

# **Conditionnement et entreposage court et long terme**

**Clément Vigneault, PhD, Ing.**

**Chercheur scientifique retraité**

**Ingénierie post-récolte des produits horticoles frais**



# Contenu de la présentation

- *Principes de base en transfert de chaleur*
- *Conception d'une unité de traitement thermique*
- *Conception d'un séchoir*
- *Entreposage*

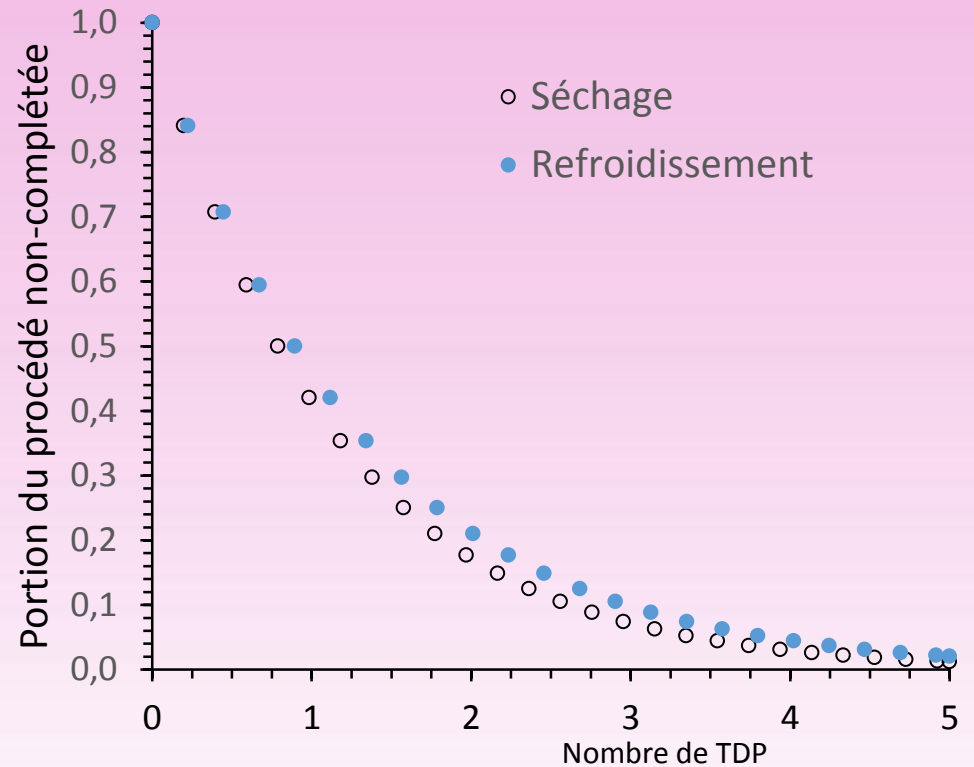


*Parlons :*

*traitement thermique*

*séchage*

*refroidissement*



*Un point en commun :*

*Le temps de demi procédé (TDP, TDR, TDS, TD...)*



# Temps de 1/2 refroidissement, TDR

$t = 0, \text{ } ^\circ T = 32^\circ\text{C}$

$$1.0 = \frac{(32-0)}{(32-0)}$$

16°C

$t = t_{1/2}, \text{ } ^\circ T = 16^\circ\text{C}$

$TDR$  ou  $t_{1/2}$  = temps requis pour que le ratio des  $^\circ T$  diminue de moitié

Ex.: conditions initiales:

$^\circ T_{produit} = 32^\circ\text{C}, \text{ } ^\circ T_{air} = 0^\circ\text{C}$

$$0.5 = \frac{(16-0)}{(32-0)}$$

$t = 2 t_{1/2}, \text{ } ^\circ T = 8^\circ\text{C}$

8°C

$$0.25 = \frac{(8-0)}{(32-0)}$$

$t = 3 t_{1/2}, \text{ } ^\circ T = 4^\circ\text{C}$

4°C

$$0.125 = \frac{(4-0)}{(32-0)}$$

$t = 4 t_{1/2}, \text{ } ^\circ T = 2^\circ\text{C}$

$$1/16 = \frac{(2-0)}{(32-0)}$$

$t = 5 t_{1/2}, \text{ } ^\circ T = 1^\circ\text{C}$

$$1/32 = \frac{(1-0)}{(32-0)}$$

Après un temps infini

$$0 = \frac{(0-0)}{(32-0)}$$

$t_{1/2}$

$t_{1/2}$

$t_{1/2}$

$t_{1/2}$

$t_{1/2}$

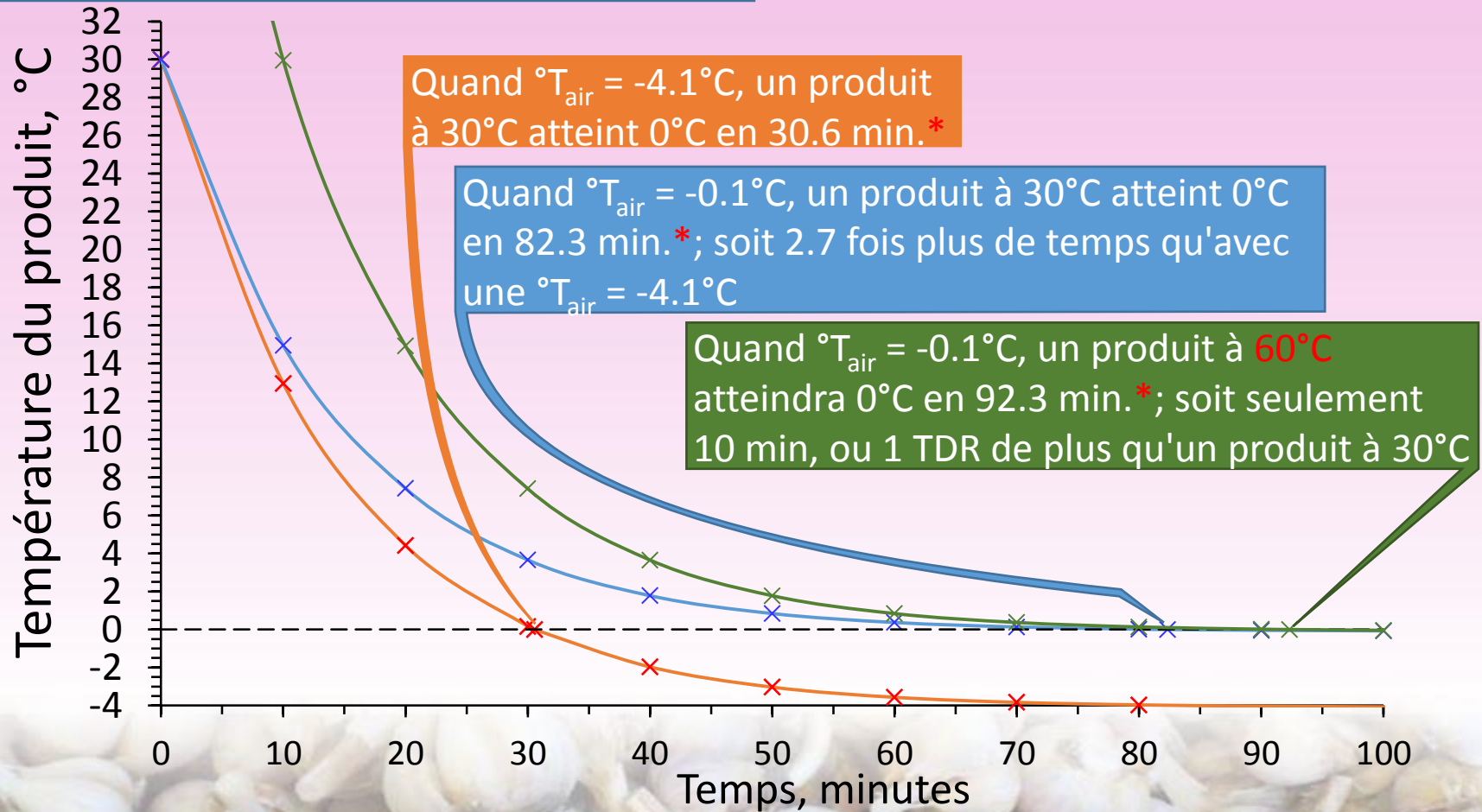
$t_{1/2}$



# Ça donne quoi de savoir ça?

Ça permet de comparer différentes conditions d'opération !!!

\* Exemple pour un TDR de 10 min.



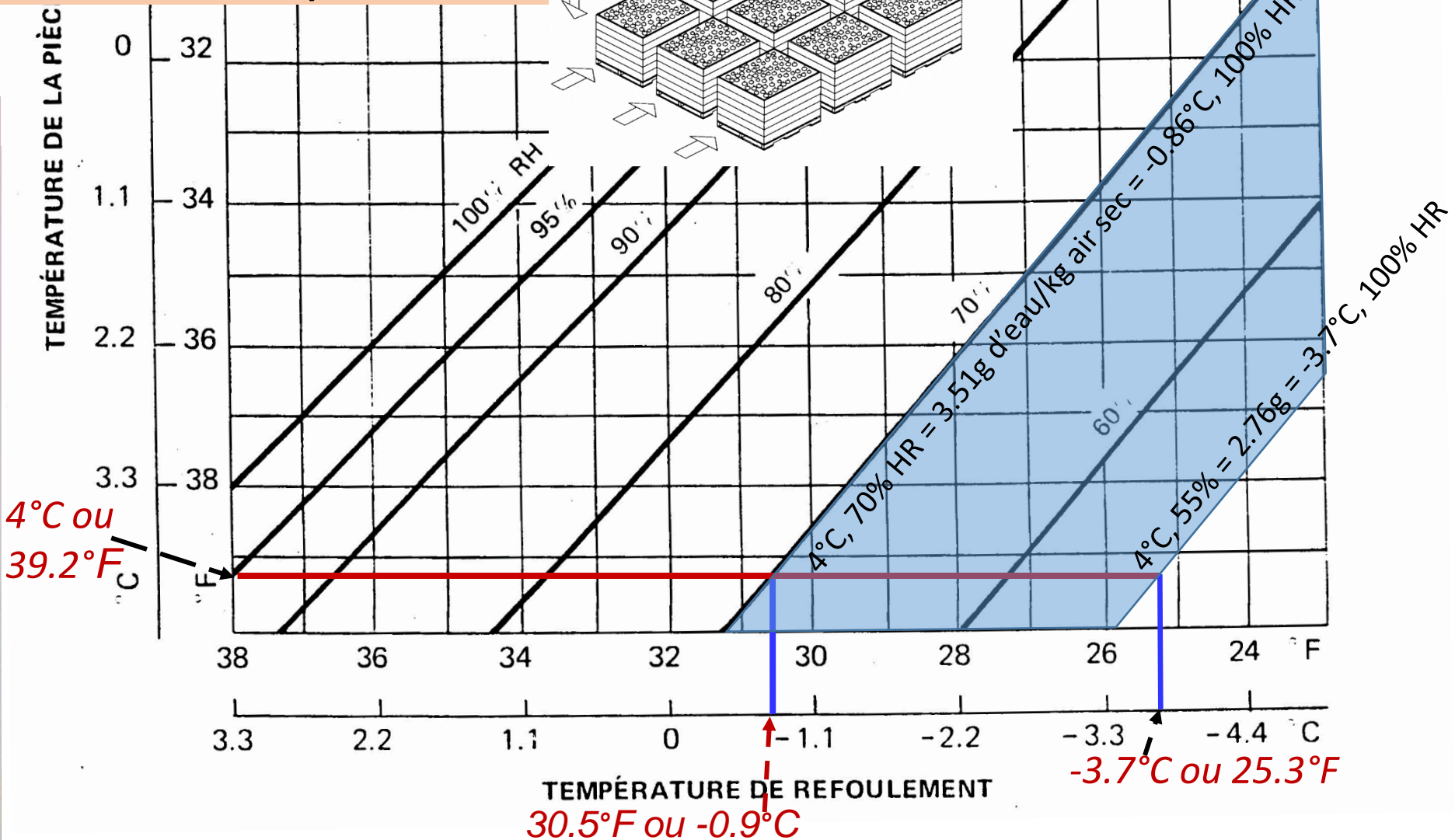
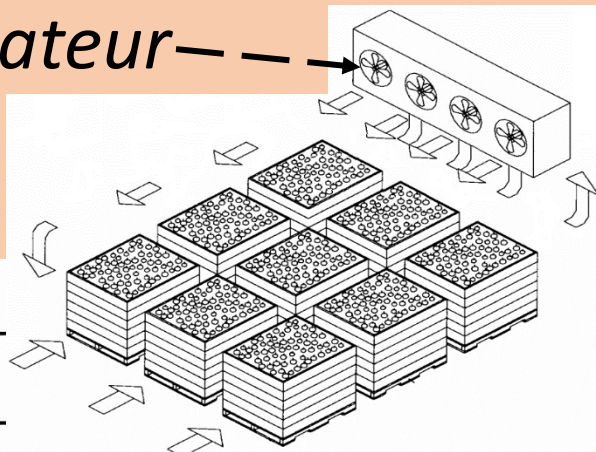


# *La différence entre chauffage, refroidissement et séchage de l'ail*

Systeme	Énergie requise
Chauffage	fournir énergie pour monter $^{\circ}T_{\text{ail}}$ + évaporer eau
Refroidissement	extraire énergie pour baisser $^{\circ}T_{\text{ail}}$ + condenser l'eau évaporée
Séchage par ventilation	fournir énergie pour monter $^{\circ}T_{\text{air}}$ + énergie pour monter $^{\circ}T_{\text{ail}}$ + énergie pour évaporer l'eau
Séchage par déshumidification	fournir énergie pour monter $^{\circ}T_{\text{air}}$ + énergie pour monter $^{\circ}T_{\text{ail}}$ + énergie pour évaporer l'eau - énergie de condensation de l'eau

Évaporer 1 kg<sub>eau</sub> = 2250 kJ, chauffer 1 kg<sub>ail</sub> de 1°C = 3.25 kJ

Pour garder l'HR entre 55 et 70 % dans un frigo à 4°C, l'air doit sortir de l'évaporateur à -2.3°C, soit un  $\Delta T$  de 6.3°C à travers l'évaporateur



# Question d'écoulement des fluides

Aspirer ou souffler l'air?



Pourquoi tout le monde souffle pour éteindre les chandelles de leur gâteau d'anniversaire?

Parce qu'ils veulent créer une pression d'air suffisamment localisée pour éliminer l'indésirable.

En séchage, a-t-on besoin d'une pression localisée ou uniforme?



# Types de pression

**Dynamique :** celle qu'on réent par grand vent. Elle est due à la vitesse de l'air et à ses variations de vitesse

**Statique :** celle qu'on ressent quand on plonge dans une piscine. Dans un plenum, on voudrait qu'elle soit la même partout

**Environnementale :** celle qui vient de ceux au-dessus de nous; la pression de ceux qu'on doit supporter

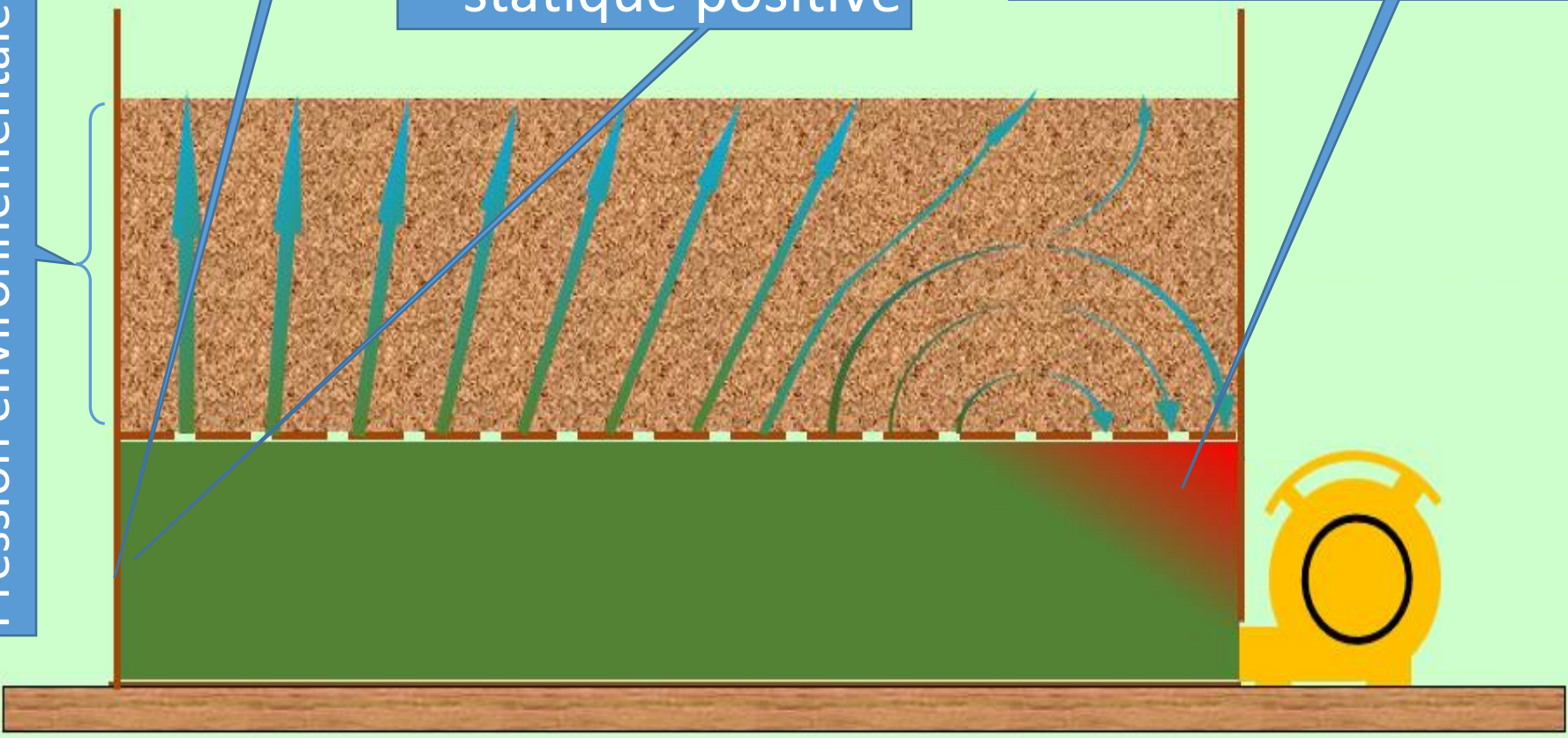


Pression dynamique  
toujours positive

Pression  
statique positive

Pression statique négative  
pouvant entraîner une  
retour d'air dans le plenum  
dû à l'effet venturi

Pression environnementale

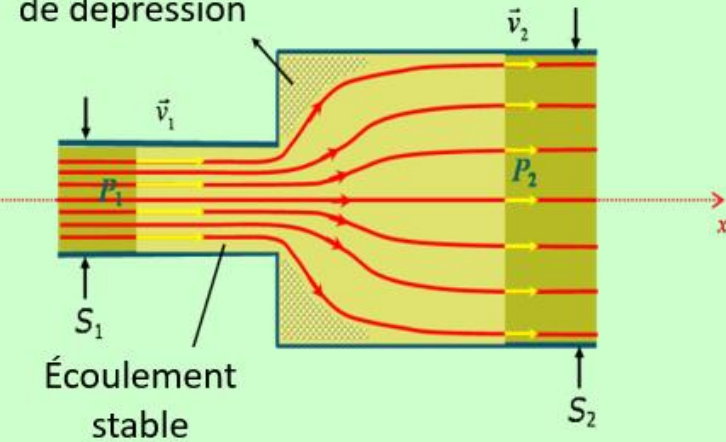


T'es sur de ça ???!!

# Statique et dynamique des fluides

[http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP\\_C\\_M02\\_G02/co/Module\\_NLP\\_C\\_M02\\_C02\\_7.html](http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M02_G02/co/Module_NLP_C_M02_C02_7.html)

Zone potentiel  
de dépression



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

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

À partir des équations  
théoriques, ça se calcule

Dimension de la sortie du ventilateur utilisé: L = 15", H = 4.5"  $S_1 = 45.8 \text{ po}^2$  ou  $0.030 \text{ m}^2$

Et entrer dans un plenum de 18 de haut par 24 po de large  $S_2 = 432 \text{ po}^2$  ou  $0.279 \text{ m}^2$

Supposons qu'on utilise la vitesse d'air recommandé par Leblanc et al qui est de  $0.13 \text{ m s}^{-1}$  sur toute l'air de projection du séchoir (96 po x 36 po).

Le ventilateur doit fournir :  $0.29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Cet air sort du ventilateur à une vitesse de :  $9.81 \text{ m s}^{-1}$

Pour entrer dans un plenum d'air perpendiculaire à la direction de l'air de :  $1.04 \text{ m s}^{-1}$

$$S_1 = 0.030 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 0.279 \text{ m}^2$$

$$v_1 = 9.8101 \text{ m s}^{-1}$$

$$v_2 = 1.04 \text{ m s}^{-1}$$

$$\rho = 1.18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

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

Les calculs montrent des conditions où il y a formation de pression statique négative pouvant entraîner un retour d'air dans le plenum



% supplémentaire	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	$v_1$	$\frac{1}{2} \rho v_1^2$	$v_2$	$\frac{1}{2} \rho v_2^2$	$P_{\text{stat}}$	P au début du plenum	P à la fin du plenum	$\Delta P$ entre 2 bouts du plenum ("eau)
0%	0.29	9.81	56.64	1.04	0.64	187	129.993	187.27	57.3
10%	0.32	10.79	68.53	1.144	0.77	187	118.100	187.40	69.3
20%	0.35	11.77	81.56	1.248	0.97	187	105.073	187.55	82.5
30%	0.38	12.75	95.72	1.352	1.08	187	90.914	187.71	96.8
40%	0.41	13.73	111.01	1.456	1.25	187	75.622	187.88	112.3
50%	0.43	14.72	127.43	1.56	1.43	187	59.198	188.06	128.9
60%	0.46	15.7	144.99	1.664	1.63	187	41.640	188.26	146.6
70%	0.49	16.68	163.68	1.768	1.84	187	22.950	188.47	165.5
80%	0.52	17.66	183.50	1.872	2.06	187	3.127	188.69	185.6
90%	0.55	18.64	204.46	1.976	2.30	187	-17.828	188.93	206.8
100%	0.58	19.62	226.55	2.08	2.55	187	-39.917	189.18	229.1

Ce qui signifie que nous aurions une plus grande différence de pression d'un bout à l'autre du séchoir. Qui plus est, à un bout, une pression négative et à l'autre bout, une pression positive.



Des trois types de pression (**dynamique**, **statique**, **environnementale** ). On mesure :

- a) Laquelle?
- b) Où?
- c) comment ?

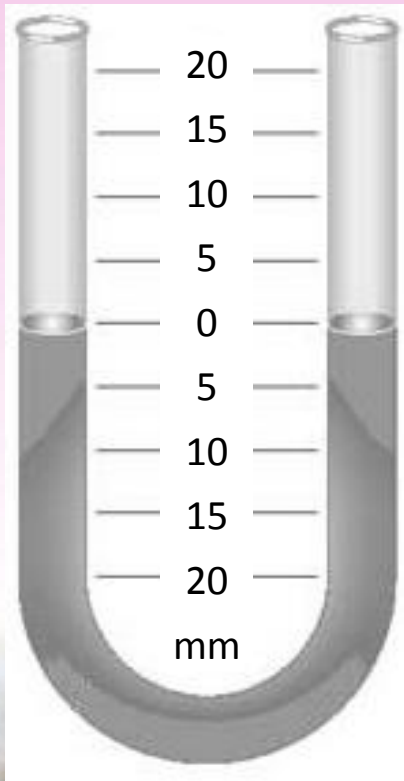
- a) On mesure la pression statique.
- b) À travers une paroi du plenum perpendiculaire à la direction générale de l'air.
- c) À l'aide d'un manomètre : le plus simple étant en U

Et on ajoute à ça un thermomètre



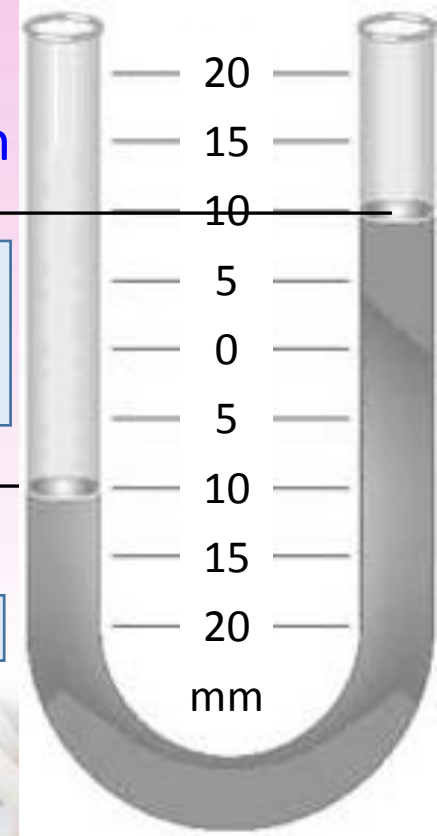
# Principe du manomètre en U:

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 po d'eau. Un atmosphère équivaut à une colonne d'environ 30' d'eau (10m). 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.

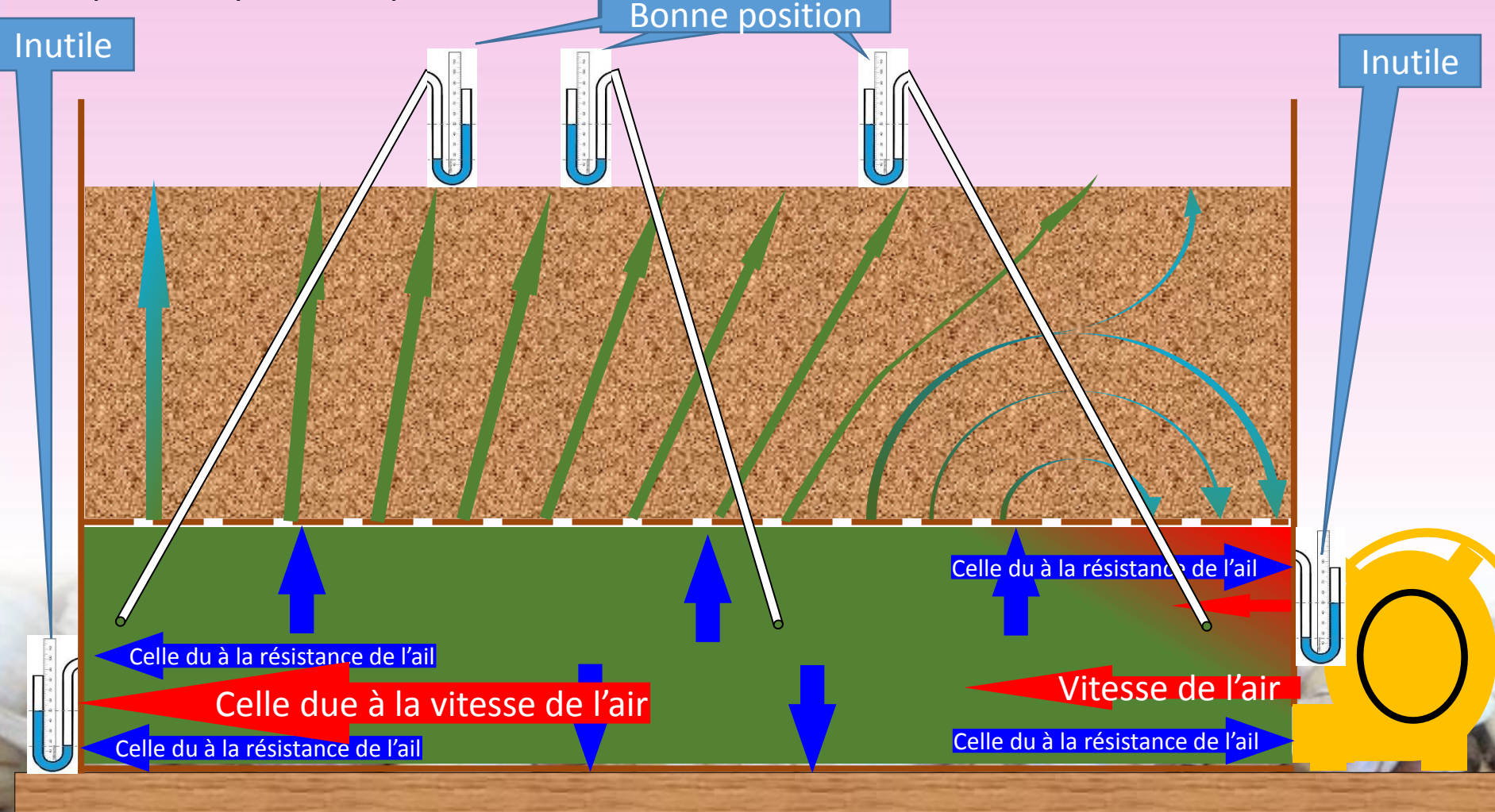
H =  
pression  
en unité  
d'eau



Pour plus de précision, il existe des manomètres inclinés



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 général 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.



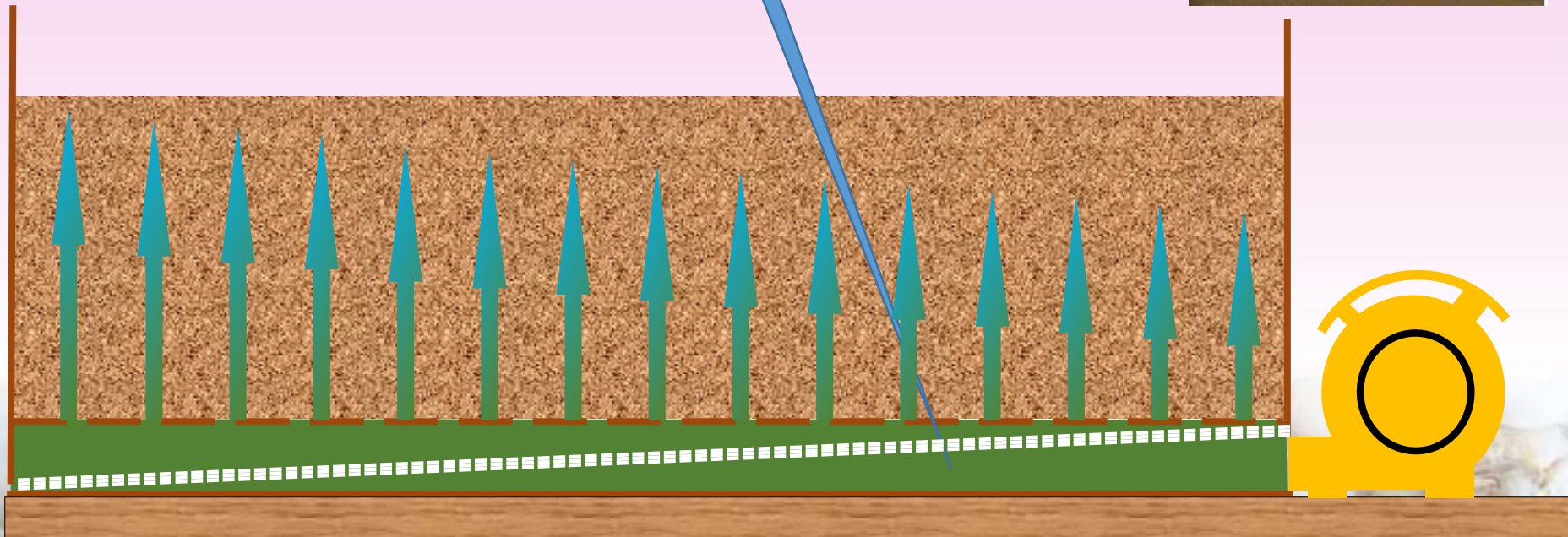
Mesurer la pression statique ne  
règle pas le problème ...

Y a-t-il des solutions?





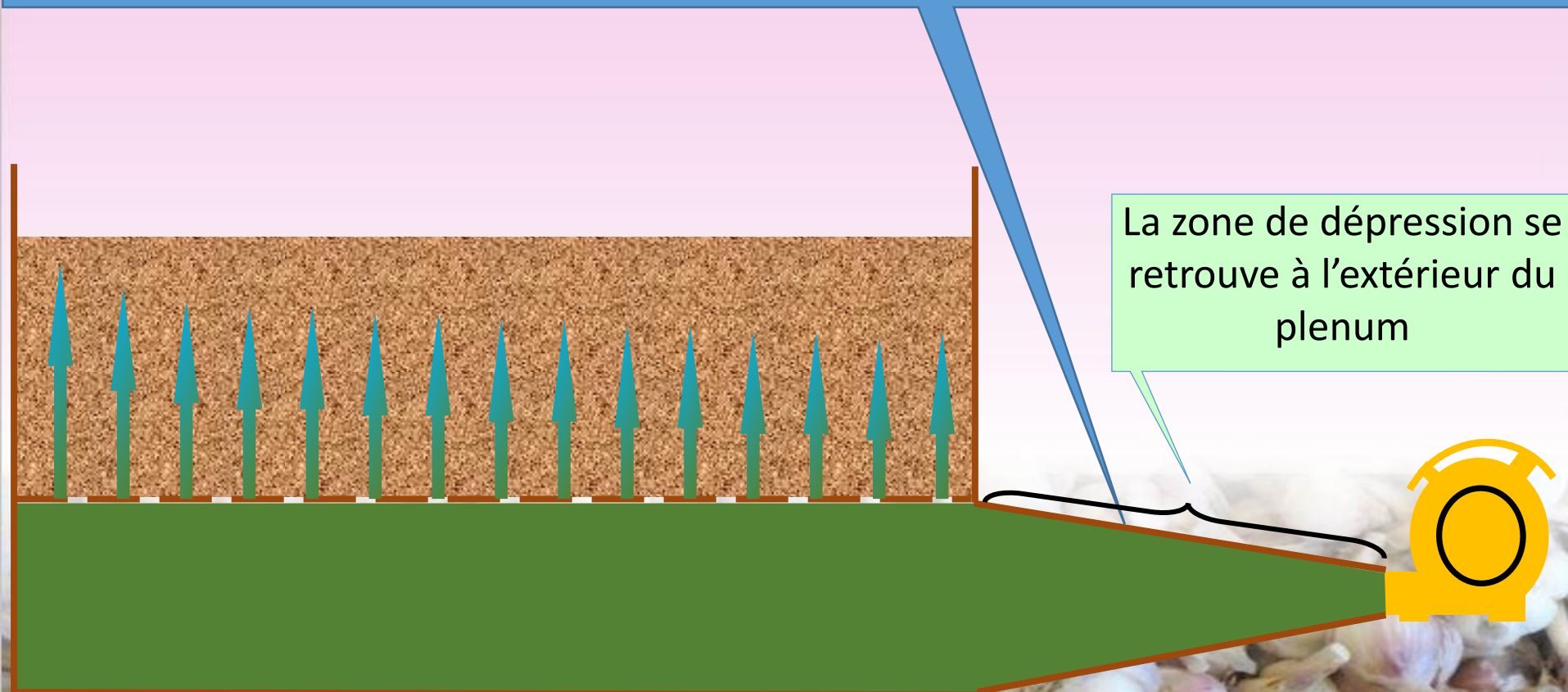
Solution 1: Utiliser un déflecteur du type pour déflecteur pour fluorescent pour dévier l'air sur toute la longueur du plenum.  
Inconvénient : efficacité non garanti.



Solution 2: **Si vous avez de la place**, éloignez le ventilateur et construisez un **entonnoir ajusté aux dimensions du plenum et du ventilateur**. Plus l'entonnoir est long, plus uniforme sera la distribution de l'air.

Avantage: élimine le retour d'air.

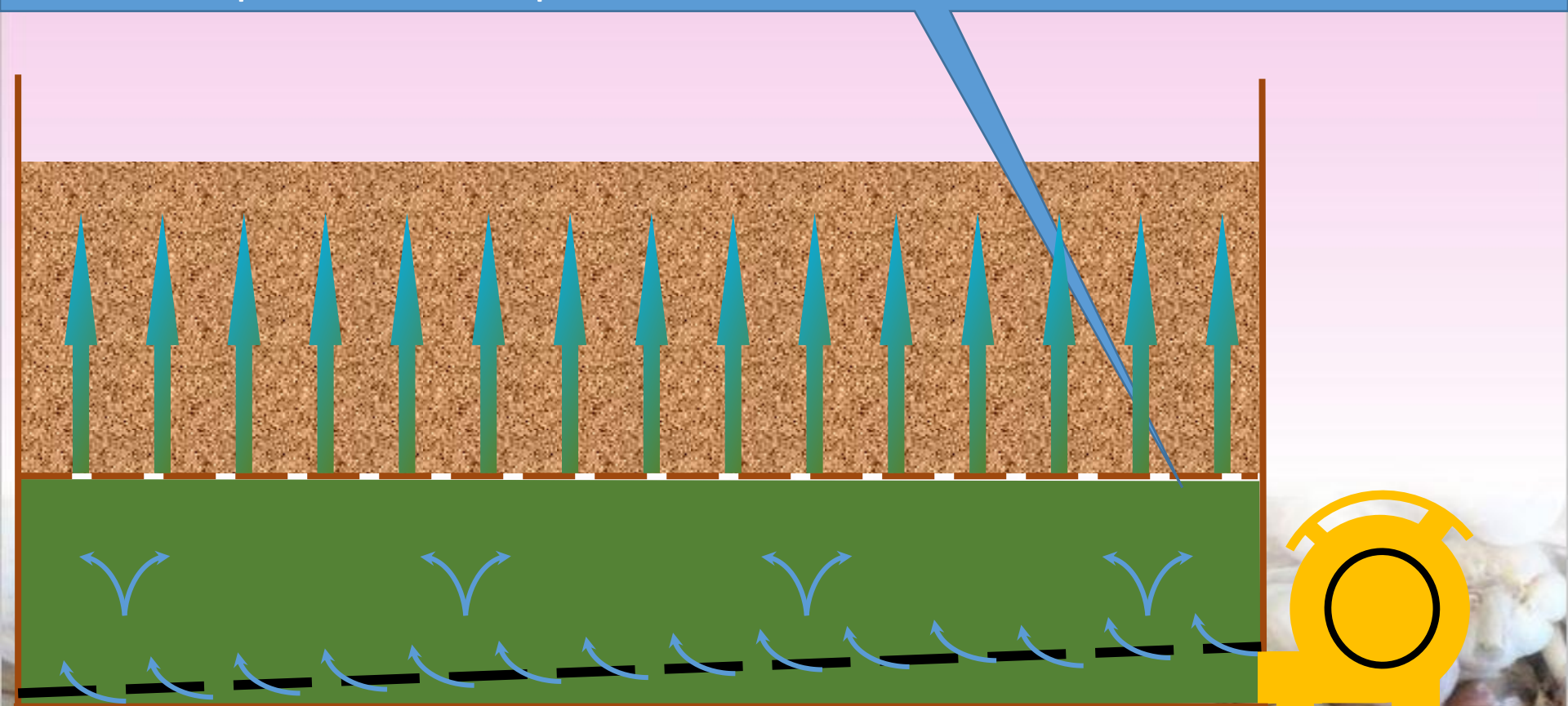
Inconvénient : demande plus d'espace.



Solution 3 : Installer un 2° plancher incliné avec petites ouvertures produisant une pression statique assez grande pour forcer l'air à le traverser dès son entrée dans le plenum.

Avantage: 1°, offre un espace où l'air peut s'uniformiser avant d'entrer en contact avec l'ail; 2°, produit une plus grande uniformité pour un système en poussée; 3°, le nombre d'ouvertures et leur largeur est calculable.

Inconvénient: requière ventilateur plus puissant pour une même débit total d'air que sans ce 2° plancher.

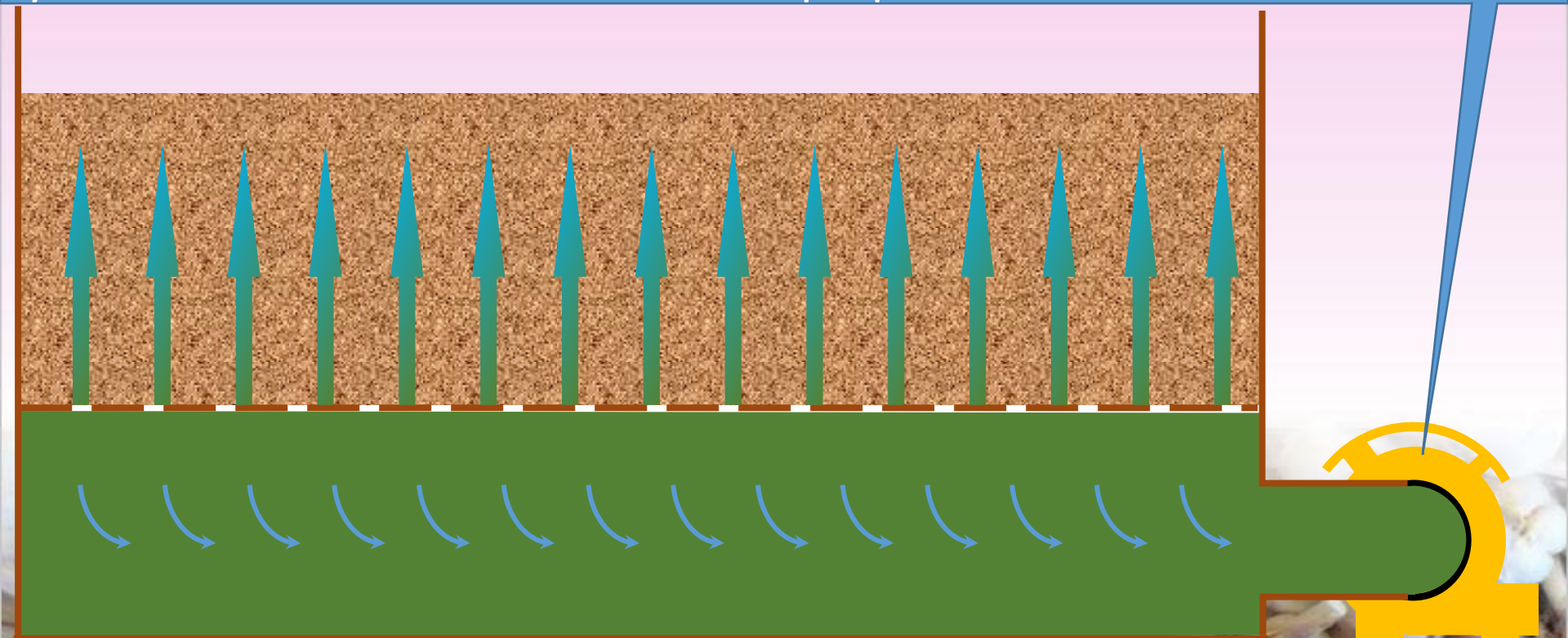


Solution 4 : Inverser la circulation de l'air pour créer une pression négative uniforme dans le plenum.

Avantage : sa simplicité et l'excellence de ses résultats

Inconvénient : la section du plenum doit être suffisante pour que la vitesse maximum de l'air ne dépasse pas les 5 m/s selon Kader, 2002.

Lorsque cette vitesse est dépassée à cause d'un manque d'espace, un système à air forcé produit une uniformité semblable ou meilleure. Ce système demande donc une meilleur préparation.





# En résumé

- Les échanges thermiques en conditions stables suivent un modèle de temps de demi procédé
- L'uniformité de l'état des produits à leur entrée dans le traitement (température et humidité) ont beaucoup moins d'effet sur les résultats que les conditions de traitement elles-mêmes
- Si on veut un résultat uniforme de procédé, on doit créer des conditions de pression statique uniforme perpendiculairement à l'écoulement de l'air
- On revient à la case départ : comment concevoir un système efficace et générant de bons résultats, soit une uniformité dans les résultats des procédés



# Conception d'un séchoir

La vitesse recommandée\* pour l'air qui circule à travers la masse d'ail à sécher de 90 cm d'épais se situe entre 0.13 et 0.15 m s<sup>-1</sup>. En utilisant une vitesse de 0.14 m s<sup>-1</sup>; on arrondit à un simple chiffre l'équation qui donne le débit d'air (Q, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) en fonction de la surface (A, m<sup>2</sup>) à travers laquelle l'air circule, soit simplement :

$$Q = 500 A$$

Et en système impérial avec Q, CFM; A, pi<sup>2</sup> :

$$Q = 27.5 A$$

Comme cette valeur est la bonne seulement pour une épaisseur de 90 cm, pour tous les autres cas, on fait quoi?

\*Erard et Villeneuve, 2012

# Dans tous les cas on peut utiliser les équations suivantes

- En considérant la quantité d'eau qu'une masse d'ail ( $M$ , kg) peut libérer en fonction du temps, la quantité d'air ( $Q$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) nécessaire pour transporter cette eau à l'extérieur ou à un déshumidificateur est calculée avec :

$$Q = 0,00022 M$$



# Conception d'un séchoir (suite)

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

La pression statique (P, **mm d'eau**) est reliée à l'épaisseur (H, m) de la couche d'ail à travers laquelle l'air circule:

$$P = 12.5 H$$

Et avec P en po d'eau et H d'ail en po :

$$P = 0.0128 H$$

*\*Erard et Villeneuve, 2012*



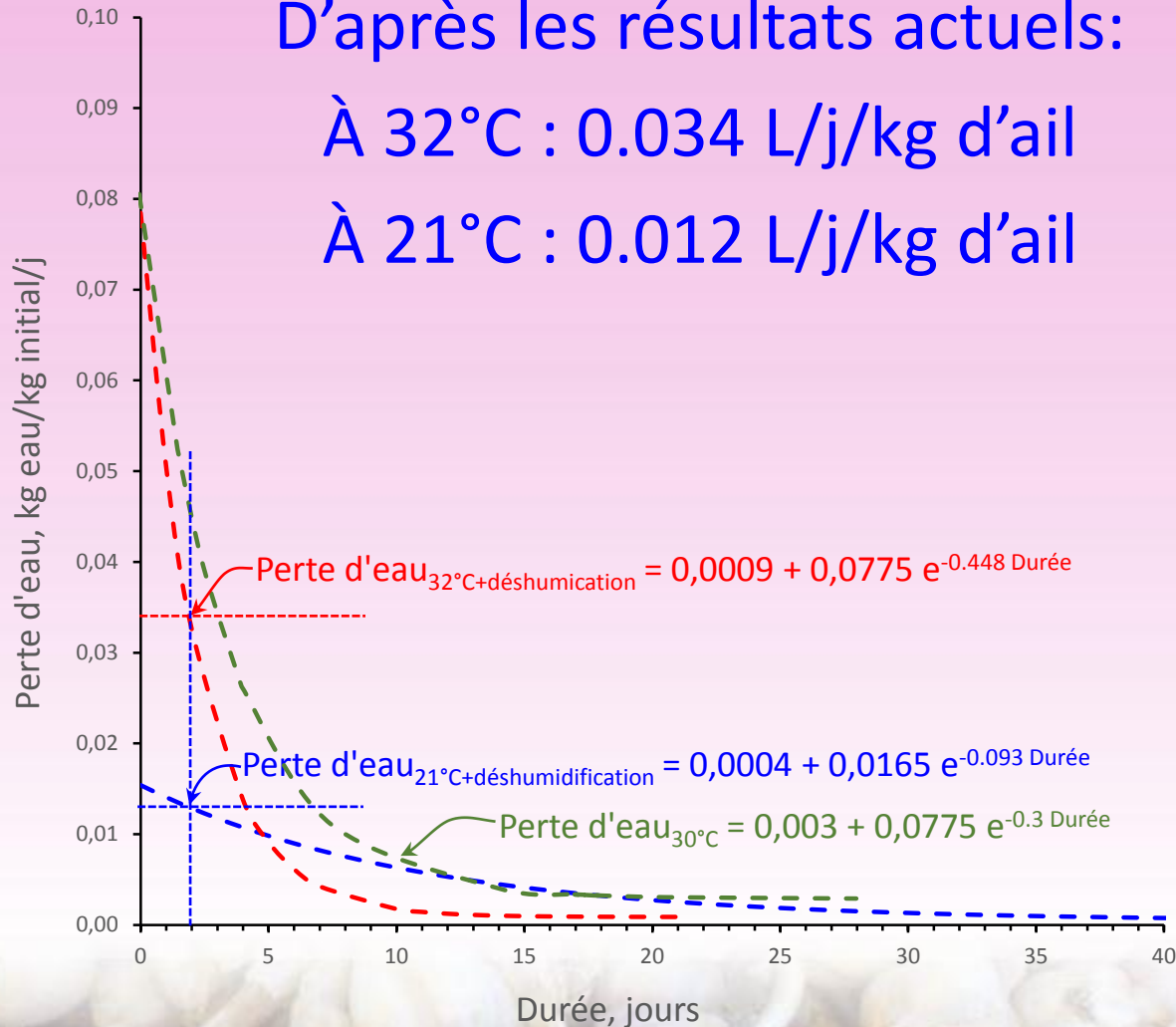


# Capacité du déshumidificateur

D'après les résultats actuels:

À 32°C : 0.034 L/j/kg d'ail

À 21°C : 0.012 L/j/kg d'ail



# *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 *Aspergillus niger*, *Botrytis allii*, *Embellisia allii*, *Fusarium*, *Pennicillium spp.*, *Sclerotium cepivorum*, *Pseudomonas spp.*



# Débit d'air pour un traitement thermique

- En considérant la quantité de chaleur à transférer une masse d'ail pour obtenir une augmentation ( $\Delta^{\circ}T$ , °C) de sa température sur une période raisonnable on devra utiliser un débit d'air égale à: (Q, L/s-kg d'ail)

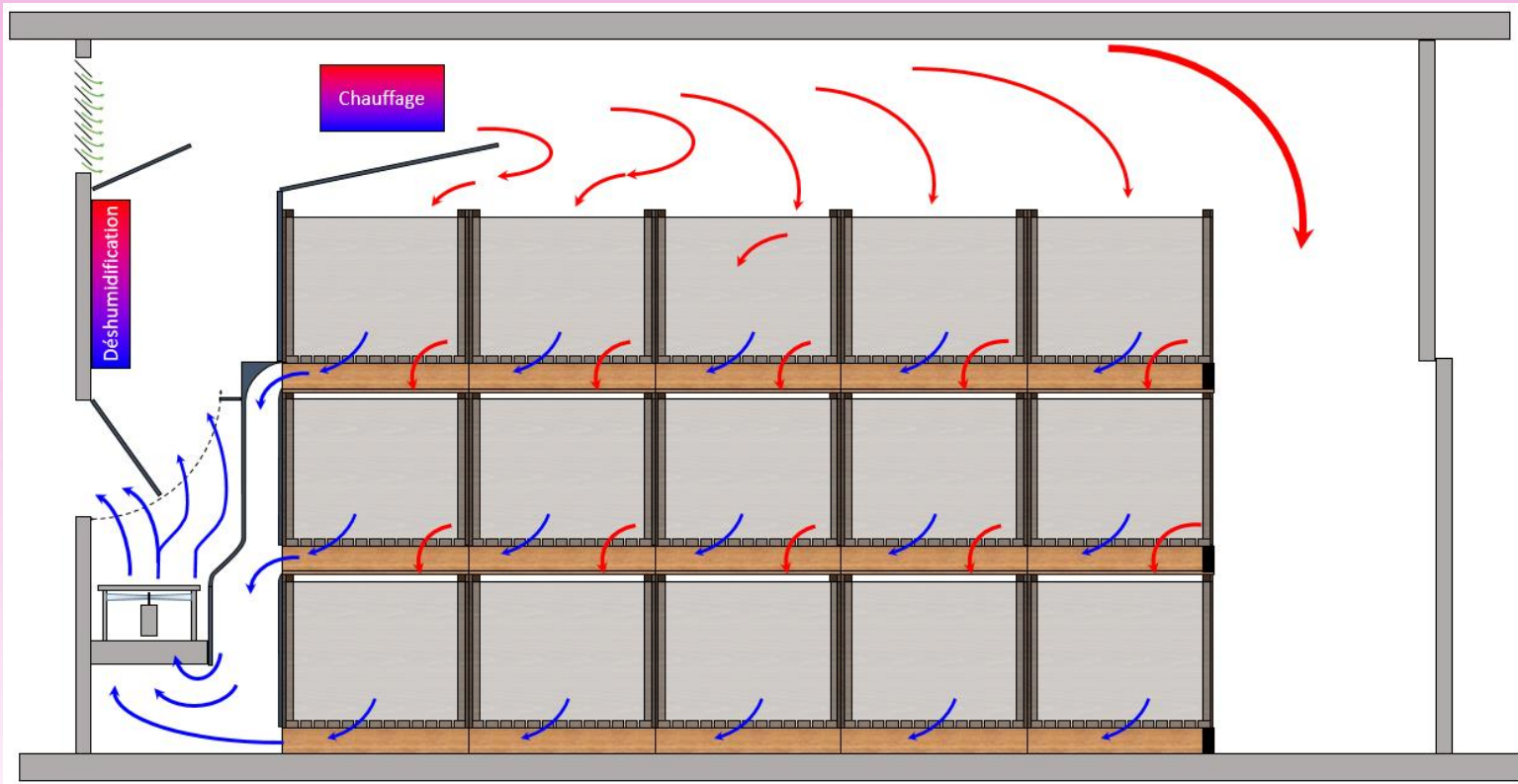
$$Q_{4h} = 0,007288 \Delta^{\circ}T + 0,3169$$

$$Q_{6h} = 0,006049 \Delta^{\circ}T + 0,2630$$

$$Q_{8h} = 0,004810 \Delta^{\circ}T + 0,2091$$



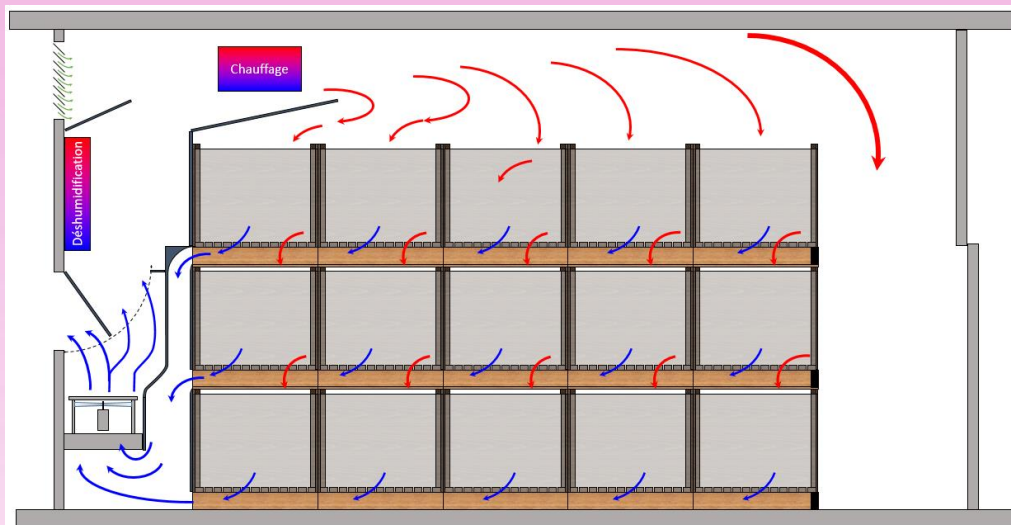
# Critères de conception d'un système à air forcé



Durant le conditionnement, l'air devrait passer à travers un maximum de 90 cm d'ail. À  $0.14 \text{ m s}^{-1}$ , ( $14 \text{ cm s}^{-1}$ ) l'air traverse l'ail en  $90\text{cm}/14\text{cm s}^{-1} = 6.43\text{s}$ , soit  $60\text{s}/6.43 = 9.3$  échanges d'air minute<sup>-1</sup>. La norme pour la vitesse de l'air dans les conduits est de ne pas dépasser 5 m/s. Les dimensions de tout conduit doivent répondre à ce critère.



# Critères de conception d'un conditionneur à air forcé



Exemple : la hauteur libre ( $hl$ , m) sous des rangées de  $N$  boîte-palettes en ligne devant réchauffé de  $20^{\circ}\text{C}$  en 4 heures sera de:

$$hl = D_{\text{app. ail}} \cdot h \cdot l_{\text{bp}} \cdot N \cdot Q_{4h} / v_{\text{max}}$$

$$hl = 578 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 0.000463 / 5 = 0.24 \text{ m ou } 240 \text{ mm}$$

$$hl = 578 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 0.000463 / 5 = 0.144 \text{ m ou } 144 \text{ mm}$$

$D_{\text{app. ail}}$  = Densité apparente de l'ail,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$N$  = nombre de boîte-palettes

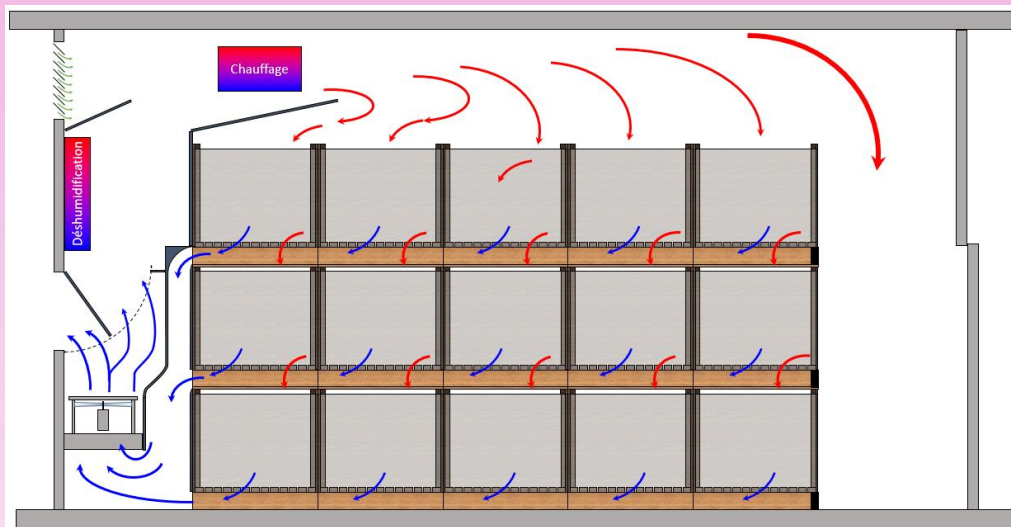
$h$  = Hauteur d'empilement, m

$Q$  = débit d'air,  $\text{m}^3/\text{s}$ -kg d'ail

$l_{\text{bp}}$  = longueur d'une boîte-palette, m

$v_{\text{max}}$  = Vitesse maximum, m/s

# Critères de conception d'un séchoir à air forcé



Exemple : la hauteur libre ( $hl$ , m) sous des rangées de  $N$  boîte-palettes en ligne contenant de l'ail devant être séché à 22°C et 55% HR :

$$hl = D_{\text{app. ail}} \cdot h \cdot l_{\text{bp}} \cdot N \cdot Q / v_{\text{max}}$$

$$hl = 578 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 0.00022 / 5 = 0.114 \text{ m ou } 114 \text{ mm}$$

$$hl = 578 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 0.00022 / 5 = 0.138 \text{ m ou } 138 \text{ mm}$$

Avec les mêmes boîte-palettes, on pourrait en aligner  
3 B-P en conditionnement et 6 B-P en séchage

$D_{\text{app. ail}}$  = Densité apparente de l'ail, kg/m<sup>3</sup>

$N$  = nombre de boîte-palettes

$h$  = Hauteur d'empilement, m

$Q$  = débit d'air, m<sup>3</sup>/s-kg d'ail

$l_{\text{bp}}$  = longueur d'une boîte-palette, m

$v_{\text{max}}$  = Vitesse maximum, m/s

# Puissance calorifique pour un traitement thermique

- En considérant la masse d'ail à chauffer ( $M$ , kg), sa chaleur spécifique ( $C_{p_{ail}}$ ,  $3.31 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), l'augmentation de température ( $\Delta^\circ\text{T}$ ,  $^\circ\text{C}$ ), et le délai prescrit (h) pour atteindre la température de traitement, la capacité calorifique (Q, kW/kg d'ail) sera de :

$$P = \frac{M C_{p_{ail}} \Delta^\circ\text{T}}{3600 \text{ h}} = \frac{0.00092 M \Delta^\circ\text{T}}{\text{h}}$$



Quel est le lien entre ce paysage  
et le conditionnement de l'ail?





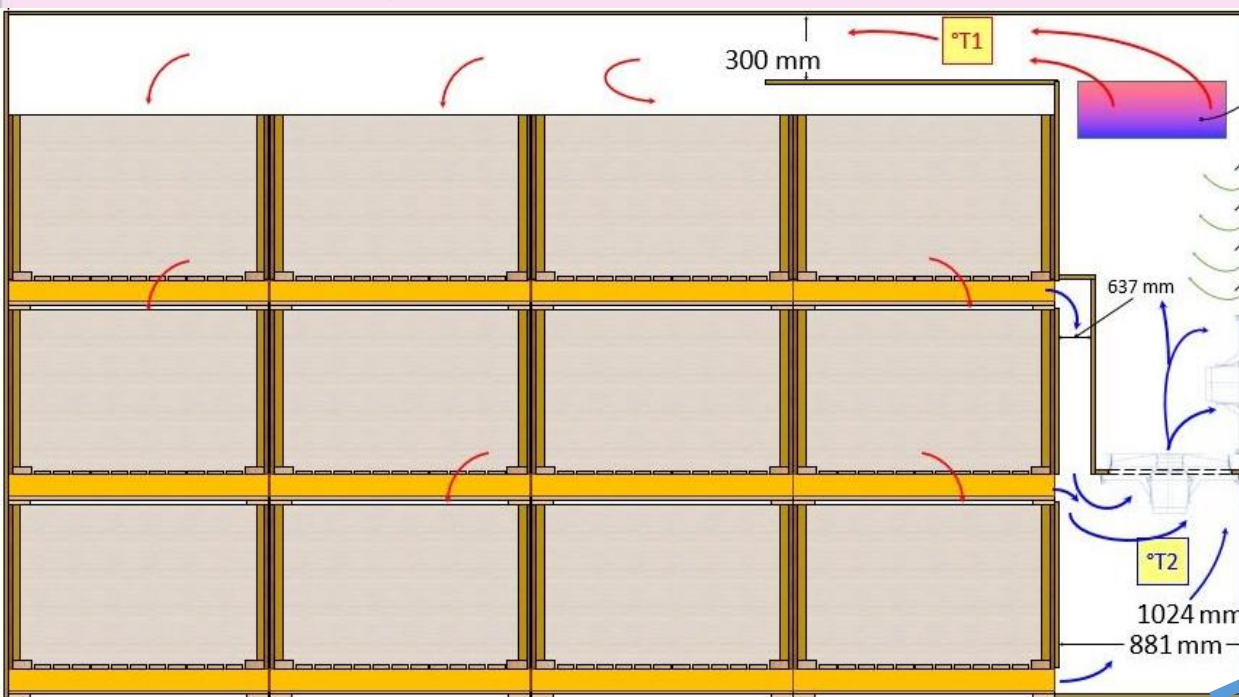
Les vents sont dominant de l'ouest et l'air frais et sec doit monter pour passer par-dessus les montagnes



L'air se refroidit et atteint les 100% HR. La moindre dépression provoque de la condensation et à cette température la vapeur d'eau passe directement de vapeur à solide : neige...

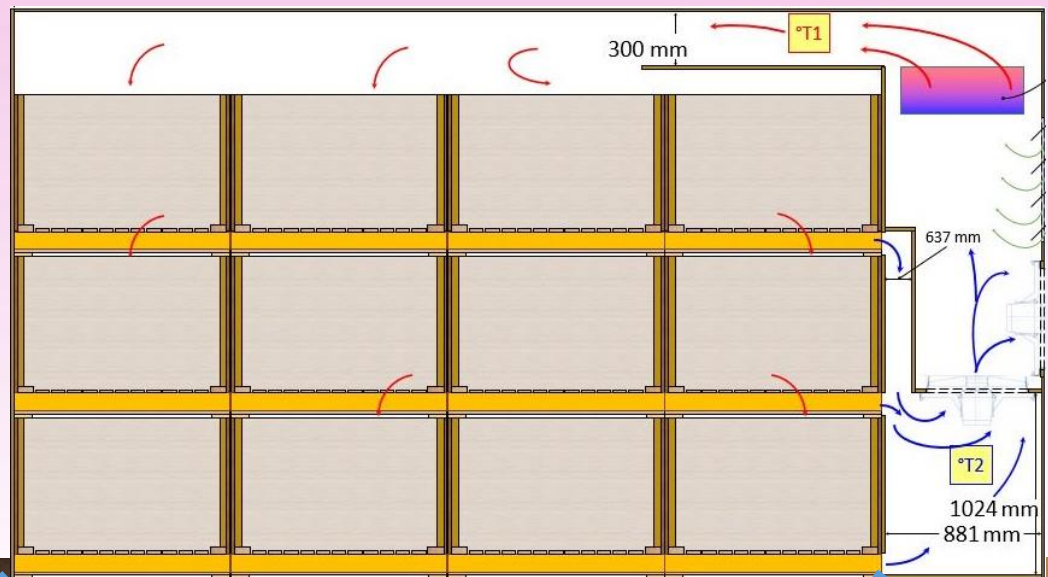


Le même phénomène se produit dans un conditionneur: après plusieurs recirculations, l'air sort de la masse d'ail à 100% HR. Comme il est aspiré par le ventilateur, il se retrouve en zone de dépression et il passe de vapeur à pluie et retombe sur le sol. De plus, un ventilateur est moins efficace à pomper de la vapeur d'eau qu'à circuler de l'air frais. Il peut même caviter dans certaines circonstances. C'est ce qui s'est produit chez deux producteurs utilisant de petits conditionneurs (moins d'une tonne).





Enfin, si l'air à 100% HR entre en contact avec une surface plus froide, il s'y condense et coule au sol.

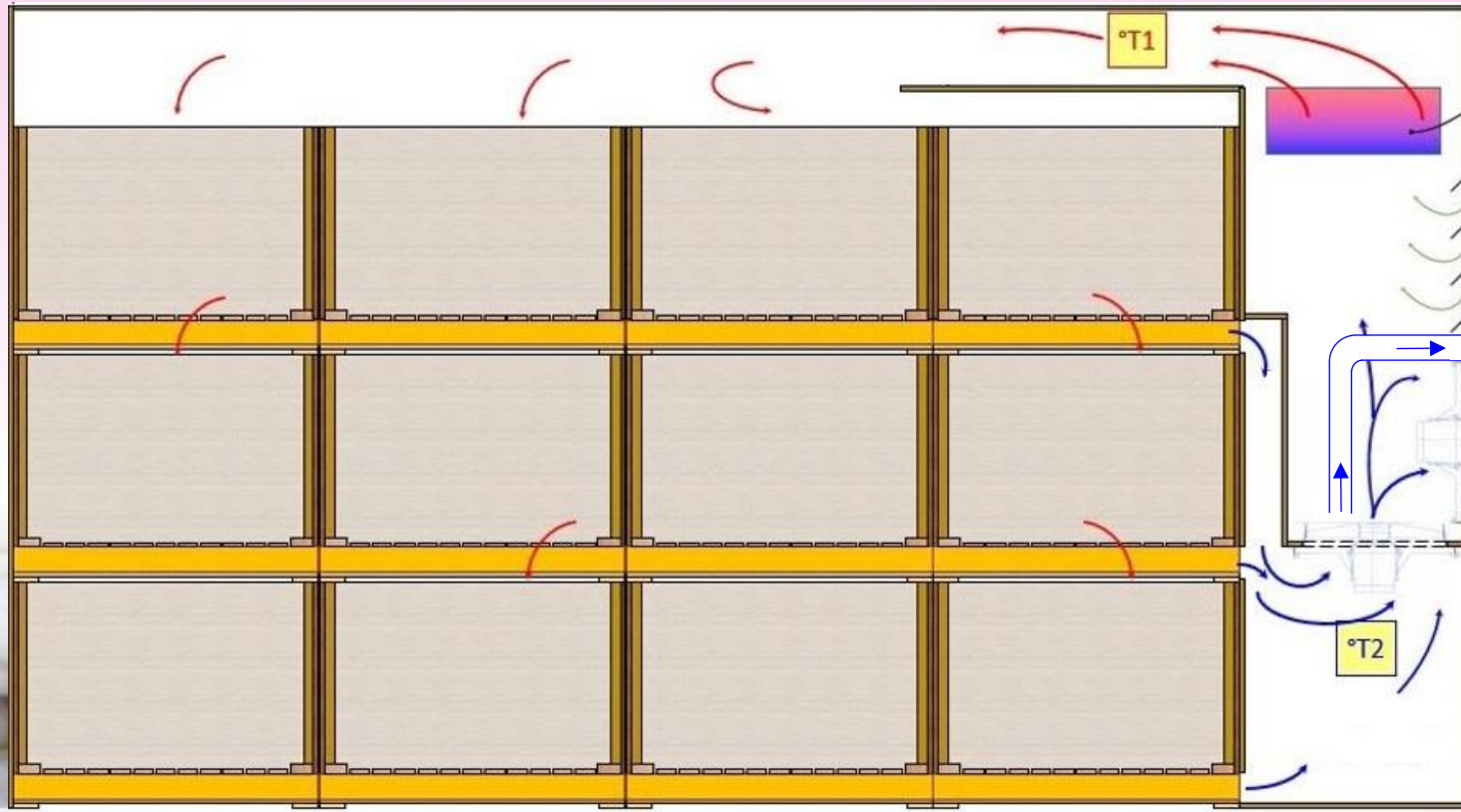




## Donc, est-ce nécessaire d'isoler thermiquement un conditionneur ?

Oui, si la température de traitement est  $5^{\circ}\text{C}$  supérieure à son environnement.

De plus, un orifice permettant d'évacuer 5% d'air recirculé est recommandé. Le remplacement de cette air par de l'air frais diminuera le phénomène de cavitation et produira un écart plus grand entre la zone pression positive et celle négative dans l'enceinte, gardant ainsi le système global en pression négative et fonctionne mieux.



# 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 dans la manipulation produit
- ...



# Entreposage de l'ail : 3 options : 21 ou 4°C ...

- Ventilation

- Taux =  $m^3/h/tonne$  métrique (CFM/tonne impériale)
- Fréquence = 2h/6h

- Humidité relative

- HR > 60% = favorise les pathogènes
- HR < 50% = augmente l'assèchement inutile de l'ail
- À 4°C, un  $\Delta^{\circ}T$  à l'évaporateur  $\leq 4.9^{\circ}C$  ne diminue pas suffisamment l'humidité de l'air; un  $\Delta^{\circ}T \geq 7.7^{\circ}C$  augmente la condensation et le givrage de l'évaporateur
- Il faut donc augmenter le temps de dégivrage, pas le diminuer ni l'arrêter ...
- Ne pas oublier qu'en hiver il faudra chauffer pour contrôler l'humidité, surtout à 4°C



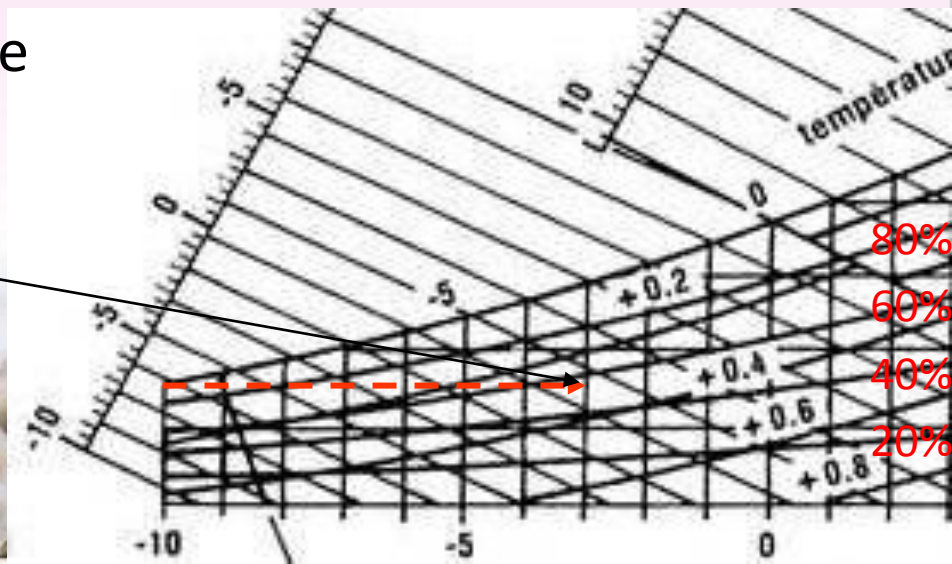
# Entreposage de l'ail : 3<sup>ème</sup> options : -3°C

- Ventilation

- Taux =  $m^3/h/tonne$  métrique (CFM/tonne impériale)
- Fréquence = 2h/12h

- Humidité relative

- Aucune donnée scientifique, méthodologie utilisée en Europe
- Pathogènes inactifs à cette température
- L'ail n'y respire pratiquement pas, donc génère peu d'humidité
- Un producteur au Québec utilise depuis 4 ans -3°C et ne contrôle ni ne mesure l'humidité
- Avec un  $\Delta^{\circ}T$  à l'évaporateur de 7°C, l'HR se maintiendra environ à 55% ou plus selon la température extérieure
- Il faudra chauffer pour ne jamais baisser sous les -3°C





# Points à respecter pour améliorer les conditions d'entreposage des produits horticoles

- Former des rangées de palettes parallèles à l'écoulement de l'air dans l'entrepôt
- Distancer les rangées de palettes (15 cm)
- Garder une distance libre le long des murs (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 portes et de toutes sources de chaleur ou de froid





## En résumé :

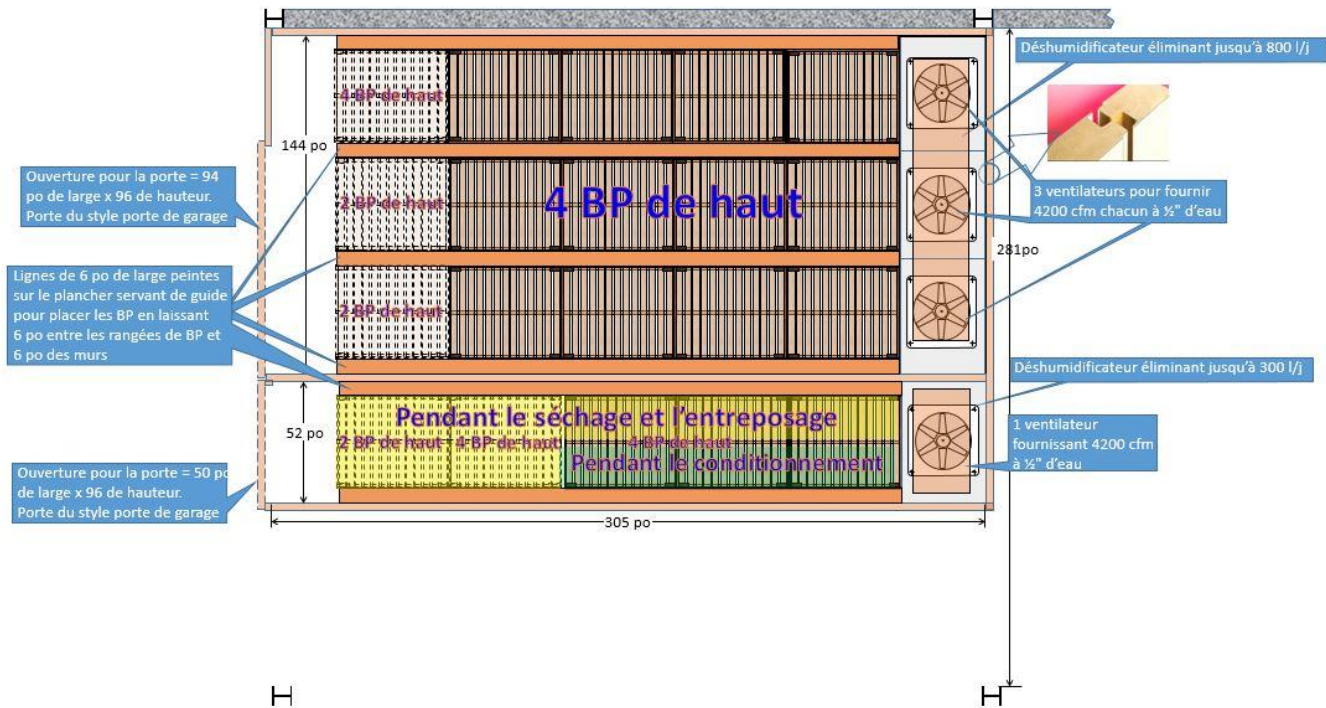
Avec les connaissances actuelles, au Québec, la grande majorité des producteurs/entreposeurs peuvent faire mieux qu'ils le font actuellement en :

- **identifiant les conditions** idéales (T et HR) pour leurs variétés d'ail et en **respectant** ces conditions
- **identifiant les besoins de leur ail** à chaque année dus aux conditions à la récolte (pathogènes, humidité ...), à leur destination (marché frais ou entreposage long terme, ...), et en **appliquant le conditionnement requis**

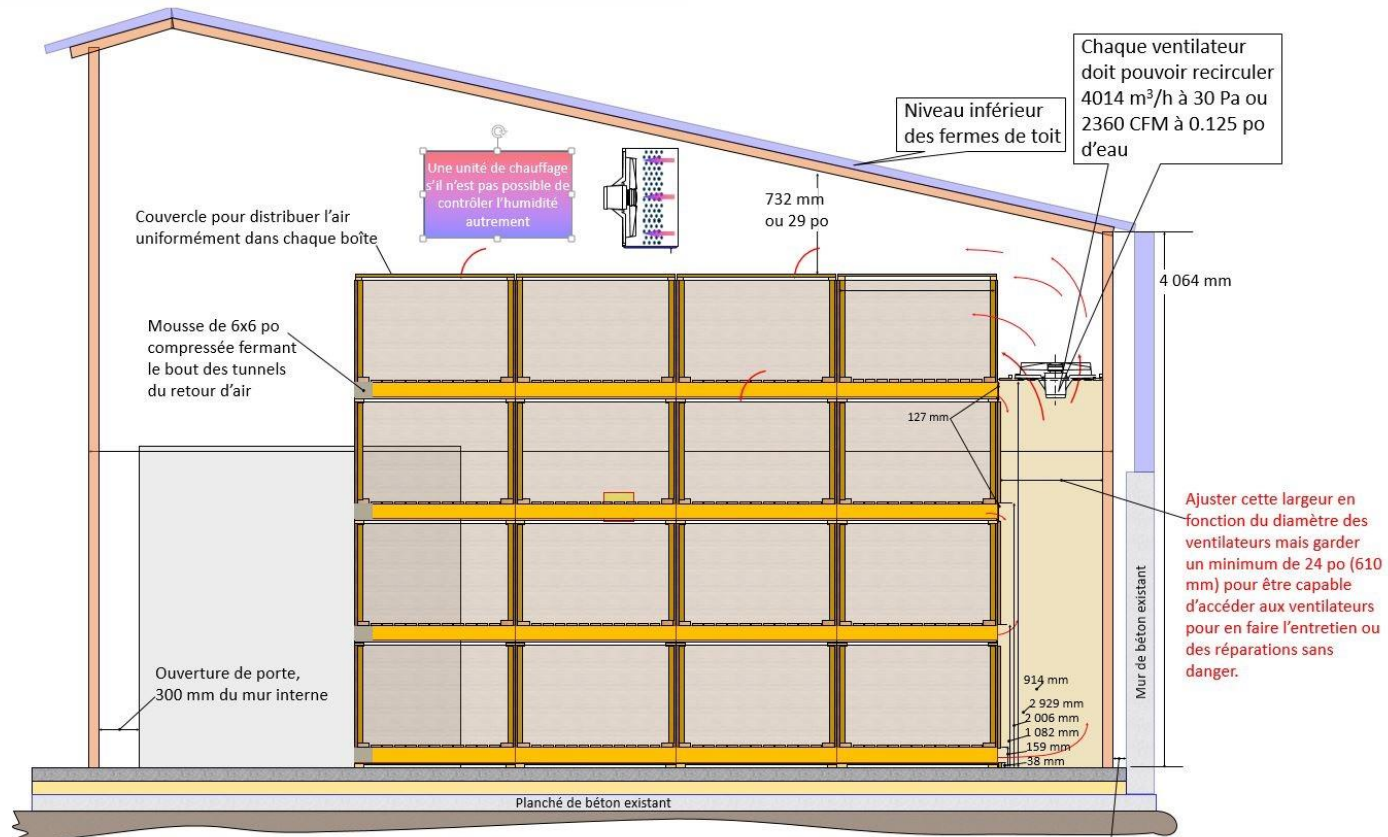


# À quoi ça peut ressembler tout ça:

Vue en plan







Vue de côté

Comme les murs de la bâtisse n'ont aucune isolation, les risques de condensation sont très élevés. Un espace d'au moins 3 po devrait être laissé libre pour une circulation de l'air permettant d'évacuer cette condensation.



# Compléments: questions

- Est-ce que je peux sécher l'ail à 32°C sans en payer la facture ?





Humidité d'équilibre, base sèche, d'après le modèle généré à partir des données de la littérature pour : Fresh Garlic slice

HR	Température, °C									
	20	22	24	26	28	30	32	40	50	60
65%	40,05	39,63	39,22	38,80	38,38	37,97	37,55	35,88	33,80	31,72
60%	39,00	38,58	38,16	37,74	37,32	36,90	36,48	34,80	32,70	30,60
55%	37,95	37,53	37,10	36,68	36,26	35,83	35,41	33,72	31,60	29,48
50%	36,90	36,47	36,05	35,62	35,19	34,77	34,34	32,63	30,50	28,37
45%	35,85	35,42	34,99	34,56	34,13	33,70	33,27	31,55	29,40	27,25
40%	34,80	34,37	33,93	33,50	33,07	32,63	32,20	30,47	28,30	26,13

Humidité d'équilibre, base humide, d'après le modèle généré à partir des données de la littérature pour : Fresh Garlic slice

HR	Température, °C									
	20	22	24	26	28	30	32	40	50	60
65%	28,60	28,38	28,17	27,95	27,74	27,52	27,30	26,41	25,26	24,08
60%	28,06	27,84	27,62	27,40	27,18	26,95	26,73	25,82	24,64	23,43
55%	27,51	27,29	27,06	26,84	26,61	26,38	26,15	25,21	24,01	22,77
50%	26,95	26,73	26,50	26,26	26,03	25,80	25,56	24,60	23,37	22,10
45%	26,39	26,16	25,92	25,68	25,45	25,21	24,96	23,98	22,72	21,41
40%	25,82	25,58	25,34	25,09	24,85	24,60	24,36	23,35	22,06	20,72

D'après ces estimations, si on sèche à 26°C au lieu de 22°C et qu'on maintient l'humidité relative à 50%, l'ail perdra : 1,7%  
d'eau de plus; ce qui n'est peut-être pas d'une importance capitale pour une petite quantité d'ail. Par contre, si on sèche à 32°C (parce qu'on a pas ce climatiseur pour le maintenir à 22°C ou qu'on travaille au mois d'aût et avec une ventilation extérieur en continue), au lieu 22°C et qu'on maintient l'humidité relative à 50%, l'ail perdra : 4,4%  
d'eau de plus. Ce qui peut être d'une grande importance pour une grande quantité d'ail car non seulement on perd 4,4% de la masse d'ail qu'on ne pourra pas vendre, mais aussi parce qu'on aura payé 4,4% d'électricité de plus qui sera nécessaire pour éliminer cet extra d'eau...

Une solution pour sécher à une plus haute température sans enlever d'eau inutilement serait de sécher à une plus haute humidité. Par exemple, si on sèche avec de l'air à 60% d'humidité relative, l'ail devrait s'équilibrer au même taux d'humidité qu'avec de l'air à 22°C et 50% d'humidité relative (d'après ces estimations théoriques). À la fin du séchage, on pourrait alors abaisser graduellement la température de l'air de 26°C à 22°C tout en abaissant en même temps son humidité relative de 60% à 50% à un même rythme; ce qui maintiendrait le taux humidité de l'ail à l'équilibre à peu près toujours au même niveau.





Un autre approche est à savoir que ce qui force l'ail à céder son eau est le déficit de pression de vapeur d'eau de l'air par rapport à sa saturation. Ce qu'on sait est qu'on veut sécher l'ail jusqu'à ce que l'activité de l'eau s'équilibre avec le déficit de pression de l'air à 22°C et 50% d'humidité relative. Hors, le déficit de pression de la vapeur d'eau dans ces conditions est connu. En utilisant ce même déficit de pression pour de l'air entre 22 et à 32°C, on peut calculer l'humidité relative de l'air pour avoir ce même déficit de pression. C'est ce qui est présenté dans le tableau ci-joint.

°C	Pression de vapeur d'eau à saturation	Humidité relative	Pression de vapeur d'eau à cet humidité relative	Déficit de pression ou force d'insitacion au séchage
22	2,6452	50%	1,3226	1,3226
24	2,9856	56%	1,663	1,3226
26	3,3637	61%	2,0411	1,3226
28	3,7828	65%	2,4602	1,3226
30	4,2467	69%	2,9241	1,3226
32	4,7592	72%	3,4366	1,3226

En utilisant cet approche, il est facile de calculer les conditions d'air qui présentent le même déficit de pression de vapeur d'eau. Par contre, comme on ne sait pas quelle est l'humidité d'équilibre de l'ail pour chacun de ces déficits de pression de vapeur d'eau. On ne peut pas calculer l'économie d'eau ni d'énergie réalisée pour des conditions autres que celles pour pour un déficit de pression de vapeur équivalent à la condition cherchée. On sait par contre 2 autres choses : a) le déficit de pression de l'air à 32°C et 50% d'HR est environ 80% plus élevé qu'à 72% d'HR, ce qui devrait assécher l'ail beaucoup plus (mais on ne sait pas de combien); b) à 32°C et 72% d'HR, il y a des risques que certains champignons se développent si ces conditions sont maintenues sur une longue période. Un traitement thermique efficace pour irradiier tout champignon potentiel serait alors d'une importance capitale (chose pas encore complètement expérimenté avec certitude ici...).

32	4,7592	50%	2,3796	2,3796
----	--------	-----	--------	--------