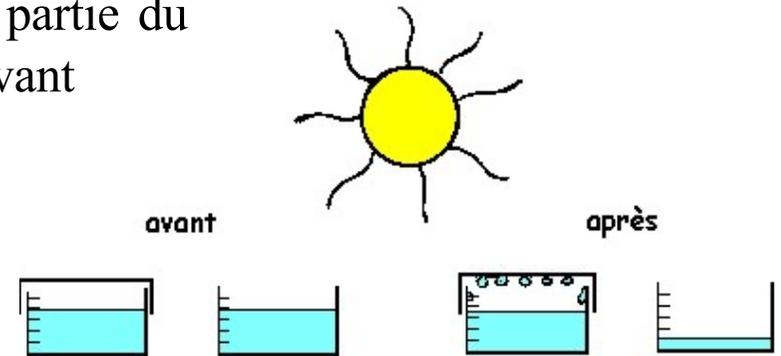


3. Conservation par déshydratation



☑ Principe

- Le séchage est une opération consistant à *retirer* une partie du *solvant* d'un corps (aliment), par *vaporisation* de ce solvant
- Le produit passe d'un état initial (dit humide) jusqu'à un état final (dit solide sec), même s'il contient encore du solvant (eau résiduelle).



Le séchage est une opération de « *séparation thermique* » : fournir *l'énergie* de vaporisation de l'eau, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. On devra donc s'intéresser à la fois aux *transferts* de *matière* et de *chaleur couplés*.

- Ici le produit est supposé fait de deux constituants :



Eau

et



Matière sèche

- ✓ Non volatile.
- ✓ Des molécules volatiles telles que les arômes, ou les composés organiques volatiles qu'on négligera

☑ Objectifs

- ✓ Stabiliser le produit (*Conservation*)
- ✓ Alléger et faciliter son transport et sa disponibilité (ex: lait en poudre)
- ✓ Lui donner sa résistance mécanique et des propriétés d'usage (infusion...)

Conserver.... !! *rendre l'eau moins disponible* pour les *microorganismes*.

Liaison de l'eau..!! Rend l'eau moins libre au fur et à mesure du séchage ; cette liaison de l'eau se mesure par **l'activité de l'eau a_w**

☑ Activité de l'eau a_w



**Pas
la Teneur
en eau !**



$$X_{bh} = \frac{m_{eau}}{m_{produit}}$$

: Teneur en eau base humide, exprimée en kg eau/kg produit

$$X_{bs} = \frac{m_{eau}}{m_{matière\ sèche}}$$

: Teneur en eau base sèche, exprimée en kg eau/kg matière sèche.

Convertir !!

$$X_{bh} = \frac{X_{bs}}{1 + X_{bs}}$$

et

$$X_{bs} = \frac{X_{bh}}{1 + X_{bh}}$$



Certains industriels s'expriment en « *points d'humidité* », un point correspondant, par convention, à une variation d'humidité de 1% exprimée en base humide.

Exemple : un maïs entrant dans un séchoir avec une teneur en eau base humide de 30 % et ressortant à 10 % a été séché de *20 points*.



Pour les *calculs sur les séchoirs* (bilans, dimensionnement), il est préférable de travailler sur la base de matière sèche (X_{bs}), qui seule reste constante au cours du séchage.

L' a_w caractérise les *liaisons de l'eau avec la matrice (liée ou libre)*. Elle dépend de la composition de l'aliment, de la teneur en eau et de la température.

□ a_w est liée à la pression de vapeur d'eau du produit humide, P_v (en Pa), par la relation :

$$a_w = \frac{P_v}{P_{VS}}$$

P_{vs} : pression de vapeur saturante (eau pure) à une température.
 a_w varie de 0 à 1.



La teneur en eau d'un aliment (%) et l'activité de l'eau du même aliment ne sont pas liées directement !!

Produit	Teneur en eau (%)	Activité de l'eau (aw)
lait	87	0,994
viande fraîche	65	0,985
fruits frais	90	0,97
pain	40	0,96
confiture	35	0,86
margarine	16	0,99
farine de blé	15	0,75
macaroni	10	0,45
lait en poudre	3	0,12

Types de phénomènes d'altération

Oxydation des lipides :

- ✓ Rancissement (détériore le goût et l'arôme)
- ✓ Facteur limitant de la conservation de certains aliments déshydratés
- ✓ Ralentissement des phénomènes d'oxydation pour a_w voisine de 0,2 : couche monomoléculaire d'eau qui stabiliserait les radicaux peroxydes formés)

Brunissement non-enzymatique :

- ✓ Réactions de Maillard qui aboutissent à la formation de polymères bruns (mélanoidines)
- ✓ Vitesse maximum pour a_w entre 0,5 et 0,7 (diffusion accrue des composés réactionnels impliqués : à fonction carbonyle et à groupement aminé)
- ✓ Facteur limitant de la conservation des aliments déshydratés à teneur moyenne en eau

☐ Réactions enzymatiques :

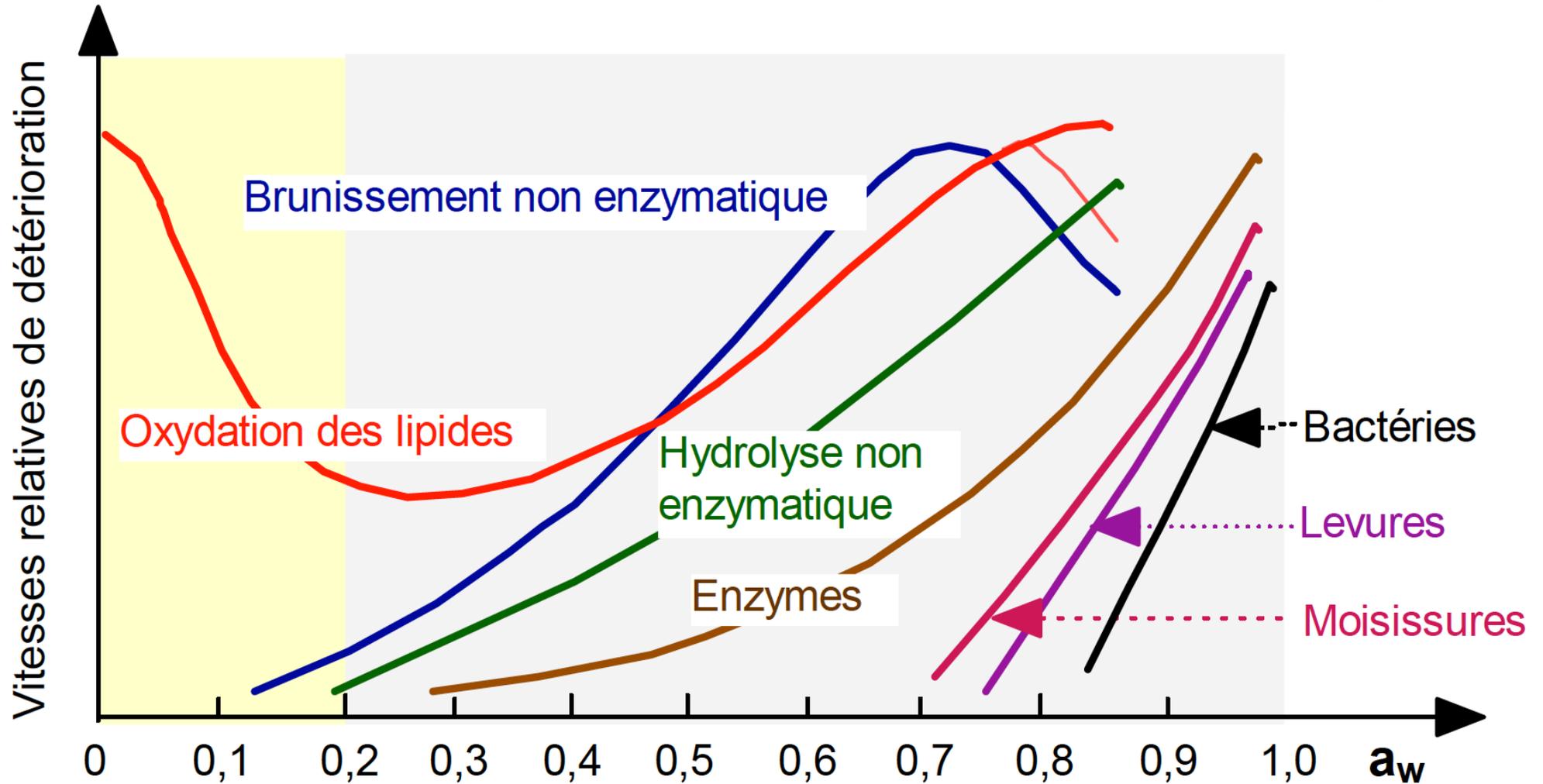
- ✓ Très conditionnées par l' a_w (vitesse très accrue à $a_w > 0,7$)
- ✓ Action des lipases pour des a_w très faibles même à l'état congelé : détérioration possible lors de l'entreposage des aliments même déshydratés ou congelés
- ✓ Nécessité d'un traitement thermique préalable (blanchiment) pour inactiver ces activités enzymatiques

☐ Développement microbien :

- ✓ $a_w = 0,91$ seuil en dessous duquel la croissance microbienne est très ralentie (seuil retenu pour la conservation des aliments à température ambiante)
- ✓ Risques de développement de moisissures xérophiles (poudre de lait, biscuits, fruits secs) ou de levures osmophiles (limite à $a_w = 0,62$ pour les levures osmophiles dans les aliments riches en sucre) ou de bactéries halophiles (produits salés)

D'où la nécessité des traitements associés : traitement thermique, addition de solutés pour augmenter la pression osmotique, ajustement du pH, incorporation de conservateurs autorisés

Vitesse d'altération des aliments en fonction de l' a_w



- La stabilité n'est obtenue que pour des a_w très faibles
- Les vitesses de détérioration ne sont pas toujours proportionnelles à a_w

☑ Isothermes de sorption

- Déterminées expérimentalement pour différents produits.
- La mesure de a_w fonction de la teneur en eau des produits permet la détermination des isothermes de sorption qui sont le plus utilisés en industrie
- Importants pour prédire et prévenir les phénomènes de dégradation lors du stockage de l'aliment
- Il existe les isothermes :

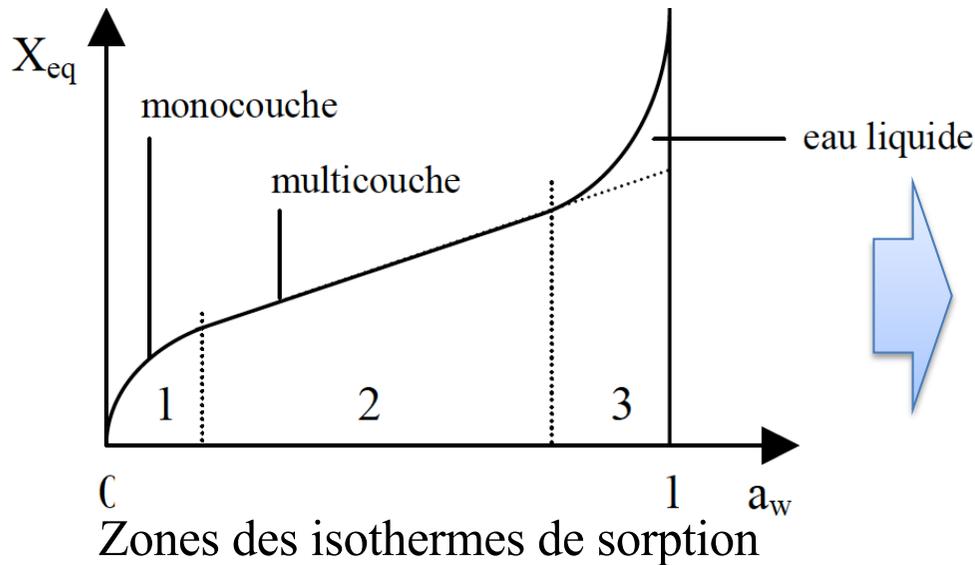
Désorption

Isotherme de sorption est déterminée à partir d'un *produit humide* (séchage)

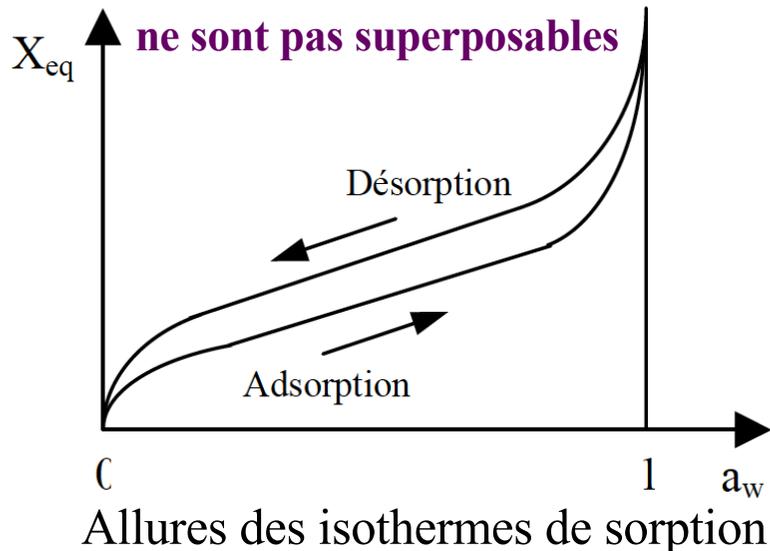
Adsorption

Isotherme de sorption est déterminée à partir d'un *produit sec* (hydratation)

Pour une même **teneur en eau**, on peut avoir deux valeurs de a_w selon l'isotherme de travail (séchage ou hydratation)

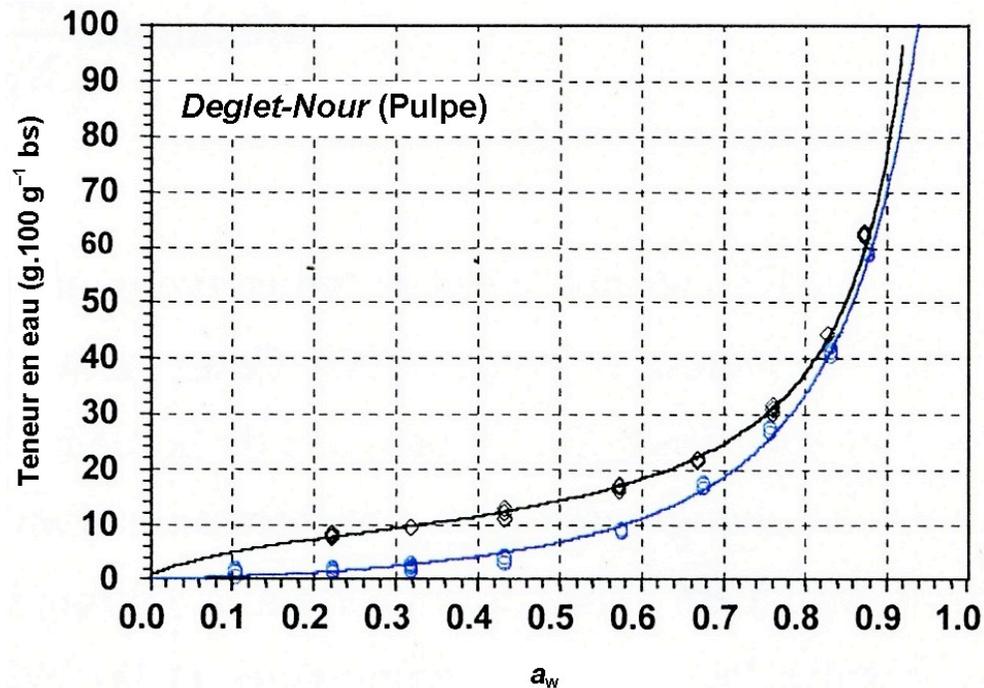


- ✓ La région :
 - Monocouche : l'eau liée
 - Multicouche : l'eau qui forme une échelle d'hydratation.
 - Eau liquide : dans les capillaires ou libre
- ✓ Généralement l'eau est mobile sauf dans la région A.



- ✓ Pas la même allure ; ce phénomène est appelé "*hystérésis*".
- ✓ Pendant le séchage les *capillaires* se ferment ; pour les re-ouvrir, il faut une *pression partielle de l'eau* plus élevée.
- ✓ Pour une teneur en eau donnée, l'équilibre de la désorption s'établit pour des plus faibles que l'équilibre de l'adsorption.

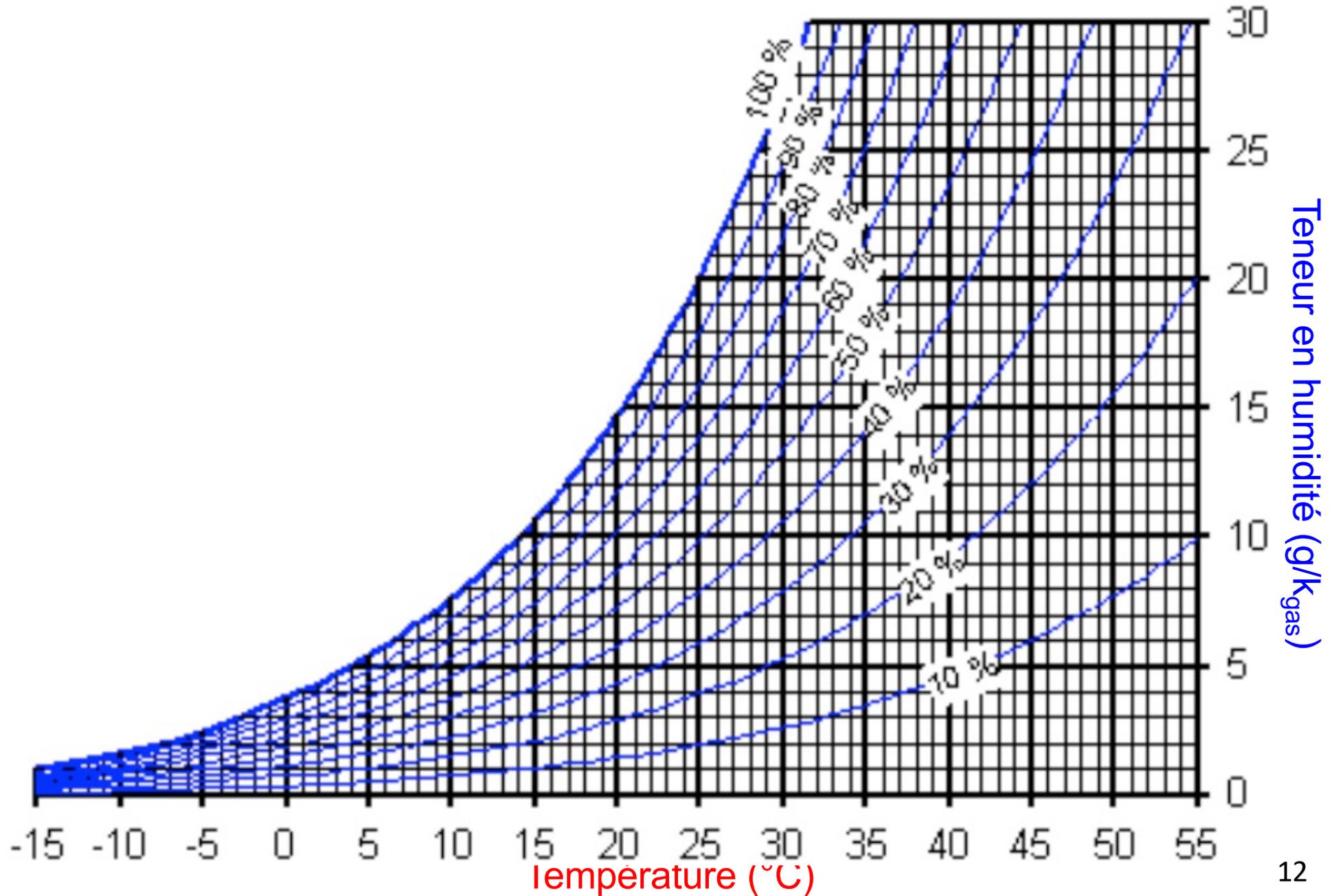
- L'hystérésis est surtout marquée dans les fruits et les légumes car les sucres de ces aliments forment des solutions sursaturées qui ne précipitent pas lors de la déshydratation.



Exemple : Isotherme de désorption (noir) et d'adsorption (bleu) à 25°C de la datte *Deglet-Nour*. Les symboles sont les points expérimentaux (◇) et la ligne continue (—) est le modèle BET

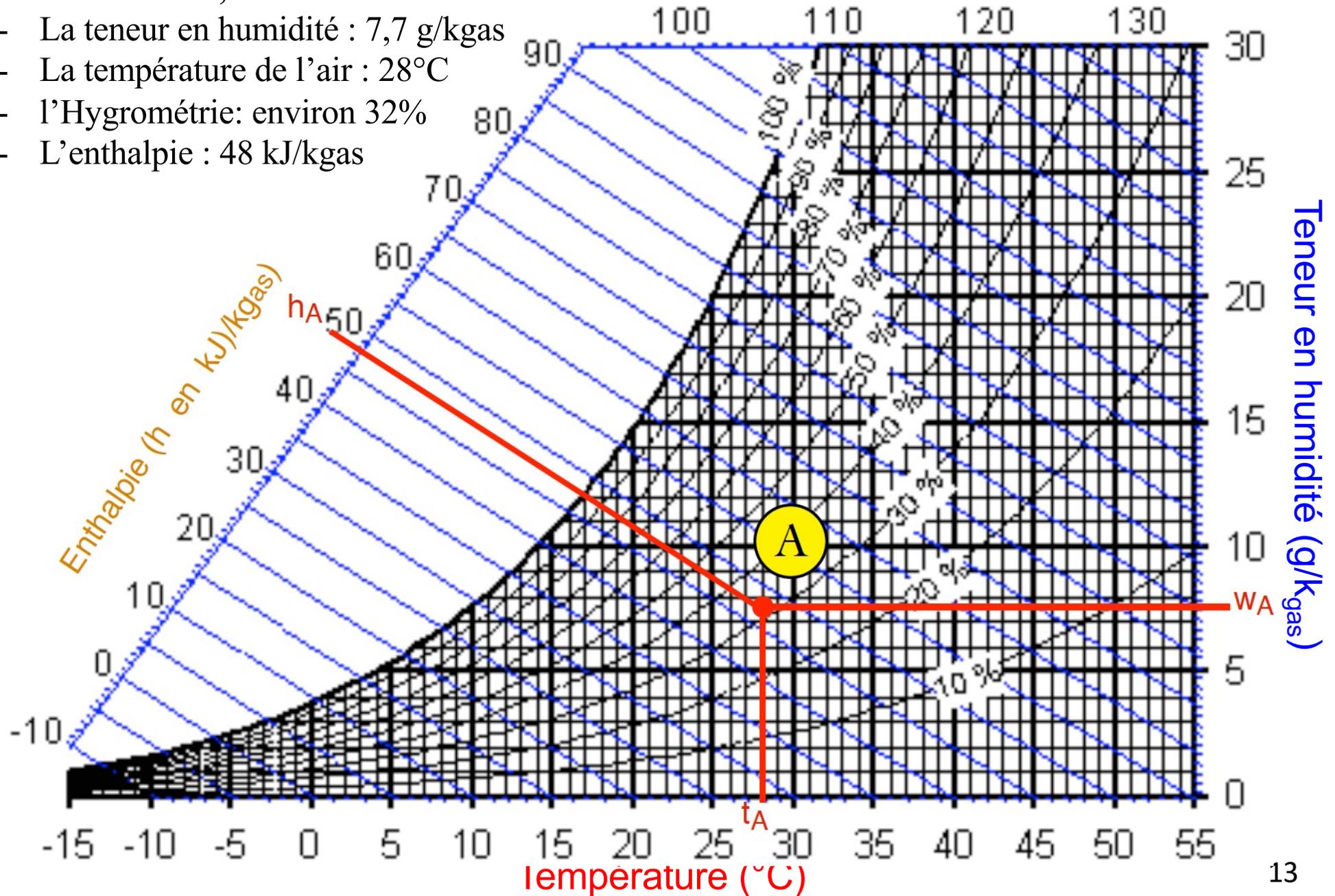
☑ Le diagramme de l'air humide

- Il permet de lire l'ensemble des caractéristiques (température humide, température de rosée, enthalpie) utilisées pour une étude de traitement d'air.
- Il permet également de suivre l'évolution de ces paramètres au fur et à mesure du séchage sans avoir recours à des calculs fastidieux.
- **Il contient :**
 - ✓ Axe de l'humidité absolue (ordonnée) indique la teneur en humidité de l'air [$\text{g}_{\text{vapeur}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$]. Gradué de 0 à 30g/kg
 - ✓ Axe des **températures** (abscisse), indique la température de l'air. Gradué de -15°C à 55°C .
 - ✓ Courbes d'humidité relative (ou hygrométrie) à une **température** donnée : le rapport entre *l'humidité de l'air étudié* et *l'humidité absolue de saturation* (l'humidité maximale). Des courbes de 10 à 100%.
 - ✓ L'enthalpie de l'air indique l'énergie contenue dans l'air. L'enthalpie de l'air indique l'énergie contenue dans l'air. Par convention, l'enthalpie de l'air totalement sec à 0°C est nulle, s'exprime en kilojoules par kilogramme d'air sec $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{gas}}$.



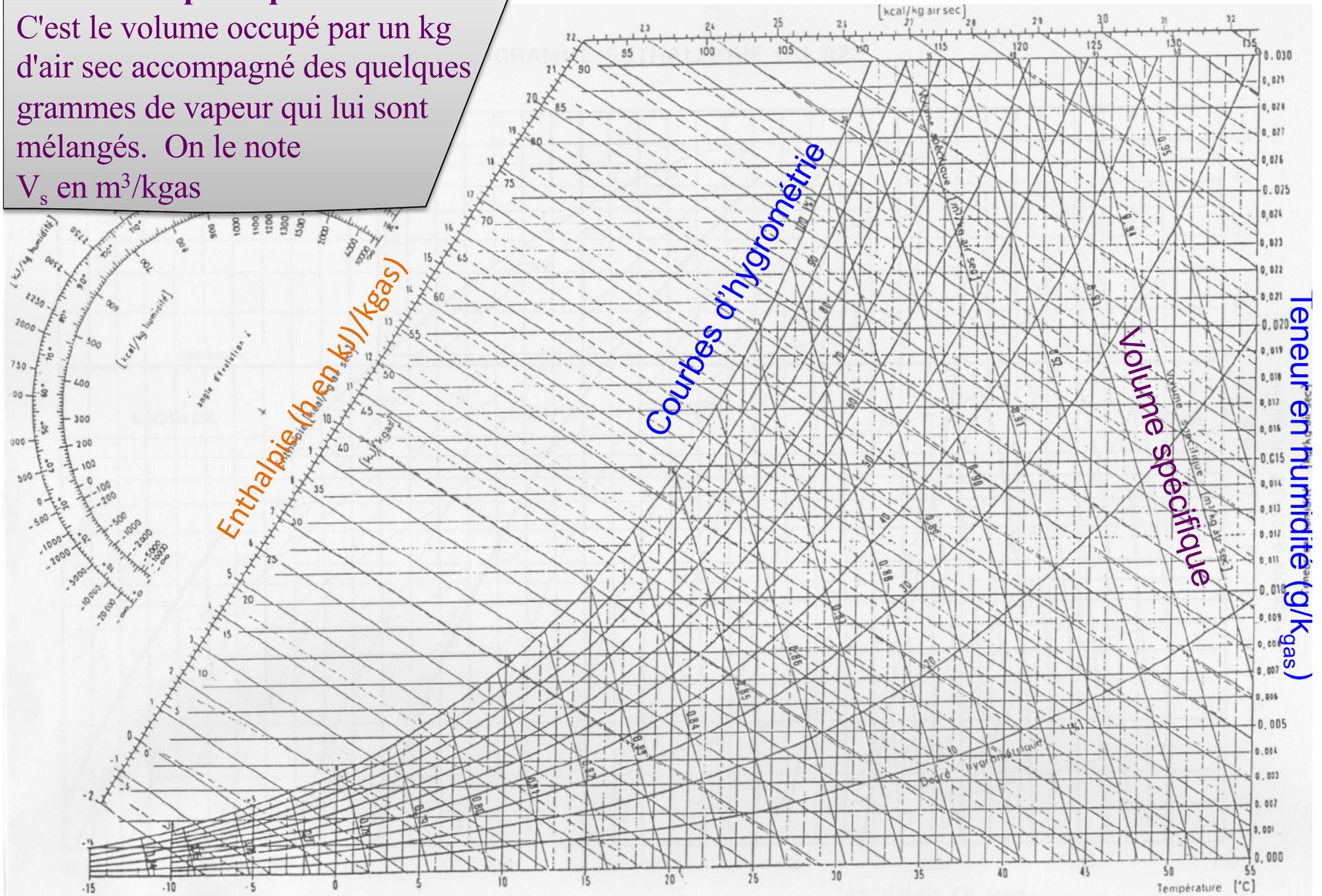
Pour le Point A, nous avons les valeurs :

- La teneur en humidité : 7,7 g/kgas
- La température de l'air : 28°C
- l'Hygrométrie: environ 32%
- L'enthalpie : 48 kJ/kgas



Le volume spécifique de l'air :

C'est le volume occupé par un kg d'air sec accompagné des quelques grammes de vapeur qui lui sont mélangés. On le note V_s en m^3/kg_{gas}



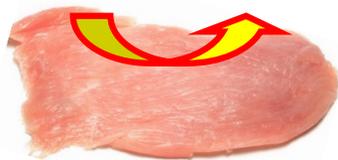
Température (°C)

☑ Opérations de séchage et de déshydratation

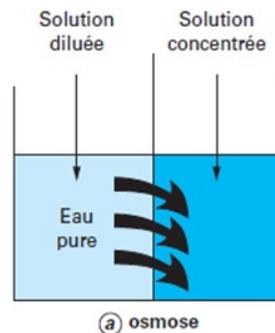
☐ Les deux principaux problèmes liés au séchage sont :

1. Risques d'altération (forme, texture, qualités nutritionnelle et organoleptique)
2. Consommation d'énergie : le séchage serait responsable de 60% de la consommation énergétique du secteur agro-alimentaire.

☐ L'élimination de l'eau repose sur différents principes physiques :



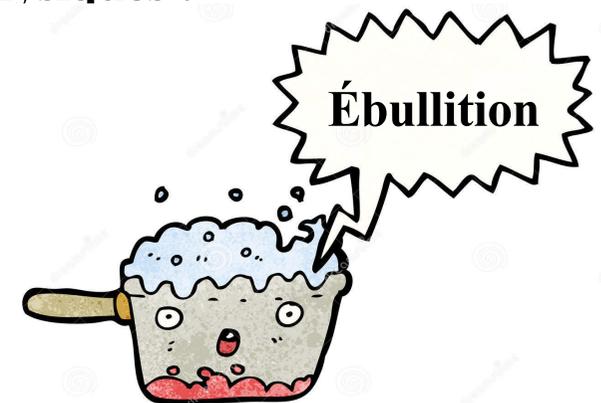
Entraînement



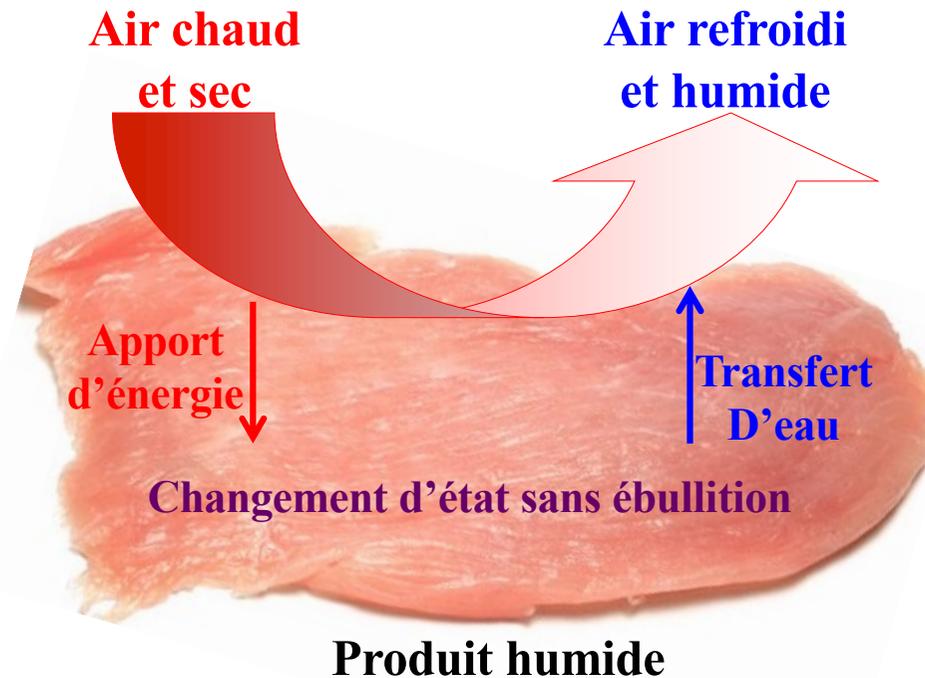
Différence de pression



Sublimation



Le choix repose sur un compromis entre la qualité visée et le coût accepté

☑ Séchage par entraînement (par convection)

- ✓ Le produit humide est placé dans un courant air chaud et sec : il s'établit un écart de température et de pression partielle.
- ✓ L'air apporte en partie l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau.
- ✓ L'eau est évaporée sans ébullition (gradient de pression partielle d'eau).
- ✓ La vapeur d'eau est transférée dans le milieu ambiant et entraînée par le gaz.

□ Les équipements

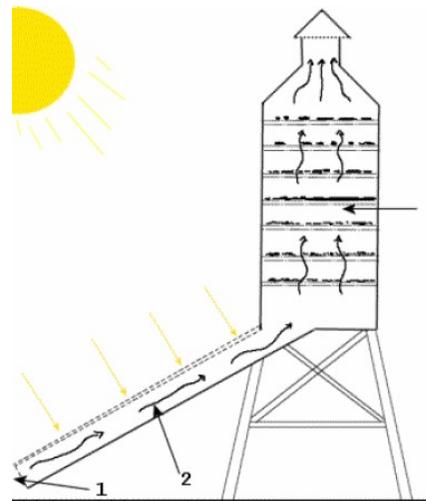
Les équipements de séchage à air chaud peuvent être classés selon le temps de séchage qu'ils impliquent :

- ✓ Temps long
- ✓ Temps court
- ✓ Temps ultra-court

■ Séchage long



Séchoir à claies



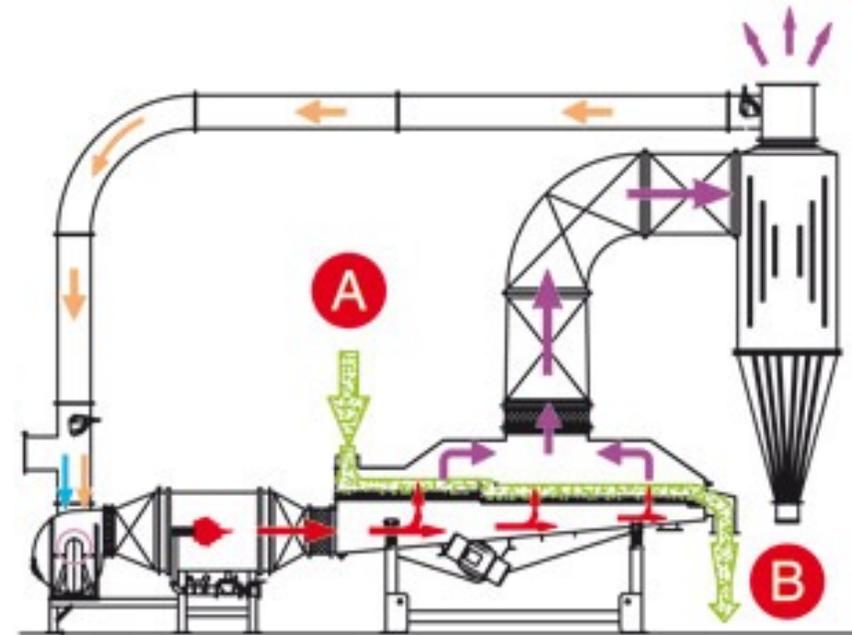
Séchoir solaire



Séchoir Tunnel

■ Séchage court

Séchoirs à lit fluidisé : une couche de produit divisé en fragments, est disposée sur une grille traversée de bas en haut par un courant d'air de vitesse suffisante pour maintenir les particules en agitation : séchage uniforme et rapide grâce à la grande surface de contact air-produit (utilisation pour légumes, céréales, café, sucre).



A: entrée du produit B : sortie du produit

Séchoirs pneumatiques : le produit solide fragmenté est déshydraté pendant son transport par un courant d'air à grande vitesse dans une canalisation assez longue (> 10 m). Le produit sec et l'air traversent ensuite un séparateur cyclone (séchage de grains, farines, amidons, fragments de pommes de terre).

▪ Séchage ultra court

L'atomisation (*Spry Drying*)

✓ Permet de produire une poudre à partir d'une suspension liquide, une émulsion ou même une pâte (aliment facilement pomptable)



✓ une opération de séchage en continu

✓ **Principe :** Pulvériser l'aliment sous forme de fines gouttes (5 à 500 μm) dans une enceinte où règne une $T > T_{\text{ébullition d'eau}}$

✓ **En trois étapes :**

1. Atomisation à l'aide d'une turbine centrifuge à grande vitesse et une buse
2. Evaporation et apparition de la phase solide
3. Séparation de poudre sèche et air humide, se dernier est récupéré par au moyen de cyclone

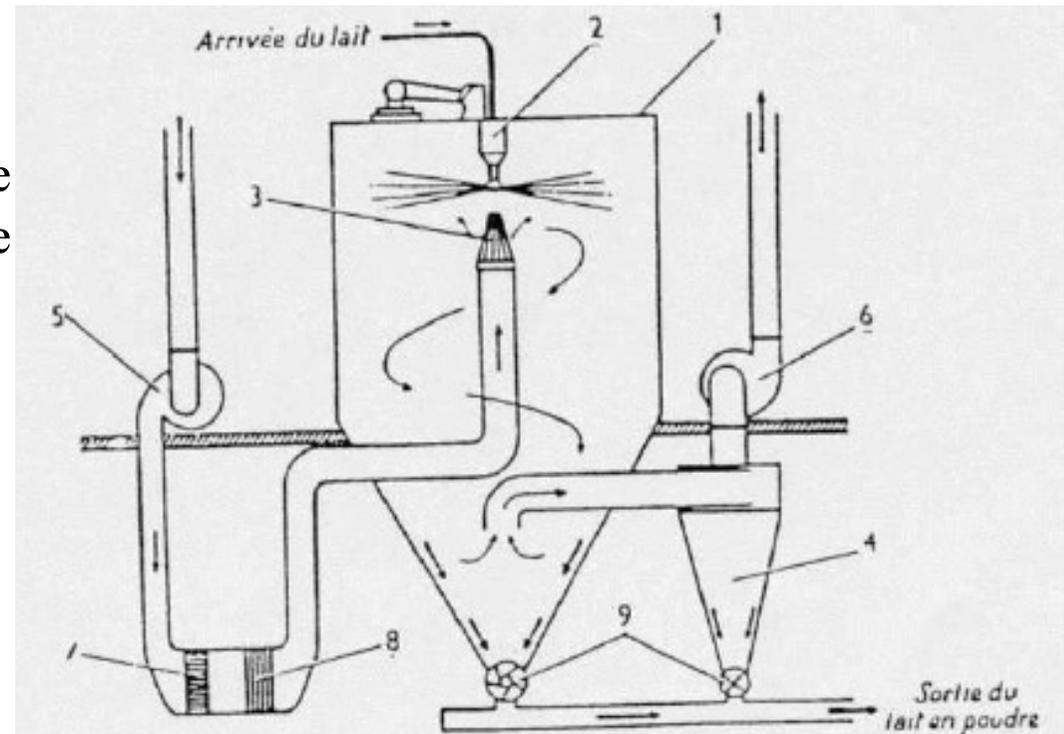


Fig. IX-8. — Schéma d'une installation de séchage du lait par le procédé *Spry* (Niro).

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Tour de séchage. | 5. Ventilateur. |
| 2. Atomiseur. | 6. Aspirateur. |
| 3. Distributeur d'air chaud. | 7. Filtre. |
| 4. Cyclone permettant la récupération de la poudre entraînée par l'air. | 8. Calorifère. |
| | 9. Distributeurs de sortie. |

☑ **La lyophilisation**

Consiste en l'élimination progressive de l'eau du produit préalablement congelé (phase solide) par passage à la phase vapeur, sans passer par la phase liquide. Ce changement d'état s'appelle la sublimation.

Pendant la lyophilisation, l'eau passe par les changements d'états suivants :

- **Congélation**

Pour commencer la lyophilisation, il est tout d'abord nécessaire de congeler la matière première sans en altérer la structure. Pour cela, les produits à lyophiliser sont congelés (IQF) directement après leur récolte, à une température de -18°C .

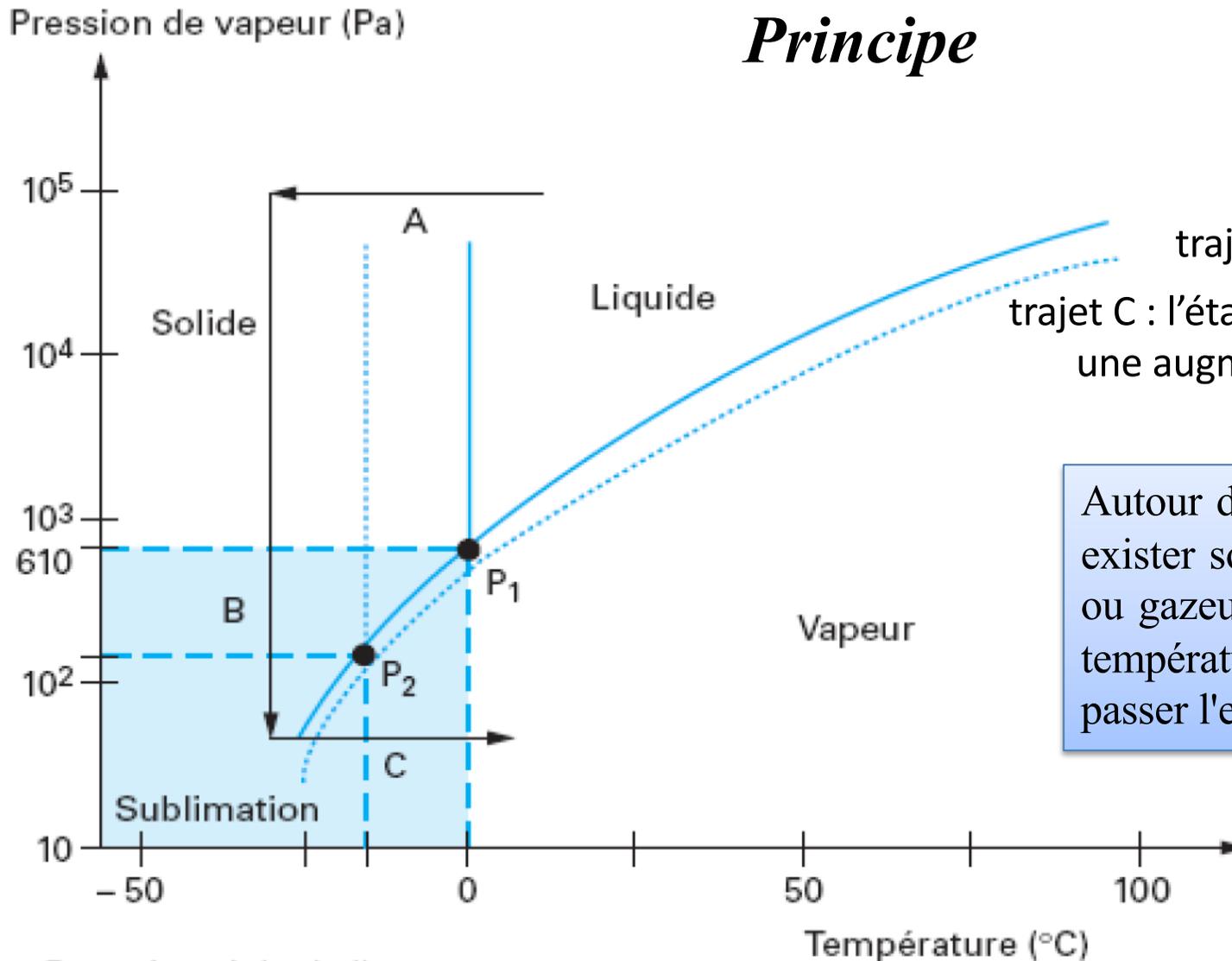
- **Sublimation**

Sous l'action du vide dans la chambre de séchage l'eau passe directement du stade solide à l'état gazeux et s'échappe du produit. Pour créer la sublimation, de l'énergie sous la forme de chaleur est nécessaire.

- **Séchage résiduel**

Ou la dessiccation, l'eau résiduelle la plus fortement liée au produit est également éliminée par adsorption à la surface des produits lors de la sublimation. Cette eau ne représente que 5%, mais la dessiccation demande un vide plus poussé.

Principe



trajet A : congélation

trajet B : abaisser la pression

trajet C : l'état vapeur sera favorisé par une augmentation de température

Autour de *point triple*, l'eau peut exister soit à l'état solide, liquide ou gazeux, et en faisant varier la température et la pression, on fait passer l'eau d'un état à un autre.

P₁ point triple de l'eau pure

P₂ point triple d'une solution aqueuse

— diagramme de l'eau pure

⋯ diagramme d'une solution aqueuse

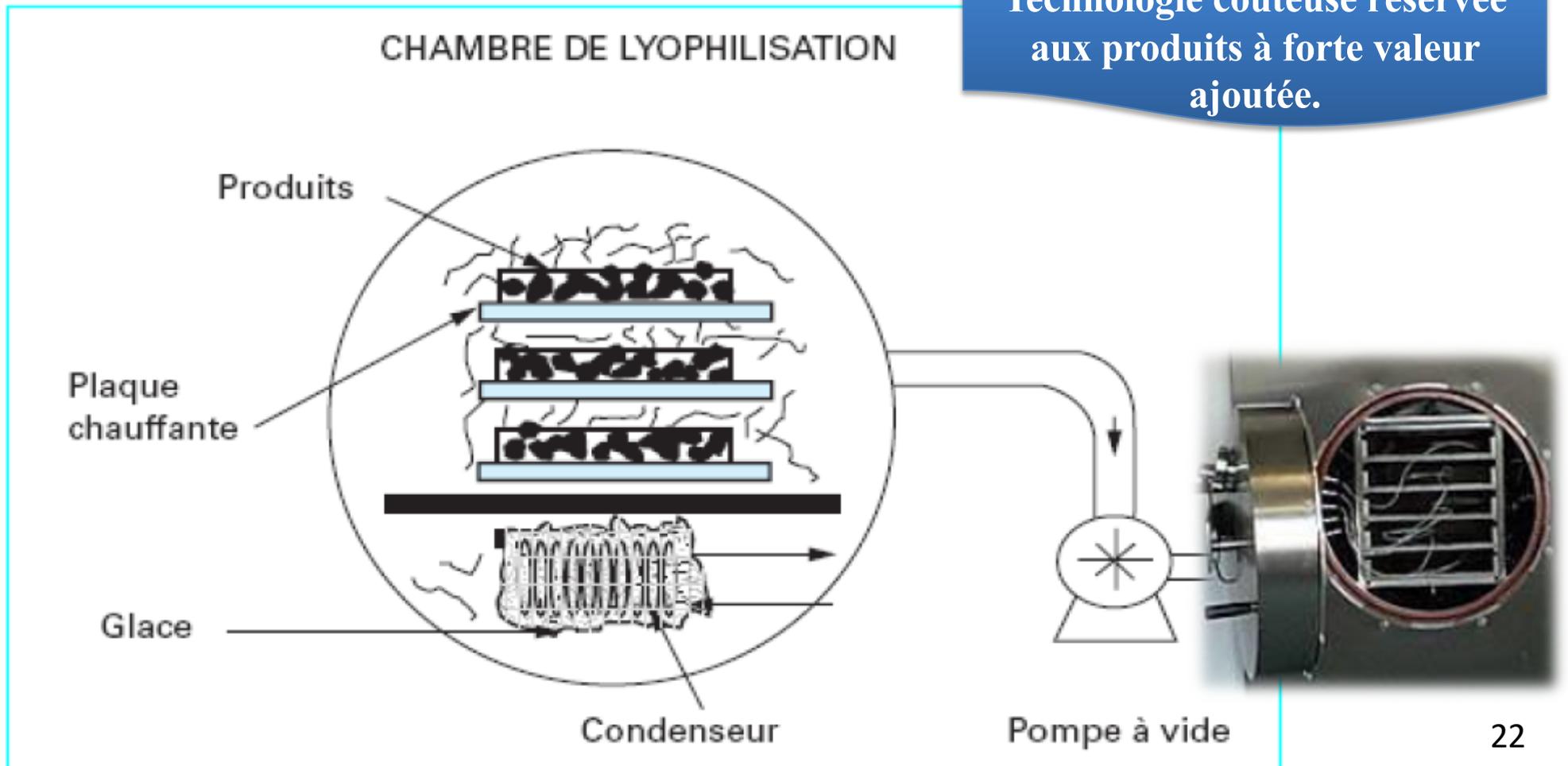
□ Lyophilisateur

Une installation de lyophilisation doit :

- ✓ produire du froid pour congeler l'eau puis la piéger
- ✓ produire du chaud pour la sublimation
- ✓ amener cette énergie au produit
- ✓ faire du vide.

Conserve la qualité : arômes, couleur, conserve les nutriments (même les plus fragiles). réhydratation correcte

Technologie coûteuse réservée aux produits à forte valeur ajoutée.



☑ Séchage et qualité des aliments

■ **Altération de la qualité**

- Perte de substances aromatiques volatiles par évaporation
- Réactions de brunissement, modification de couleur
- Flétrissement ou durcissement de la surface des produits
- Diminution de la capacité de rétention d'eau (dénaturation des protéines)
- Perte de la valeur nutritionnelle (oxydation des vitamines)

- **Réhydratation** : le produit ne reprend jamais totalement sa forme, son aspect et son goût d'origine et forme des grumeaux !
- **La destruction flore microbienne** n'est pas l'objectif ; Il est souvent nécessaire associer un blanchiment ou une pasteurisation avant le séchage.

À l'exception de la Lyophilisation

1/La fin du séchage se caractérise par une augmentation de la température;

2/Séchage initial trop rapide élimine l'eau de surface plus vite que la migration de l'eau dans le produit ce qui conduit à la formation d'une croute

← a pour conséquences

☑ Finalité

Quelque soit la technique de déshydratation utilisée, le but est toujours le même



**Diminuer la teneur en eau :
réduire l'activité de l'eau des produits**



**Empêcher le développement microbien
Bloquer ou ralentir les réactions chimiques et enzymatiques,
sources de détérioration.**



**Conserver à température ambiante dans des emballages adaptés ;
Préservation les qualités nutritionnelles.**