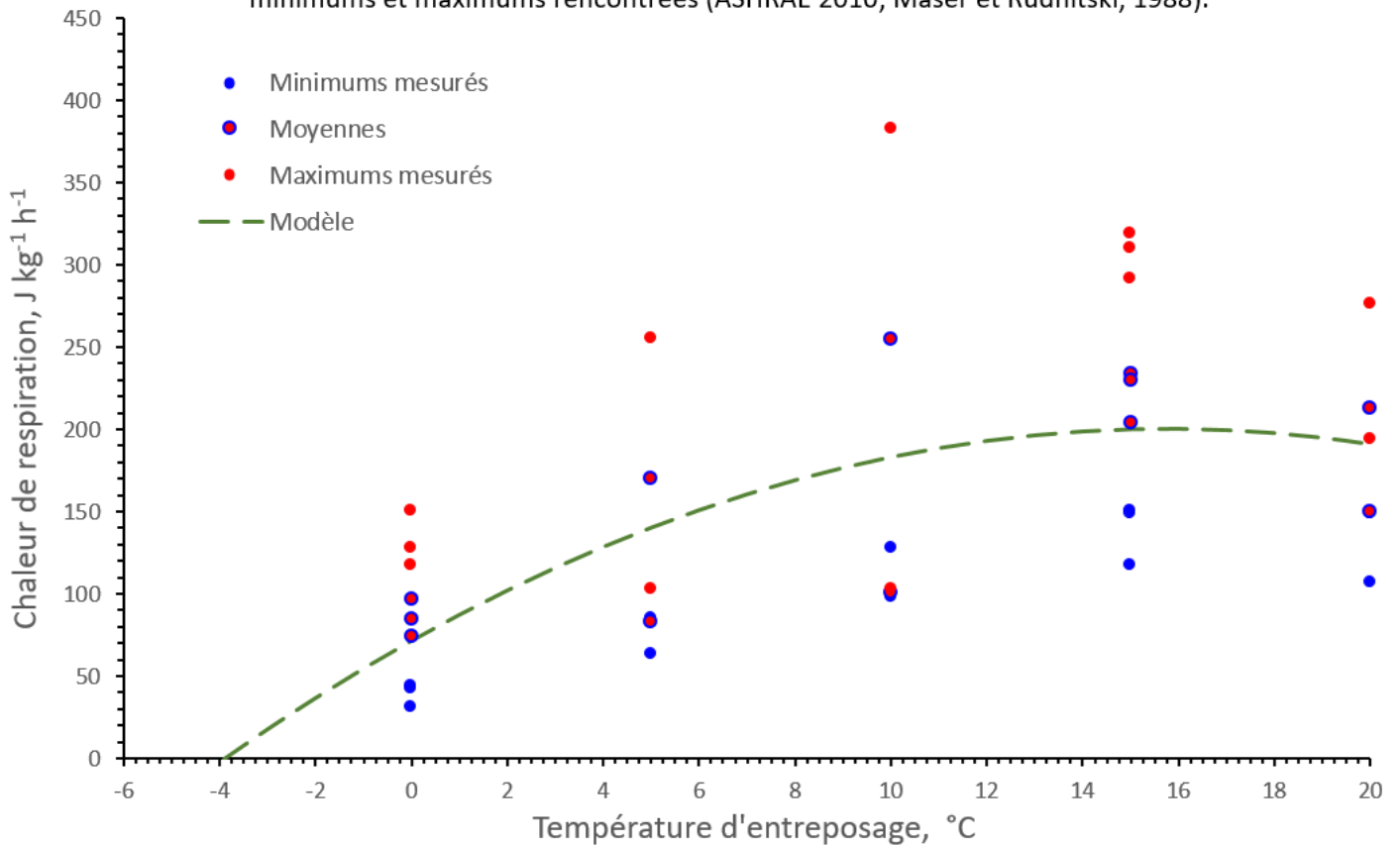
Référence : Garlic Farm, 2017; Leblanc, 2014; Mishra et al, 2014; Cantwell, WFLO, 2008; Cantwell, WFLO, 2008; HB 66, 2006

6. Chaleur de respiration de l'ail en fonction de la température

Un modèle développé à partir de données de quelques auteurs prédit que l'ail devrait pratiquement cesser de respirer à °T de -4°C. Les sous-produits du processus de respiration sont entre autres, l'eau et la chaleur et le CO₂. En milieu froid et sec, toute source de chaleur externe ou interne alimente l'évaporation, et donc, est une source de perte d'eau ou séchage. C'est le principe du séchage à froid (freeze drying). Théoriquement, à °T = -4°C, l'ail devrait pratiquement cesser de perdre de l'eau n'ayant plus de chaleur pour l'évaporer. De plus, les pathogènes colonisant l'ail et capable de se développer à cette température sont à toute fin pratique inexistant.

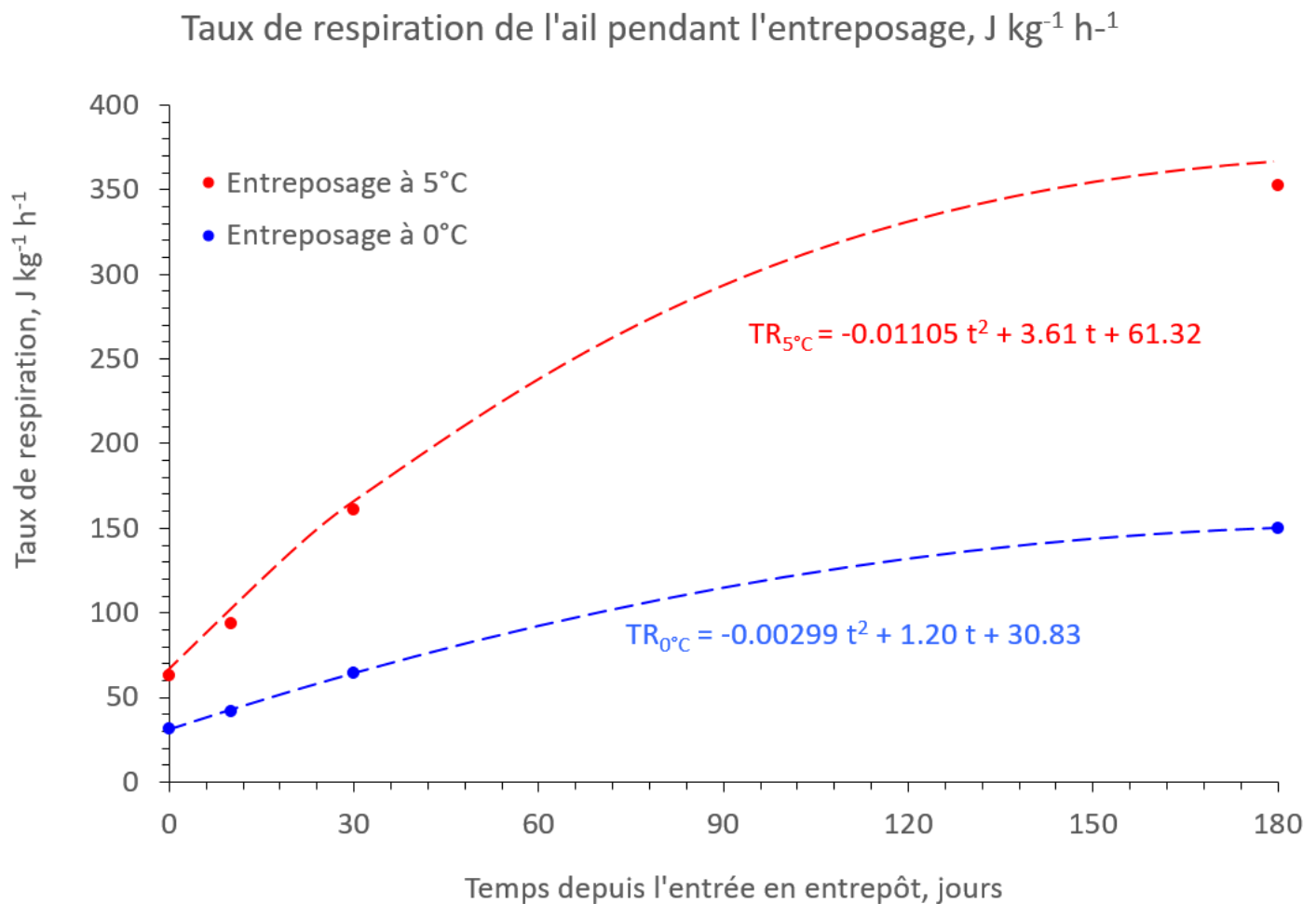
Model de la chaleur de respiration de l'ail en fonction de la température

Réalisé à partir des données rencontrées des la littérature scientifique qui les présente sous forme de valeurs minimums et maximums rencontrées (ASHRAE 2010; Maser et Rudnitski, 1988).



7. Taux de respiration de l'ail pendant l'entreposage

Comme on peut le constater, en plus de différer en fonction de la température, le taux de respiration de l'ail varie dans le temps. En effet, le taux de respiration de l'ail augmente lentement avec la durée de l'entreposage. Pour avoir un ordre de grandeur de cette augmentation dans le temps et selon les températures, il faut comparer ces différents taux de respiration sur une base commune. Prenons comme référence le taux de respiration de l'ail le jour 0 à la température de référence de 0°C. L'ail respire 1.98 fois plus vite à 5°C qu'à 0°C au jour 0. L'ail respire 2.48 fois plus vite à 5°C qu'à 0°C au jour 30 et 5.18 fois plus vite que l'ail à 0°C au jour 0. Cette progression augmente continuellement jusqu'au jour 150 pour atteindre une différence de 2.5 fois plus vite à 5°C qu'à 0°C au jour 150 et 11.5 fois plus vite que l'ail à 0°C au jour 0. Enfin, à 5°C l'ail respire en moyenne sur un entreposage de 150 jours 2.43 fois plus vite qu'à 0°C.



N'oubliez jamais, tant que l'ail est vivant, il respire

Atmosphère contrôlée: <0.5% O₂ seul ou avec 5-10% CO₂

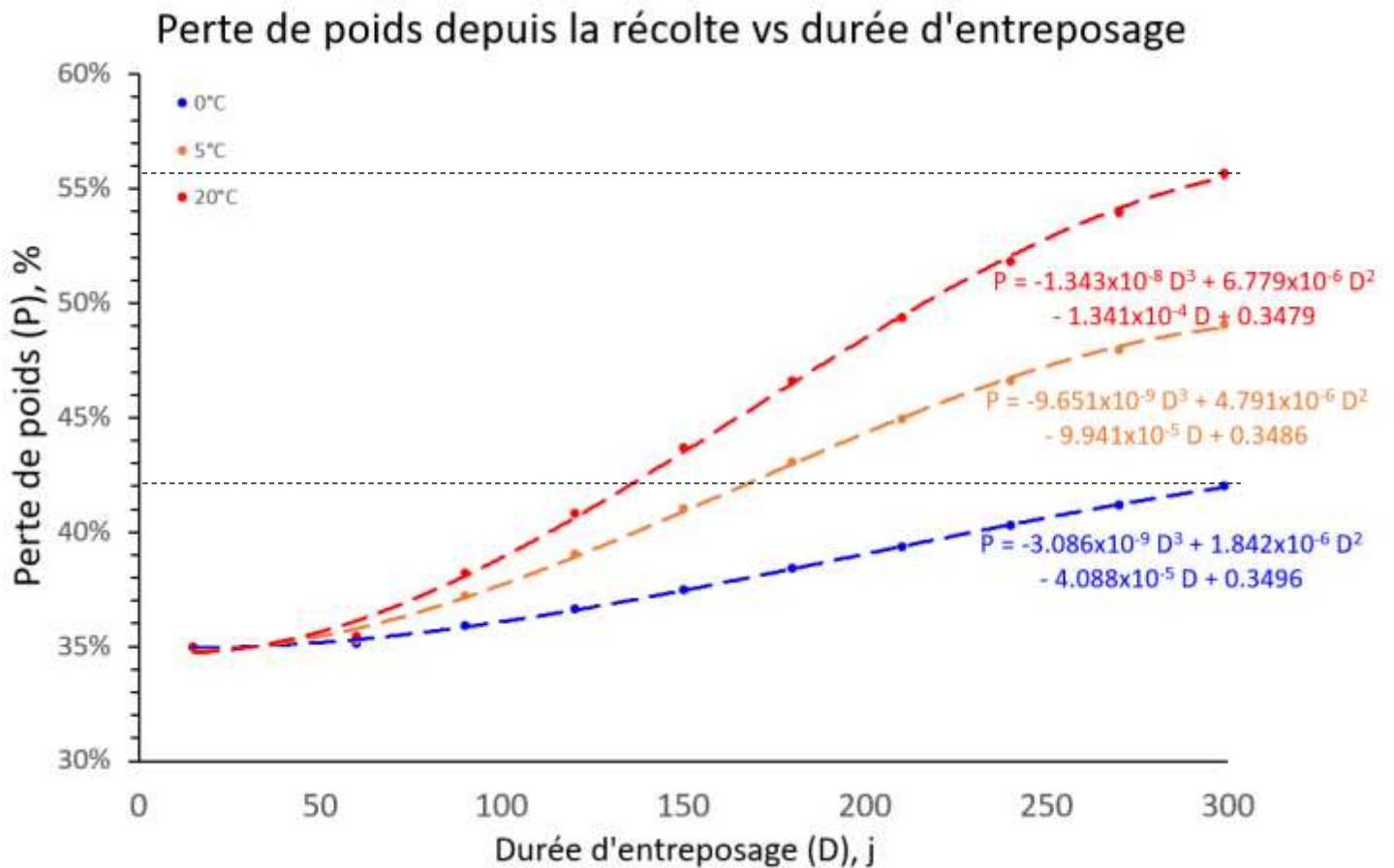
En milieu hermétique, le problème sera donc l'excès de CO₂

En brûlant les 21% d'O₂ disponible, l'ail produit environ 21% de CO₂, ce qui est beaucoup trop pour lui

De plus, en absence d'O₂, l'ail entre en respiration anaérobie produisant plus de CO₂ que d'O₂ absorbé

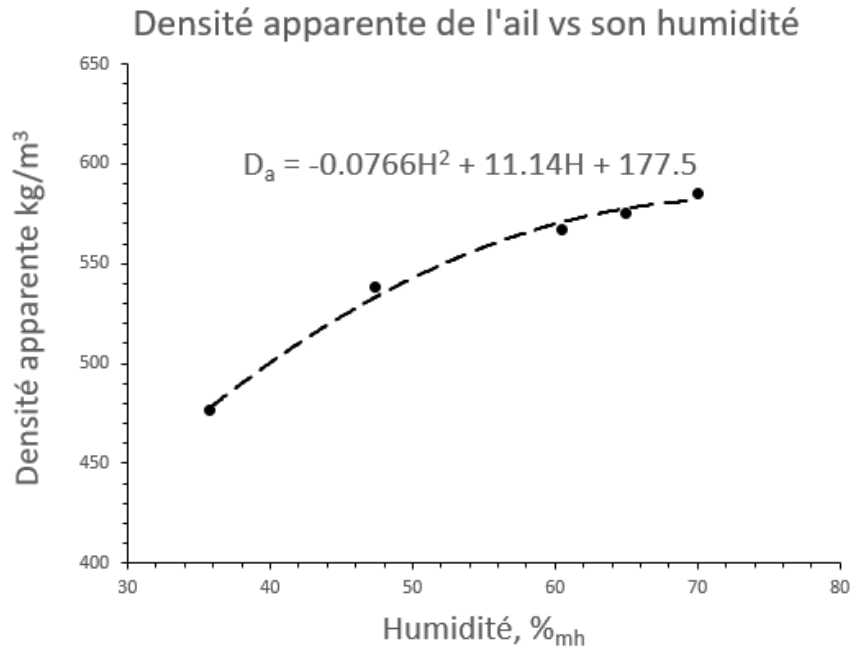
8. Perte théorique de masse de l'ail pendant l'entreposage vs la durée d'entreposage

En se basant seulement sur la perte de masse due au taux de respiration, un modèle a été développé en considérant le changement du taux de respiration pendant l'entreposage trouvé dans la littérature et du taux de respiration en fonction de la température. La masse perdue est exprimée en pourcentage de la masse initiale à la récolte considérant que dans tous les cas, la perte au séchage était de 35% de la masse initiale. À une température de 0°C, il se perd environ 7% de la masse initiale à la récolte, alors qu'à 20°C ce serait près de 21%, soit 3 fois plus.



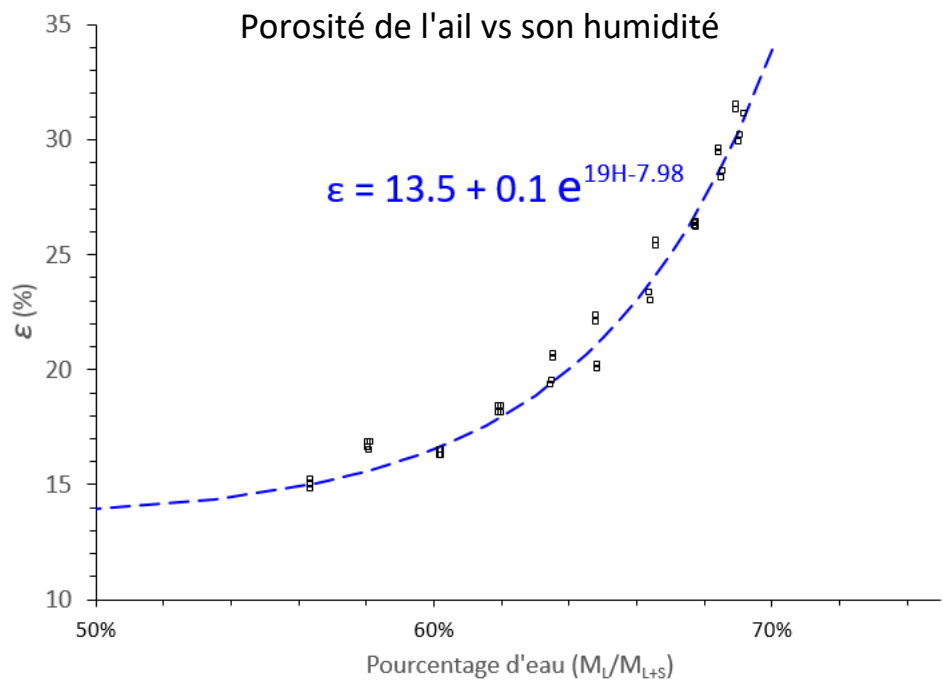
9. Densité apparente de l'ail vs son humidité

La densité apparente de l'ail peut sembler sans importance pour le producteur mais elle permet de comprendre les effets de la perte d'humidité sur la circulation de l'air. En effet, la porosité de l'air est déterminée à partir de sa densité apparente.



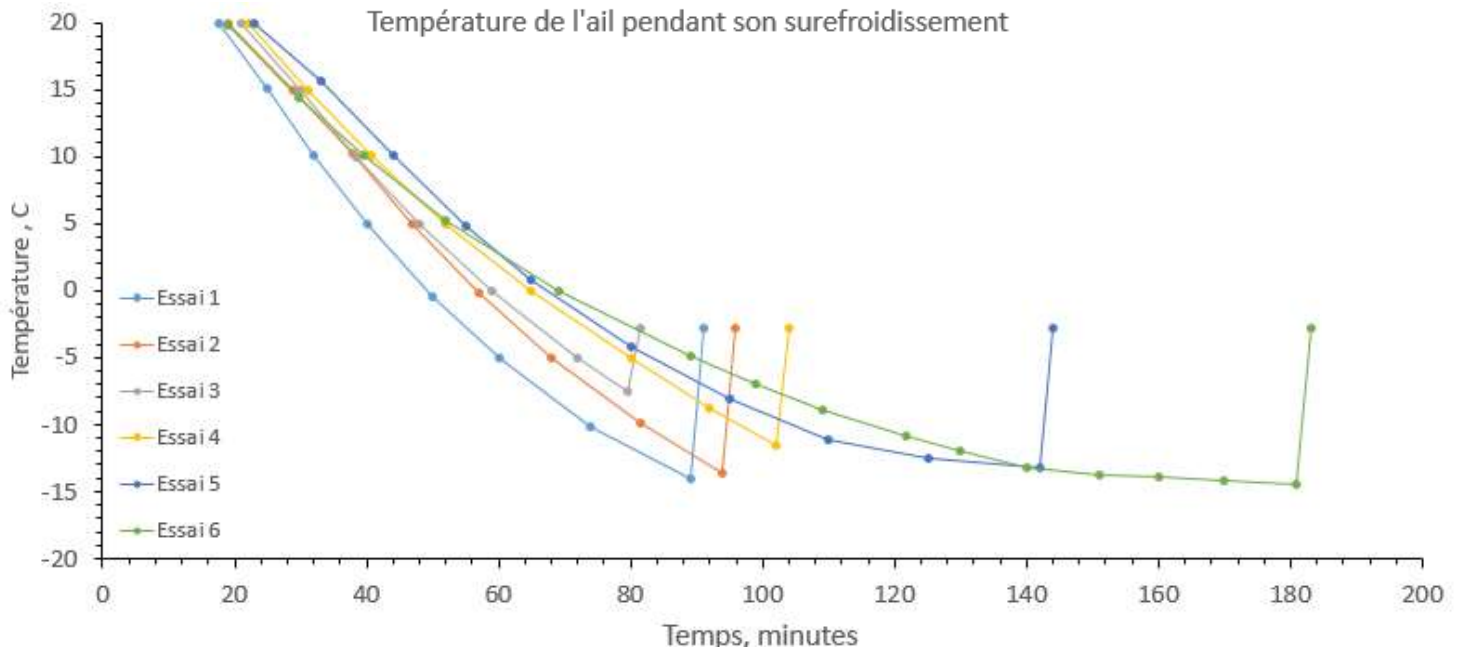
10. Porosité de l'ail vs sa teneur en humidité

Pour la majorité des produits horticoles, leur porosité (ϵ , %) diminue avec l'augmentation de leur teneur en humidité. La teneur en humidité de l'ail a un effet contraire sur sa porosité. Ce phénomène est avantageux lors du séchage de l'ail. Pour l'air, une augmentation de la porosité signifie une plus grande facilité pour circuler à travers la masse de produit. Comme la porosité de l'ail diminue en séchant, l'air aura tendance à circuler où l'ail est le plus humide, donc à faire toujours sécher les parties les plus humide du lot; ce qui est un avantage intéressant pour obtenir un séchage plus uniforme que dans le cas où le produit augmente sa porosité en séchant.



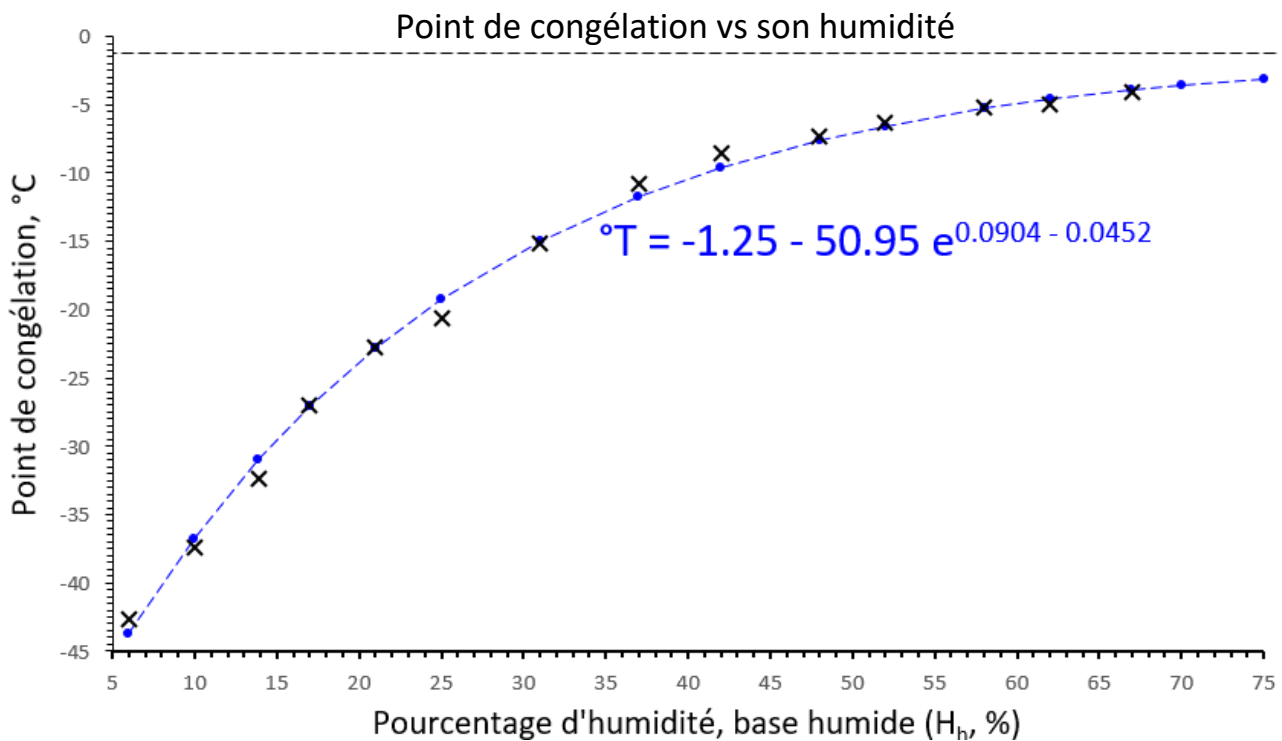
11. Température de l'ail pendant son surefroidissement

Le point de congélation présenté dans la littérature scientifique varie selon les auteurs entre -0.8 et -1.8°C. Par contre, des recherches réalisés en avec l'ail de différents pays montrent qu'il est possible de surefroidir l'ail jusqu'à -14.8°C sans qu'il y ait congélation (formation de cristaux. À cette température, l'état physique et physiologique de l'ail est très instable et la moindre perturbation fait congeler l'ail. Il y a alors changement d'état pour l'eau qu'il contient et dégagement de chaleur. La température de l'ail remonte alors à sa température de congélation et des cristaux se forment. Moins l'ail est surefroidi, plus il sera stable. De l'ail a été surefroidi à -6°C et est resté stable plus d'une semaine. Comme l'expérience n'a duré qu'une semaine, la durée maximale de cette stabilité n'a pas été mesurée.



12. °T de congélation ou °T minimale de surefroidissement de l'ail vs sa teneur en humidité

La température de congélation ou °T minimale de surefroidissement de l'ail dépend de sa teneur en humidité et du taux de refroidissement. Malheureusement peu d'information est disponible sur le taux de refroidissement.



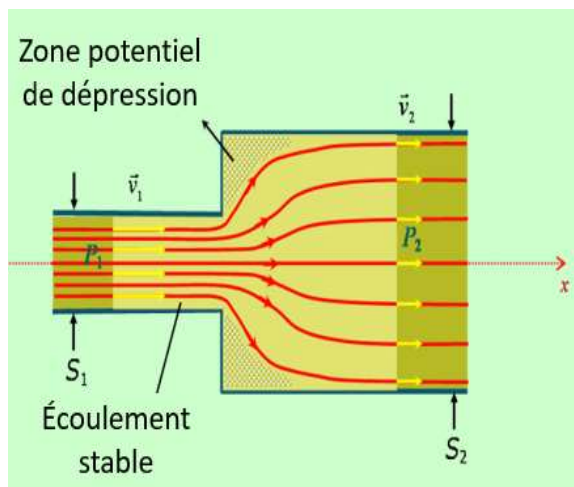
13. Statique et dynamique des fluides

Effet Venturi :

Principe utilisé dans un carburateur où le carburant est aspiré par le changement de vitesse de l'air

- + d'air qui passe dans le même petit trou, + + changement de vitesse est important
- + dépression est forte
- + carburant est aspiré.

Même principe s'applique ici

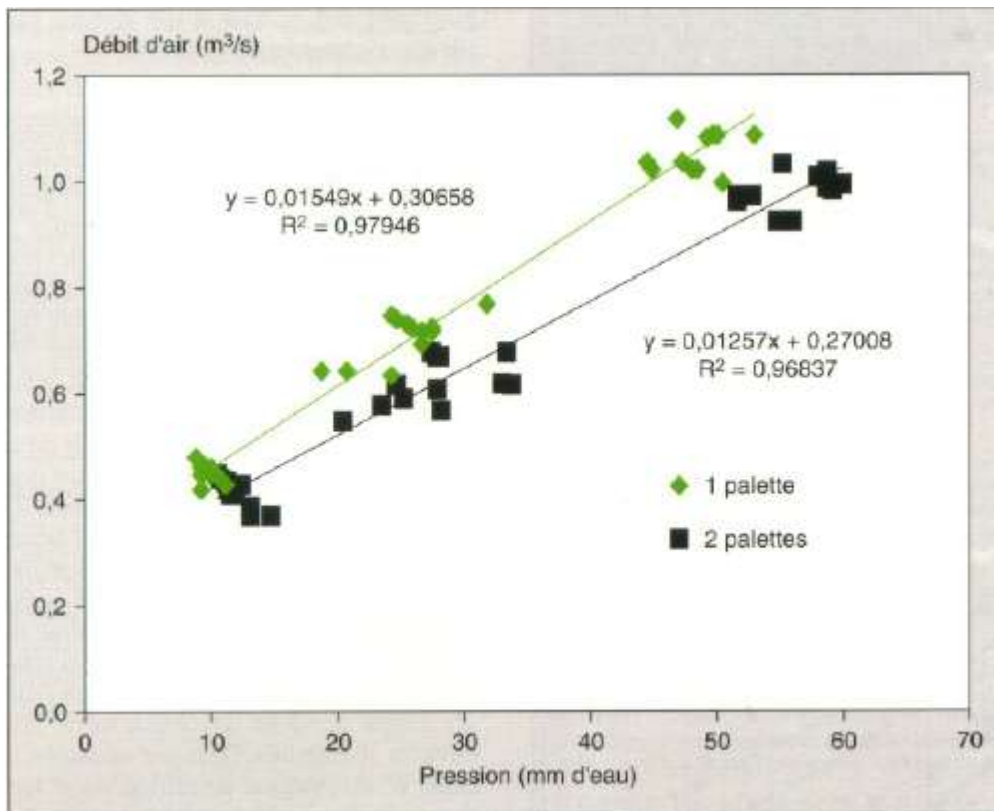


Ça se calcule à partir des équations théoriques :

$$\Delta P_t = \frac{1}{2} \rho (v_1 - v_2)^2 = \frac{1}{2} \rho \left(v_1 - v_1 \frac{S_1}{S_2} \right)^2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2$$

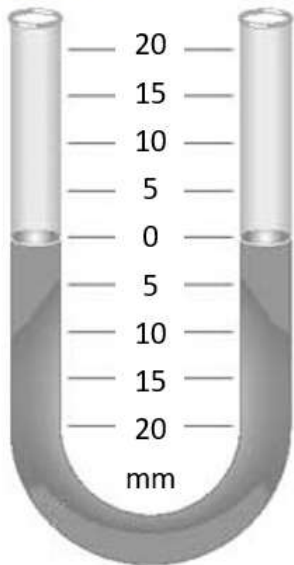
14. Perte de pression à travers une ou deux caisses de produit

Contrairement à ce qu'on peut penser, le fait de superposer deux boîtes ou deux boîte-palettes ne double pas la perte de pression totale lors de la circulation de l'air à travers ces deux boîtes par rapport à circuler à travers une seule boîte ou boîte-palette comme le montre ces résultats réalisés avec du poireau. Le même phénomène est prévisible avec l'ail.



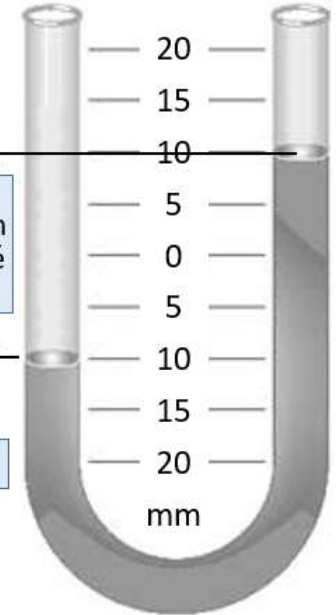
15. Comment mesurer la pression statique dans un système à l'air forcé

Lorsque les 2 côtés du U sont exposés à la même pression, la hauteur du liquide est égale sur les 2 cotés.



On mesure une pression par la différence des hauteurs du liquide entre les 2 côtés du U. On utilise souvent de l'eau comme liquide, c'est pourquoi on parle de pression en cm, mm ou " d'eau. Un atmosphère équivaut à une colonne d'environ 30' d'eau. En circulation d'air, on parle généralement de pression de 6 à 50 mm (1/4 à 2") d'eau. Pour l'ail qu'on empiler pas plus de 90 cm, on devrait avoir une pression de 20 mm d'eau.

H= pression en unité d'eau

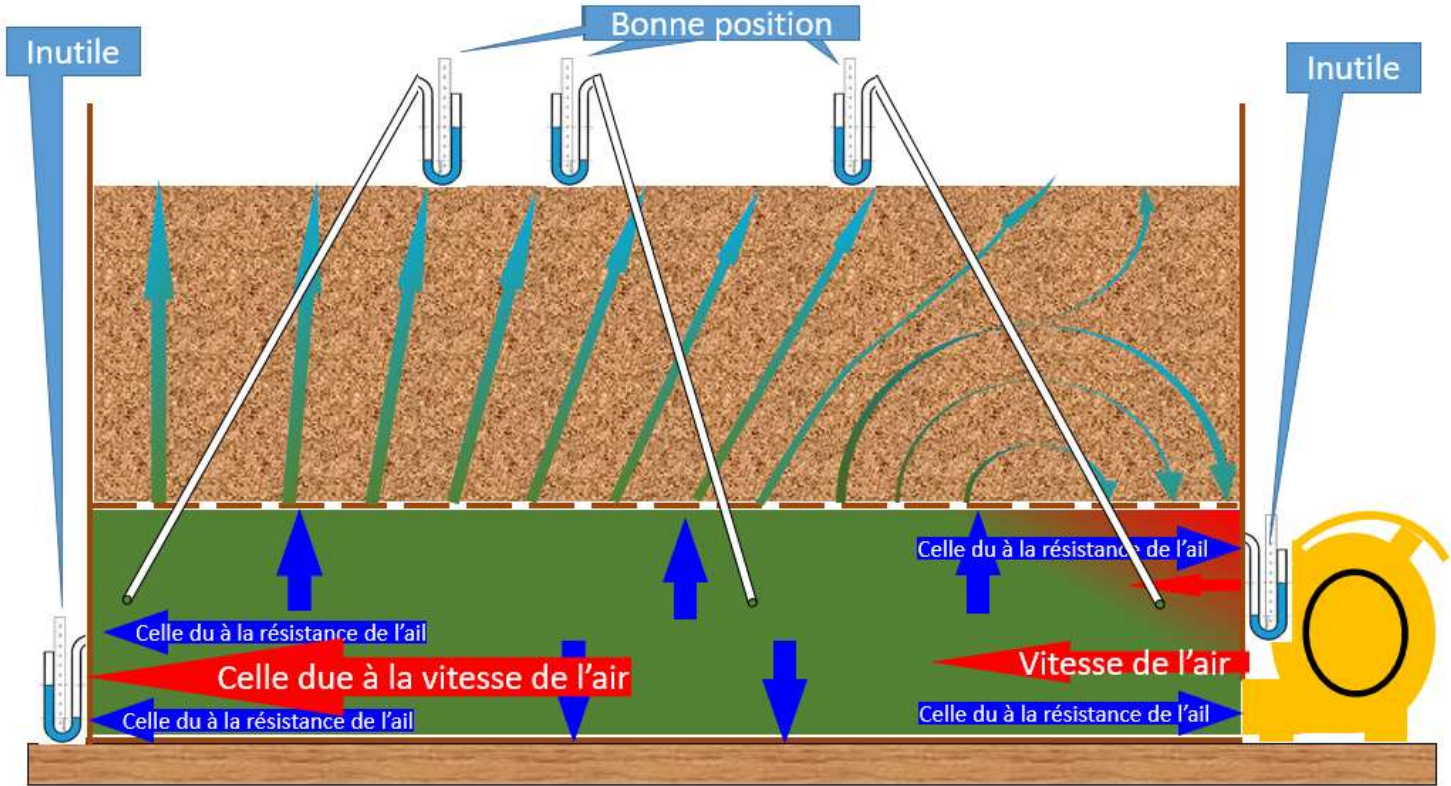


Pour plus de précision, il existe des manomètres inclinés



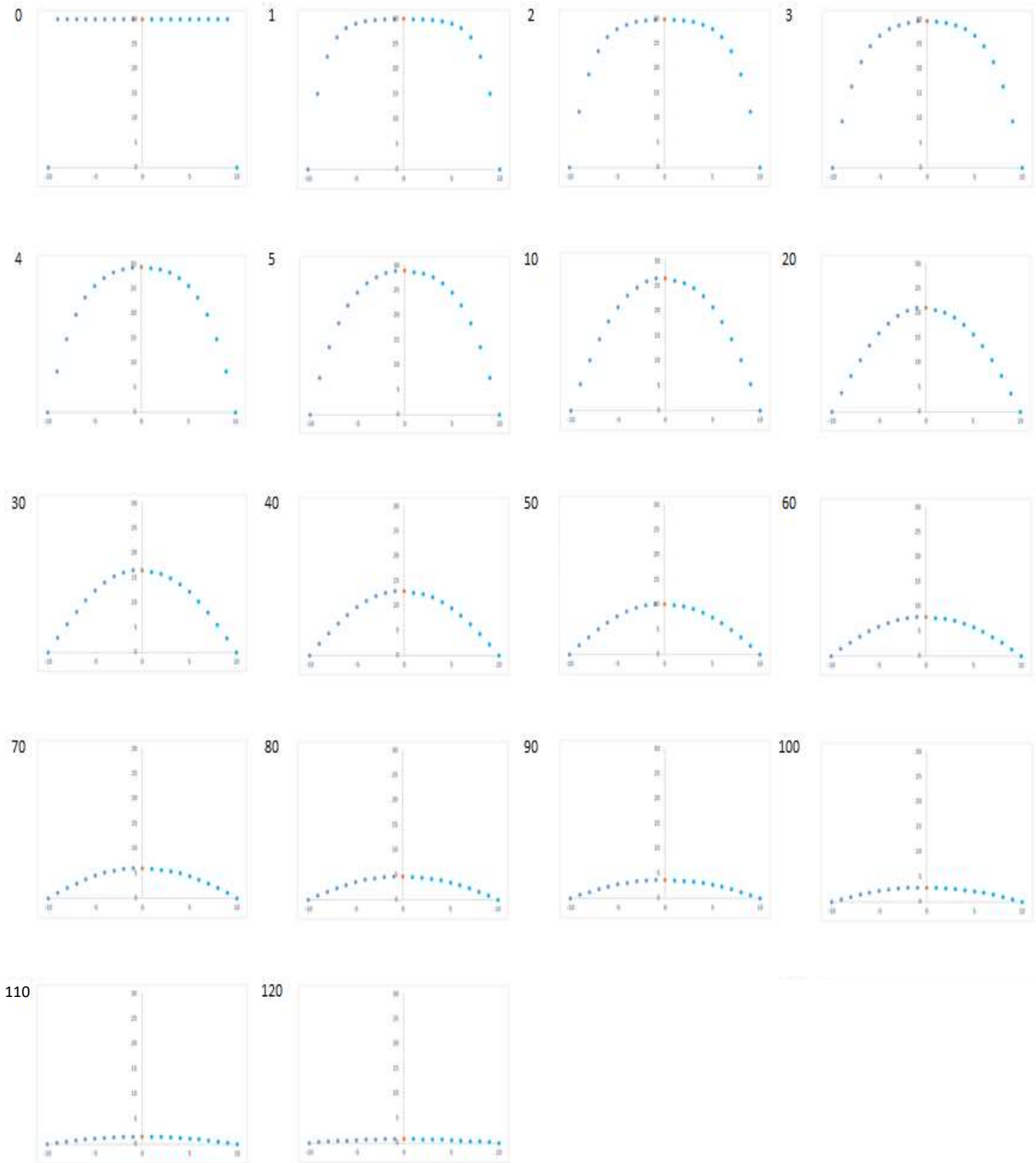
16. Où mesurer la pression statique sans un système à l'air forcé

Pour une question de gestion de l'uniformité du débit de l'air à travers de la masse d'ail, l'idéal serait de mesurer la pression à 3 endroits répartis sur la longueur de plenum. On perce un trou à chaque endroit dans la paroi perpendiculaire au mouvement générale de l'air. On insère un tube flexible dans le trou. Ce tube relie l'intérieur du plenum à un côté du tube en U. Si un trou avait été placé au bout du plenum, on y mesurerait la pression dynamique en plus de la pression statique; ce qui n'est pas utile pour nos besoins.



17. Progression théorique de la °T en refroidissement ou l'humidité en séchage pendant le procédé

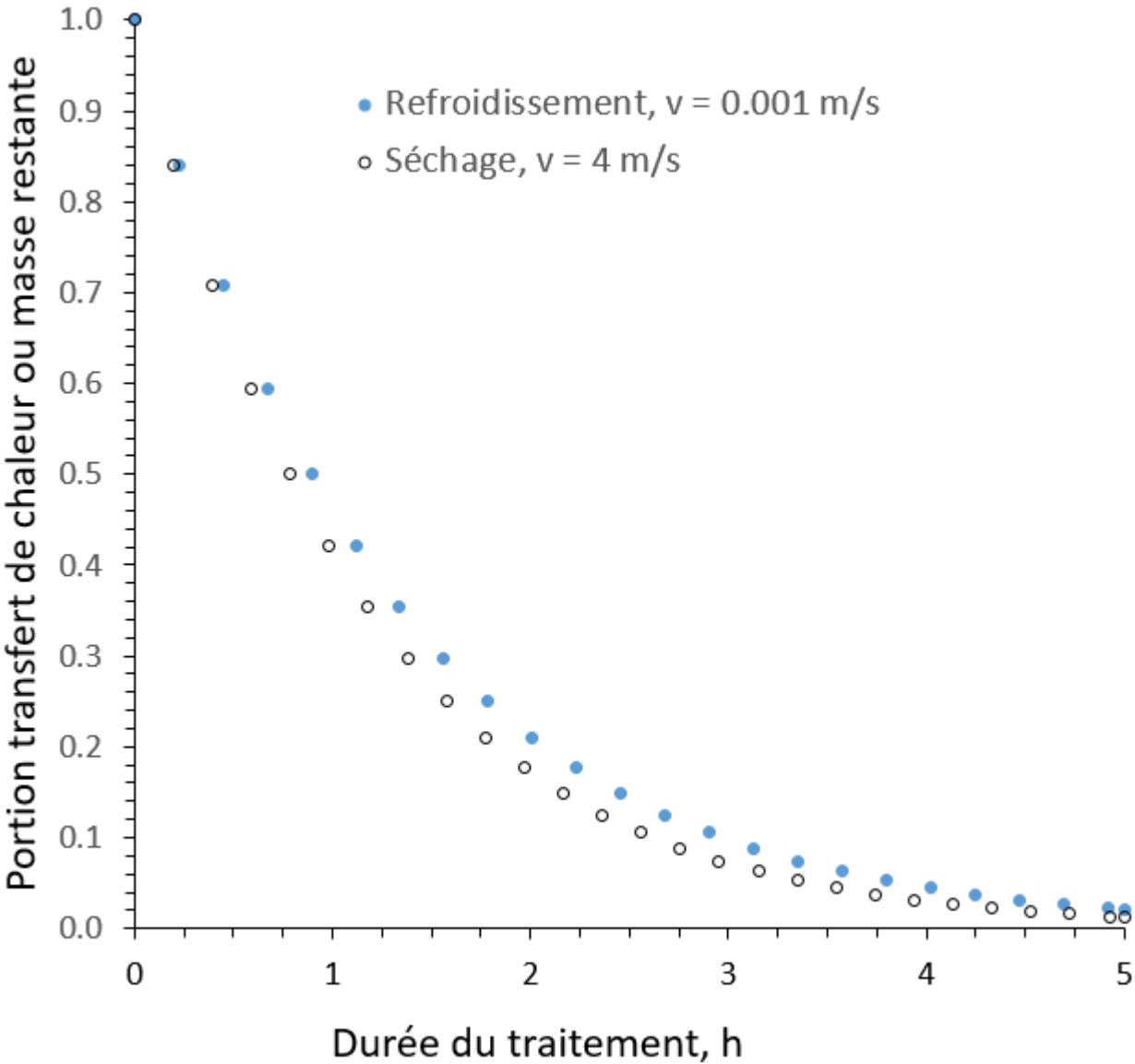
Ces courbes nous permettent de visualiser que pendant un procédé de séchage, chauffance ou refroidissement, le procédé est beaucoup plus rapide au début qu'à la fin. Par exemple, il est facile de voir que pendant les 10 premières unités de temps, l'adifférence des courbes est beaucoup plus grande qu'entre les 10 dernières (110 à 120).



18. Portion transfert de chaleur ou masse restante

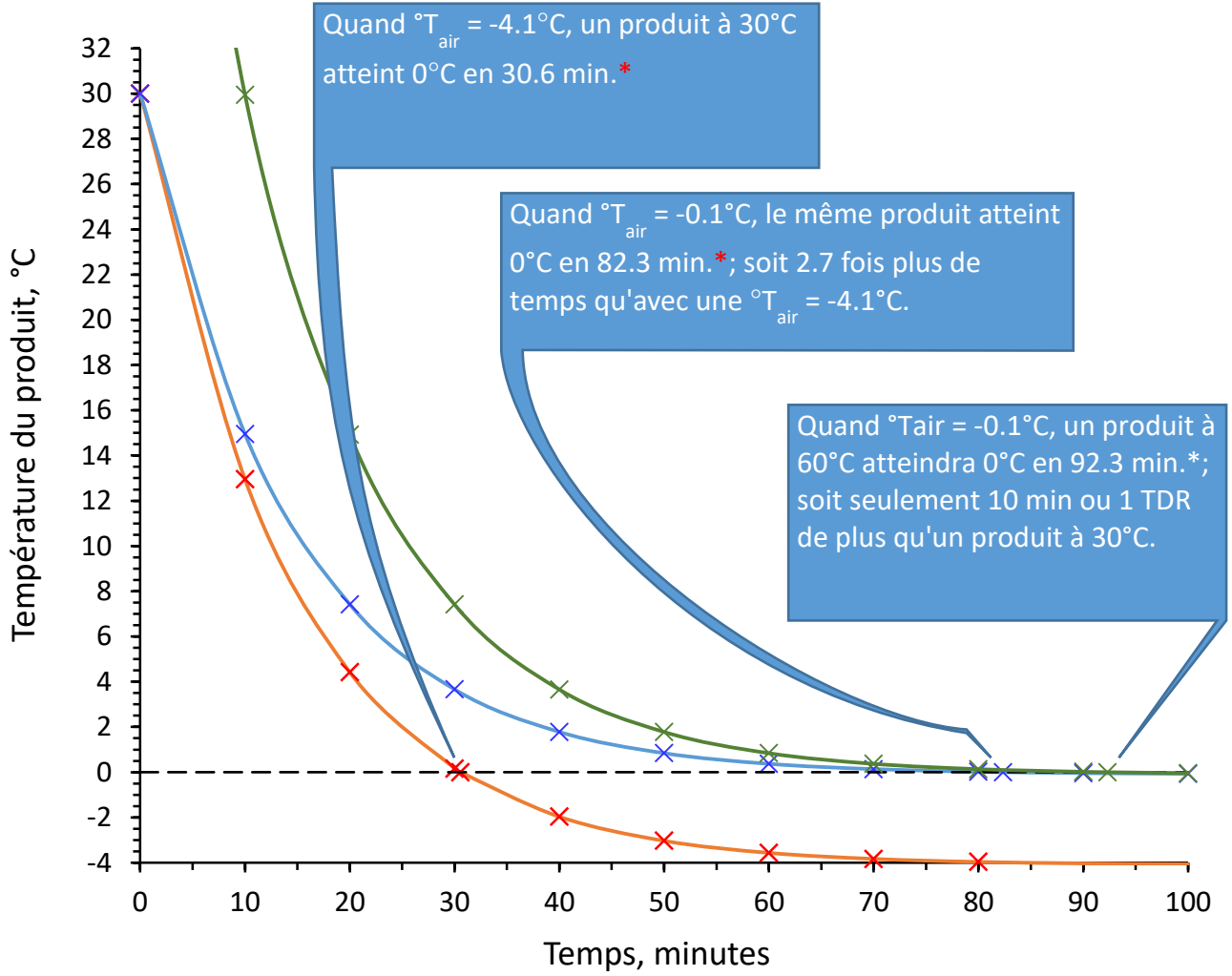
Ces courbes montrent à la fois la similarité qui existe entre le transfert de chaleur en réchauffement ou refroidissement et le transfert de masse (humidité) en séchage, et le phénomène de temps de demi-procédé. Le refroidissement, l'augmentation de température et le séchage ne sont pas des processus dont le taux est linéaire dans le temps. Pour un système donné, normalement la moitié du processus est réalisée dans un temps donné. Durant la même période de temps suivant, le processus ne se réalisera que pour le 1/4 du total à réaliser. Puis sur la période suivante, seulement sur le 1/8 du total, et ainsi de suite. À chaque période successive, la moitié du travail réalisé durant la période précédente se réalisera. Cette période est appelée TEMPS DE DEMI PROCÉDÉ ou en réfrigération le temps de demi refroidissement.

Portion transfert de chaleur ou masse restante

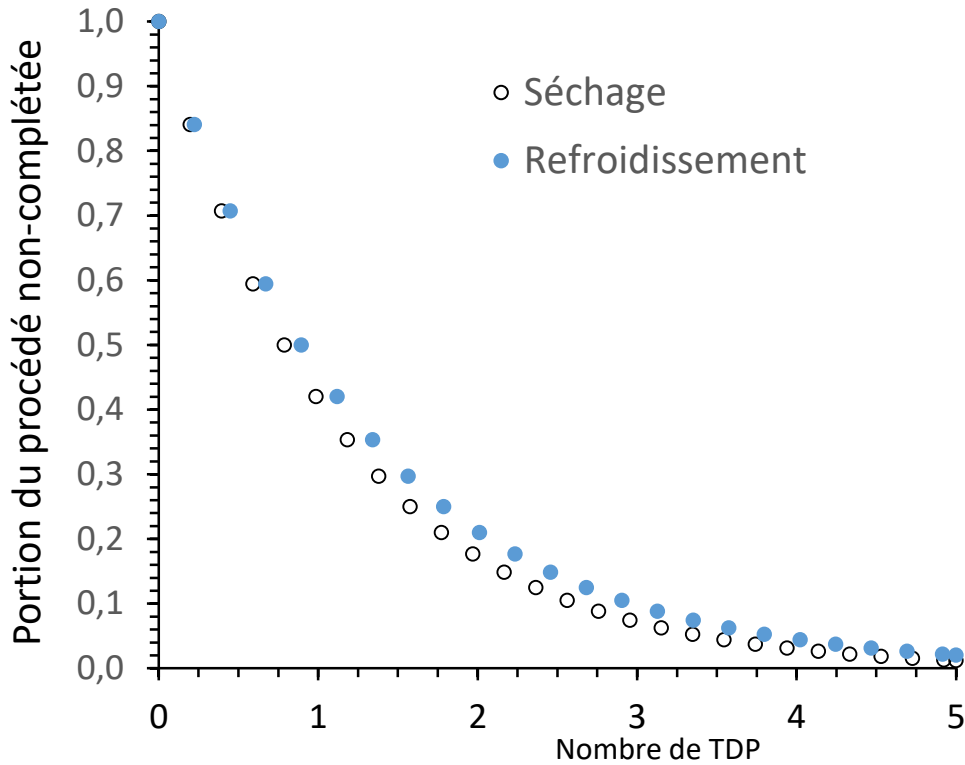


19. Exemple avec un Temps de Demi Refroidissement de 10 min

Cet exemple montre l'importance de maintenir les conditions d'opération le plus stable possible. En laissant varier la température de l'air de refroidissement de seulement quelques degrés, on augmente considérablement le temps du procédé. Par contre, le fait que le produit est entré à une température plus ou moins chaude n'a pratiquement aucune importance pour la durée du procédé.



20. La différence entre chauffage et refroidissement de l'ail



Chauffage : fournir énergie pour monter $^{\circ}\text{T}_{\text{ail}}$ + évaporer eau

Refroidissement : extraire énergie pour baisse $^{\circ}\text{T}_{\text{ail}}$ - évaporé eau

Évaporer 1 kg eau = 2250 kJ

Chauffer ou refroidir 1 kg ail de 1°C = 3.25 kJ

Exemple :

Réchauffer l'ail de 15°C = 49 kJ/kg_{ail}

Si l'ail perd 0.3 kg eau/kg ail = 675 kJ/kg_{ail}

Total : 724 kJ/kg_{ail}

Refroidit l'ail 15°C = 49 kJ/kg_{ail}

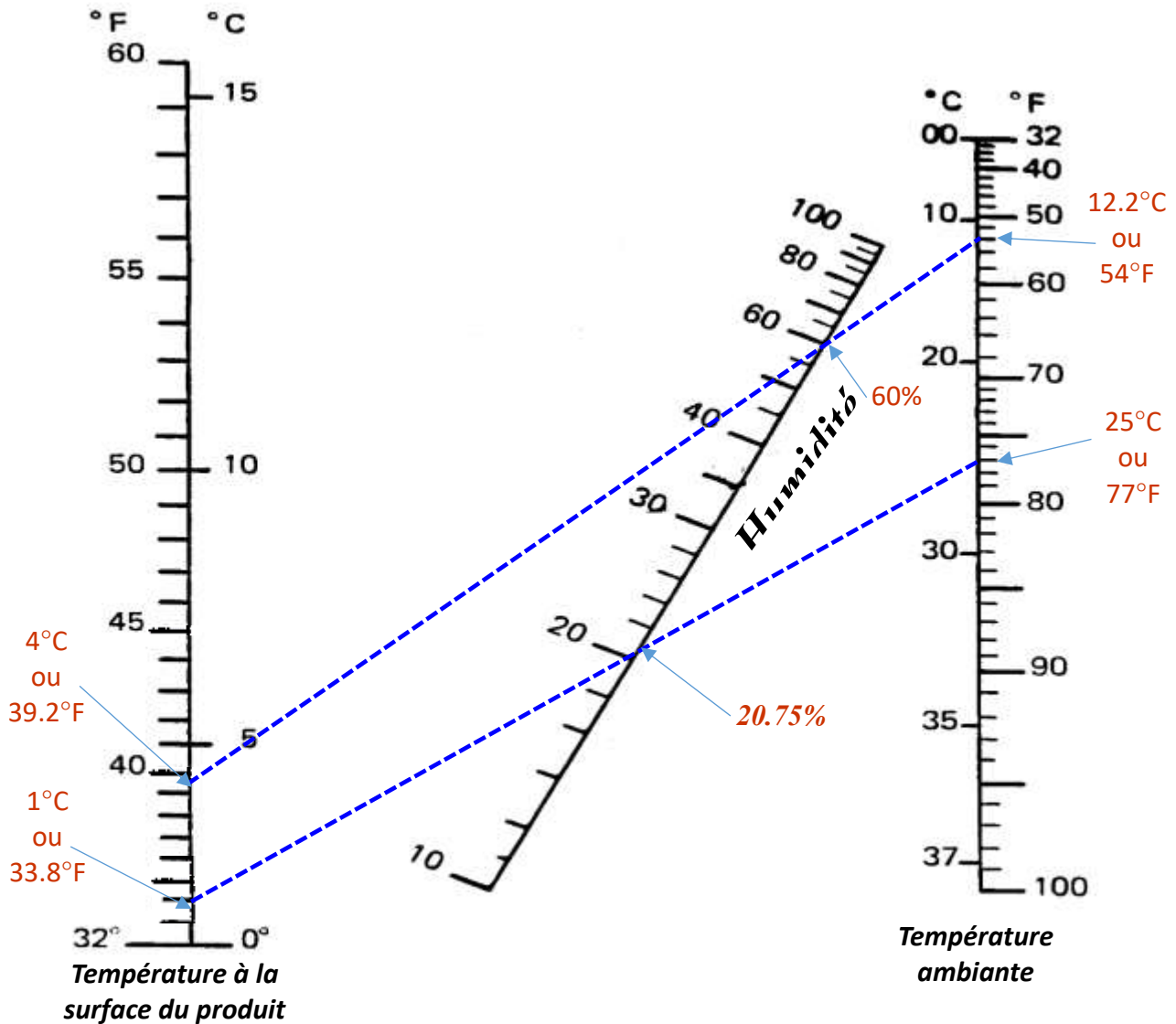
S'il perd 0.01 kg eau/kg ail = -22.5 kJ/kg_{ail}

Total : 26.5 kJ/kg_{ail}

Un rapport de 27 fois plus d'énergie à transporter.

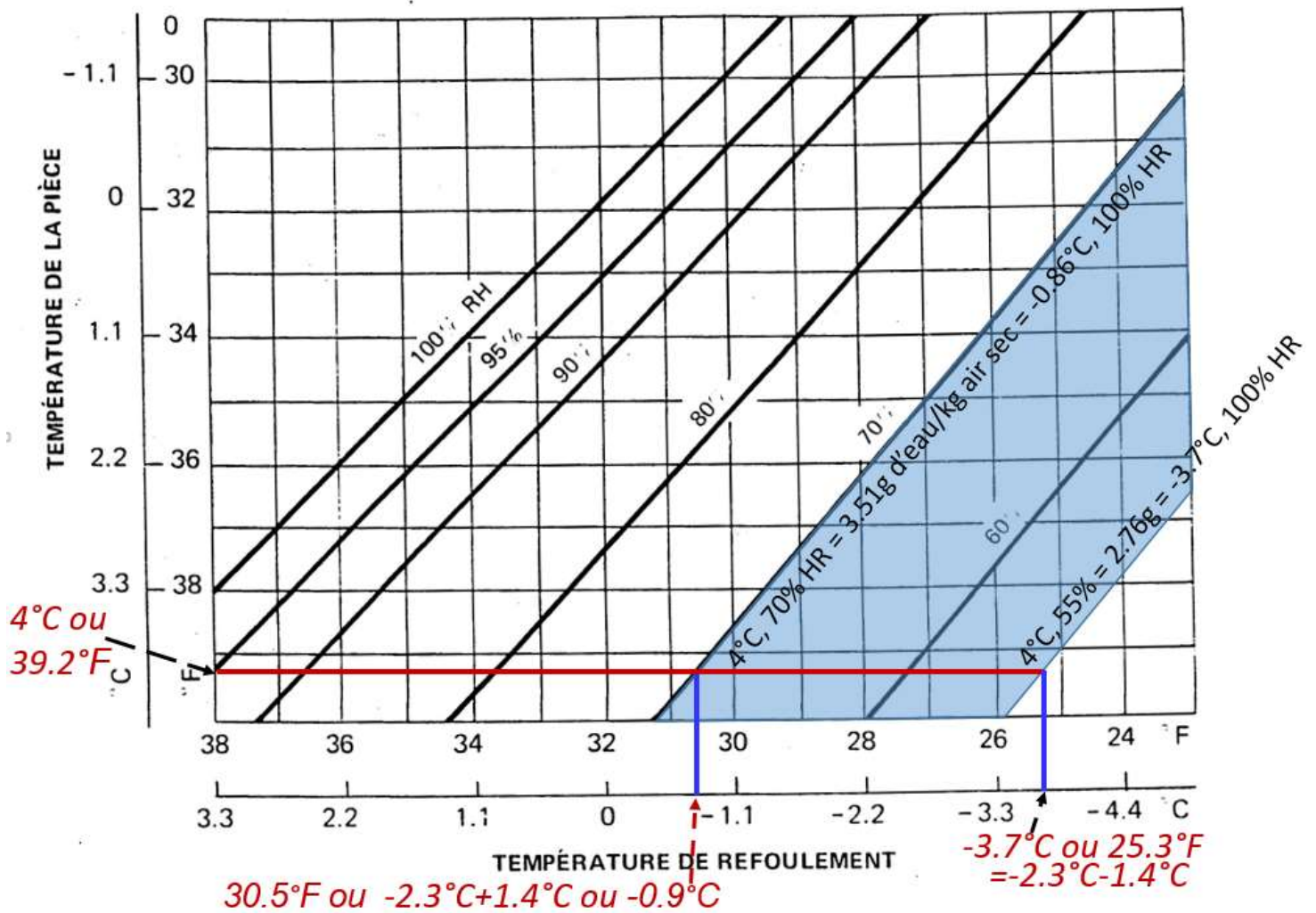
21. Exposition d'un produit à l'air chaud et humide

Pour trouver les conditions à éviter, on peut utiliser cet abaque. Il suffit de relier la température du produit à la température ambiante. La valeur à l'endroit où cette ligne rencontre la ligne Humidité Relative (HR) est la valeur maximum d'HR pour laquelle il n'y aura pas de condensation. Donc, il y aura formation de condensation sur le produit pour toute valeur d'HR supérieur à ce maximum.



22. Contrôle de l'humidité à l'aide de l'évaporateur

Pour garder l'HR entre 55 et 70 % dans un frigo à 4°C, l'air doit sortir de l'évaporateur à $-2.3 \pm 1.4^\circ\text{C}$, soit une différence de $6.3 \pm 1.4^\circ\text{C}$ à travers l'évaporateur

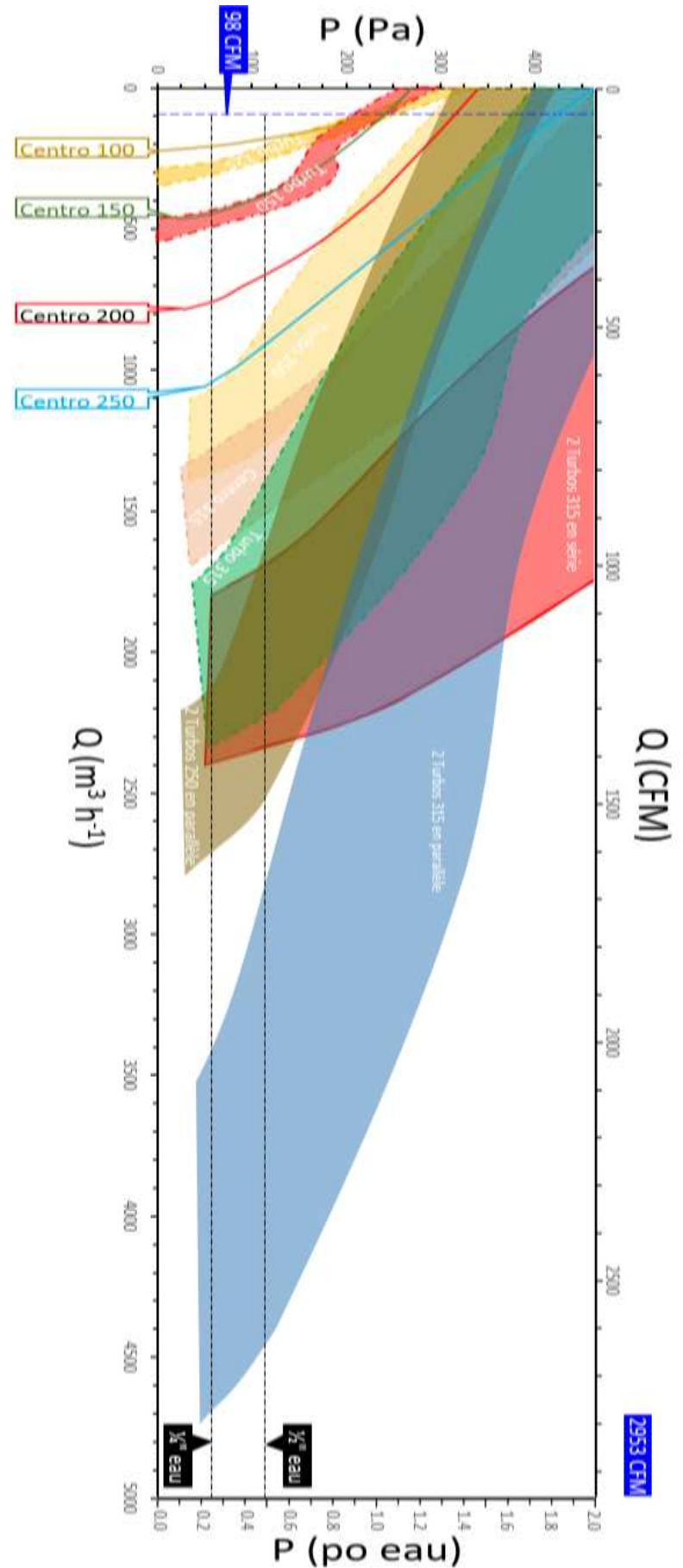


23. Performance de ventilateurs en fonction de la pression statique

Il y a un ventilateur pour répondre à vos besoins, quels qu'ils soient... Vous donnez les quatre informations suivantes à des bons représentants et il vous trouve quelque chose :

- débit (CFM, m^3/s ou h)
- pression statique à laquelle il doit fonctionner
- domaine d'application (milieu sec, poussiéreux, humide, sous la pluie...),
- source électrique disponible (110, 220, 550V...)

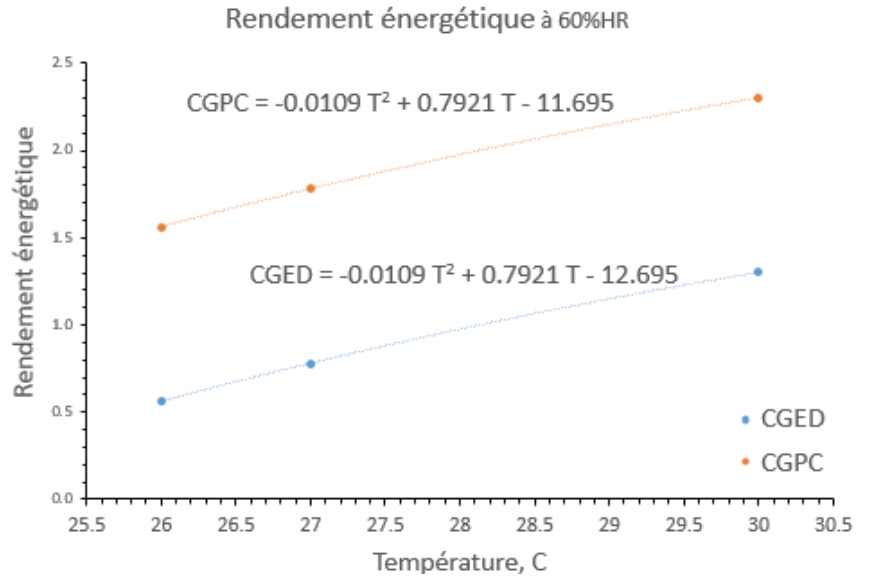
J'ai n'ai regardé qu'une seule compagnie et voilà ce que j'ai trouvé pour couvrir toute demande entre ¼ et ¾ po d'eau (6 à 18 mm d'eau).



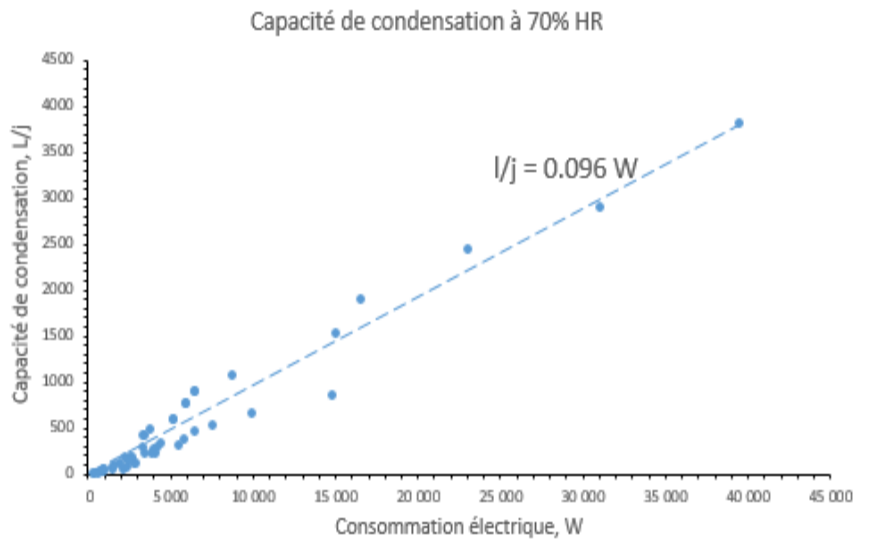
24. Performance des déshumidificateurs

Pour un fabricant donné, les déshumidificateurs qu'il fabrique semblent condenser une quantité d'eau directement proportionnel à l'énergie qu'ils utilisent. Par contre cette relation entre l'eau condensé et l'énergie utilisée varie d'un fabricant à l'autre.

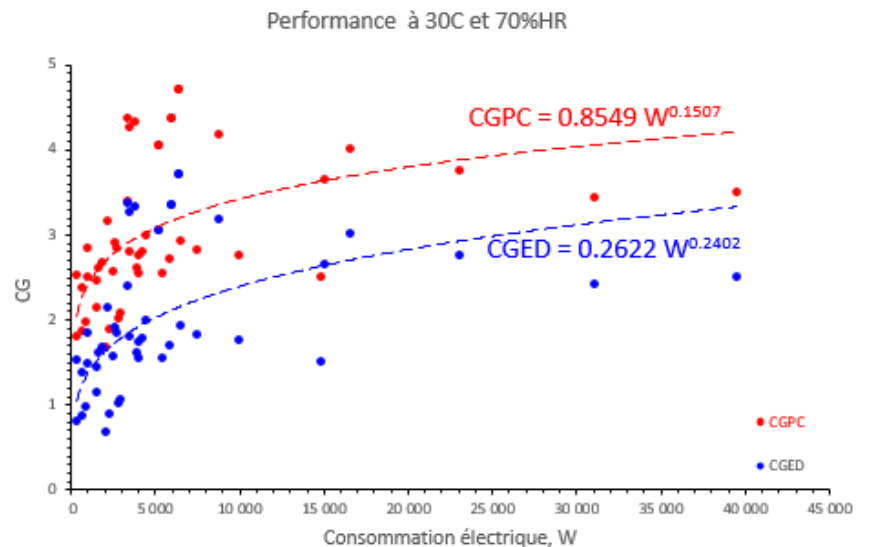
Ces données démontrent que le rendement énergétique d'un déshumidificateur augmente avec l'augmentation de la température.



Ces données démontrent que les performance des déshumidificateurs à condenser l'eau (CGED) et à chauffer l'air (CGPC) augmentent très rapidement avec la puissance du déshumidificateur pour les petites puissances mais qu'elles sont assez stables pour les grande puissance.



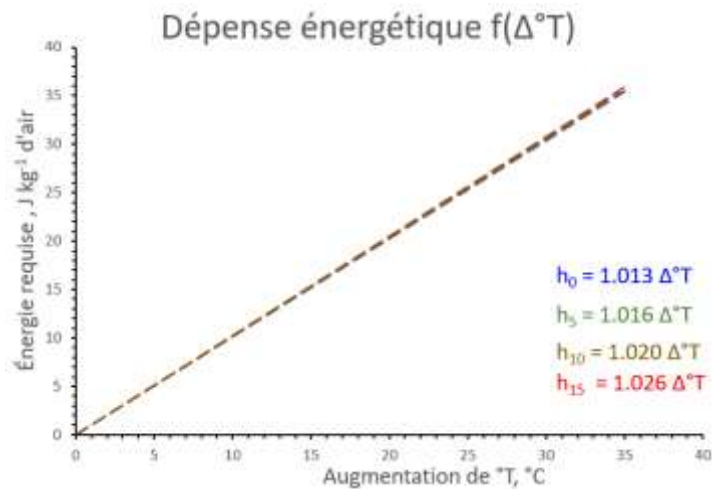
CGED : Coefficient global énergétique de déshumidification
 CGPC : Coefficient global de performance en chauffage de l'air



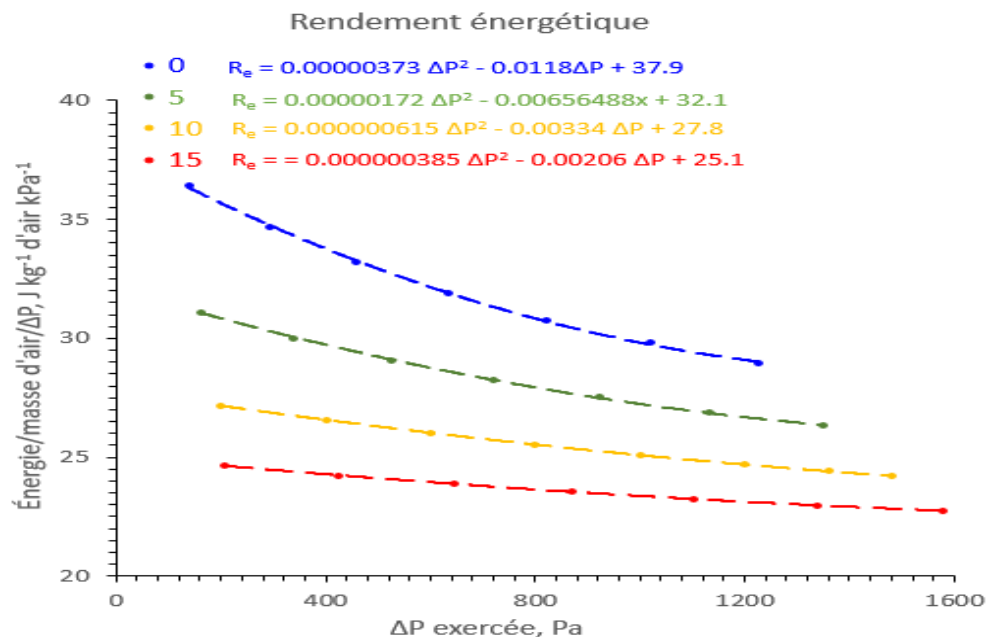
25. Efficacité énergétique vs pression hygroscopique de l'air

La pression hygroscopique de l'air est la différence entre la pression de vapeur de l'eau qu'elle contient et celle de l'eau que contient le produit à sécher. Plus la différence est grande plus l'air a de capacité à extraire l'eau du produit. Ainsi, lorsque l'air à une pression de vapeur inférieure à celle du produit, il peut y avoir humidification du produit par condensation ou par transfert de l'humidité de l'air au produit. Lorsque l'air à une pression de vapeur égale à celle du produit, c'est l'équilibre et il n'y a aucun échange d'eau entre l'air et le produit. Finalement, lorsque l'air à une pression de vapeur supérieure à celle du produit, il y a déshumidification ou séchage du produit par évaporation ou transfert de l'humidité du produit à l'air. La question est à savoir si le séchage à partir de l'air froid est plus efficace qu'à partir de l'air chaud ou le contraire. Un calcul de l'énergie requise pour chauffer l'air froid et l'air chaud et la comparaison de la pression hygroscopique permet de répondre à cette question.

De par les calculs réalisés, on peut constater que l'énergie requise pour chauffer de l'air augmente linéairement avec la différence de $^{\circ}\text{T}$ obtenue; et pour un même écart de température (ex.: de 35°C) à partir de différentes températures est la même à moins de 0.6% près, pour des températures initiales de l'air de 0°C ou 15°C à 100% HR dans les deux cas.



Mais pour obtenir une pression hygroscopique donnée, l'énergie requise diminue considérablement lorsque la température initiale est plus élevée. Par exemple, on doit utiliser 45% plus d'énergie avec le l'air à 0°C qu'avec celle à 15°C pour obtenir une même pression hygroscopique de 200 Pa; 39% de plus pour 400 Pa, 30% pour 800 Pa, et 26% pour 1600 Pa. L'important de cette différence diminue dont avec l'augmentation de la pression hygroscopique. En conclusion, plus on travaille avec de l'air chaud, plus c'est efficace. La température à utiliser est donc limité par ce que le produit peut accepter et non par l'efficacité énergétique.



26. Conception d'un séchoir

Pendant le conditionnement, l'air devrait passer à travers de moins de 90 cm d'ail.

À 0.15 m s^{-1} , soit 15 cm s^{-1} , l'air traverse l'ail en $90\text{cm}/15\text{cm s}^{-1} = 7.2\text{s}$, soit $60\text{s}/6\text{s} = 10$ échanges d'air minute⁻¹.

De plus, la norme pour la vitesse de l'air dans les conduits est de ne pas dépasser 5 m/s. La largeur des tunnels (L_T) et couloirs (L_C) doit répondre à ce critère.

La vitesse recommandée pour l'air qui circule à travers la masse d'ail à sécher se situe entre 0.13 et 0.15 m s^{-1} . En utilisant une vitesse de 0.14 m s^{-1} ; on arrondit à un simple chiffre l'équation qui donne le débit d'air (Q) en fonction de la surface (A) à travers laquelle l'air circule, soit simplement :

$$Q \text{ en m}^3 \text{ h}^{-1} = 500 A \text{ en m}^2$$

Et en système impérial : $Q \text{ en CFM} = 27.5 A \text{ en pi}^2 \text{ de séchoir}$

L'épaisseur maximum de chaque couche d'ail dans un séchoir ne devrait pas dépasser **90 cm**.

La pression statique (P) dans le plenum est reliée à l'épaisseur (H) de la couche d'ail à travers laquelle l'air circule:

$$P, \text{ mm d'eau} = 12.5 H, \text{ m d'épaisseur d'ail}$$

Et en système impérial : $P, \text{ po d'eau} = \frac{H}{80}, \text{ po d'épaisseur d'ail}$

Exemple de calcul pour un système de séchage d'ail à ventilation verticale permettant de superposer 2 boîte-palettes (1 x 1.2 x 0.6 m de haut) nécessiterait un ventilateur capable de fournir 500 A, soit:

$$500 \times 1 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} = 600 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

à une pression statique de : 12.5 H, soit :

$$12.5 \times (0.6 \text{ m} \times 2 \text{ boîtes}) = 15 \text{ mm d'eau}$$

Un autre exemple mais en impérial, 3 boîtes-palettes de (48"x36"x20"de haut), nécessiterait un ventilateur capable de fournir 27.5 A, soit:

$$27.5 \times 3 \text{ pi} \times 4 \text{ pi} = 330 \text{ CFM},$$

à une pression statique de : H/80, soit :

$$(20 \text{ po} \times 3 \text{ boîtes})/80 = 0.75 \text{ po d'eau}$$

27. Ce qui limite l'uniformité dans le temps et l'espace

Capacité frigorifique insuffisante ou excessive

Les restrictions dans la circulation de l'air

L'hétérogénéité de la vitesse de l'air dans les plenums

Le sur-traitement d'un produit = asséchement

Le sous dimensionnement des évaporateurs qui produit de la condensation excessive à l'évaporateur

Mauvais placement des produits

Mauvaise gestion des systèmes

Mauvaise gestion de la manipulation produit

...

28. Point à respecter pour améliorer la qualité de l'ail conditionné et entreposé

Maintenir les températures à $\pm 1^\circ\text{C}$ de l'objectif

Se maintenir le plus près des conditions limites du produit, sans toutefois entrer dans la zone de dommage par la chaleur, le froid, le manque ou l'excès d'humidité

Utiliser des évaporateurs de surface adéquate pour y ajuster les écarts de $^\circ\text{T}$ et diminuer l'asséchement du produit entreposé

Utiliser un système de chauffage capable de maintenir la température désirée (25, 30, 35, 48 $^\circ\text{C}$) selon l'objectif du traitement

Former des rangées de palettes parallèles à l'écoulement de l'air dans l'entrepôt

Distancer les rangées de palettes (10-15 cm)

Garder une distance libre le long des murs (10-15 cm)

De grands espaces vides nuisent à l'uniformité de la distribution de l'air

Ne laisser pas les ventilateurs fonctionner inutilement

Placer les thermostats à au moins 1,3 m du sol, des murs, des sources de chaleur et de froid

HR > 70% = favorise les pathogènes

HR < 55% = augmente l'asséchement de l'ail

Pour une température d'entreposage à 4 $^\circ\text{C}$

Un $\Delta^\circ\text{T}$ à travers l'évaporateur inférieur à 4.9 $^\circ\text{C}$ ne diminue pas suffisamment l'humidité pour l'ail. Un $\Delta^\circ\text{T}$ supérieur 7.7 $^\circ\text{C}$ augmente la condensation et le temps de dégivrage de l'évaporateur