

**Plantes à parfum,
médicinales et aromatiques**

LE SECHAGE

**des principes ... à la
définition de votre installation**

iteipmai publications

49120 CHEMILLE FRANCE

SOMMAIRE

Avant-propos	5
Remerciements	7
Chapitre I - LE VÉGÉTAL	9
Chapitre II - LES PRINCIPES DE SÉCHAGE	23
Chapitre III - L'AIR	35
Chapitre IV - L'ÉNERGIE	45
Chapitre V - ÉTUDE COMPARATIVE	57
Chapitre VI - LES TECHNOLOGIES DU SÉCHOIR	65
Première partie - Les éléments aérauliques	69
Deuxième partie - Les éléments thermiques	79
Troisième partie - La pompe à chaleur (PAC)	95
Quatrième partie - Les enceintes	105
Chapitre VII - LA CHAÎNE DE TRANSFORMATION	121
Chapitre VIII - CALCUL D'UNE INSTALLATION	137
Références bibliographiques	145
Carnet d'adresses	147
Table des principales notions abordées	157
Table alphabétique des espèces citées	159
Table des matières	161

.....

AVANT-PROPOS

Parmi les productions végétales, la branche des plantes médicinales aromatiques et à parfum recouvre une réalité diverse et complexe. Ses trois secteurs d'utilisation, -la pharmacie, l'aromatique alimentaire, la parfumerie et la cosmétique-, présentent des besoins très variés en formes (plantes fraîches, déshydratées, surgelées, huiles essentielles,...), en qualités (extraction, herboristerie,...) et en espèces (plusieurs centaines).

Face à ces marchés, la production française qui ne couvre qu'une faible partie des besoins, s'appuie sur la cueillette et la culture de quelques 150 espèces, certaines à faibles valeurs ajoutées recouvrant de grandes surfaces et, à l'opposé, d'autres produites sur de petites surfaces avec de très fortes valeurs ajoutées.

Cette production française doit faire face à une double concurrence sévère :

- . internationale pour des produits non protégés sur le marché mondial en général non déficitaire,
- . produits de synthèse qui dominent largement du fait de la cherté et de l'instabilité des matières premières naturelles qui de surcroît ont du mal à s'inscrire dans les contraintes réglementaires souvent élaborées pour les produits de synthèse.

Les contraintes ne sont pas seulement économiques, mais également techniques (mise en culture, mécanisation, séchage,...), biologiques (espèces, teneurs en principes actifs,...), réglementaires (homologation, AMM, normes,...), et politiques (décret Evin 1989 supprimant le remboursement des préparations magistrales à base de plantes, évolution de grands pays producteurs de l'Est, ...).

Alors que les investissements et les efforts de recherche nécessaires à l'amélioration de la productivité sont freinés par la petite taille de ces marchés et la faiblesse de leur enjeux économiques et sociaux vis-à-vis des grandes cultures, la production française au cours des dix dernières années a su néanmoins accroître fortement sa compétitivité. Elle l'a fait par une spécialisation de ses producteurs, une mécanisation croissante, accompagnées d'autres gains de productivité par le biais de la sélection végétale et d'itinéraires de production/élaboration plus adaptés à la meilleure maîtrise d'une qualité ciblée pour un usage donné.

En effet, si quelques plantes peuvent être conduites selon les techniques de cultures céréalières, la plupart nécessite un machinisme spécialisé, principalement à partir de la récolte. La complexité vient du fait que l'on exploite différentes parties de plantes (racines, parties aériennes, feuilles, fleurs), chaque espèce présentant des caractéristiques morphologiques différentes. Les problèmes ont été largement résolus en adaptant des matériels existants ou par la construction de prototypes. Enfin, c'est la destination de la plante et son mode de transformation qui vont véritablement orienter le système de production, ainsi que la quantité de matière végétale à traiter.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la réalisation de cet ouvrage sur le séchage des plantes médicinales et aromatiques. Alors que la majorité des quelques 12 000 tonnes de plantes produites nécessite une opération de séchage pour stabiliser le matériel végétal, il n'existait aucun document de référence dans ce domaine.

Opération primordiale à l'obtention d'un produit de qualité (teneur en principes actifs, conservation de l'arôme et aspect visuel) et très significative dans l'établissement de son coût de revient, il était nécessaire de réaliser un ouvrage de synthèse à destination des professionnels spécialisés de ce secteur, ou qui désirent le devenir.

Ce guide n'a ni la prétention d'apporter des réponses toutes faites aux divers problèmes soulevés par le séchage, ni celui de présenter une liste exhaustive des matériels utilisables.

Il s'inscrit surtout comme un document d'aide à la prise de décisions pour concevoir et utiliser une installation de séchage.

Quelles sont les précautions à prendre pour ne pas altérer les plantes ? Comment se comporte l'air de séchage ? Existe-t-il une source d'énergie plus économique ? Comment dimensionner son installation ? sont quelques-unes des nombreuses questions traitées dans ce guide.

L'utilisateur y trouvera de multiples éléments de réponses et de références illustrées de nombreuses figures et exemples, mais pas de solution toute faite à sa situation, sachant qu'en matière de séchage chaque réalisation est particulière. A cet égard, les constructeurs ont un rôle important à jouer.

Dans un premier temps, les aspects fondamentaux du séchage sont étudiés en considérant les comportements de la plante, de l'air, les énergies exploitables et les principes de séchage.

Ensuite dans un deuxième temps, les technologies du séchage et de la chaîne de transformation sont abordées pour être répertoriées, analysées et évaluées.

Enfin, une liste non exhaustive de fabricants et distributeurs de matériels pour séchoirs et chaînes de transformation est présentée à la fin de cet ouvrage.

Les tarifs présentés n'engagent en aucun cas les fournisseurs et fabricants mentionnés. Ils permettent d'établir des fourchettes de prix et offrent des points de repère.

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a été réalisé à l'iteipmai avec les collaborations internes de :

- Christophe HENRY technicien supérieur, dans le cadre de son Service National,*
- Xavier SIMONNET ingénieur stagiaire.*

Nous remercions vivement pour sa contribution, Madame Catherine BONAZZI chargée de recherche INRA au laboratoire de génie industriel alimentaire de l'ENSIA de Massy, qui nous a fait le plaisir d'assurer la lecture et la correction de ce document sur le plan scientifique.

Nous exprimons notre reconnaissance aux producteurs et à nos adhérents qui ont accepté les enquêtes et mesures réalisées sur leurs installations de séchage.

Nous saluons également pour leur disponibilité et leur contribution, les fabricants et distributeurs de matériel, le Comité Economique Agricole de la Prune d'Ente et du Pruneau, la Chambre d'Agriculture du Maine et Loire, et le CFPPA de Nyons.

Ce document a été réalisé avec la participation financière de l'ONIPPAM.

CHAPITRE I - LE VÉGÉTAL

1. GÉNÉRALITÉS

Constituant majeur de la plante, l'eau est indispensable à son développement. Elle assure deux grandes catégories de fonction :

1) maintien des structures :

- port du végétal,
- mouvement d'organes (feuilles, étamines) et de cellules (stomates),
- allongement cellulaire.

2) déroulement du métabolisme

La plante coupée fane rapidement. Elle va rester vivante jusqu'à ce que la déshydratation qui survient plus ou moins tôt entraîne la mort des cellules.

Bien que fragilisée, elle va donc poursuivre son métabolisme :

- à partir de ses réserves

- . eau . énergie
- . minéraux . autres substances (dont les principes actifs recherchés),

- et sous l'action de l'environnement

- . lumière . humidité
- . température . oxygène

Sous l'influence de réactions biochimiques et physicochimiques, la composition de la plante va évoluer rapidement. Des modifications vont notamment apparaître sur le plan de :

- sa teneur en eau,
- sa valeur énergétique,
- sa pigmentation,
- la stabilité et l'équilibre de certains composés chimiques.

De plus, la plante récoltée va devenir un terrain de prédilection pour le développement des nombreux micro-organismes indésirables (bactéries, levures, moisissures).

La connaissance des principaux paramètres intervenant sur le végétal récolté, en vue de les maîtriser, est indispensable pour stabiliser au mieux la récolte en fonction de sa finalité d'utilisation.

2. PARAMÈTRES BIOLOGIQUES

21. L'eau

211. L'humidité de la plante

L'humidité se définit par le rapport de la masse d'eau contenue dans la plante à la masse totale (MS* + eau).

Les "points" d'humidité représentent les pourcentages de teneur en eau. La mesure de l'humidité avant et après séchage permet de calculer la perte en eau au séchage, élément primordial dans le calcul d'une installation de séchage. La teneur en eau se calcule précisément par étuvage à 105°C pendant quelques heures et s'estime à l'aide d'humidimètres. Ces derniers permettent une lecture rapide mais sont coûteux et souvent moins précis.

* MS : matière sèche

On nomme :

Hi : humidité initiale en % :

$$Hi = \frac{\text{masse frais} - MS}{\text{masse frais}} \times 100$$

Hf : humidité finale en % :

$$Hf = \frac{\text{masse sec} - MS}{\text{masse sec}} \times 100$$

Qe 1 = quantité d'eau à enlever/frais en % :

$$Qe 1 = \frac{(Hi - Hf)}{(100 - Hf)} \times 100$$

Qe 2 = quantité d'eau à enlever/sec, en % :

$$Qe 2 = \frac{(Hi - Hf)}{(100 - Hi)} \times 100$$

En général, Hi s'étend de 70 à 90 % et Hf est inférieure à 13 %, soit en moyenne une perte de 60 à 80 points d'humidité.

212. Notion de disponibilité de l'eau - Aw

On distingue la teneur en eau d'une substance, exprimée en kg eau/kg matière sèche, de l'activité de l'eau : Aw. Cette dernière représente les interactions de l'eau avec les autres constituants du produit conduisant à l'existence d' «eau libre» (Aw= 1) et d'eau liée (Aw< 1) (fig. I.1). L'Aw traduit la disponibilité de l'eau pour les réactions biologiques par exemple.

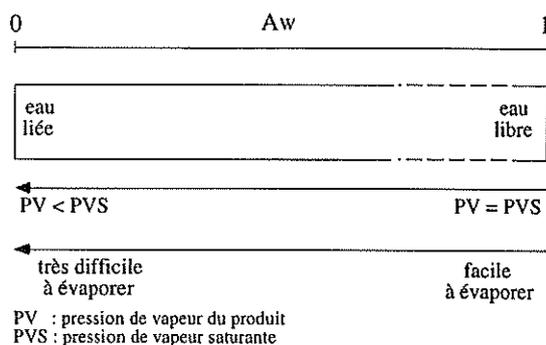


Figure I.1
Représentation schématique de l'Aw

L'abaissement d'Aw permet de stabiliser le végétal en :

- bloquant les développements microbiens,
- limitant les transformations internes (enzymes, réactions).

213. Notion d'humidité relative d'équilibre - HRE

La notion d'humidité relative d'équilibre fournit un moyen de mesurer la disponibilité de l'eau dans la plante (Aw).

$$HRE = \frac{P^*}{P^{***}}$$

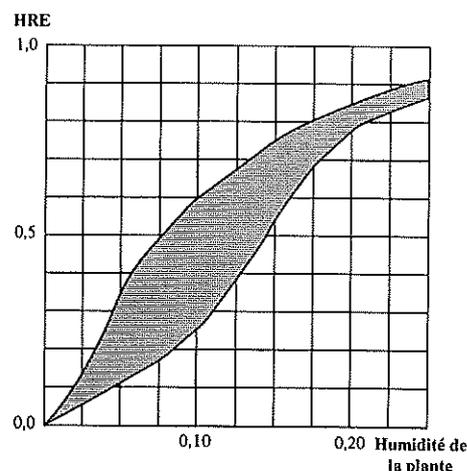
* Pression de vapeur d'eau d'une petite quantité d'air placée en équilibre avec la plante à la température t (°C)

** Pression de vapeur saturante à la température t (°C)

Lorsque l'équilibre entre la plante et l'air est atteint, HRE = Aw

C'est la pression de vapeur d'eau (PV) qui détermine les échanges entre le produit et l'atmosphère qui l'entoure, aussi bien pour le séchage que pour le stockage (figure I.2). C'est par rapport à l'état d'équilibre que se mesure l'importance des échanges.

Au cours du séchage, le rapport PV/PVS diminue, La vitesse de séchage n'est plus limitée par les caractéristiques de l'air (facteurs externes), mais par celles du produit (facteurs internes) comme la migration interne de l'eau et la structure du produit. On tend vers un état où le produit est en équilibre avec l'air et la vitesse de séchage nulle.



Le développement des microorganismes est inhibé en dessous de :

HRE = 0,90 - 0,95	bactéries
HRE = 0,88	levures
HRE = 0,80	moisissures

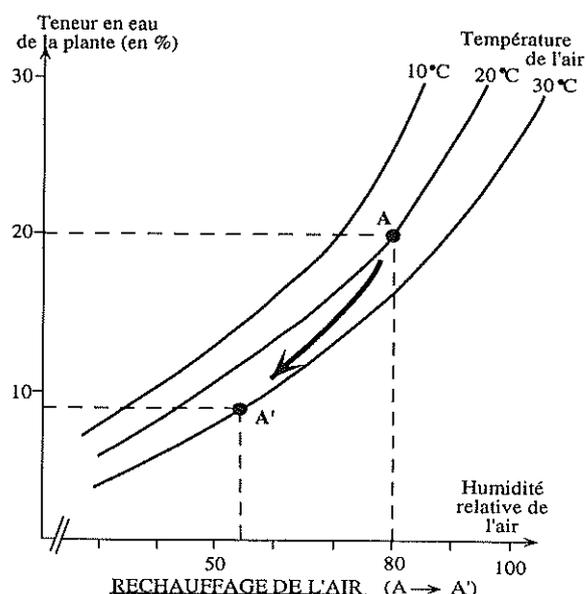
Figure I.2
Evolution de l'humidité relative d'équilibre (HRE) d'une plante en fonction de son humidité : développement des microorganismes (source : Iteipmai, 1982)

214. Notion de pouvoir hygroscopique

Comme nous venons de le voir, une plante et de l'air mis en contact prolongé tendent vers un état d'équilibre :

- même température,
- même pression de vapeur.

Ainsi, à une valeur de la teneur en eau du produit correspond une valeur d'humidité relative de l'air (cf. chapitre AIR). Cette relation permet de tracer des courbes d'équilibre hygroscopique (ou courbes de sorption) d'une plante (figure I.3).



Air A (t = 20 °C, HR = 80 %) possibilité de déshydratation jusqu'à 20 % d'eau dans la plante
Air A' (t = 30 °C, HR = 55 %) possibilité de déshydratation jusqu'à 8,5 % d'eau dans la plante

Figure I.3
Exemple d'équilibre hygroscopique d'une plante en cours de séchage (source : Iteipmai, 1982)

Beaucoup de produits présentent de telles courbes d'équilibre, ils sont dits hygroscopiques. On ne peut les sécher entièrement avec de l'air moyennement saturé, il restera toujours une teneur en eau résiduelle correspondant à l'équilibre avec l'air de séchage. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau n'est plus celle correspondant à l'eau libre, elle est supérieure et relative à ce pouvoir hygroscopique. Ce pouvoir est influencé par la texture et la composition

22. Stabilité des principes actifs

La température et l'humidité relative de l'air, ainsi que la durée du séchage influent fortement sur la qualité du produit fini. Outre l'aspect visuel, il faut également considérer les particularités de certains principes actifs.

221. Les huiles essentielles

A noter que la Pharmacopée et l'AFNOR (Association Française de Normalisation) imposent des teneurs minimales en huiles essentielles pour la commercialisation des plantes. Un type de profil aromatique peut également être recherché par l'industrie. La température de séchage influence de façon très

du matériel végétal, notamment la présence de mucilages. En pratique, le réchauffage de l'air et les précautions de stockage s'imposent pour atteindre une faible humidité relative de l'air et ainsi pallier à cette contrainte. Parallèlement, les parties de plante épaisses (racines, capitules, baies,...) présentent aussi un frein à l'évacuation de l'eau, d'où l'intérêt de limiter la vitesse de l'air et d'augmenter les surfaces d'échange par coupe, broyage, écrasement.

importante les pertes en huiles essentielles.

Les figures I.4, I.5 et I.6 illustrent l'effet dépressif des températures de séchage élevées, respectivement sur la menthe poivrée, la sauge officinale et la matricaire.

Pour la plupart des cas, des pertes sont enregistrées avec une température de séchage dépassant 45°C.

Cependant pour le persil (Daudin et Richard, 1982) et d'autres ombellifères, les meilleurs résultats sont obtenus avec une température de séchage supérieure à 80°C.

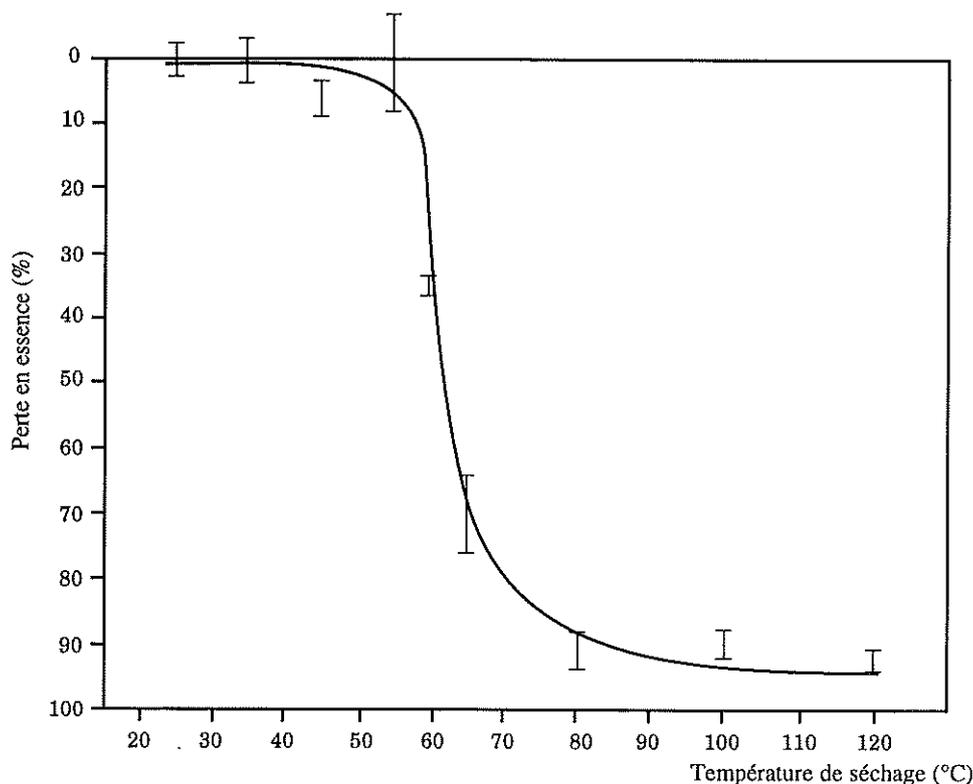


Figure I.4

Perte en huile essentielle des feuilles de menthe poivrée, en pourcentage, en fonction des températures de séchage

(Bouverat-Bernier *et al.*, 1989)

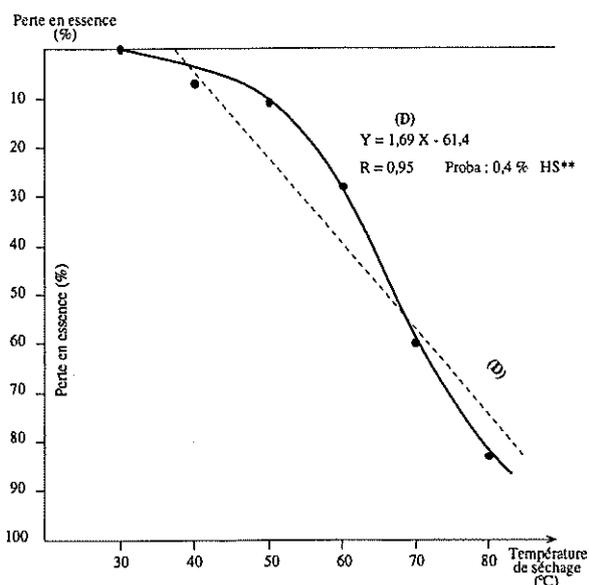


Figure 1.5

Perte en huile essentielle de la feuille de sauge officinale, en fonction des températures de séchage (source : Itelpmal, 1992)

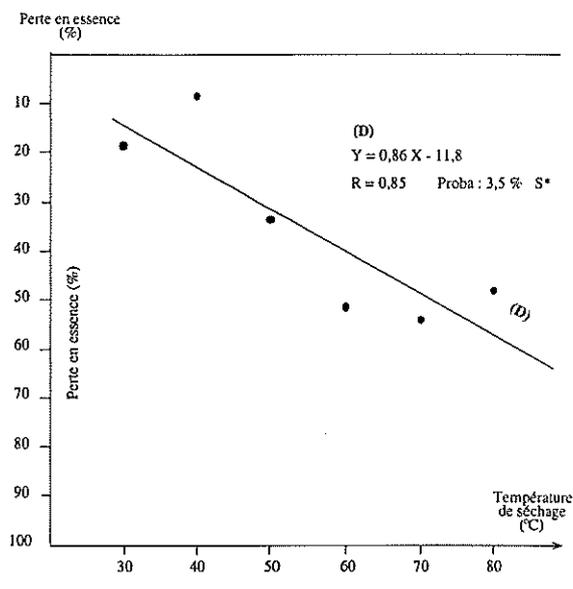


Figure 1.6

Perte en essence des capitules de matricaire en fonction de la température de séchage (source : Itelpmal, 1992)

Deux interprétations peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène :

- la migration rapide de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur de la feuille provoque dès le début du séchage un dépôt de matières solubles (BIMBENET *et al.*, 1970) qui vient former une «pellicule» à la surface des feuilles et ralentir, sinon empêcher, le départ des produits volatils.
- la diffusivité relative des substances volatiles par rapport à celle de l'eau est d'autant plus faible que

le milieu est anhydre (THIJSSSEN et RULKENS, 1968). Or, dans le cas d'une allure de séchage élevée, la surface du produit est rapidement amenée à une faible teneur en eau dès les premiers instants du séchage. La diffusion sélective des substances volatiles et de l'eau à travers cette partie plus déshydratée est plus propice à l'élimination d'eau

Le type d'organe sécréteur joue un rôle important sur le plan des pertes en huile essentielle (tableau I.1).

Localisation de l'HE (épiderme)	externe			interne	
Appareil sécréteur	poils glandulaires			canaux	idioblaste
. espèces	menthe	sauge officinale	bardane	persil	laurier commun
. familles	labiées		composées	ombellifères	lauracées
Extraction HE	facile			exigeante en temps, pression (frein des parois)	
Fragilité (perte potentielle d'HE)					
. manutention	importante			faible	
. élaboration (coupe)	importante			faible	
. t° séchage	importante			nulle	
Précautions	limiter les manipulations et sécher à basse température : 30 ≤ t° < 50			couper le prod. frais sécher de 80 à 90°C	
Durée du séchage	20 à 72 heures			< 20 heures	

Tableau I.1
Conditions de séchage en fonction des organes sécréteurs

Les appareils sécréteurs externes sont très fragiles et sujets à diverses dégradations. Par contre les ombellifères, grande famille des plantes aromatiques (persil, anis, fenouil, livèche, angélique, aneth, coriandre, ...) présentent la particularité de sécréter et stocker l'huile essentielle dans des canaux sous l'épiderme. Les

risques de perte potentielle d'huile essentielle sont ainsi nettement atténués.

Outre la perte d'huile essentielle, le séchage peut entraîner des modifications dans la composition de l'huile essentielle, modifiant ainsi le profil aromatique (tableau I.2).

Traitements	Teneur en essence des feuilles (ml/100 g MSF)	Composition de l'huile essentielle (%)						
		1,8 cinéol	α thuyone	β thuyone	camphre	β caryoph.	humulène	viridiflorol
frais	2,1	20,0	1,7	17,2	26,0	2,4	0,8	5,8
30°C	2,1	19,1	1,6	17,1	29,1	2,9	1,1	4,8
80°C	0,4	14,6	1,0	7,2	38,7	4,6	1,5	16,2

Tableau I.2

Variation de la composition en huile essentielle de la feuille de sauge officinale, fraîche et séchée à 30 et 80°C.

(source : Iteipmai, 1992)

222. Les pigments

Le critère visuel est très souvent prépondérant pour l'acheteur.

Les principaux facteurs responsables de la couleur sont les pigments et les composés issus du brunissement enzymatique et non enzymatique.

1) Les pigments

La couleur des plantes aromatiques est principalement due à deux classes de pigments : chlorophylles et caroténoïdes, tous deux liposolubles et respectivement verts et jaunes/oranges. Ils sont sensibles aux conditions de séchage.

2) Les réactions de brunissement

Le brunissement enzymatique consiste en la transformation par le biais d'enzymes, des composés phénoliques en polymères colorés bruns ou noirs. L'inactivation des enzymes peut être obtenue par la chaleur lors d'un blanchiment par exemple.

Le brunissement non enzymatique, ou réaction de MAILLARD, est un ensemble très complexe de réactions. Il engendre notamment la formation de pigments bruns ou noirs et de composants odorants, indésirables ou non. Les paramètres influençant la réaction de MAILLARD sont principalement la teneur en eau, la température et la durée du traitement thermique.

La sensibilité des pigments à la chaleur et les réactions de brunissement réclament la prudence.

Des différences de comportement sont également observées selon les espèces.

Ainsi, une étude (ROCHA MIER, 1993) portant sur l'influence des conditions de séchage sur la couleur de la menthe (*Mentha spicata*) et du basilic (*Ocimum basilicum*) a fait ressortir les tendances suivantes :

- pour des échantillons non blanchis, le séchage doit être effectué à basse température : 45 - 50°C pour la menthe et 40°C pour le basilic au maximum,
- une forte vitesse de séchage se traduit par un effet protecteur de la couleur verte dans le cas de la menthe alors que l'inverse est observé pour le basilic,
- une forte humidité de l'air de séchage détériore la couleur dans les deux cas,
- un séchage à basse température suivi d'un séchage à plus forte température ne permet pas de bloquer les réactions de dégradation des pigments.

Pour l'ensemble des plantes, les trois principaux critères à prendre en compte sont :

- la température de séchage,
- la vitesse de séchage,
- l'humidité de l'air.

Des traitements préalables comme le blanchiment peuvent également être envisagés.

223. Les hétérosides, alcaloïdes, terpènes ...

Les quelques exemples présentés ci-dessous illustrent les réactions très variables de ces composés, aux températures de séchage.

Digitale laineuse (*Digitalis lanata*)

On extrait des feuilles récoltées en première année, des hétérosides cardiotoniques, notamment la digoxine.

Il est traditionnellement admis que la dessiccation de la feuille doit être réalisée rapidement à une température aussi basse que possible (voire même à température ordinaire) pour éviter la destruction des hétérosides. La faiblesse de la température nécessite une intense ventilation (BRUNETON, 1993). Cependant, une étude de l'iteipmai (1991) révèle que le recours à des températures allant jusqu'à 60-80°C n'affecte pas la teneur en digoxine. Les températures assez élevées permettent surtout une forte réduction de la facture énergétique par rapport à des traitements avec des températures plus douces, voisines de 30°C.

La drogue sèche doit obligatoirement être stockée en atmosphère sèche et à l'abri de la lumière, son humidité résiduelle doit se situer aux environs de 6 %. La conservation est de toute façon limitée.

Valériane (*Valeriana officinalis*)

La drogue est composée des organes souterrains (rhizomes, racines et stolons) dont on extrait les valépotriates (monoterpènes). Ces composés sont particulièrement instables : ils se décomposent rapidement sous l'influence de l'humidité, de la chaleur (> à 40°C) ou de l'acidité (pH < à 3) (BRUNETON, 1993).

La Pharmacopée Européenne (Xe édition) précise que la drogue ne doit pas être séchée à une température supérieure à 40°C.

Pyrèthre de Dalmatie (*Chrysanthemum cinerariæfolium*)

Les pyréthrine (monoterpènes irréguliers), toxiques pour les animaux à sang froid et employées comme insecticide, sont extraites des capitules.

Ces composés sont particulièrement photo-instables : 3 jours d'exposition des capitules au soleil réduisent de 20 % la teneur en pyréthrine. Le séchage est conduit en deux temps : une première phase avec un séchage à température inférieure à 40°C, suivie d'une seconde phase avec des températures progressivement croissantes jusqu'à 60-80°C (Mémento de l'Agronome, 1984).

Concernant 5 plantes à alcaloïdes, une étude (BUZUK, 1991) portant sur l'influence de la température de séchage propose les recommandations suivantes :

- . chélidoine majeur (*Chelidonium majus*) : 80°C *
- . stramoine (*Datura stramonium*) : 60°C *
- . corydalle solide (*Corydalis solida*) : 40°C *
- . belladone (*Atropa belladonna*) : 20°C *
- . jusquiame noire (*Hyoscyamus niger*) : 20°C *

* température maximale de séchage

3. LES EXIGENCES COMMERCIALES

L'expression de la qualité d'une plante est fonction de son utilisation :

- pour l'**aromaticien**, la saveur et la neutralité,
- pour le **parfumeur**, l'odeur,
- pour le **chimiste**, la ou les substances actives,
- pour l'**acheteur biologique**, la non utilisation de pesticides et d'engrais chimiques de synthèses, l'absence de résidus,
- pour le **négociant**, le critère visuel est souvent prépondérant.

Face à ces exigences diverses, en France, la Pharmacopée et l'AFNOR régissent les contrôles de qualité pour les plantes médicinales et aromatiques.

La Pharmacopée définit les normes concernant les plantes destinées à l'industrie pharmaceutique (tableau I.3) ; elle utilise le terme de drogue. Pour certaines plantes inscrites, elle présente une monographie. Chaque pays possède sa propre pharmacopée. Il existe également une Pharmacopée européenne.

L'AFNOR a élaboré deux recueils de normes s'adressant aux épices et aromates (elle utilise le terme de produit), et aux huiles essentielles.

Chaque produit et chaque drogue inscrits font l'objet d'une définition qui précise entre autres :

- les parties utilisées (racine, fleurs),
- l'état du végétal : frais, sec, entier, brisé...
- la teneur minimale et parfois maximale en principe actif.

Les normes pour une plante peuvent varier selon qu'elle est destinée à l'industrie pharmaceutique ou à une utilisation aromatique (tableau I.4).

Le procédé de séchage, déterminant pour la qualité du produit, devra donc tenir compte à la fois des normes exigées et des caractéristiques du végétal.

Et bien souvent, la notion de qualité est un compromis entre le producteur et l'acheteur, compromis dans lequel le prix occupe une place importante.

Plantes à huiles essentielles		Parties considérées	Teneur en eau (%)	Teneur en HE	
				minimale	maximale
absinthe	<i>Artemisia absinthium</i>	feuille + sommité fleurie	12	0,3	1,3
armoise	<i>Artemisia vulgaris</i>	feuille + sommité fleurie	10	0,1	-
achillée	<i>Achillea millefolium</i>	sommité fleurie	11	0,3	-
calament	<i>Calamintha officinalis</i>	sommité fleurie	10	0,6	-
coriandre	<i>Coriandrum sativum</i>	fruit	10	0,3	-
camomille	<i>Anthemis nobilis</i>	capitule	10	0,7	-
angélique	<i>Archangelica officinalis</i>	racine	12	0,4	-
hysope	<i>Hyssopus officinalis</i>	feuille + sommité fleurie	12	0,3	1,5
mélisse	<i>Melissa officinalis</i>	feuille	12	0,05	-
genièvre	<i>Juniperus communis</i>	fruit	15	0,75	-
romarin	<i>Rosmarinus officinalis</i>	sommité fleurie	10	1,5	-
sauge	<i>Salvia officinalis</i>	feuille	10	2	3
thym	<i>Thymus vulgaris</i>	feuille + fleur	10	1,2	-
matricaire	<i>Matricaria chamomilla</i>	capitule	-	0,4	-
menthe poivrée	<i>Mentha piperita</i>	feuille	11	1,2	-
verveine odorante	<i>Lippia citriodora</i>	feuille	10	0,4	-

Tableau I.3

Normes de la Pharmacopée française concernant la teneur en eau et en huile essentielle (HE) de quelques plantes médicinales (source : Pharmacopée française, Xe édition)

Espèce	Pharmacopée française	AFNOR
menthe poivrée (<i>Mentha piperita</i>)	feuilles entières ou fragmentées teneur en essence $\geq 1,2 \%$	feuilles plus ou moins brisées (classe I, II) teneur en essence $\geq 0,8 \%$ pour classe II $\geq 1 \%$ pour classe I
thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	feuilles + fleurs teneur en essence $\geq 1,2 \%$	feuilles + fleurs teneur en essence $\geq 1 \%$

Tableau I.4

Exigences sur les parties utilisées et la teneur en essence de la menthe poivrée et du thym selon la Pharmacopée et l'AFNOR

(sources : AFNOR, 1992, Epices et aromates - Pharmacopée française Xe édition)

4. CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES PAM

41. Les différentes parties récoltées (figure I.5 - tableau I.5)

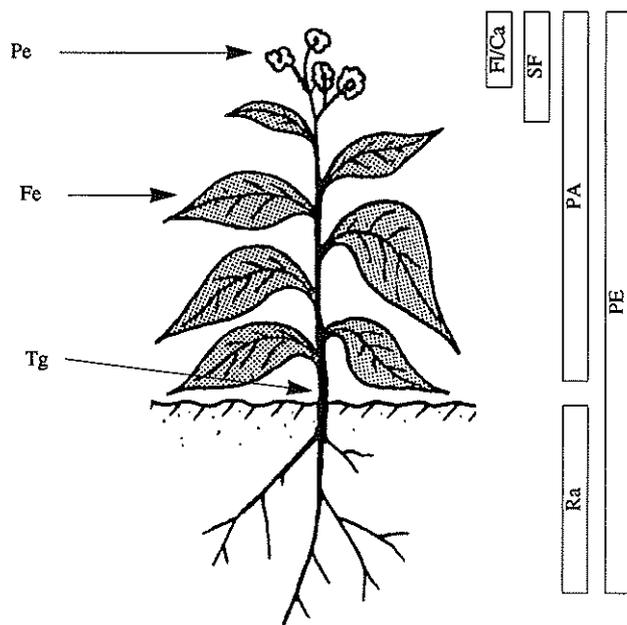


Figure I.5

Les différentes parties d'une plante utilisables

Parties de la plante	Exemples
PE : plante entière	piloselle
Ra : racine	gentiane, bardane
PA : partie aérienne	gui, persil
SF : sommité fleurie	bourrache
Ca : capitule	matricaire
Fl : fleur	camomille
Pe : pétale ou ligule	souci, coquelicot
Tg : tige	angélique
Fe : feuilles	verveine, menthe poivrée
Autres :	
bractée	tilleul
stigmate	safran
aubier	tilleul
baie	genièvre
bouton floral	aubépine
écorce	bouleau

Tableau I.5

Exemples de parties commercialisées pour quelques plantes

42. Teneur en eau à la récolte de 20 plantes (tableau I.6)

Ces 20 plantes récoltées en France présentent des variations de teneur en eau non négligeables. Ainsi, pour obtenir 1 kg de romarin et de basilic sec, il faudra évaporer respectivement 1, 2 et 4 kg d'eau.

C'est un aspect non négligeable dans l'établissement du coût de revient du séchage par kg de produit sec.

Plante	Partie considérée	Ratio F/S (1)	Ratio E/F (2)	Humidité à la récolte (en %)
grande absinthe	partie aérienne	2,5	0,6	72
basilic	feuilles	5,0	0,8	82-89
camomille	fleurs	2,9	0,65	75-84
estragon	feuilles	2,5	0,6	74
gentiane	racines	2,5	0,6	77
hysope	feuilles	2,5	0,6	77-78
mélisse	feuilles	2,9	0,65	63-82
menthe douce	feuilles	3,3	0,7	74-87
origan	sommités fleuries	2,5	0,6	74-78
persil	partie aérienne	4,0	0,75	82-83
reine des prés	partie aérienne	2,5	0,6	70-80
romarin	feuilles	2,2	0,55	70
sarriette	feuilles	2,0	0,5	53-72
sauge officinale	feuilles	2,9	0,65	75-80
thym	feuilles	2,5	0,6	72-75
tilleul	bractées	2,2	0,55	70
verveine	feuilles	2,5	0,6	72-80

(1) Ratio F/S (frais/sec) : masse de produit frais récolté pour obtenir un kg de produit sec

(2) Ratio E/F (eau/frais) : masse d'eau à évaporer au cours du séchage pour un kg de produit frais à sécher

Tableau I.6

Teneur en eau à la récolte de 20 plantes
(source : Itelpma/SOLAGRO)

43. Conditions de séchage des principales espèces cultivées (tableau I.7)

(voir pages suivantes)

Dénomination de la plante	partie considérée (1)	Hf (2) * AFNOR 92 ** Pharmacopée Xe Ed.	t° de séchage recommandée	observations
aneth	SF Ft	10 % ** 12 % **	80°C 45°C maxi	/ /
ballote fétide	PA	-	35 à 40°C	trouçonnage préalable (hache paille)
bardane	Ra	10 % **	35 à 45°C	lavée et coupée (tronçons 2 à 3 cm) avant séchage
basilic	PA	13 % * - 10 % **	40°C maxi	une température plus élevée entraîne un noircissement des feuilles et une perte en huile essentielle
bleuet	Ca	-	jusqu'à 55°C	aussitôt la récolte ; séchage délicat
bourrache	SF	9 % **	35 à 40°C	séchage aussitôt la récolte
camomille	Ca	10 % **	40°C maxi	/
carvi	Ft	blond : 12 % * noir : 13 % **	40°C maxi	humidité des fruits à la récolte = 20 %
digitale laineuse	Fe	6 % **	jusqu'à 80°C	traditionnellement = 30°C
estragon	PA	7 % *	55 à 75°C	température plus élevée en début de séchage. Un séchage rapide évite le noircissement des feuilles
fenouil doux	Ft Ra	8 % ** -	35 - 40°C maxi 40 - 45°C	/
livèche	Fe Ra	6 - 8 % -	55 à 60°C 35 à 45°C	lavée et coupée avant séchage
matricaire	SF/Ca	-	35 à 45°C	lavée et coupée pour faciliter le séchage
mélisse	PA	12 % **	35°C	le séchage doit être rapide car le capitule a tendance à poursuivre sa maturation (graines)
menthe poivrée	PA	13 à 14 % * 11 % **	45°C maxi	à une température supérieure, les feuilles noircissent, la teneur en huile essentielle n'est affectée qu'à partir de 55°C

Dénomination de la plante	partie considérée (1)	Hf (2) * AFNOR 92 ** Pharmacopée Xe Ed.	t° de séchage recommandée	observations
millepertuis <i>Hypericum perforatum</i>	PA	10 % **	35 à 40°C	pour l'herboristerie, coupée (1 cm) avant séchage
origan <i>Origanum vulgare</i>	PA	10 % *	30 à 40°C	/
persil <i>Petroselinum sativum</i>	Fe	10 à 13%	100°C puis 50°C	une température trop basse altère l'arôme
petite absinthe <i>Artemisia pontica</i>	PA	-	30 à 35°C maxi	à une température supérieure : perte en huile essentielle
piloselle <i>Hieracium pilosella</i>	Pe	-	40°C	nettoyage préalable
pyrèthre de Dalmatie <i>Chrysanthemum cinerariaefolium</i>	Ca	10 % **	progressivement, jusqu'à 60 - 80°C	fanage préalable à une température < 40°C
reine des prés <i>Spiraea ulmaria</i>	PA	12 % **	40°C	séchage aussitôt la coupe
romarin <i>Rosmarinus officinalis</i>	PA	11 % * - 10 % **	30 - 40°C	/
rue officinale <i>Ruta graveolens</i>	PA	-	35 à 40°C	tronçonnage préalable (hache paille) pour favoriser le séchage
safran <i>Crocus sativus</i>	St	12 % * - 12 % **	30 à 35°C	séchage en couche mince (étuve)
souci des jardins <i>Calendula officinalis</i>	Ca	13 % **	45°C (maxi 60°C)	aussitôt la récolte ; séchage délicat
thym <i>Thymus vulgaris</i>	PA	12 % * - 10 % **	30 - 40°C	/
valériane <i>Valeriana officinalis</i>	Ra	15 % **	40°C maxi	laver avant séchage
verveine odorante <i>Lippia citriodora</i>	PA	10 % **	40°C	/

(1) Ca : capitule - Fe : feuille - Ft : fruit - PA : partie aérienne - PE : partie entière - Ra : racine - SF : sommité fleurie - St : stigmaté

(2) humidité finale maximale

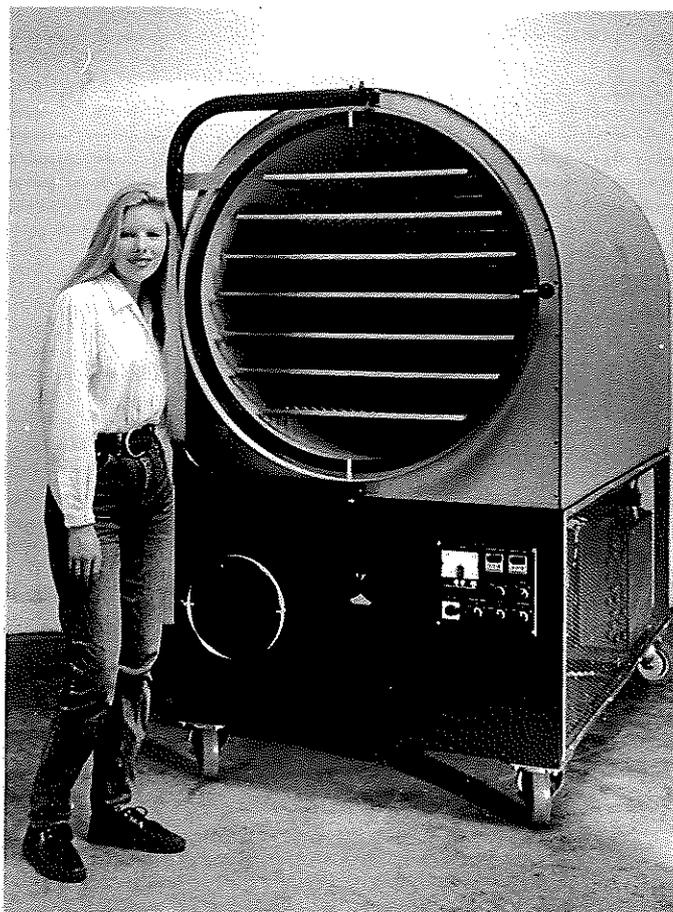
Tableau I.7

Recommandations pour le séchage de 30 espèces couramment cultivées
(source : fiches techniques iteipmai)

Les richesses de la nature au service de la décoration

FROZEN IN TIME Pickering UK.
CONSTRUCTEUR D'EQUIPEMENT DE PRESERVATION

Lyophilisateurs	D 20	D 32	D 85
volume de la chambre	0,22 m ³	0,36 m ³	1,1 m ³
Etagères	5	5	7
Surface de chargement	1,76 m ²	2,97 m ²	7,9 m ²



Lyophilisez la beauté

- Fleurs coupées
- Fleurs des champs
- Plantes décoratives
- Légumes
- Fruits & Potpourris

Lyophilisez sans abimer à peu de frais

- Herbes
- Plantes
- Documents
- Taxidermie

Pour découvrir toutes les possibilités techniques, créatives,
commerciales de ces lyophilisateurs contactez: par fax/switch:
33 (1) 41150944. Installations et SAV en: FRANCE, SUISSE

La Note Bleue



CHAPITRE II - LES PRINCIPES DE SÉCHAGE

.....

1. INTRODUCTION

Pour les conserver, il est indispensable d'abaisser l'Aw des plantes jusqu'à des valeurs qui correspondent à une humidité variant de 5 à 13 % selon les cas. A la récolte, on atteint souvent des humidités supérieures à 80 %, et il est donc nécessaire de concevoir des moyens efficaces pour les sécher.

Lorsque les volumes traités sont faibles et lorsque les conditions atmosphériques sont favorables, il est possible d'employer des méthodes simples (séchage «naturel», «solaire»).

Lorsqu'il faut sécher de grosses récoltes dans un bref délai et quelles que soient les conditions atmosphériques, il devient nécessaire de faire appel à des

moyens de séchage artificiels. Ces systèmes complexes et onéreux sont nécessaires pour obtenir un produit commercialisable de qualité homogène.

Les diverses techniques offrent un large choix à la déshydratation des produits agro-alimentaires.

Pour les PAM, le principe de séchage par entraînement (ou convection) reste le plus usité, pour des questions d'investissement et d'exigences du produit.

D'autres principes modernes tels que la lyophilisation ou l'osmose inverse, ou l'utilisation des rayonnements sont à l'étude, mais leur intérêt est trop spécifique pour être développé en détail dans ce dossier.

2. LE SÉCHAGE PAR CONVECTION

21. Principe et applications

L'air éventuellement traité (réchauffage, déshumidification) entraîne l'eau de la plante par convection naturelle ou forcée.

Cette technique est la plus simple et la plus utilisée actuellement, elle concerne le séchage :

- naturel en claie, grenier,
- artificiel en caisson ventilé et fours de déshydratation.

22. Mécanisme

Au cours du séchage, on constate (tableau II.1) :

- une vaporisation de l'eau du produit,
- un accroissement de la température du produit,
- une augmentation de la teneur en eau de l'air,
- une diminution de la température de l'air.

Ces évolutions mettent en jeu de l'énergie, et ces échanges énergie/matière (eau) dépendent des caractéristiques de l'air et des niveaux de liaisons de l'eau dans la plante.

Conditions	T° sèche	T° humide	% HR*	PE**	W***
Air extérieur	20°C	16°C	68 %	1,5 g	10 g
Air chauffé	35°C	21°C	30 %	5,5 g	10 g
Air extrait PAM	21,5°C	21°C	100 %	0 g	15,5 g

* Humidité relative de l'air (%)

** Pouvoir évaporatoire (g eau/kg air sec)

*** Teneur en eau de l'air (g eau/kg air sec)

Tableau II.1

Exemple d'évolution des caractères de l'air

En règle générale, on distingue trois phases successives (figure II.1) :

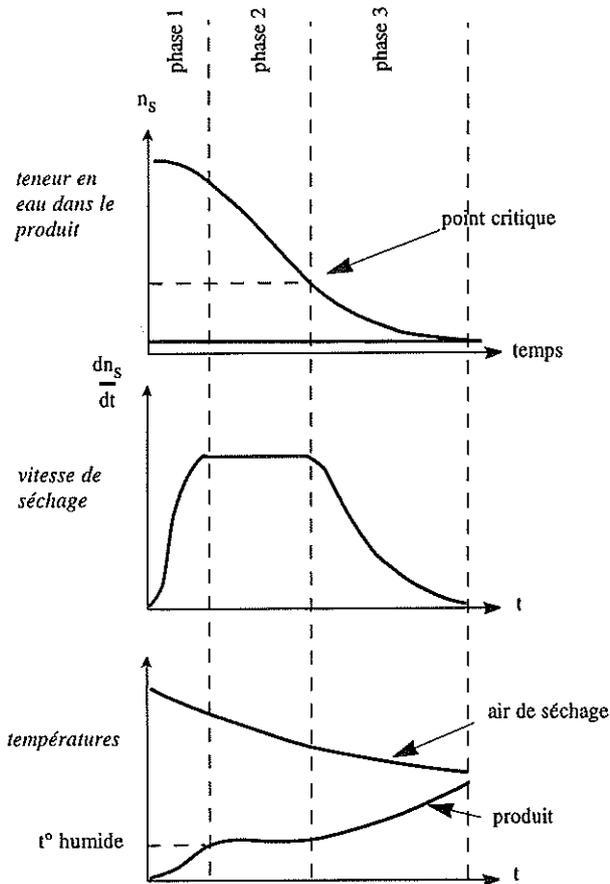


Figure II.1

Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit, de la vitesse de séchage et de la température (source : ROCHA MIER, 1993)

Phase 1 : phase de mise en température du produit

La température du produit s'élève ou diminue progressivement jusqu'à une valeur correspondant à la température humide de l'air de séchage. Le flux d'eau évaporée augmente (suite à l'augmentation de la pression de vapeur du produit) et l'activité d'eau à la surface du produit est égale à 1. Cette phase n'est pas mise en évidence dans le cas de produits très fins ou de petites dimensions pour lesquels elle peut être très rapide.

Phase 2 : phase de séchage à vitesse constante

Le produit reste à la température humide de l'air, l'évaporation à la surface ne dépend que des conditions extérieures. La quantité d'eau libre disponible est très grande, et une migration d'eau de l'intérieur du produit vers la périphérie remplace régulièrement l'eau évaporée.

La vitesse de séchage est maximale car l'activité d'eau du produit en surface est toujours égale à 1.

Phase 3 : phase de séchage à allure décroissante

A partir d'une certaine teneur en eau du produit, appelée teneur en eau critique, l'activité d'eau à la surface du produit va commencer à diminuer et ainsi que, par conséquent, la vitesse de séchage ; le transfert de chaleur n'étant plus compensé par la vaporisation, la température du produit augmente et tend asymptotiquement vers la température de l'air. La vitesse de séchage n'est plus limitée par les caractéristiques de l'air (facteurs externes), mais par celles du produit, comme la migration interne de l'eau, la structure du produit, les solutés, etc... (facteurs internes).

A la fin de cette période, le produit est en équilibre avec l'air et la vitesse de séchage est nulle. Cette période de séchage est parfois encore divisée en deux phases (BIMBENET, 1969) :

- une première phase pendant laquelle la vaporisation de l'eau se fait à la surface du produit comme pour les deux premières périodes. Mais contrairement aux situations précédentes, il ne reste plus d'eau libre à la surface bien que l'eau continue à migrer à l'état liquide ;
- la deuxième phase est caractérisée par le fait que la vaporisation ne se fait plus à la surface, celle-ci étant trop sèche pour que l'eau y arrive à l'état liquide. D'où l'apparition d'un front de vaporisation pénétrant dans le produit et marquant la limite entre les zones de migration sous forme liquide et de migration sous forme vapeur.

Cette troisième phase est responsable du surséchage, et peut entraîner dans certains cas un effet de croûtage en surface, phénomène d'autant plus prononcé que l'humidité initiale du produit, la température de séchage, et le débit d'air sont élevés. On peut observer d'autres modifications telles que le brunissement, les pertes en huiles essentielles et une modification des principes actifs.

Cette fin de séchage est coûteuse (figure II.2) par gaspillage d'énergie, d'où l'intérêt de recycler cet air ou d'en modifier les caractéristiques (vitesse).

Energie consommée
par gramme d'eau extraite
(kcal/g)

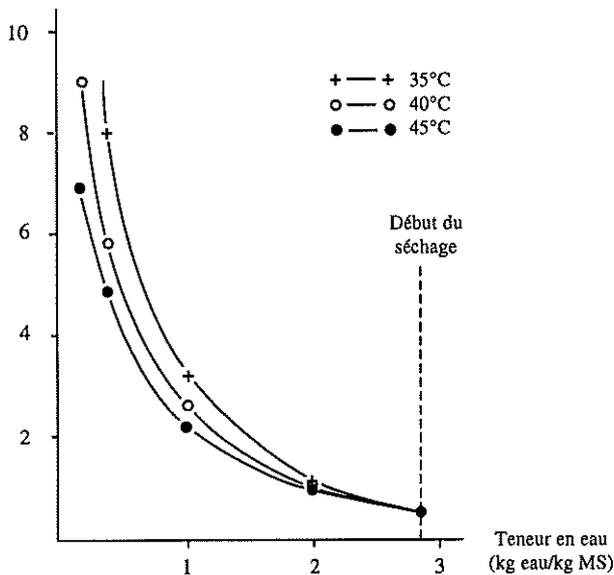


Figure II.2

Energie consommée par gramme d'eau extraite en fonction de la teneur en eau de la feuille de menthe poivrée (source : Bouverat-Bernier *et al.*, 1989)

En réalité, ces phénomènes se compliquent lorsque l'on a :

- une épaisseur importante de produit,
- des corps à fort pouvoir hygroscopique,
- des produits hétérogènes (plante entière),
- des paramètres climatiques variables.

La courbe d'évolution, au cours du temps, de la teneur en eau d'un produit, présente des allures différentes selon la température de séchage (figures II.3 et II.4).

Une température plus élevée conduit à :

- une déshydratation plus rapide du produit,
- une économie sur la facture énergétique, malgré une puissance calorifique supérieure à mettre en œuvre.

Ainsi, une étude menée sur la menthe poivrée a révélé une économie de 30 % sur la facture énergétique avec une température de séchage de 45°C contre une température de 35°C (Bouverat-Bernier *et al.*, 1989). Il y a donc intérêt à retenir la température de séchage maximale autorisée par le produit.

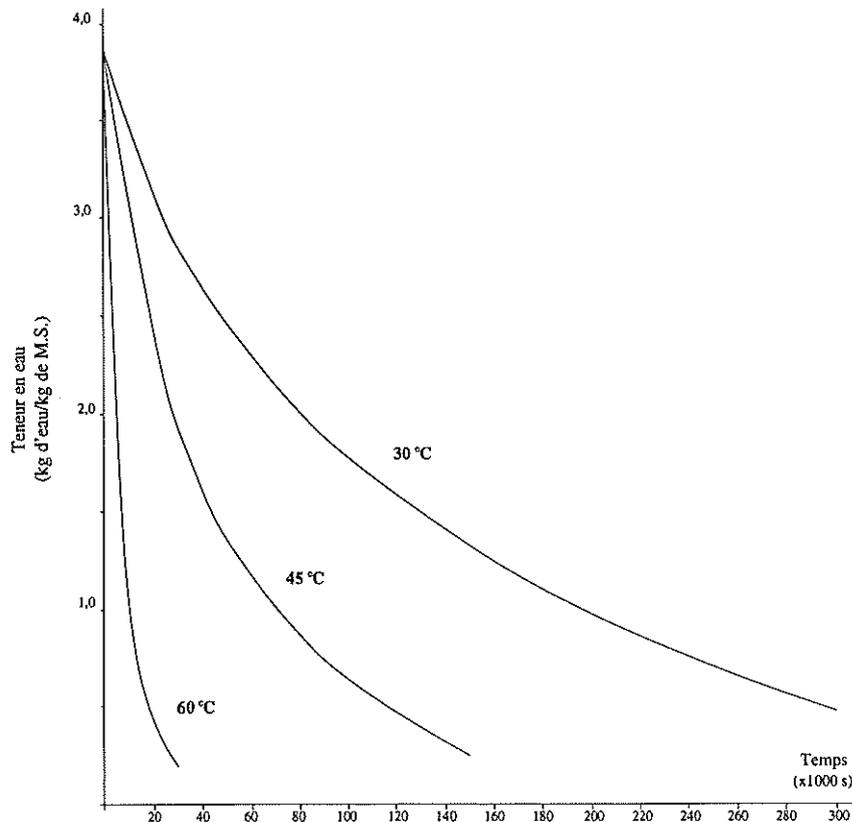


Figure II.3

Cinétique de séchage de la feuille de digitale laineuse pour trois températures (source : Iteipmai, 1991)

232. Le séchage à contre courant (figure II.5)

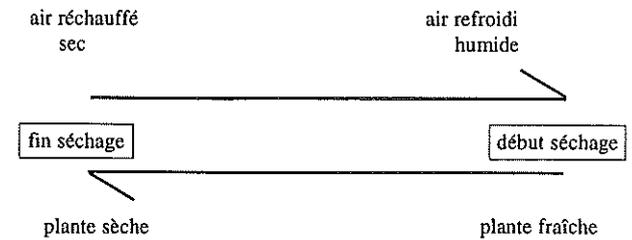


Figure II.5
Principe du séchage à contre courant

Il permet une parfaite valorisation de l'effet évaporatoire.

A la sortie, l'air est saturé au maximum car au contact du produit le plus humide. Cependant, les plantes qui rentrent reçoivent un air humide et chaud, favorable aux développements microbiens et à l'activité enzymatique.

Ce système est économique en énergie. L'optimisation de la vitesse de l'air et de la rotation des lots est déterminante pour l'obtention d'un produit de qualité. En pratique, un séchage à co-courant est cependant plus fréquemment utilisé, car il permet d'utiliser un air plus chaud (attaque du produit humide) et donc d'accélérer le séchage.

233. Le séchage en couche épaisse

L'air sec et chaud pulsé à travers la masse se charge en humidité et se refroidit au cours de sa progression. Son pouvoir séchant diminue constamment jusqu'à s'annuler lorsqu'il atteint la saturation. Ce front d'annulation du pouvoir séchant s'appelle front de séchage et va se déplacer de la zone d'attaque (bas du tas) jusqu'à la zone de sortie (surface du tas) (figure II.6).

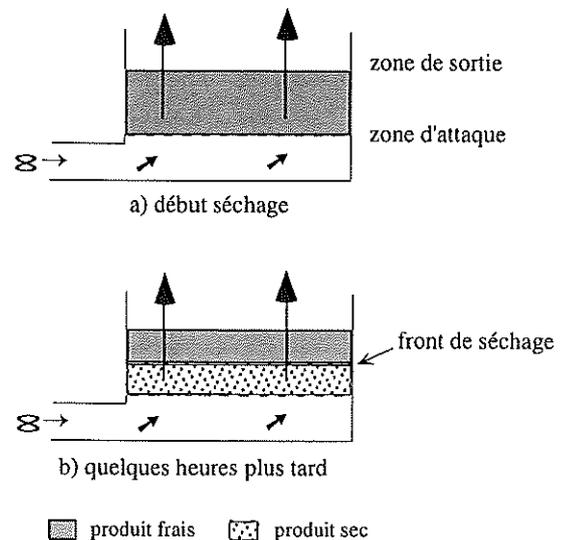


Figure II.6
Le front de séchage d'une couche épaisse de produit

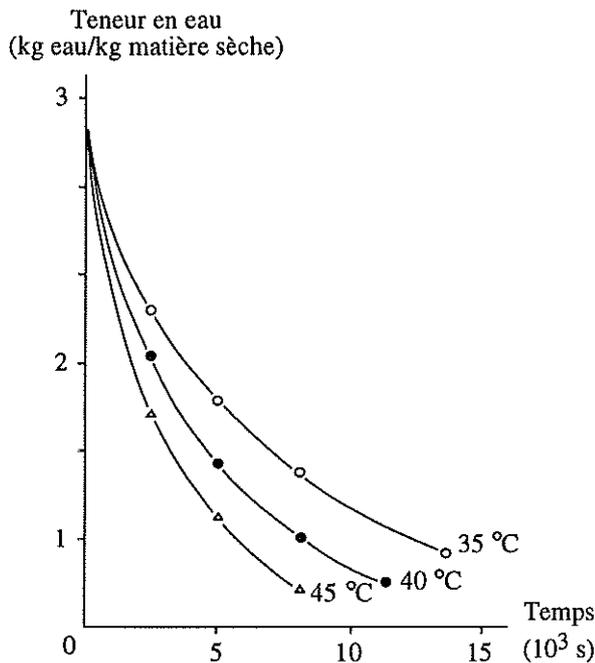


Figure II.4
Cinétiques de déshydratation de la menthe poivrée feuille à trois températures
(source : Bouverat-Bernier *et al.*, 1989)

23. Les variantes du séchage par convection

231. Le séchage à température variable

Il marie économie et qualité visuelle.

Début séchage :

- Attaque à haute température (autour de 100°C)
 - . fixation couleur
 - . forte vaporisation
 - . peu d'effet croûtage car la surface est humide donc peu sensible aux chocs thermiques

Suite :

- Température décroissante
 - . optimisation de la vaporisation
 - . croûtage et surchauffe de la surface déjà sèche évités

Fin de séchage en bac finition

- . économie
- . homogénéisation

Cette migration est fonction de :

- la température et de l'humidité relative de l'air chaud,
- la vitesse de l'air dans le produit.

La propagation du séchage se fait en couches successives.

Lorsque le front de séchage a atteint la face de sortie, toute la masse a réellement subi le séchage.

A moins d'attendre que l'équilibre hygroscopique soit atteint, pour toute la masse, la zone d'attaque sera plus sèche que la zone de sortie. Cette hétérogénéité de teneur en eau est inhérente au séchage en couche épaisse.

Pour pallier à ces inconvénients, le brassage permet de réhomogénéiser le gradient d'humidité du tas et d'éviter les surchauffes. Il faudra veiller à ne pas créer de zone préférentielle de passage pour l'air (cheminée), ni de zone tassée (bouchon).

Remarque :

La couche supérieure tend à rester humide pour deux raisons :

- 1) front de séchage arrivé en surface,
- 2) atteinte du point de rosée en surface.

En effet, l'air chaud humidifié à la sortie du tas rencontre une ambiance plus fraîche, la vapeur qu'il contient se condense sur place. L'association d'une couche neutre, intermédiaire entre l'ambiance et le produit, permettrait de déplacer ce front de séchage vers la couche neutre. Sans qu'il soit possible de conclure sur ce procédé, notons que des essais avec des couvertures et toiles de jutes sur PAM se seraient avérés intéressants.

24. Conclusion

La technique de séchage par entraînement, essentiellement utilisée en PAM est encore mal connue. La complexité des relations air/plante, la diversité des espèces, les faibles marges ne permettent pas de financer et de réaliser des études fines. Les paramètres tels que vitesse et débit d'air, températures optimales, forme des circuits aérauliques sont bien souvent définis arbitrairement. Dans ce contexte, relativement flou, on utilise des normes moyennes et polyvalentes.

Les principales conséquences de ces arbitrages sont des durées de séchage et des consommations énergétiques surélevées.

3. LA LYOPHILISATION

31. Principe et applications

lyo : dissoudre
phyle : qui aime

Cela consiste à extraire délicatement l'eau des tissus sans perturber ni la forme, ni la composition des cellules. Elle utilise une propriété physique particulière des liquides : sublimation de la glace en descendant en dessous du point triple (température égale à 0°C et pression égale à 4,6 mm Hg pour l'eau).

Cette technique a été développée dans les années 1950, et son intérêt est très spécifique.

La qualité des produits est remarquable sur :

- l'aspect (forme, couleur),
- la réhydratabilité (reprise instantanée de l'humidité avec un apport d'eau bouillante),
- la conservation (éléments nutritifs, bonne stabilité des arômes dans le temps).

En industrie agroalimentaire, elle est utilisée pour traiter des produits à forte valeur ajoutée (produits de la mer, champignons, café instantané) mais sa principale destination revient aux produits pharmaceutiques (vaccins, levures, ferments) car c'est la technique qui conserve le mieux «la vie».

32. Mécanisme

Schéma théorique de la lyophilisation (figure II.7) :

. se placer dans les conditions de sublimation :

- 1) congélation : température inférieure à la température de fusion commençante du produit,
- 2) mise sous vide : pression inférieure à la pression correspondante sur la courbe d'équilibre glace/vapeur (eau pure : 0,01 °C/610 Pa),

. ensuite apporter des calories nécessaires au changement d'état :

- 3) chauffage en 2 phases :

- sublimation, pour enlever l'eau libre
- dessiccation secondaire : pour enlever l'eau de structure, le produit étant majoritairement sec.

- 4) revenir à pression atmosphérique (avec de l'azote, gaz sec, afin d'éviter une réhumidification ou une oxydation).

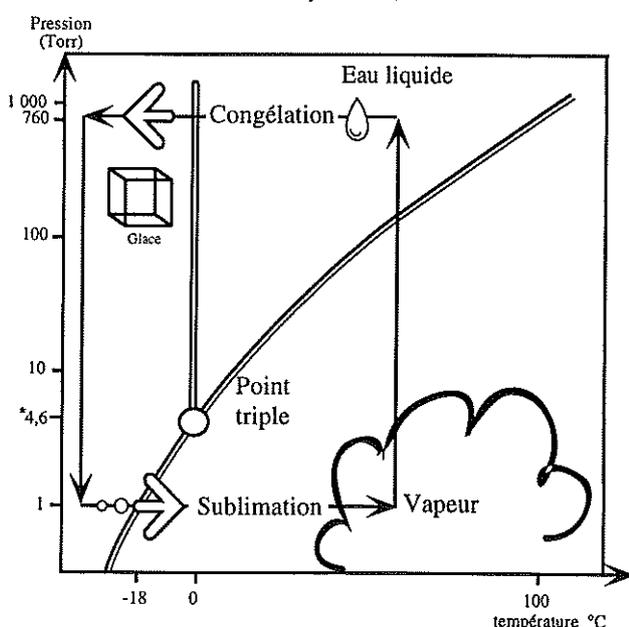


Figure II.7

Diagramme des phases de l'eau, et principe de la lyophilisation (source : IAA, 1991)

A titre d'exemple, la durée du cycle de lyophilisation présenté ci-dessous pour traiter 3 tonnes de champignons frais est de 22 heures :

- | | |
|----------------------------|-------------------|
| 1) congélation | : 2 h 30 |
| 2) mise sous vide | : 0 h 30 |
| 3) sublimation | : 8 h 00 à 9 h 00 |
| 4) dessiccation secondaire | : 10 h 00 |

Remarque : la qualité des produits finis étant l'atout de la lyophilisation, il est nécessaire de bien les préparer au séchage avec une chaîne de préparation similaire aux unités de conserverie (contrôle qualité

à la réception, lavage, blanchiment, coupe, conditionnement en chariots, stockage).

33. Appareillage

Les systèmes discontinus sont les plus simples et permettent de traiter la production en lots.

L'appareil est composé (figure II.8) :

- d'une cuve recevant les chariots,
- d'une pompe à vide,
- d'un piège à glace (déterminant la capacité),
- d'une ventilation (répartition),
- de plaques chauffantes intercalées entre les couches de produits, assurant l'apport d'énergie.

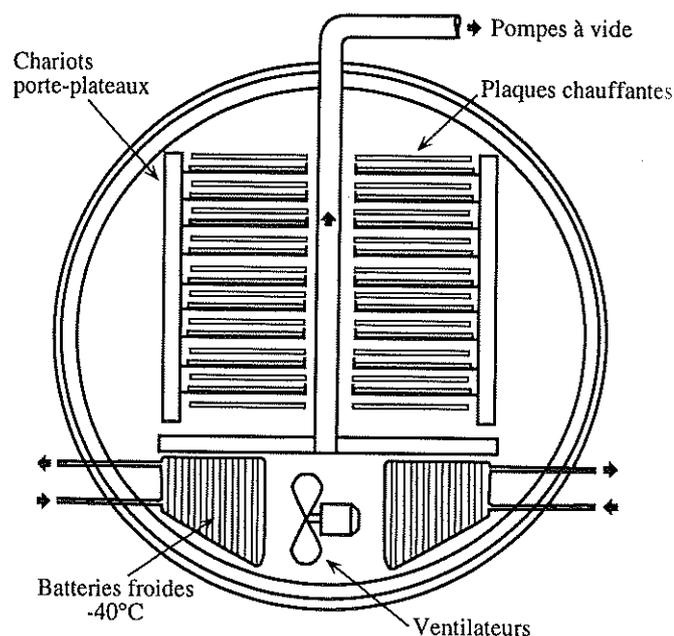


Figure II.8

Schéma d'un lyophilisateur discontinu (source : IAA, 1991)

34. Conclusion

Il existe de nombreuses variantes face au schéma et au type d'appareil présenté (vitesse de congélation, lit fluidisé, couplé avec micro-ondes, lyophilisation à pression atmosphérique utilisant un froid sec (N GAZ) associé à des adsorbants,...).

Le coût de ce procédé, variable selon la définition des équipements, est élevé (tableau II.2). Son usage peut concerner des produits à haute valeur ajoutée tels que fleurs, plantes, fruits et légumes de décoration.

Cette technique convient bien aux plantes aromatiques commercialisées pour leur aspect dans les nouveaux débouchés de l'IAA que sont les aliments à préparation instantanée (soupes, Bolino, Knor,...).

Capacité de séchage/j.		Capacité kg glace	PE* kg eau/h	Investissement (INV) Prix unité HT (F) 1991	INV PE F/kg eau/h
kg frais	kg sec				
100	20	80	3,3	1 100 000	330 000
350	70	280	11,6	2 300 000	200 000

*Pouvoir évaporatoire

Tableau II.2
Exemple de prix de lyophilisateur
(source : SGD Serall)

4. LE SÉCHAGE PAR PULVÉRISATION

41. Principe et applications

Il consiste en une pulvérisation de la substance dans une tour dite d'atomisation où circule un air chaud et sec. Par convection, le produit cède son eau à l'air et chute par gravité dans un cyclone de séparation air/poudre.

Cette technique de séchage est réservée aux produits liquides et légèrement pâteux.

Intérêts majeurs :

- . instantanéité (les produits sont pré-cuits),
- . très bonne qualité bactériologique,
- . bonne préservation de la qualité (temps de séjour courts).

Exemples d'utilisation :

- . en IAA : café soluble et lait en poudre,
- . en pharmacie : poudres,
- . arômes : arômes de champignons.

42. Mécanisme (figure II.9)

La pulvérisation (atomisation) produit une grande surface d'échange favorable au séchage.

La taille des gouttes dépend du système de pulvérisation, des débits respectifs de liquide et de gaz, de la vitesse relative de l'air par rapport aux gouttes et du degré de mélange.

Le mélange peut se faire à co-courant, cas le plus général, parfois à contre-courant ou avec des flux mélangés.

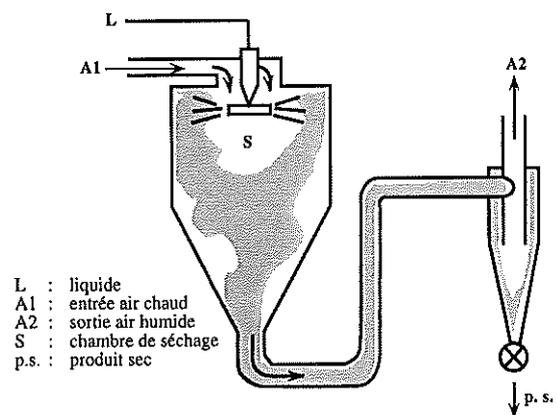


Figure II.9

Schéma d'un tour d'atomisation à co-courant

43. Conclusion

Ce principe permet de sécher économiquement des produits très riches en eau (consommation d'énergie spécifique : CES = 1 à 1,6 kWh/kg eau évaporée), mais n'est pas applicable aux plantes. Par contre, le séchage par lit fluidisé dit «flash» utilise ce principe et concerne des produits frais ou pâteux ou solides de faibles tailles. Il pourrait être appliqué aux PAM. Les particules sont maintenues suspendues dans un gaz chaud constituant un lit expansé, avec un mouvement permanent des particules (ressemblant à un liquide en ébullition). Le séchage se fait essentiellement par convection. En IAA, les gaz utilisés sont l'air ou un gaz inerte pour éviter toute oxydation.

5. LE MICRO-ONDES

51. Principe et applications

La chaleur est générée à l'intérieur du produit, elle va migrer de l'intérieur vers la surface où il y a évaporation

Le principe des micro-ondes (ou hyperfréquences) peut être utilisé en :

- séchage de produits en grains,
- séchage d'échantillons de plantes,
- extraction,
- lyophilisation,
- blanchiment,
- désherbage.

52. Mécanisme (fig II.10)

Il s'agit de provoquer l'échauffement des substances non conductrices de l'électricité (corps diélectriques contenant des molécules polaires telles que l'eau) par mouvement moléculaire directement au sein de la substance sous l'action d'un champ électrique alternatif produit entre les armatures d'un applicateur.

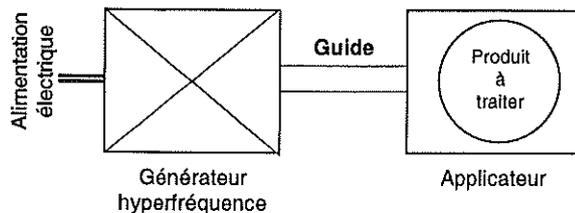


Figure II.10

Schématisme d'un système micro-ondes

Fréquences retenues par la législation :

- France : 2 450 MHz
- USA : 945 MHz

Le chauffage par génération interne de chaleur ne constitue pas en lui-même un procédé de séchage, mais à côté de la convection et de la conduction, un moyen de transfert de l'énergie et d'élévation de la température d'un produit donné.

53. Conclusion

Le chauffage micro-ondes présente des propriétés originales qui peuvent se traduire par des avantages significatifs pour un processus industriel :

- transfert direct de l'énergie au produit,
- chauffage homogène dans la masse du produit,
- chauffage sélectif,
- densité de puissance élevée,
- absence d'inertie thermique,
- rendement assez élevé,
- rapidité de chauffage.

Par contre, il connaît des limitations qui sont essentiellement d'ordre économique. D'une façon générale, les coûts d'investissements (1989) sont estimés en moyenne de 15 à 20 000 F/kW utile, dont 40 % pour le générateur et 60 % pour l'applicateur ; la maintenance concerne surtout le renouvellement des tubes à vide du générateur, dont la durée de vie est de 2 000 à 5 000 heures.

En séchage, on peut théoriquement compter sur une consommation secteur de 1,5 à 2 kWh pour évaporer 1 kg d'eau dans un produit. Cependant, en raison de son coût d'investissement élevé, le chauffage par micro-ondes est essentiellement utilisé par trois types d'application :

- les applications spécifiques difficiles à réaliser avec une autre technique (exemple : le séchage final),
- les applications mixtes en combinaison avec une technique plus classique,
- les applications où les puissances mises en jeu sont faibles.

L'iteipmai a participé en 1988 à une étude de désinsectisation des PAM par le procédé du micro-ondes.

Si certains produits de récolte comme les sommités fleuries contenant des huiles essentielles (camomille, lavande,...) en sont exclues, globalement, le procédé s'avère utile pour désinsectiser des lots sans effet négatif sur le produit.

Des essais de distillation incluant le micro-ondes sont en cours, notamment chez ARCHIMEX. Des premiers résultats sur menthe révéleraient une distillation très rapide.

6. LA DÉSHYDRATATION OSMOTIQUE

6.1. Principe et applications

La déshydratation osmotique (encore appelée déshydratation par osmose directe ou déshydratation/imprégnation par immersion) est un procédé basé sur la mise en contact de produits entiers ou découpés en morceaux, avec des solutions fortement concentrées.

Ceci donne lieu essentiellement à deux transferts de matières simultanés à contre-contrant :

- 1) un important départ d'eau, du produit vers la solution,
- 2) un transfert de soluté, de la solution vers le produit.

En fait, c'est une déshydratation partielle, un prétraitement à l'intérieur d'un processus de transformation, de conservation (figure II.11).

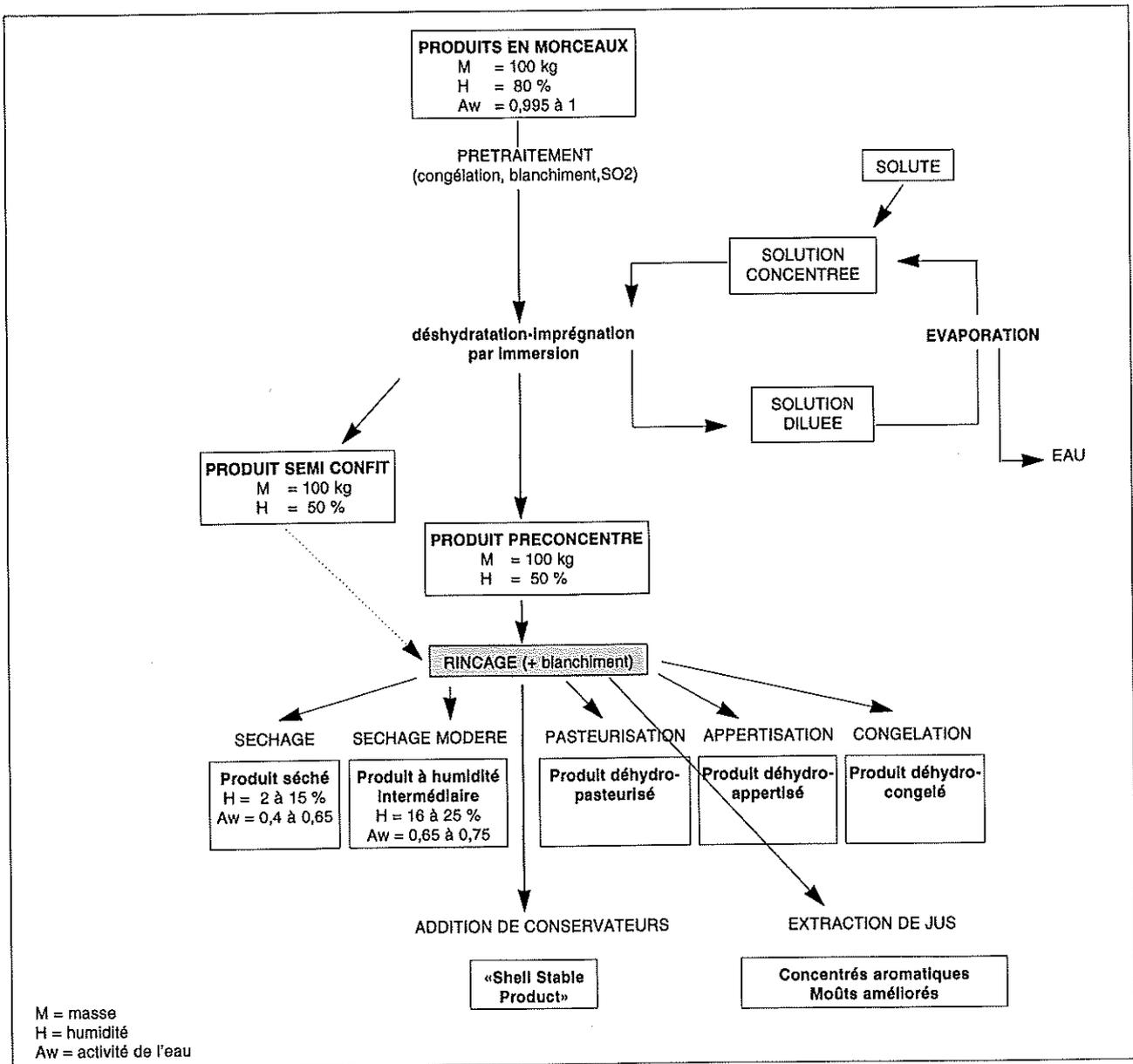


Figure II.11

Différentes possibilités d'applications industrielles du procédé de déshydratation osmotique (d'après Raoult-Wack et Guilbert, 1990)

Ce principe est utilisé par :

- le salage et saumurage des viandes, poissons, fromages et légumes,
- le confisage,
- la préconcentration dans la fabrication de jus concentrés de fruits et légumes.

62. Mécanisme (figure II.12)

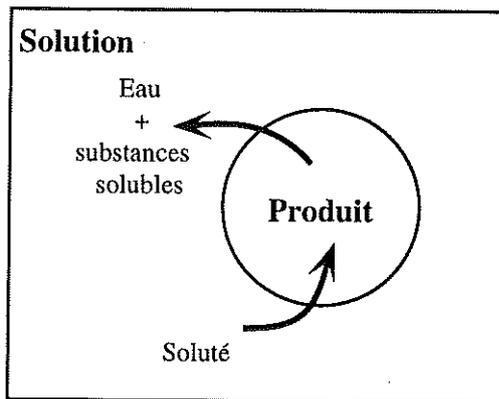


Figure II.12

Schématisme de la déshydratation osmotique

L'objectif de la déshydratation osmotique (par différence avec le saumurage) est de favoriser une sortie d'eau des tissus tout en limitant l'entrée de soluté dans le produit, le tout pouvant conduire à une diminution significative de la masse des aliments traités jusqu'à 50 %.

La déshydratation osmotique dépend :

- 1) des propriétés des tissus végétaux,
- 2) des conditions de traitement (température, durée, soluté, concentration de la solution, agitation, ...).

Il est indispensable de pouvoir contrôler les transferts simultanés et croisés de matière entre l'aliment et son milieu d'immersion, et ce en leur absence. Cela est désormais possible grâce à la connaissance des lois physiques qui les régissent. Elle a permis de déterminer l'action de paramètres tels que la température, la concentration des solutés, la durée, l'agitation.

La solution est composée d'agents dépresseurs de l'activité de l'eau (solutés tels que : saccharose, glucose, chlorure de sodium, sorbitol, glycérol).

La température de la solution est modérée : 30 à 50°C. Une perte de poids de 50 % (par rapport au produit frais correspond à des durées de traitement de 1 à 5 heures pour des solutions très concentrées et des petits morceaux).

63. Conclusion

Les intérêts de la déshydratation osmotique sont :

- la possibilité de «formuler» un aliment sans affecter son intégrité, en opérant en 2 étapes :
 - 1) déshydratation dans une solution composée de solutés,
 - 2) imprégnation (incorporation d'ingrédients) à finalité :
 - . nutritionnelle (vitamines, sels minéraux, nutriments spécifiques, ...),
 - . organoleptique (arômes, colorants, agents de texture),
- le maintien des caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques de l'aliment.

Le maintien de ces qualités est évidemment d'autant plus marqué que les pertes en soluté propre du produit sont maîtrisées. Or, dans les techniques classiques, si l'agent dépresseur de l'activité de l'eau peut pénétrer dans des tissus lésés, les molécules organiques (vitamines, arômes), les sels minéraux ou les oligo-éléments, présents à l'origine dans l'aliment, ne manqueront, eux, de s'en échapper. Tout au contraire, la déshydratation osmotique permettra de les conserver.

- la réduction des dépenses énergétiques.

L'introduction d'une telle étape dans des procédés classiques de séchage devrait permettre des économies. Il n'intervient pas, contrairement au séchage traditionnel, de dépense énergétique liée à l'évaporation de l'eau (il n'y a pas de changement de phase). La consommation d'énergie se limite au maintien de la température de la solution et au recyclage de la solution.

Cependant :

- les produits fractionnés ont tendance à flotter sur le soluté,
- la composition des solutés reste à définir pour chaque cas,
- les solutés sont le plus souvent inégalement distribués dans les tissus,
- les échanges eau/soluté au sein des membranes et autres tissus cellulaires, ne sont pas encore assez bien connus et maîtrisés.

Mais, les récents progrès permettent d'envisager le développement de la déshydratation osmotique pour de nombreuses applications.

Pour les PAM, son usage semblerait intéressant pour préserver les qualités organoleptiques et les facultés de réhydratation des herbes aromatiques tout en limitant les consommations énergétiques.

CHAPITRE III - L'AIR



1. GÉNÉRALITES

Dans la plupart des principes de séchage, on utilise les propriétés de l'air.

Celui-ci transporte, réchauffe, refroidit, aspire, piège, ...

Les caractéristiques de l'air (eau, énergie) ont une importance fondamentale pour la déshydratation.

L'air ambiant (air humide) est un mélange de gaz (air sec) et contient une certaine quantité de vapeur d'eau.

Ce mélange est traité la plupart du temps comme un mélange de deux gaz parfaits.

Il y a trois variables indépendantes qui permettent de caractériser l'état de l'air humide, lorsque la vapeur d'eau n'est pas en contact avec l'eau liquide :

- 1) la pression,
- 2) la température,

- 3) la teneur en humidité, qui représente la quantité d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec. Cette variable s'appelle encore rapport de mélange, rapport d'humidité ou d'humidité spécifique.

Dans la plupart des procédés de séchage (artificiels ou naturels), l'air humide est utilisé à la pression atmosphérique, et on ne considère plus que deux variables.

A partir de la connaissance de ces trois variables, on peut définir les paramètres caractéristiques de l'air humide.

2. L'HUMIDITÉ RELATIVE - HR (en %)

C'est le rapport de la pression de vapeur dans l'air à la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température (on parle également de degré hygrométrique).

$$HR (\%) = \frac{PV}{PS} \times 100$$

PV : pression de vapeur d'eau dans l'air

PS : pression de vapeur saturante à la même température

Elle exprime le degré de saturation d'un air, en vapeur d'eau à une température donnée.

La capacité de l'air à contenir de la vapeur augmente fortement avec sa température, d'où l'intérêt de son réchauffage.

Exemple : pour une même quantité d'eau/kg d'air sec
 - avec une température sèche = 15°C HR = 72 %
 - avec une température sèche = 20°C HR = 38 %

3. LES TEMPÉRATURES

31. Température de rosée : t_r (en °C)

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau de l'air commence à se condenser. Elle correspond à un air saturé.

On remarque ce phénomène :

- . en début de séchage quand l'air extrait sort saturé,
- . à la surface du tas de plante en contact avec l'air extérieur froid.

32. Température sèche : t_s (en °C)

Température mesurée classiquement avec un thermomètre à bulbe sec.

33. Température humide : t_h (en °C)

En contact avec un corps humide, l'air se charge en eau sous forme de vapeur. Cette transformation absorbe de l'énergie. Il y aura donc simultanément enrichis-

sement de l'air en eau et abaissement de sa température. Si l'activité de l'eau en surface du corps reste égale à 1, il s'établit un régime stationnaire et la température du corps humide se stabilise à une valeur appelée température humide. Elle se mesure avec un thermomètre dont le bulbe est entouré de coton imbibé d'eau et placé dans un courant d'air d'au moins 2 m/s, sans échange avec l'extérieur.

Remarque : la comparaison de t_s et t_h permet, de façon simple, de déterminer l'HR d'un air (tableau III.1).

Exemple de lecture :

$$t_s = 20^\circ\text{C}$$

$$t_h = 18^\circ\text{C}$$

$$\text{on obtient } HR = 83 \%$$

4. L'ENTHALPIE DE L'AIR - h (kJ/kg air sec)

L'enthalpie exprime la chaleur totale d'un système isolé.

Celle-ci tient compte de :

- la chaleur sensible (température sèche),
- la chaleur latente (teneur en vapeur d'eau),

L'enthalpie représente l'énergie potentielle d'un air dans des conditions définies (température sèche et humidité relative). Elle est indiquée par équivalence dans le diagramme de l'air humide (figure III.3) et peut se calculer par la formule suivante :

$$h = (1,01 + 1,92 W) t_s + 2\,498 W$$

- h : enthalpie (kJ/kg air sec)
- 1,01 : chaleur spécifique de l'air (kJ/kg air sec/°C)
- 1,92 : chaleur spécifique de la vapeur d'eau (kJ/kg air sec)
- W : teneur en vapeur d'eau de l'air (kg/kg air sec)
- t_s : température sèche (°C)
- 2 498 : chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C (kJ/kg eau)

Exemple :

$$\text{température sèche} \quad : \quad t_s = 20^\circ\text{C}$$

$$\text{humidité relative} \quad : \quad HR = 40 \%$$

$$\text{soit} \quad W = 0,00577 \text{ kg eau/kg air sec}$$

$$\text{on obtient} \quad h = 34,83 \text{ kJ/kg air sec}$$

L'ensemble des caractéristiques de l'air sont liées. Le changement d'un des paramètres, une intervention extérieure au système entraîne obligatoirement une variation des valeurs.

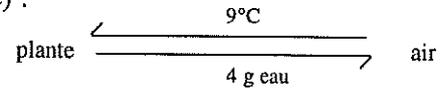
5. TRANSFORMATION ISENTHALPIQUE

Le séchage est dit isenthalpique si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud.

C'est la base du séchage théorique.

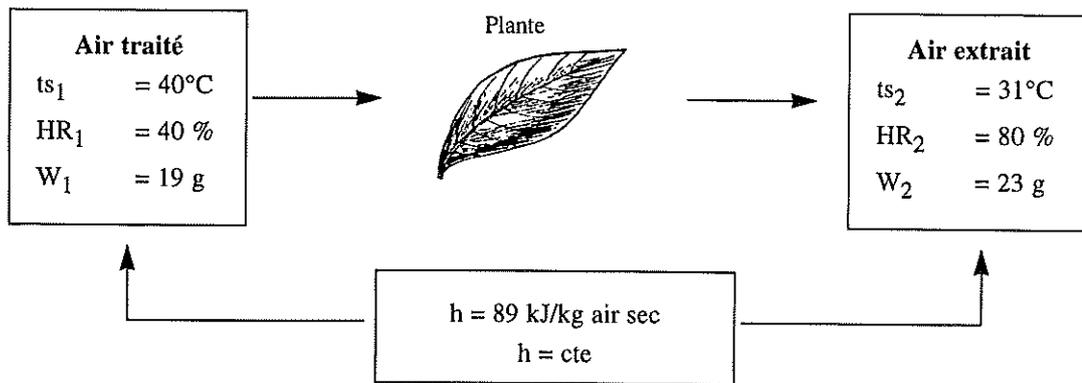
En convection, l'air possède une certaine enthalpie et la conserve, seules ses caractéristiques évoluent (température sèche et HR).

Dans cet exemple théorique, l'air a conservé sa chaleur totale en échangeant avec la plante de la chaleur sensible ($^{\circ}\text{C}$) contre de la vapeur d'eau (chaleur latente) :



Cet air a perdu 9°C ($t_{s2} - t_{s1}$) mais a gagné 4 g d'eau par kg d'air sec ($W_2 - W_1$). Ce gain est appelé pouvoir évaporatoire.

Exemple :



6. POUVOIR EVAPORATOIRE - PE (g eau/kg air sec)

Le pouvoir évaporatoire est un élément fondamental en terme :

- de performance d'un séchoir,
- de comparaison d'équipement,
- de calcul d'installation.

Ce PE dépend de l'équipement mais aussi de la plante (pouvoir hygroscopique, niveau de déshydratation), il régresse au cours du séchage.

On peut le calculer de plusieurs manières :

PE théorique : différence de teneur en eau potentielle entre l'air traité et l'air extrait à saturation.

$$\text{PE (g eau/kg air sec)} = W_2 - W_1.$$

Ce calcul est réalisé à partir du diagramme de l'air humide (figure III.3). Cette valeur n'est réelle qu'en début de séchage.

PE pratique : différence des mesures réalisées au cours du séchage (figure III.1). Cette valeur est précise mais très variable au cours du séchage. En pratique, elle évolue de 0 à 10 g/kg air sec.

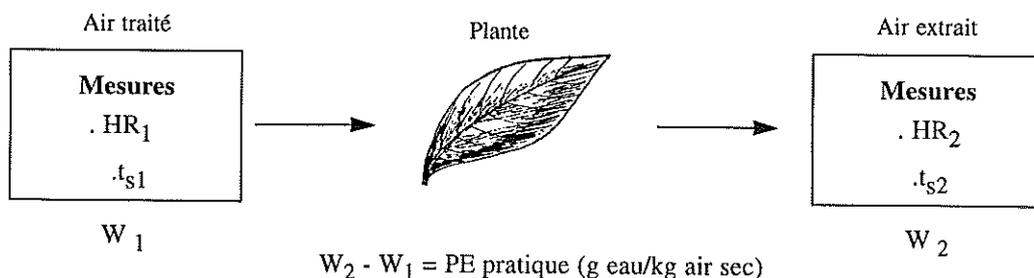


Figure III.1
PE pratique

Remarque :

On peut la calculer à différents stades de déshydratation d'une plante, afin d'étudier la dynamique de séchage (figure III.2). Pour l'apprécier, on peut introduire la notion de coefficient de séchage. C'est le rapport entre la quantité d'eau réellement évaporée et le pouvoir évaporatoire de l'air. S'il peut être égal à 1 dans certaines conditions au début du séchage, il diminue ensuite rapidement.

PE moyen, 2 façons de l'aborder :

a) Exprimé en kg eau/unité de temps

$$\text{PE moyen} = \frac{\text{perte en eau au cours du séchage}}{\text{durée du séchage}}$$

Ce rapport permet de comparer des installations à l'aide de ratio :

$$\text{INV} = \frac{\text{investissement unité séchage (F)}}{\text{PE moyen de l'unité séchage (kg eau/unité de temps)}}$$

$$\text{CES} = \frac{\text{consommation horaire de l'unité séchage (kWh)}}{\text{PE moyen de l'unité de séchage (kg eau/h)}}$$

CES : (Consommation d'Energie Spécifique en kWh/kg eau évaporée)

b) Exprimé en g eau/m³ d'air

$$\text{PE moyen} = \frac{\text{perte horaire en eau (g/h)}}{\text{débit du ventilateur (m³/h)}}$$

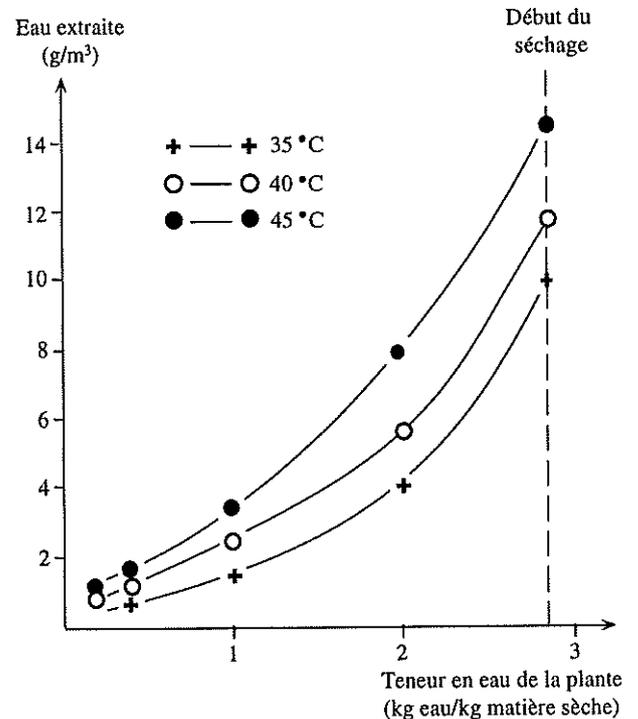


Figure III.2

Exemple de quantité d'eau extraite par m³ d'air en fonction de la teneur en eau du végétal (menthe poivrée)

(source : Bouverat Bernier *et al.*, 1989)

Selon les plantes et les techniques de séchage, les ratios sont très variables.

Le pouvoir évaporatoire est donc très dépendant de la température, de HR, ainsi que de la qualité des échanges air/plantes (débit, pression, vitesse de l'air,...).

7. DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

Le diagramme de l'air humide ou diagramme de Mollier (figure III.3) est une représentation graphique des différents états du mélange air-vapeur-énergie.

Ce diagramme est l'outil indispensable pour les études techniques du séchage.

Sans calcul, il permet de connaître les caractéristiques d'un air à l'aide de deux valeurs simples, telles que température sèche et HR.

Une présentation schématique du diagramme de l'air humide est proposée à la figure III.4.

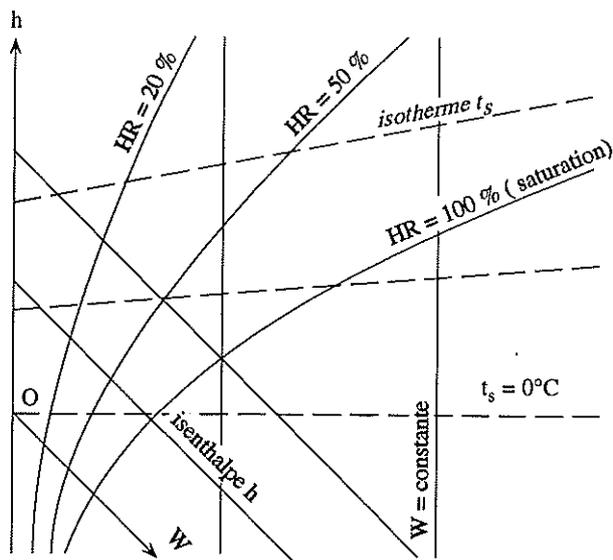


Figure III.4

Présentation schématique du diagramme de l'air humide

L'exploitation des résultats d'un tel diagramme exige une parfaite connaissance des conditions de séchage :

- conditions climatiques extérieures,
- puissance et performances du générateur,
- caractéristiques de la plante.

Exemple de lecture :

On donne :

- température sèche (t_s) = 30°C
- humidité relative (HR) = 30 %,

On déduit du diagramme (figure III.5) :

- teneur en humidité de l'air (W) = 8 g eau/kg d'air sec,
- enthalpie de l'air (h) ≈ 50 kJ/kg air sec.

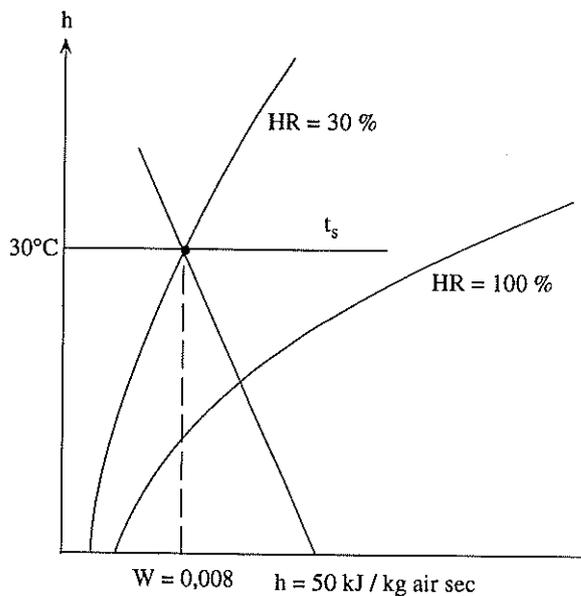


Figure III.5

Représentation schématique de la lecture du diagramme de l'air humide

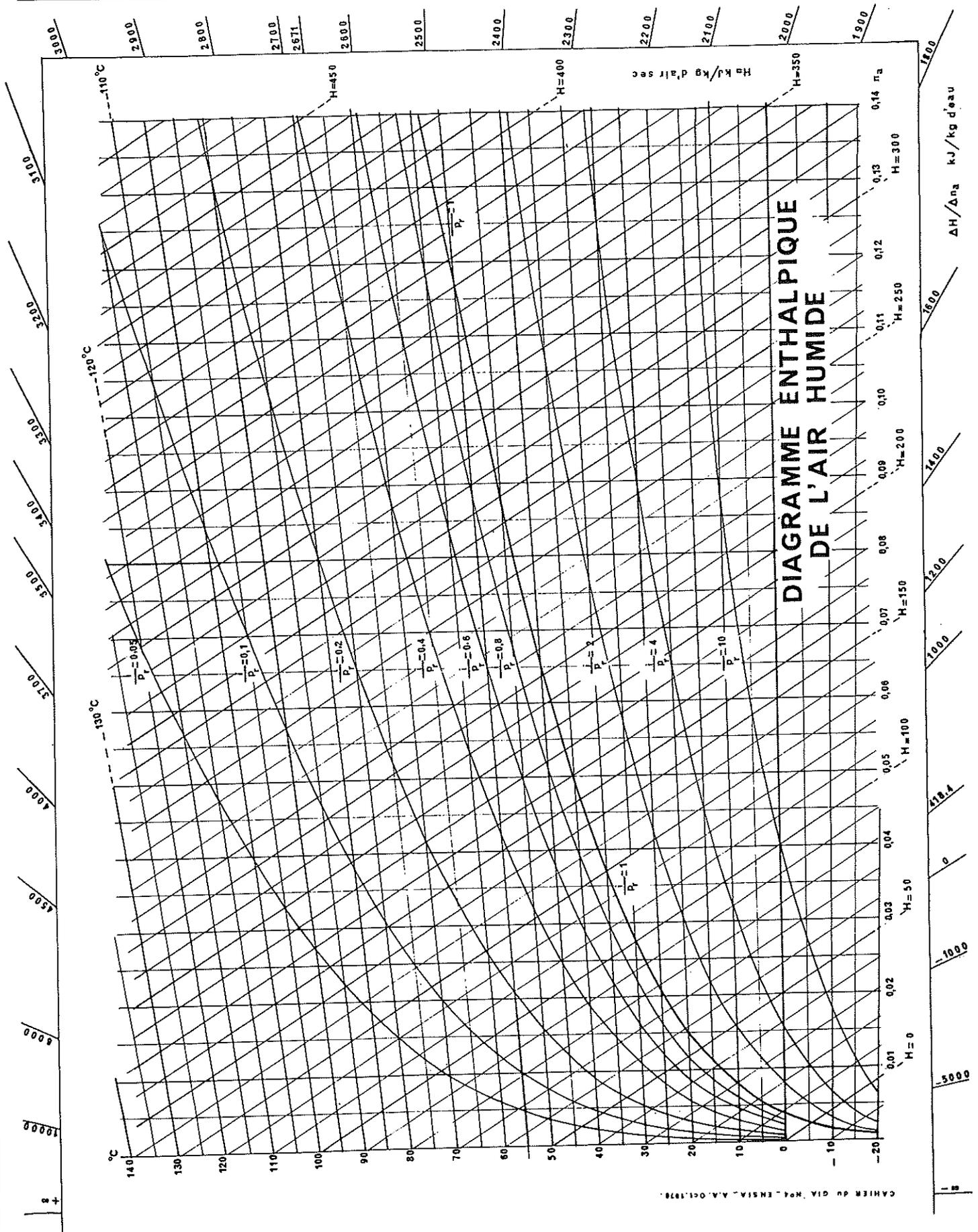
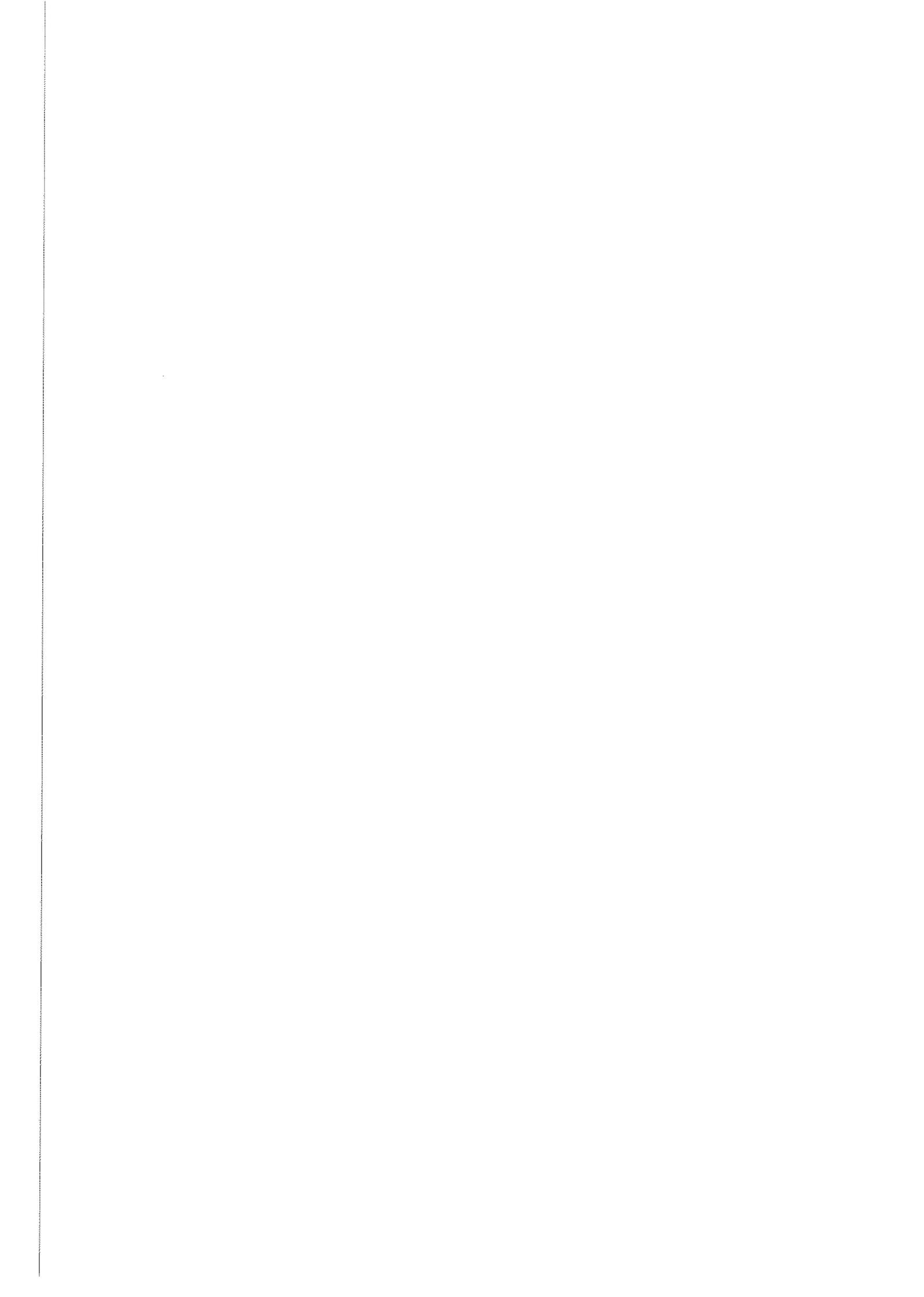


Figure III.3
 Diagramme enthalpique de l'air humide
 (source : département de GIA - ENSIA MASSY)

.....

CHAPITRE IV - L'ÉNERGIE



Introduction

Si l'énergie est une charge incontournable en matière de séchage, en revanche son coût est variable. Ce dernier est dépendant de la source d'énergie utilisée ainsi que de la structure de transformation et des volumes traités.

Ces différentes sources sont transformables, stockables et associables, mais à l'heure actuelle, pour des raisons techniques et économiques, on se limite en séchage à quelques unes (solaire, combustibles fossiles et électrique). Avant d'aborder en détail ces différentes énergies, quelques rappels s'imposent.

1. NOTIONS GÉNÉRALES

11. La calorie (cal)

Définition : quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'un corps d'un gramme dont la chaleur massique est égale à celle de l'eau à 15°C sous la pression atmosphérique normale.

Application : en évaluation et comparaison thermique de différentes sources d'énergies.

Correspondances : (tableau IV.1)

Energie	cal	J	kWh	TEP
calorie	1	4,186	1,163x10 ⁻⁶	10 ⁻¹⁰
Joule	0,239	1	278x10 ⁻⁹	239x10 ⁻¹³
kiloWatt-heure	86x10 ⁴	36x10 ⁵	1	86x10 ⁻⁶
tonne équivalent pétrole	10 ¹⁰	42x10 ⁹	11 600	1

Tableau IV.1

Correspondances entre les différentes unités de mesure énergétique

Les kilocalories (kcal) sont encore très utilisées alors que le joule (unité du système international) doit les remplacer. Les TEP sont réservées à de grosses structures de type industriel.

Le kWh, d'origine électrique, est utilisé pour des comparaisons. Pour la tarification, c'est l'unité légale depuis le 01/01/1978.

12. Autres notions

121. Chaleur spécifique (CS)

Définition : quantité d'énergie nécessaire pour élever de 1°C la masse ou le volume d'un corps.

Exemples :

$$\begin{aligned} CS \text{ eau} &= 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \\ &= 4,186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CS \text{ air} &= 0,24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \\ &= 1,005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \\ &\# 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/m}^3\text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$CS \text{ vap. eau} = 1,92 \text{ kJ/kg air sec}^\circ\text{C}$$

Utilisation : calcul de puissance calorifique pour des objectifs donnés (débit, variation de température).

122. Consommation d'énergie spécifique

Définition : quantité d'énergie nécessaire pour évacuer (évaporer) un kg d'eau, ou sécher un kg de plante, exprimée en kWh/kg eau évaporée et kWh/kg produit sec.

Utilisation : comparaison des performances de séchage des installations.

123. Pouvoir calorifique (PC)

Définition : le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur que peut fournir la combustion de l'unité de volume ou de masse d'un combustible donné.

Exemple : un m³ de gaz en brûlant dégage 9,7 kWh, le pouvoir calorifique de ce gaz est de 9,7 kWh au m³.

Remarque : la combustion d'un combustible fournit fréquemment de la vapeur d'eau qui contient une certaine quantité de chaleur, généralement non utilisable par l'utilisateur. C'est pour cela qu'il est distingué deux pouvoirs calorifiques :

- le pouvoir calorifique inférieur (PCI) = quantité de chaleur utilisable,
- le pouvoir calorifique supérieur (PCS) = quantité de chaleur utilisable + quantité de chaleur contenue dans la vapeur d'eau évacuée par les produits de combustion.

Utilisation : le PC permet de comparer les énergies et de prévoir des consommations pour des besoins précis. C'est le PCI qui est le plus couramment utilisé. Le tableau IV.2 rapporte le PCI des principales sources d'énergies.

Sources d'énergie	Masse volumique normale	PCI	
		kWh/kg	kJ/kg
Bois sec (chêne)	560 kg/m ³	4,6	16 750
Paille		3,8	13 800
FOD (fuel domestique)	0,83 kg/l	11,8	42 500
Propane	2,04 kg/m ³	12,8	46 000
Butane	2,67 kg/m ³	12,85	46 000
Gaz naturel (Lacq)	0,74 kg/m ³	13,7	49 000

Tableau IV.2

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 6 sources d'énergies (source : SCOM, 1982)

124. Rendement thermique (RT)

Définition : rapport entre l'énergie libérée et l'énergie consommée par la source.

$$RT (\%) = \frac{\text{énergie libérée}}{\text{énergie consommée}} \times 100$$

Ce rendement évolue selon l'énergie et les moyens mis en œuvre (tableau IV.3). Pour des combustions directes (sans échangeurs), le rendement est voisin de 100 %.

Source	Type échangeur	Rendement	Seuil T°
Bois	air/air	≤ 70 %	
Fuel Propane Butane Gaz naturel	air/air	≤ 87 %	> 200°C
Electricité	résist./air	95 à 100 %	800°C
Chaudière	air/eau air/vapeur	60 à 80 % 50 à 75 %	90/95°C 150°C
Solaire	capteur	20 à 50 %	

Tableau VI.3

Evaluation des variations de rendement selon l'énergie et le type d'échangeur

125. Puissance thermique ou calorifique (PT)

Définition : quantité d'énergie fournie par un générateur en régime de croisière. Exprimée en kJ/h ou en kWh/h, c'est une référence propre à chaque appareil, déterminant la capacité d'évaporation.

$$PT \text{ (kJ/h)} = \text{débit} \times CS \times \Delta t$$

débit : m³/h

CS : chaleur spécifique : kJ/m³/°C

Δt : gain de température : °C

2. LES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE

21. Energie solaire

Si la source est gratuite, et est idéale au niveau de l'environnement et de la dépendance énergétique, par contre son captage présente un coût souvent rédhibitoire.

De plus, sa garantie en puissance est très aléatoire.

211. Le gisement solaire (figure IV.1)

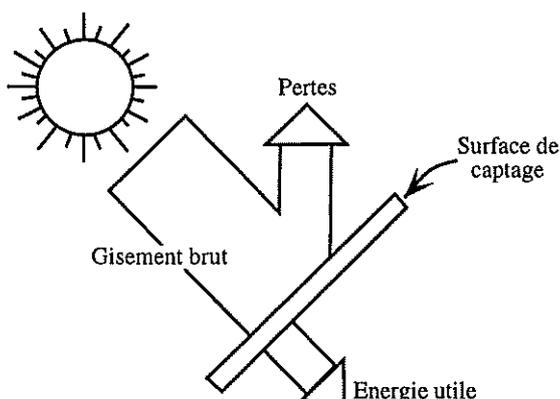


Figure IV.1

Décomposition du gisement brut

Le gisement brut est l'ensoleillement ou irradiation reçue par unité de surface et de temps, exprimée le plus souvent en kWh/m²/jour. Celui-ci n'est jamais exploité complètement par le capteur, dans le meilleur des cas, 50 % sont récupérés.

Cette irradiation en énergie incidente varie de 2 à 8 kWh/m²/h et dépend de :

- la localisation géographique,
- l'époque de l'année,
- les accidents climatiques (nuages, brouillard,...),
- l'inclinaison du capteur (angle/horizontal),
- l'orientation du capteur (angle/Sud).

212. Les pertes

Elles sont localisées au niveau du capteur et peuvent être réduites en jouant sur :

- l'orientation et l'inclinaison du capteur,
- le choix des matériaux,
- la vitesse de l'air dans le capteur.

Elles déterminent le rendement de captation (RC) :

$$RC (\%) = \frac{\text{gisement} - \text{perte}}{\text{gisement}} \times 100 = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie incidente}} \times 100$$

213. L'énergie utile

En théorie, on l'estime avec la formule :

$$\text{Energie utile (kWh/m}^2\text{/jour)} = I \times RC$$

I : irradiation (kWh/m²/j)

RC : rendement de captation

(15 % < RC < 50 %)

En pratique, une fois installée, on la calcule :

$$\text{Energie utile pratique (kWh/m}^2\text{/jour)}$$

$$= \frac{PT \times 24 \text{ h}}{S}$$

$$= \frac{\text{débit} \times CS_{\text{air}} \times \Delta t}{S} \times 24 \text{ h}$$

PT : puissance thermique : kWh/h

S : surface du capteur : m²

Débit : m³/h

CS air : chaleur spécifique air : kWh/m³/°C

Δt : gain de température : °C

Ainsi, on peut évaluer le rendement de captation réelle.

214. Le coût

Son calcul est assez complexe. Il s'apprécie sur une comparaison avec d'autres systèmes, prenant en compte :

- l'amortissement des installations,
- l'énergie payante consommée,
- l'entretien,

pour aboutir à un coût total du séchage exprimé en Franc/kg eau évaporée.

L'utilisation du solaire est plutôt envisageable en association avec une autre énergie.

22. Autres énergies dites renouvelables

Mises à part les énergies d'origine mécanique (hydraulique et éolienne), les sources renouvelables proviennent de la biomasse.

Au niveau agricole, ce sont les produits et sous produits d'exploitation (bois, pailles, tourteaux, grignons...) qui sont «recyclés» par une chaudière en énergie thermique. De faible PCI (10 000 à 20 000 kJ/kg), ces produits souvent encombrants (faible masse volumique), exigent un investissement lourd, un stockage et une manutention importante (tableau IV.4).

La fermentation méthanique issue de fumiers, boues, déchets urbains, produit le gaz naturel, ou méthane (CH_4), ou BIOGAZ est actuellement relancée. Ce gaz très volumineux, difficilement stockable mais "propre" et économique, peut être utilisé en combustion directe.

Le potentiel de ces diverses énergies n'est pas négligeable mais leur exploitation nécessite outre des investissements particuliers à amortir, une proximité d'approvisionnement (industries voisines) afin de limiter les coûts de transport élevés.

Source	Masse volumique kg/m ³	PCI	
		kWh/kg	kJ/kg
Chêne sec	560	4,6	16 700
Bois 20 % eau		3,8	13 800
Sciure bois		3,5	13 800
Paille		3,8	13 800
Tourbe	140 400	5,9	21 300
Grignons			
. noirs		5,8	20 900
. épuisés		3,5	13 800
. blancs		2,9	10 400
Canne provence			
. tiges		4,8	17 000
. feuilles		4,6	16 700
Granulés ordures ménagères		4/4,6	14 600 à 16 700

Tableau IV.4

Exemples de pouvoir calorifique inférieur pour certaines énergies renouvelables
(source : SCOM, 1982)

Origine	Traitement	Produits
Pétrole	Distillation fractionnée + Raffinage	Gaz . propane C_3H_8 . butane C_4H_{10}
		Liquide . essence . gazole . fioul
Gaz naturel	Lavage purification + mélange	Méthane CH_4
		Ethane C_2H_6
		Propane C_3H_8
		Butane C_4H_{10}

Tableau IV.5
Origine des combustibles

En séchage, nous retiendrons :

- propane
- FOD (Fuel Domestique)
- gaz naturel

Ces énergies ont un pouvoir calorifique (PC) élevé, leur exploitation est simple, demande peu d'investissement, et leur approvisionnement est aisé.

Le butane n'est plus que très rarement utilisé. Pour un prix très voisin au kWh en comparaison avec le propane, il est plus délicat à stocker (point de rosé : - 0,5°C).

La combustion d'énergie fossile dégage, en plus de la chaleur et du CO_2 , de la vapeur d'eau. L'importance de cette dernière est liée au taux d'hydrogène dans le combustible (tableau IV.6).

Cette eau de combustion va, dans un système en combustion directe, entraîner une baisse du pouvoir évaporatoire.

Energie	% hydrogène kgH/kg combust.	H ₂ O Combustion kg/kg combust.
FOD	13,5	1,22
Propane	16,9	1,53
Gaz Naturel Lacq	24,2	1,99
Déchets bois	4	0,36
Electricité	0	0

Tableau IV.6

Eau de combustion apportée par divers combustibles
(source : EDF-GDF)

23. Les énergies fossiles

Issues de l'écorce terrestre, formées au cours de millions d'années, ces stocks épuisables sont les plus utilisés. Les houilles et lignites ont été abandonnées au profit du pétrole et du gaz naturel qui, après raffinage, offrent une multitude de produits (tableau IV.5).

231. Tarification du gaz naturel

Nous nous limiterons au domaine agricole (exploitation de taille moyenne) soit les tarifs : B2i et B2s (tableau IV.7).

Tarif	Base	B0	B1	B2i	B2s	TEL
Codes tarifs	741-841-941	711-811-911	712-812-912	710-810-910	846-856-946	824-834-924
Consommation annuelle indicative	jusqu'à 1 000 kWh	de 1 000 à 7 000 kWh	de 7 000 à 30 000 kWh	de 30 000 (3) jusqu'à 150 000 à 350 000 kWh	au-delà de (3) 150 000 à 350 000 kWh	au-delà de 5 000 000 à 8 000 000 kWh (3)
Exemples d'usages	cuisine (1)	cuisine et EC	chauffage et EC et/ou cuisine individ.	chauffage et/ou EC dans les chaufferies moyennes	chauffage et/ou EC dans les chaufferies importantes	chaufferie de grande puissance, pour une gestion simple d'un poste énergie important
Abonnement	125,88 F/an	195,72 F/an	708,48 F/an	1 001,52 F/an	4 358,16 F/an	39 717 F/an
(2) Niveau de prix	prix par kWh en centimes	prix par kWh en centimes	prix par kWh en centimes	prix par kWh en centimes	prix par kWh hiver (4) été (4)	prix par kWh 1ère tranche hiver (4) été (4)
1	27,64	21,82	14,39	13,49	13,39 10,28	13,29 10,28
2	27,64	21,82	14,79	13,89	13,79 10,68	14,01 10,45
3	27,64	21,82	15,19	14,29	14,19 11,08	14,63 10,62
4	27,64	21,82	15,59	14,69	14,59 11,48	15,25 10,79
5	27,64	21,82	15,99	15,09	14,99 11,88	15,87 10,96
6	27,64	21,82	16,39	15,49	15,39 12,28	16,49 11,13
Réduction 2è tranche Seuil (kWh) Montant (cF/kWh)						4 000 000 2 000 000 2,45 3,75

(1) une formule simplifiée, le forfait cuisine, est proposée sous certaines conditions

(2) les valeurs indiquées correspondent respectivement à la redevance de location et d'entretien de compteur de débit compris entre 5 et 10 m³/h et au prix par kWh applicable en 1ère tranche

(3) selon les usages et la répartition des consommations en hiver et en été

(4) hiver du 1er novembre au 31 mars
été du 1er avril au 31 octobre

EC : eau chaude

Tableau IV.7
Tarification du gaz naturel (prix HT au 01-05-1994)
(source : GDF)

Les postes à prendre en considération pour calculer son coût sont :

1) **le raccordement** : sa possibilité est fonction de la proximité d'un réseau de distribution (canalisation), GDF étant redevable d'une obligation de rentabilité. Coût : 5 600 F HT.

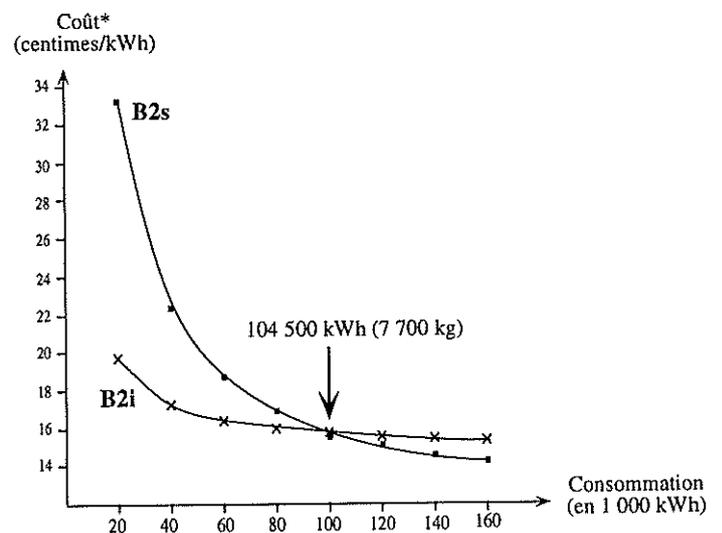
Le prix peut être ramené à 2 500 F HT remboursable, avec un engagement de consommation,

2) **l'abonnement** : son montant est annuel et est fonction du tarif (exemple : B2i : 1 001,52 F HT/an),

3) **le prix du kWh** : il existe 6 niveaux de prix selon la commune considérée (se renseigner auprès de GDF).

Le tarif B2s (comparé au B2i) n'est rentable que si la différence de prix kWh été/hiver en fonction du niveau de consommation réciproque permet d'annuler les 3 356,64 F (4 358,16 - 1 001,52) supplémentaires d'abonnement.

Si la consommation est exclusivement estivale, cas du séchage des PAM, l'utilisateur choisira de préférence le tarif B2s. Ceci est à moduler en fonction des kWh consommés (figure IV.2).



* Abonnement + prix kWh (niveau de prix 4)

Figure IV.2
Variation du coût du kWh des tarifs B2i et B2s selon le volume considéré, dans le cas d'une consommation exclusivement estivale

En franc constant, le prix du gaz naturel est stable et relativement indépendant des fluctuations du prix du pétrole. Son coût est indexé sur les prix à la consommation.

Le gaz naturel :

- propre,
- souple d'utilisation,
- énergie puissante,
- et ayant un prix de vente compétitif,

est très largement utilisé par les industries agro-alimentaires.

Son utilisation dépend de la possibilité de raccordement au réseau.

Le pouvoir calorifique du gaz naturel peut présenter de légères fluctuations, celui-ci étant le résultat du mélange de plusieurs sources d'approvisionnement (Algérie, Russie, Mer du nord, Lacq).

232. Prix du propane (juin 1994, HT)

Sur une période d'utilisation de juin à septembre, le coût du kWh peut être situé dans une fourchette de 15,18 à 18,80 centimes/kWh, pour une installation de séchage de taille moyenne (générateur de 130 kWh).

Le coût du stockage, comprenant la location plus une garantie entretien et réparation pour une cuve de 500 kg à 1,750 t, est d'environ 1 475 F HT/an pour un contrat de 3 ans.

233. Prix du FOD (Fuel Domestique) (tableau IV.8)

Volume en litre	Prix HT en F/l	Prix HT en centime/kWh*
< 1 000	1,64	16,75
1 000 à 2 000	1,56	15,93
2 000 à 5 000	1,52	15,52
5 000 à 14 000	1,47	15,01
> 14 000	1,43	14,60

* calculé avec un PCI = 9,79 kWh/l

Tableau IV.8

Prix (juin 1994) du FOD à Saumur (49)

De légères variations de prix sont notées selon les fournisseurs. L'évolution du prix est liée au coût du dollar et aux relations internationales.

Stockage : environ 3 500 F HT pour une cuve de 2-3 000 litres.

Le FOD nécessite souvent, pour des raisons de qualité de l'air séchant (pollution par les produits issus de la combustion), l'emploi d'un échangeur.

Depuis quelques années, le fuel supérieur mis sur le marché possède de meilleures caractéristiques de combustion allant vers un rendement amélioré et un entretien réduit (compter + 10 c/l).

24. L'électricité

Avec EDF-GDF, la France est le deuxième producteur d'électricité de la Communauté Européenne après l'Allemagne. La production, d'origine essentiellement nucléaire (80 %), représente plus de 400 milliards de kWh pour une consommation de 360 milliards de kWh.

Le prix de cette énergie tend à baisser dans le temps. (figure IV.3).

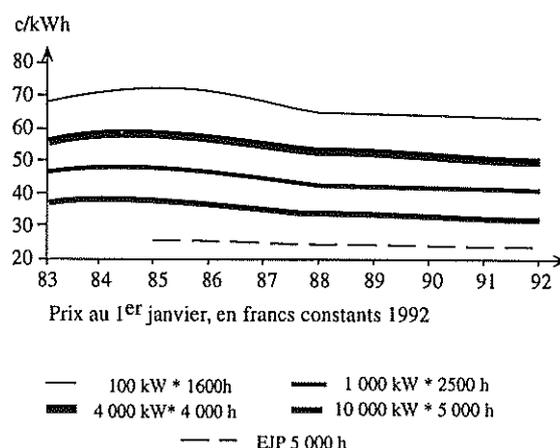


Figure IV.3

Evolution des prix HT de l'électricité en France, pour usages industriels (source : EDF)

Le recours à l'électricité est inévitable à l'heure actuelle ; outre le chauffage, elle intervient dans la régulation, la ventilation, les équipements annexes.

Une estimation des besoins est nécessaire afin de déterminer le système de tarification optimale et de profiter des meilleurs prix. Celle-ci est à étudier au cas par cas.

La facture électrique comporte :

- une prime annuelle qui est fonction de la puissance souscrite en kVA (kilovoltampère),
- des prix de kWh différents suivant les saisons et les moments de la journée.

Le prix du kWh peut donc s'avérer très variable.

241. Estimer la puissance à souscrire

La puissance souscrite s'exprime en kVA et correspond à la puissance apparente. Celle-ci comprend la puissance active (effectivement transformée au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique, ...) plus une partie de puissance réactive (qui sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des moteurs). L'importance de cette puissance réactive est appréciée par le facteur de puissance : $\cos \psi$.

Un mauvais facteur de puissance provoque des pertes d'énergie active. Celles-ci constituent un gaspillage. Comme elles sont évidemment enregistrées par le compteur d'énergie active, elles viennent augmenter d'autant les consommations de cette nature qui apparaissent sur la facture d'électricité.

De plus, une consommation excessive d'énergie réactive peut également entraîner une majoration du montant de la facture d'électricité (en fait, c'est celle-ci qui risque de coûter le plus cher).

Aux puissances actives et réactives correspondent respectivement des consommations d'énergie active en kWh et d'énergie réactive en kVAh.

La facturation de l'énergie réactive est fonction de la formule de tarification :

- elle est prise en compte dans la puissance souscrite (prime fixe) pour les tarifs EDF bleu et jaune,
- elle est comptabilisée par un compteur d'énergie réactive par les tarifs EDF vert.

Ainsi pour une même puissance active, deux générateurs électriques pourront réclamer une puissance apparente différente, soit une facture énergétique différente (variation de la prime fixe). Pour les fours à résistances : $\cos \psi \neq 1$, soit une puissance apparente \neq puissance active.

On peut améliorer le facteur de puissance en évitant de faire tourner les moteurs à faible charge et en utilisant des condensateurs.

Selon la formule tarifaire EDF choisie, cette puissance souscrite sera fixe ou modulable sur l'année.

242. Choisir sa tarification

Le principe de tarification EDF repose sur :

- la demande très irrégulière d'électricité :
 - . au cours d'une journée (écart jour/nuit),
 - . entre les jours d'une même semaine (jours ouvrés et dimanche),
 - . entre les différentes semaines de l'année (été/hiver),
- la puissance souscrite.

Les différentes formules de tarification (tableau IV.9) offertes sont trop complexes pour que nous les présentions en détail, chaque utilisateur étant un cas particulier. Des conseillers EDF pour le secteur agricole sont présents dans chaque département, il suffit de les contacter.

Puissance souscrite	36 kVA		250 kVA
	Bleu	Jaune	Vert
Tension réseau	Basse	Basse	Moyenne et Haute
Usages	Agricole et Domestique	Agricole PME-PMI	Industries

Tableau IV.9
Caractéristiques des différents tarifs

Nous nous limiterons à présenter les différents paramètres à prendre en compte ainsi que les possibilités offertes.

Dans le cadre du séchage des PAM, seuls les tarifs bleu et jaune sont retenus. Dans le cadre de ces tarifs, la puissance réactive n'est pas directement facturée. Le seuil de 36 kVA est souvent dépassé pour une installation de séchage en électrique (séchoir à résistances).

Les postes à prendre en compte pour le calcul du coût :

- le raccordement (prix applicables au 01/05/1993)
 - ☞ tarif bleu :
 - . si puissance souscrite ≤ 18 kVA : minimum 4 600 F HT,
 - . si puissance souscrite comprise entre 18 et 36 kVA : minimum 6 200 F HT,

☞ tarif jaune :

- . si passage du tarif bleu au tarif jaune :
minimum 13 000 F HT
- . si raccordement nouveau :
minimum 20 000 F HT

Il faut ensuite majorer ces prix en fonction de l'éloignement du point de raccordement sur le réseau EDF.

- l'abonnement ou prime annuelle fixe (tab. IV.10) est fonction :
 - . de la puissance souscrite,
 - . de l'option choisie,
 - . et de la version adoptée dans le cadre du tarif jaune.
- le prix de kWh (tableau VI.10)
 - ☞ tarif bleu : 5 niveaux de prix,
 - ☞ tarif jaune : 12 niveaux de prix.

La formule sera définie en fonction :

- des puissances nécessaires sur les différentes périodes de l'année,
- des kWh consommés sur les différentes périodes de l'année.

243. Utilisation de l'électricité en séchage

Séchage par convection

Ce système est le plus classique : l'air est chauffé par un convecteur, une batterie de résistances.

L'exploitation électrique est simple :

- . batterie + gaine + régulation température
(investissement \geq 450 F HT/kW installé)

De plus, l'air traité est propre et permet un séchage de qualité.

TARIF BLEU - CLIENTS DOMESTIQUES ET AGRICOLES

abonnements puissance souscrite (en kVA)	prix des abonnements (en francs par an)				
	option base	option heures creuses		option EJP (1)	
petites fournitures 3 kVA	145,08				
6	368,52	691,56		-	
9	745,92	1 204,44		-	
12	1 117,08	1 722,84		691,56	
15	1 488,24	2 241,24		691,56	
18	1 859,40	2 759,64		691,56	
24	-	4 153,56		-	
30	-	5 547,48		-	
36	-	6 941,40		2 759,64	

petites fournitures 3 kVA	prix de l'énergie (en centimes par kWh)				
	option base	option heures creuses		option EJP (1)	
		HP (2)	HC (2)	HN (2)	PM (2)
67,29	57,77	57,77	32,87	36,93	294,46

TARIF JAUNE - OPTION BASE

versions	prime fixe annuelle F/kVA	prix de l'énergie (centimes/kWh)			
		HPH (2)	HCH (2)	HPE (2)	HCE (2)
utilisations longues	337,08	65,65	41,16	20,62	13,26
utilisations moyennes	114,72	91,95	55,5	21,94	13,66
dépassements en F/heures	79,66				

TARIF JAUNE - OPTION EJP

version	prime fixe F/kVA/an	PM (2)	HH (2)	HPE (2)	HCE (2)
utilisations longues	337,08	243,89	38,65	20,62	13,26
dépassements en F/heures	79,66				

(1) Cette option ne s'applique pas en Corse et dans les départements d'Outre-Mer. Elle est offerte dans la zone à télécommande.

Sur décision des collectivités locales, des taxes municipale (0 à 8 %) et départementale (0 à 4 %) sont applicables sous certaines conditions

(2) PM : heures pointe mobile ; HH : heures d'hiver ; HPE : heures pleines été ; HCE : heures creuses été

Tableau IV.10

Prix de vente de l'électricité HT à dater du 10 mars 1994
(source : EDF)

Séchage par génération interne de chaleur

C'est le principe chauffant du «micro-ondes». Il est coûteux :

- en consommation ($\cos \psi$),
- en investissement :
15 000 - 20 000 F HT/kW utile,

Pompe à chaleur : PAC (cf. chap. technologies),

Lyophilisation (cf. chap. principes de séchage),

Le recours à l'électricité, en comparaison avec les énergies fossiles, engendre souvent des frais de fonctionnement plus élevés (facture EDF).

Cependant l'électricité est pourvue d'avantages non négligeables :

- absence de résidus et d'eau de combustion,
- souplesse d'utilisation (le réglage ne fait pas appel à des volumes et pressions),
- taille de l'installation plus réduite (absence de stockage),
- mobilité de l'installation (un simple branchement est nécessaire),
- et surtout une grande sécurité d'utilisation (absence de combustion).

CHAPITRE V - ÉTUDE COMPARATIVE

Essai de comparaison de systèmes de séchage intégrant matériel et énergie



1. AVERTISSEMENT

Les prix et coûts abordés dans cette étude ne le sont qu'à titre indicatif. Leur application à d'autres cas concrets réclame la prudence.

Nous les avons voulus les plus proches possible de la réalité mais les nombreux paramètres intervenants (pouvoir évaporatoire de l'air de séchage, type de végétal, coût du matériel, durée d'utilisation, énergie,...) sont extrêmement variables.

Combinés, ils peuvent présenter de grandes disparités de résultats.

L'intérêt de cette étude repose principalement sur la démarche de comparaison et sur les tendances qui s'en dégagent.

Sur le terrain, chaque application est un cas particulier.

2. DÉTERMINER UN CAS TYPE D'UTILISATEUR

Les utilisateurs de séchoirs étant très différents par les volumes et les produits traités, il s'ensuit une grande diversité dans les équipements et les énergies utilisées (tableau V.1).

Au vu de la diversité des systèmes de séchage et afin

d'opérer une comparaison sur une même base, un cas type susceptible d'intéresser un nombre important d'utilisateurs a été défini (tableau V.2).

C'est sur la base de ce cas type que s'effectuera toute l'étude comparative.

Utilisateurs	Nbre	Equipement	Energie	Gamme de PAM	Période de séchage	Durée d'utilisation	Volume traité	
							kg frais/j	kg sec/an
Cueilleurs	> 200	Armoire Claies Caisson	Solaire Electrique	Très diversifié	Etendue		10 à 500 kg	200 à 2 000 kg
Agriculteurs diversifiés	100	Caisson	FOD Propane	Spécialisés qqes PAM	Eté	< 60 j	500 à 200 kg	2 à 10 t
Agriculteurs spécialisés	< 50	Caissons améliorés	Propane	Diversifié	Toute l'année surtout l'été	> 60 j	2 à 10 t/j	> 10 t
Groupements Coopératives	≤ 10	Caisson Four	Propane	Diversifié	1/2 année	≤ 200 j	5 à 25 t/j	50 t
Industries	< 5	Fours	Propane Gaz naturel	Très diversifié	Toute l'année	< 200 j	>> 10 t	> 50 t

Tableau V.1

Disparité des utilisateurs de séchoir (estimation)

Utilisateur	Equipement	Gamme de PAM	Période de séchage	Durée d'utilisation	Volume traité
Cas type	Caisson	Partie aérienne 77 % perte en eau séchage en 1 j.	juin-octobre	60 jours	1 t. frais/j.

Tableau V.2

Caractéristiques du cas type

3. ESTIMER LES CARACTÉRISTIQUES DE L'INSTALLATION

Objectifs du séchage :

- 1 t produit frais (parties aériennes)/jour,
- ôter 77 % d'eau, soit 770 kg eau/jour à évaporer,
- durée réelle de séchage 22 h/jour.

Hypothèses de travail : (figure V.1)

- pouvoir évaporatoire retenu : 3 g eau/m³ air
- séchage en caisson (20 m²).

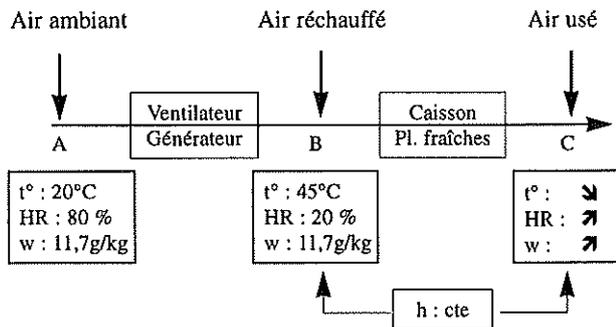


Figure V.1

Principales caractéristiques de l'air aux différentes étapes du séchage

Quels paramètres pour le générateur et le ventilateur ?

- 770 kg eau en 22 h
- soit 35 kg/h avec $\text{PE} = 3 \text{ g/kg}$:
- débit air nécessaire 11 666 m³/h
- ($\approx 11\,530 \text{ m}^3/\text{h}$)

- puissance calorifique requise pour le générateur

$\text{PT} : \text{débit} \times \text{CS} \times \Delta t$

débit : 11 666 m³/h

$\text{CS} : \text{chaleur spécifique air} : 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/m}^3/^\circ\text{C}$

$\Delta t : \left. \begin{array}{l} \text{air ambiant } 20^\circ\text{C} \\ \text{air réchauffé } 45^\circ\text{C} \end{array} \right\} + 25^\circ\text{C}$

$\text{PT} = 97,4 \text{ kWh/h}$

Caractéristiques retenues pour la suite des calculs :

ventilateur : débit : 11 530 m³/h

générateur : PT 100 kWh

4. LES MODES D'EXPLOITATION COMPARÉS

- | | | | |
|---------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| 1) résistance/électricité | | 3) brûleur/propane | : en direct |
| 2) brûleur/FOD | : en direct | | avec échangeur |
| | avec échangeur | 4) brûleur/gaz naturel | : en direct |

5. QUE PENSER DE L'EAU DE COMBUSTION ?

La performance d'une installation de séchage est fonction du matériel choisi et de la source d'énergie employée, énergie et matériel étant étroitement liés.

Certains utilisateurs s'inquiètent notamment des conséquences de l'eau produite par les énergies fossiles en combustion directe, sur les performances de leur séchoir.

Une approche théorique du problème a été menée en considérant des systèmes avec échangeur et d'autres à combustion directe.

Les résultats sont rapportés dans le tableau V.3.

On note que l'énergie consommée par les générateurs à combustion indirecte est nettement supérieure

re à celle des autres systèmes (+ 15 à 20 % de kWh, pour un pouvoir évaporatoire très légèrement amélioré).

Sur la majorité du temps de séchage (environ les 2/3), l'HR de l'air extrait est supérieure ou égale à 40 - 45 %.

Par contre en fin de séchage, on peut atteindre facilement de l'air extrait à faible HR ($20\% < \text{HR} < 35\%$). Le gain de pouvoir évaporatoire peut alors paraître non négligeable mais il ne faut pas oublier la surconsommation engendrée par les échangeurs.

Finalement, l'eau dégagée en combustion directe n'altère pas outre mesure les performances d'une telle installation.

	Electricité/ Résistance	FOD/ Brûleur		PROPANE/ Brûleur		Gaz naturel/ Brûleur
		à échangeur	direct	à échangeur	direct	direct
Rendement des générateurs %	98	85	100 % PCI	87	100 % PCI	100 % PCI
Energie consommée (kWh) pour une énergie libérée identique à l'électricité	100	115,3	98	112,3	98	98
Consommation horaire kWh kg	100	9,77	8,3	8,77	7,66	7,15
Eau formée par comb. kg eau/h g/kg d'air	/ /	/ /	10,13 0,72	/ /	11,72 0,82	14,23 1
Teneur en eau de l'air réchauffé (B) g/kg d'air	11,7	11,7	12,4	11,7	12,5	12,7
Importance de l'eau de com- bustion (%) sur la teneur en eau de l'air (B) (=A/WB)	0	0	+ 6 %	0	+ 6,8 %	+ 8,5 %
Perte de pouvoir évaporatoire potentiel (en %) pour un air extrait (C) à						
90 % HR	0	0	1 à 5 %	0	1 à 5 %	
75 % HR	0	0		0		0
60 % HR	0	0		0		
45 % HR	0	0		0		
30 % HR	0	0	≈15 %	0		≈15 %

(B, C : cf. figure V.1)

Tableau V.3

Comparaison théorique des énergies suivant leur exploitation à partir du diagramme de l'air

6. COMPARAISON TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Au-delà des intérêts techniques, l'aspect économique du séchage est primordial.

Quel sera le système le mieux adapté à la situation de référence, en fonction des principaux paramètres ?

La comparaison va porter sur des coûts de revient calculés à partir des investissements spécifiques, de la consommation d'énergie spécifique (CES) et du coût de l'énergie.

Certains aspects non chiffrables compléteront cette étude.

61. Investissements spécifiques

Le tableau V.4 détaille le montant des investissements poste par poste pour chaque système. La fourchette de prix généralement présentée intègre les variations de prix entre fournisseur et d'éventuelles parts d'auto-construction.

Ces investissements sont calculés à partir de références de prix HT 1991 - 1992.

La notion d'amortissement permet de rapporter ces dépenses à des valeurs relatives (jour et kilo sec).

Critères	Energies et modes d'exploitation					
	Electricité	FOD		Propane		Gaz naturel
		indirect	direct	indirect	direct	direct
Type réchauffeur	Résistances	brûleur à air soufflé		brûleur à air soufflé		air soufflé
Investissements (en KF)*						
Puissance	100 kW	116 kW	120 kW	116 kW	130 kW	130 kW
- générateur	45/60	14	4,9/7	18,8	9/9,8	9/9,8
- raccordement	1/2	1	1/2	2,5	2,5	2,5
- recyclage	/	1	1/2	2,5	2,5	2,5
- thermostat	/	/	0,5/1	/	0,5/1	0,5/1
- installation	1/2	/	/	/	/	/
- cuve	/	2	2	/	/	/
Aérolitique						
- ventilateur	compris	4/8	4/8	4/8	4/8	4/8
- gaines-cône	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Enceinte						
- caisson	10/20	10/20	10/20	10/20	10/20	10/20
Total (en KF)*	59,5/86,5	34,5/48,5	24,9/42,5	37,8/51,8	28,5/43,8	28,5/43,8
Amortissements (en F)**						
F/an (5 ans)	11 900/17 300	6 900/9 700	5 000/8 500	7 560/10 360	5 700/8 760	5 700/8 760
F/jour d'utilisation	200/290	115/162	83/142	126/173	95/146	95/146
F/kg sec brut	0,86/1,25	0,50/0,70	0,36/0,62	0,55/0,75	0,41/0,63	0,41/0,63

* KF : kilo franc : 1 000 F

** F : Franc

Tableau V.4
Investissements - amortissement du séchoir (Prix HT)

Le mode d'exploitation électrique se détache très nettement des autres (figure V.2). Le prix du générateur à résistance en est le responsable.

Il n'apparaît pas de différence aussi significative entre les autres procédés. Les systèmes avec échangeur se positionnent cependant dans une fourchette de prix plus élevés.

Les solutions gaz naturel et propane en direct donnent une qualité d'air réchauffé supérieure à celle du FOD en direct, mais ce dernier a un coût plus attractif. Le gaz naturel réclame cependant la proximité d'un réseau de distribution.

Si le choix de l'utilisateur s'oriente vers un système avec échangeur, le propane présente l'avantage d'être moins polluant pour l'environnement, plus simple d'utilisation et plus facile d'entretien.

En général, les systèmes à combustion sont assez proches. Dans le cadre du cas type, il faut compter 40 à 70 centimes d'amortissement séchoir/kg de produit sec (non élaboré).

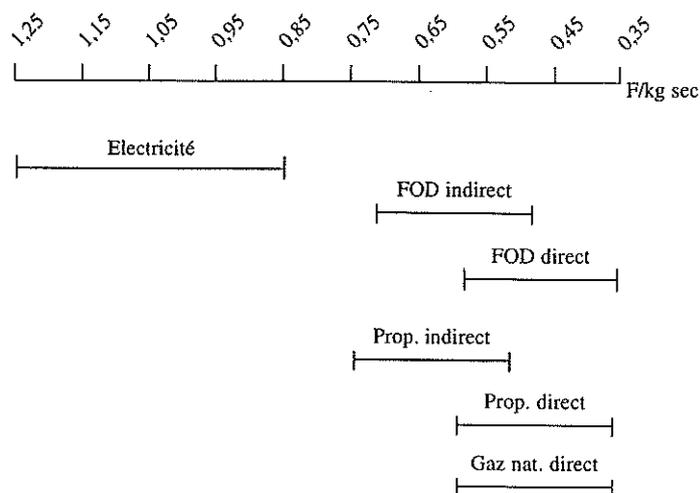


Figure V.2
Répartition des procédés selon l'investissement

62. Coûts énergétiques et de revient globaux

Les principaux paramètres de calcul sont repris par le tableau V.5.

Quel que soit le mode d'exploitation, l'énergie représente 70 % du coût de revient du séchage (figure V.3).

L'électricité s'affiche nettement en tête avec un coût énergétique supérieur à 2 F/kg produit sec. La différence entre système direct et indirect est à ne pas négliger. Une différence de 35 centimes rapportée à une production sèche totale de 14 t avoisine les 5 000 F.

Les générateurs avec échangeurs pourraient afficher des surcoûts beaucoup plus importants dans le cas de rendements moindres.

Nous avons pu apprécier précédemment (cf. chapitre énergie) les paramètres pouvant influencer de façon notable le prix d'une même source d'énergie. Il convient donc de rester prudent quant à ces résultats.

Au regard de ce cas type, il faut compter entre 2 F et 2,50 F HT/kg de produit sec de coût de revient global pour un système reposant sur l'emploi d'énergie fossile.

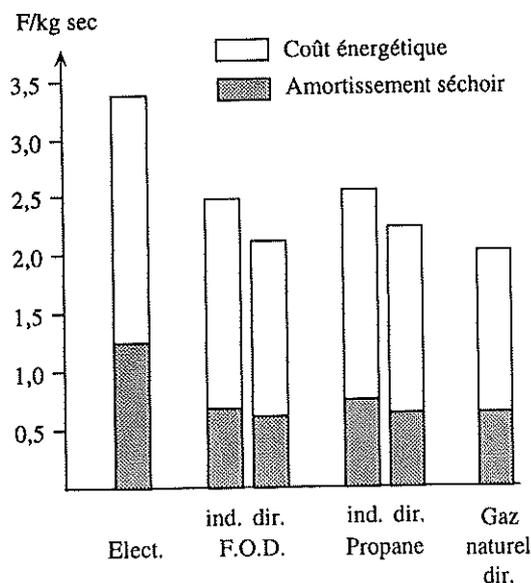


Figure V.3

Répartition des coûts de revient/kg de produit sec

Cette étude peut être affinée, en abordant des paramètres non chiffrables (tableau V.6).

Ils peuvent revêtir une priorité variable selon l'utilisateur, l'élément sécurité d'utilisation peut très bien l'emporter sur tous les autres.

63. Conclusion

Quel que soit le système, il semble qu'il faille s'attendre à un coût de revient global supérieur à 2 F/kg de produit et à un investissement de 30 000 F minimum pour notre cas type.

Si l'électricité présente un coût de revient nettement supérieur aux autres systèmes, celui-ci ne doit pas faire oublier les nombreux avantages dégagés par cette énergie.

Les autres modes d'exploitation à base d'énergie fossile sont très proches. Ils sont à considérer par chacun en fonction de différents paramètres secondaires (sécurité, entretien, pollution,...).

A noter que le coût énergétique/kg produit sec est très fortement tributaire des volumes consommés, et évoluera différemment selon l'énergie considérée.

Comme nous le précisons au début de cette étude, chaque installation sera un cas particulier à aborder avec les paramètres qui lui sont propres.

Toujours est-il que la maîtrise du poste énergie détermine, pour une bonne part, la rentabilité d'une production.

	Electricité/ Batterie Résistance	FOD/Brûleur		Propane/Brûleur		Gaz naturel/ Brûleur
		à échangeur	direct	à échangeur	direct	direct
Energie mise en œuvre kWh (pour une énergie libérée de 98 kWh)	100	115,3	98	112,3	98	98
Pouvoir évaporatoire retenu kg eau/h	35	35	35	35	35	35
CES kWh/kg d'eau	2,8	3,3	2,8	3,2	2,8	2,8
Coût du kWh* F/kWh	0,23	0,16	0,16	0,17	0,17	0,15
Coût du kg d'eau évaporée F/kg eau	0,64	0,53	0,45	0,54	0,48	0,42
Coût énerg./kg de pl. sèche ** F/kg sec	2,14	1,78	1,51	1,81	1,61	1,41
Frais d'amort. du séchoir *** F/kg sec (génér.+ caisson + régl. + alim.)	1,25	0,70	0,62	0,75	0,63	0,63
Coût de revient global F/kg sec	3,39	2,48	2,13	2,56	2,24	2,04
Investissements F HT	59 500 à 86 500	34 500 à 48 500	24 900 à 42 500	37 800 à 51 800	28 500 à 43 800	28 500 à 43 800

* Electricité : tarif jaune utilisations moyennes (1/3 creuse + 2/3 pleine) + prime fixe de 5 mois
 FOD : tranche prix 2 000 à 5 000 l
 Propane : prix moyen de la fourchette proposée
 Gaz naturel : tarif B2S, niveau de prix 4, prix été + prime fixe

** Coefficient = $\frac{\text{Masse frais} - \text{Masse sec}}{\text{Masse sec}}$ = 3,35

*** Coût réel sans autoconstruction (valeur maxi)

Tableau V.5
Calcul du coût de revient global

	Electricité/ Batterie Résistance	FOD/Brûleur		Propane/Brûleur		Gaz naturel/ Brûleur
		à échangeur	direct	à échangeur	direct	direct
Potentiel évaporatoire	****	****	***	****	***	**
Qualité du séchage	****	****	*	****	***	***
Environnement (air)	****	*	*	***	***	***
Entretien	****	*	**	**	***	****
Finesse de régulation	****	**	**	***	***	***
Dépense énergétique	*	***	****	**	***	****
Investissement	*	***	****	**	****	****
Stabilité des cours d'énergie	****	*	*	**	**	****
Sécurité d'utilisation	****	***	**	***	**	**

**** très bon
 * très mauvais

Tableau V.6
Estimation des éléments non chiffrables

CHAPITRE VI - LES TECHNOLOGIES DU SÉCHOIR



Introduction

La conception et la mise en place d'un séchoir se heurtent à des contraintes techniques et économiques. Le monde des PAM étant petit et disparate, les constructeurs et organismes ont peu étudié la question par manque d'intérêt et de moyens. La technologie est donc bien souvent calquée sur les principes de séchages agricoles (foin, grains, semences) et de déshydratation en industrie agro-alimentaire (fruits et légumes) ; pourtant ces produits ne se ressemblent pas.

Face à ce contexte, les solutions en PAM avancent à petits pas avec une expérience forgée sur le tas.

Ce chapitre aborde les différents éléments du séchoir, à savoir :

- les éléments aérauliques,
- les éléments thermiques,
- la pompe à chaleur,
- et les enceintes.

Des systèmes sont présentés. A charge à l'utilisateur de mettre en parallèle ses propres caractéristiques.



Première partie : les éléments aérauliques



Dans le principe du séchage par convection, la circulation de l'air est essentielle. Le recours à la ventilation artificielle s'impose rapidement dès que le chargement dépasse quelques kilogrammes de produit frais par m².

1. LE VENTILATEUR

C'est une turbo-machine recevant de l'énergie mécanique qu'elle utilise pour mettre en mouvement un fluide gazeux dont elle élève la pression.

Avant de choisir un ventilateur, il y a lieu de spécifier un certain nombre de paramètres.

11. Paramètres

☞ **Le débit (Q)** : analogue à l'intensité en électricité, il représente la quantité de fluide véhiculée par unité de temps, exprimée en m³/h, aux conditions d'aspiration. Pour un air donné (t°, HR), le débit régit dans certaines limites le pouvoir évaporatoire (kg eau/h). Le débit pour un ventilateur donné peut être régulé au niveau de :

- . l'ouverture à l'aspiration,
- . la vitesse de rotation,
- . l'inclinaison et le nombre des pales.

☞ **La pression (p)** : est une grandeur analogue à la différence du potentiel en électricité. Pour un circuit donné, c'est celle qui est nécessaire pour maintenir constant le débit déterminé. Elle est fonction des pertes de charge du circuit (mm CE : mm de colonne d'eau). La pression d'un ventilateur est la différence de pressions totales absolues entre la bride de refoulement et la bride d'aspiration de ce ventilateur. La pression totale (p_t) est la somme de la pression statique (p_s) et d'une pression dynamique (p_d).

$$p_t = p_s + p_d = p_s + \frac{CV^2}{2}$$

C = masse spécifique du fluide (kg/m³)

V = vitesse (m/s)

En pratique, seule la pression statique permet de vaincre la résistance des conduits et des appareils (échangeurs thermiques, filtres, etc...). La pression doit donc permettre à l'air de traverser les plantes mises à sécher. Pour les PAM, les pressions nécessaires sont bien inférieures à celles rencontrées pour le séchage des grains et semences (p PAM < 100 mm CE, p grain ≥ 200 mm CE).

☞ **La puissance (P)** : à chaque point de fonctionnement d'un ventilateur correspond une puissance nécessaire à fournir à l'arbre du ventilateur. Cette puissance est généralement exprimée en kW, plus rarement en chevaux (CV). Le ventilateur rend d'autre part, sous forme pneumatique, une certaine puissance.

☞ **Le rendement (n)** : est le rapport de la puissance rendue à la puissance absorbée. Cette puissance absorbée est la puissance fournie au moyen du ventilateur, autrement dit la puissance mécanique fournie par le moteur moins les pertes dans les paliers, les organes d'accouplement, etc... Ce rendement se rapproche de 85 % dans les meilleurs cas.

☞ **Loi des vitesses** : la variation de la vitesse de rotation modifie certaines performances :

- Q varie proportionnellement à la vitesse,
- p varie proportionnellement au carré de la vitesse,
- P varie proportionnellement au cube de la vitesse,
- n reste inchangé.

☞ **Loi de densité** : sur une même installation, si on passe dans le ventilateur successivement de l'air atmosphérique normal (C = 1,225 kg/m³) puis un gaz de densité x fois plus grande, on observe que :

- . le débit volumique n'a pas changé,
- . la pression est devenue x fois plus grande,
- . la puissance absorbée est devenue x fois plus grande,
- . le rendement n'a pas changé.

☞ **Niveau sonore** : la notion de "silence" est imprécise et relative. Elle varie avec l'environnement (voisinage), la conception des locaux, la présence d'autres sources de bruit et les distances. Pour un même ventilateur, le bruit perçu au niveau de la pression acoustique va dépendre :

- de la vitesse de l'air dans les conduites,
- de la pression,
- des obstacles,
- de la fixation (vibrations).

La vitesse est obligatoirement liée à la pression fournie. Il y a toujours intérêt à adopter une pression de distribution aussi faible que possible lorsque la condition de silence est impérative. A noter qu'une légère augmentation du diamètre des conduits entraîne une importante baisse de pression, et inversement.

Il est évidemment toujours possible de prévoir une atténuation phonique par l'emploi d'absorbants, amortisseurs par résonance ou autres dispositifs. Ces méthodes sont dans bien des cas efficaces, mais leur mise en œuvre, généralement coûteuse, est toujours un peu aléatoire en raison des nombreuses incertitudes que présentent leur calcul. Le meilleur et le plus sûr moyen d'obtenir une installation silencieuse est d'éviter au maximum la production de bruit au ventilateur.

Pour un ventilateur fonctionnant dans des conditions déterminées de débit et de pression, il existe un spectre de puissance sonore approximatif exprimé en dB (décibel) (figure VI.a1). A partir de cette donnée, il est possible de calculer pour une installation le spectre approximatif de pression acoustique pondéré (en dBA). Le tableau VI.a1 fournit quelques repères en matière de niveaux de pression acoustique pondérés.

Situation	Niveaux de pression acoustique pondérés	Critères isophoniques ISO
Régnant au voisinage de diverses sources sonores		
. murmure	20 dBA	-
. conversation calme	30 dBA	-
. zone résidentielle calme	30 - 40 dBA	-
. conversation moyennement bruyante	50 dBA	-
. usine bruyante	90 dBC	-
Seuil de douleur (à 1 000 Hz)	120 dB	-
Niveaux admissibles dans divers locaux		
. local insonorisé	10 dBA	0
. salle de conférence	30 à 40 dBA	20 à 30
. hôtel	35 à 45 dBA	25 - 35
. maison calme	40 à 45 dBA	35 - 40
. restaurant	50 à 60 dBA	40 - 50

Tableau VI.a1

Exemples de niveaux de pression acoustique pondérés
(Source : formulaire Pont-A-Mousson)

Les problèmes de nuisance sonore concernent les installations de tailles importantes à proximité d'habitations, de foyers urbains. Un choix judicieux (matériel, emplacement), associé à une conception optimale (taille des conduits, amortisseurs, chicanes), limiteront les risques de plaintes.

12. Performances

Deux grands types de ventilateurs sont proposés (tableau VI.a2)

Pour chacun des deux types, les fabricants proposent une gamme très large offrant de nombreuses variantes, tel le nombre de pales. Pour de petites installations (armoires, faible chargement, petit caisson) et petites productions, on préférera les hélicoïdes. Par contre, dès que l'on a un séchoir à gros chargement (hauteur, plantes à forte densité) avec des circuits de distributions (entraînant des pertes de charges), on choisira des centrifuges.

13. Pertes de charge

Ce sont des chutes de pression entre deux points, dues à des "freins" dans le circuit aéraulique :

- à l'aspiration
 - . grilles, filtres,
 - . coudes,
 - . virole,
 - . générateur,
 - . clapet de réglage,
- au refoulement
 - . section et longueur du conduit,
 - . batterie électrique,
 - . échangeur,
 - . coudes,
- pour le caisson
 - . grille,
 - . répartisseurs,
 - . parois et leurs formes,
- pour la matière végétale
 - . hauteur de chargement,
 - . parties végétales (feuilles, tiges, ...) et type de végétal (romarin, menthe, sauge,...).

Difficiles à estimer, elles peuvent se chiffrer par des calculs complexes ou mieux, par des mesures.

En pratique, pour les PAM on compte :

- . 40 à 80 mm CE/mètre de hauteur de tas,
- . 10 à 15 mm CE pour les grilles,
- . 3 à 5 mm CE pour les filtres,
- . x mm CE pour conduits et répartisseurs.

Exemples :		Pertes de charge
- menthe	hauteur du tas : 0,5 m x 60 mm CE =	30 mm CE
	+ circuit	20 mm CE
	TOTAL	50 mm CE
- romarin	hauteur du tas : 2 m x 40 mm CE =	80 mm CE
	+ circuit	20 mm CE
	TOTAL	100 mm CE

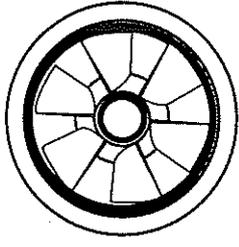
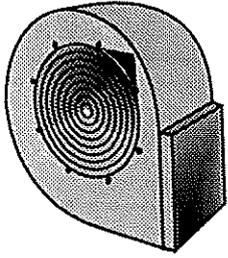
Type de ventilateur	Helicoïde ou Axial	Turbine ou Centrifuge
Caractères		
Investissement	-	jusqu'à 2 à 3 fois plus cher que l'axial
Forme	 <p>peu encombrant, léger</p>	 <p>volumineux et lourd</p>
Principe	Une ou plusieurs hélices tournent dans une virole cylindrique. La direction du fluide est parallèle à l'axe de rotation.	Le fluide pénètre dans la roue parallèlement à l'axe de rotation, et en ressort sensiblement radialement
Pression	faible	importante
Rendement	< 80 %	≤ 85 %
Puissance absorbée	-	légèrement inférieure à l'axial
Vitesse de rotation	importante (souvent ≥ 1 500 Tpm*), usure plus rapide en milieu chargé de poussières. * tours/mn	plus faible (≤ 1 500 Tpm*) * tours/mn
Vitesse périphérique	-	plus faible que l'axial
Niveau sonore	-	plus faible que l'axial
Allure des courbes de fonctionnement	Maximum très prononcé. Utilisation avec des paramètres fixes.	Maximum peu prononcé, en variant la vitesse, on modifie les paramètres (Q, p) sans trop changer les rdts.

Tableau VI.a2

Tableau comparatif des deux types de ventilateurs

Plus le système est complexe, plus il y a création de ces pertes de charge (angles, multi-caissons, échangeurs, recyclage). Afin de les éviter, des efforts sur la

conception sont nécessaires, notamment en ce qui concerne les conduites d'air dans la limite de l'encombrement et de l'investissement possibles.

14. Achat d'un ventilateur

141. Choix des performances

L'achat peut être réalisé sur le marché de l'occasion, mais il est difficile de tomber sur l'idéal en fonction des paramètres de séchage définis pour une installation donnée. Il est cependant toujours possible à partir de la fiche signalétique d'un appareil d'occasion,

d'obtenir les courbes de fonctionnement correspondantes auprès du constructeur. Ces courbes de fonctionnement (figure VI.a1), propres à chaque appareil, combinent plusieurs variables : débit, pression, puissance absorbée, rendement et puissance sonore. Elles permettent pour un ventilateur, à partir de paramètres définis (débit et pression), de connaître ses performances.

Exemple de lecture :

Paramètres définis : débit (Q) = 11 666 m³/h
pression statique = 50 mm CE

Lecture sur la figure VI.a1.

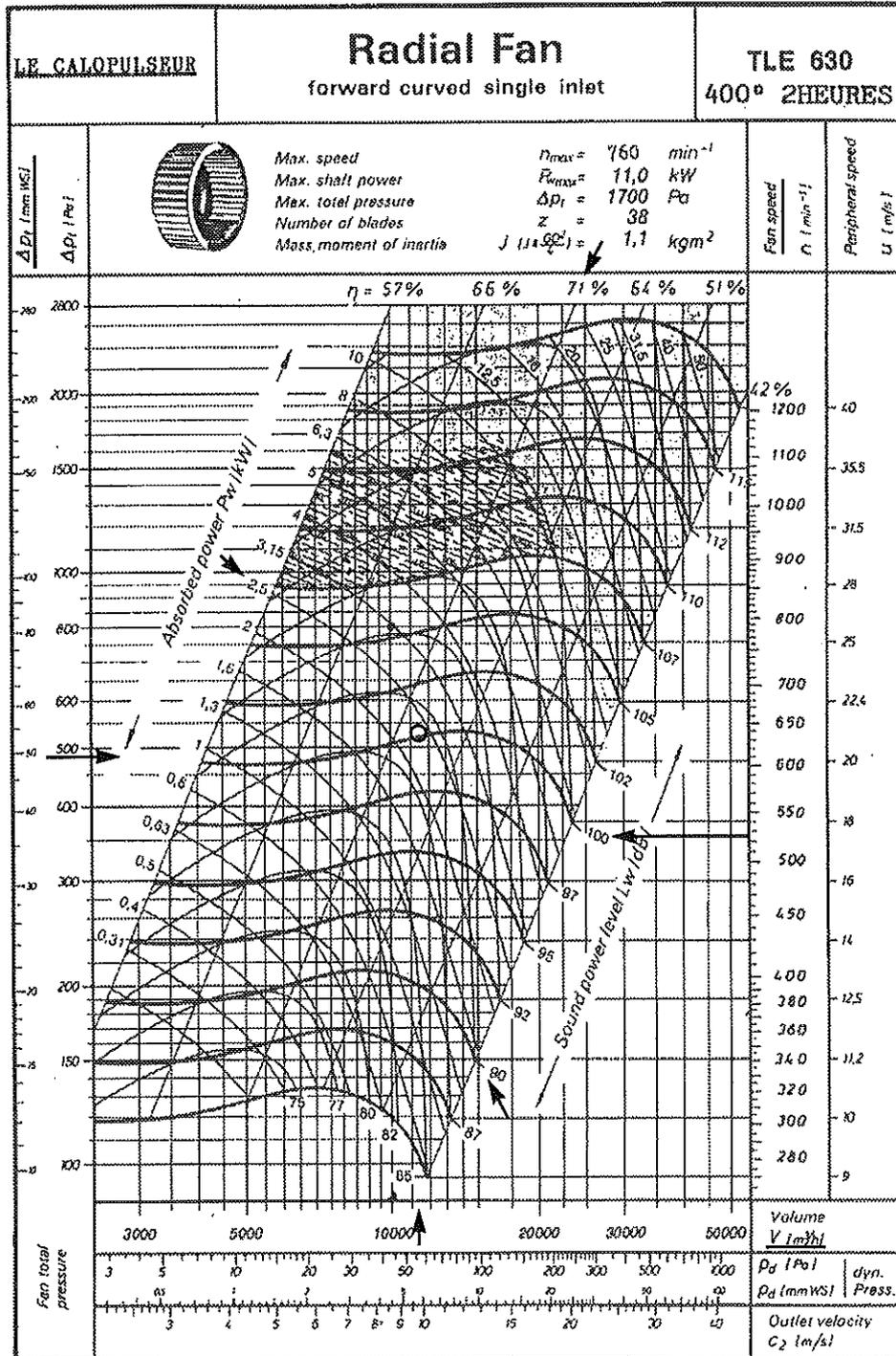


Figure VI.a1
Courbes de fonctionnement pour un ventilateur centrifuge
(source : le Calopulseur)

Réponses :

- . vitesse rotation (*Fan Speed*) : 540 tours/mn
- . puissance absorbée (*Absorbed power*) : 2,5 kW
soit 3,4 CV
- . rendement (η) : < 71 %
- . puissance sonore : 90 dB

142. A quel prix ?

Pour des caractéristiques de base identiques (débit, pression), les prix sont très variables suivant la conception, le type, les matériaux, les options et les marques.

Parmi les principales marques, on peut citer :

- SOLIVENT-VENTEC,
- VENT-MECA,
- AEIB,
- LE CALOPULSEUR.

Quelques prix sont rapportés dans le tableau VI.a3.

Performances	Prix avec moteur	
	Axial	Centrifuge
Débit 10 000 m ³ /h . pression 35 mm CE . pression 50 mm CE	4 925 F 3 750 F	6 280 F 7 680 F
Débit 30 000 m ³ /h . pression 60 mm CE	10 065 F	14 925 F

Tableau VI.a3
Exemples de tarif sur devis (HT, 1992)

2. LES CONDUITES D'AIR

Les conduites ou gaines acheminent l'air vers le séchoir. Leur taille et forme influencent la qualité de répartition (homogénéité) de l'air et le niveau des pertes de charge.

En règle générale, plus le conduit sera large :

- moins il y aura de bruits, de perte de charge,
- plus coûteuse et plus encombrante sera l'installation.

La circulation du fluide est souvent gênée par la présence «d'accidents» créant des déséquilibres, des chutes de performance.

21. Côté aspiration

A l'aspiration, la présence «d'accidents» ou un profil de vitesse non homogène, entraîne une chute des caractéristiques du ventilateur.

La giration de l'air à l'entrée du ventilateur

Une pré-giration (rotation dans le même sens que la roue) produira une chute des caractéristiques du ventilateur ; une contre-giration (rotation en sens inverse de la roue) provoquera un accroissement de la puissance absorbée par le ventilateur, (figure VI.a2). La correction de ce tourbillon se fera par la mise en place d'aubes directrices en amont ou dans les coudes (figure VI.a3). La perte de charge de ces aubages devra être ajoutée à la perte de charge du circuit.

Deux autres solutions permettent d'éviter cet inconvénient :

- l'utilisation d'un inclineur monté sur l'ouïe d'aspiration du ventilateur,
- l'adaptation de capots d'aspiration parfaitement dimensionnés.

Une vitesse d'air non uniforme à l'aspiration

Ce défaut est généralement provoqué par la présence d'un coude à l'entrée du ventilateur qui produit une vitesse d'air plus importante à l'extérieur du coude qu'à l'intérieur (figure VI.a4).

Pour remédier à ce phénomène, il est nécessaire :

- soit d'éloigner le coude de l'entrée du ventilateur d'une distance L minimum égale à 5 fois le diamètre d'aspiration du ventilateur,
- soit de placer des ailettes dans le coude en maintenant celui-ci à une distance L du ventilateur, L minimum étant égale à 2 fois le diamètre d'aspiration,
- soit d'augmenter le diamètre de la tuyauterie d'aspiration et donc le rayon du coude et de faire suivre celui-ci d'un convergent à l'entrée du ventilateur. Le diamètre de la tuyauterie devra être de l'ordre de 1,5 fois le diamètre d'aspiration du ventilateur.

Le défaut d'alimentation du ventilateur peut également être provoqué par la présence d'un obstacle en face de l'aspiration : obstacle à éliminer.

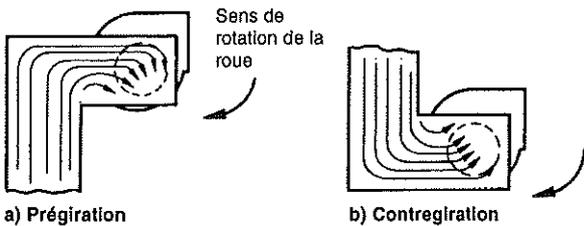


Figure VI.a2

Raccordement produisant une giration
(Source : Solyvent - Ventec)

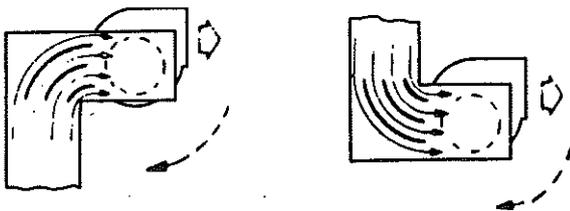


Figure VI.a3

5 aubes directrices dans le coude
contrecarrant la rotation à l'aspiration du ventilateur
(source : Solyvent - Ventec)

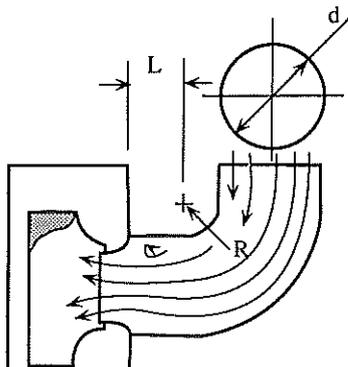


Figure VI.a4

Ventilateur avec coude à l'aspiration
(source : Solyvent - Ventec)

Pour les séchoirs à PAM, ce problème concerne le raccordement du brûleur en amont (figure VI.a5).

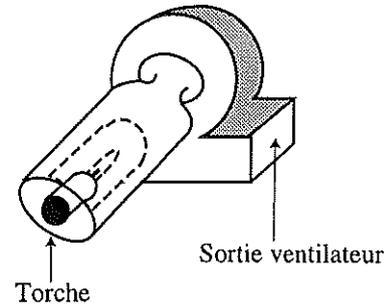


Figure VI.a5

Ventilateur avec brûleur en amont

22. Côté refoulement

Le refoulement crée une répartition irrégulière qui s'estompe sur la longueur de la gaine (figure VI.a6)

Le raccordement d'un «accident» (coudes, volets, piquages) immédiatement au refoulement provoque des pertes de charge très élevées. Avant l'implantation de ces accessoires, il est nécessaire de respecter une distance «Le» (figure VI.a7) égale au minimum pour un ventilateur centrifuge à :

$$Le = 3 \times \sqrt{\frac{4(a \times b)}{\pi}}$$

Exemple :

pour une section de 0,5 x 0,5 m

$Le \geq 1,7 \text{ m}$

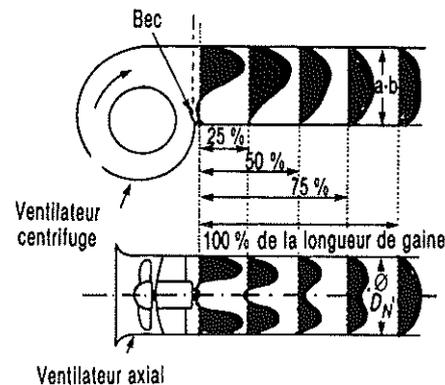


Figure VI.a6

Evolution du profil en sortie de ventilateurs centrifuge et hélicoïde
(source : Fläkt)

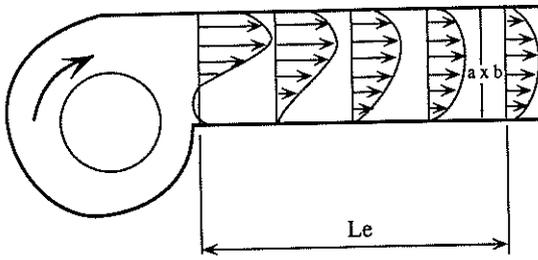


Figure VI.a7

La distance «Le» (ventilateur centrifuge)
(source : Solyvent - Ventec)

S'il n'est pas possible de respecter cette distance, une autre solution peut être l'adoption d'un diffuseur (figure VI.a8), les accessoires étant montés après le diffuseur. L'emploi de grilles de répartition limite les perturbations mais entraîne des pertes de charge.

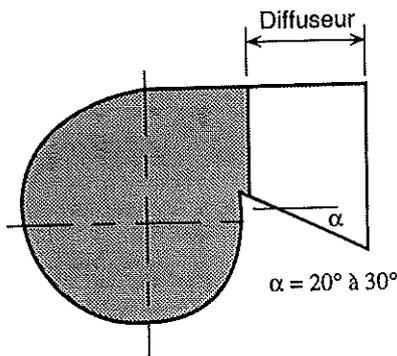
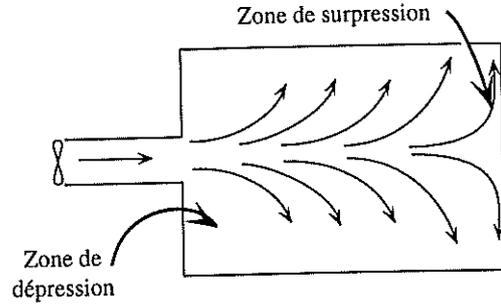


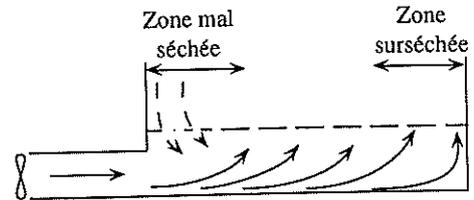
Figure VI.a8

Le diffuseur

(source : Solyvent - Ventec)



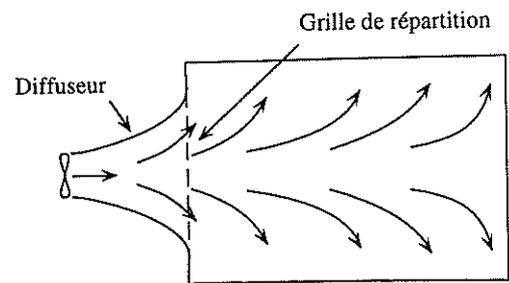
a) vue de dessus



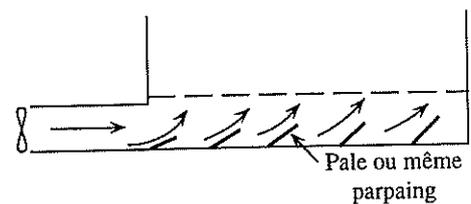
b) vue de profil

Figure VI.a9

Approche de la circulation de l'air en caisson avec un raccordement droit



a) vue de dessus



b) vue de profil

Figure VI.a10

Quelques solutions simples pour une ventilation plus homogène du produit à sécher

23. La répartition de l'air soufflé

C'est en caisson que l'on rencontre le plus de problème. Généralement le raccordement est simple (figure VI.a9).

L'emploi d'un cône ou diffuseur, éventuellement d'une grille de répartition et de pales à l'intérieur, (figure VI.a10) limite à moindre coût les défauts présentés ci-dessus.

3. CONCLUSION

La partie aéraulique est bien souvent négligée par manque de connaissances et de moyens. Pourtant, les expériences montrent bien que ces conséquences sont coûteuses en pénibilité (brassages) et en qualité de séchage (développement de moisissures en zone

humide, retard de séchage). Des efforts réalisés au moment de la conception pourront en limiter les effets. Au niveau des estimations des paramètres (débit, pression) nécessaires, il semble préférable de les surévaluer afin d'atteindre les objectifs.



Ventilation - Chauffage

**Irrigation
Aspersion et Goutte à Goutte**

Serres - Tunnels

**Z.A.
Route de la Loire
49630 MAZE**

**Tél : 41-80-68-20
Fax : 41-80-23-34**

Deuxième partie : les éléments thermiques



1. INTRODUCTION

Ce sujet est très vaste. En effet, les sources d'énergie et leurs modes d'exploitation sont nombreux.

Le choix d'un système repose sur plusieurs paramètres :

- la qualité recherchée,
- le volume traité,
- la valeur ajoutée dégagée par le produit séché,
- la capacité financière d'investissement,
- le climat.

Les résultats obtenus sur ces cinq points, en fonction des différents générateurs, sont très variables.

2. L'EXPLOITATION DU SOLAIRE

21. Introduction

Contrariées par des notions de rentabilité, les solutions solaires sont pourtant nombreuses.

Des organismes spécialisés tels que SOLAGRO, CEDER, réalisent des études et dossiers.

Les collectivités locales encouragent parfois les démarches, études et réalisations à l'aide de subventions.

L'ADEME (ex-AFME) peut réaliser les préétudes gratuitement.

Parmi les techniques les plus simples et les plus anciennes, on peut noter le séchage :

- au champ (ex. : gentiane, thym, lavande, sauges),
- en grenier (ex. : tilleul, verveine),
- en séchoirs naturels (ex. : tabac brun, fleurs en bouquet).

A l'heure actuelle, on peut citer des essais et réalisations plus élaborés tels que :

- serres,
- capteurs toitures,
- boudins noirs,

et leur variantes.

22. Fanage au champ

C'est la manière la plus simple, la plus économique mais aussi la plus dégradante.

Le produit est traité comme un fourrage :

- fauche,
- endainage,
- battage ou conditionnement (bottes, balles rondes).

Ceci induit des pertes au champ :

- perte de couleur,
- perte de feuilles, de fleurs,
- augmentation de la charge microbienne,
- transformation et perte de principes actifs.

Réalisée avec de gros volumes, cette pratique est plutôt réservée à des produits ne requérant pas une qualité visuelle primordiale (extraction).

Il faut également compter avec les risques de pluie.

Remarque : un essai de préfanage au champ (avec finition en séchoir) sur menthe poivrée fut réalisé en 1992 par l'iteipmai. Il a permis de conclure que la conduite en préfanage (jusque 3 jours) :

- n'entraînait pas de perte de rendement en huile essentielle,
- n'entraînait pas de modification notable du profil aromatique,
- conduisait à une mauvaise qualité apparente sur feuilles entières (vert marron à noir) (photo 1, planche 1).

23. Utilisation de capteur

231. Le grenier

Il existe de nombreuses pratiques dans le Sud et Sud-Est de la France. La technique la plus ancienne est le séchage sous toiture, en vrac (tilleul), en bouquet (fleurs, mélisse), sur claies (feuilles mon-dées).

Peu compliquée et peu exigeante en investissement, elle nécessite de la manutention, de la surface et du temps. Il faut bien souvent une semaine pour sécher.

232. La serre

Une serre est souvent libre en été et peut servir de capteur sans surcoût énorme (figure VI.b1).

Face à l'effet de serre (film transparent) combiné avec l'effet de corps noir (bâche noire au sol), le rendement en captation peut atteindre 25 à 30 %.

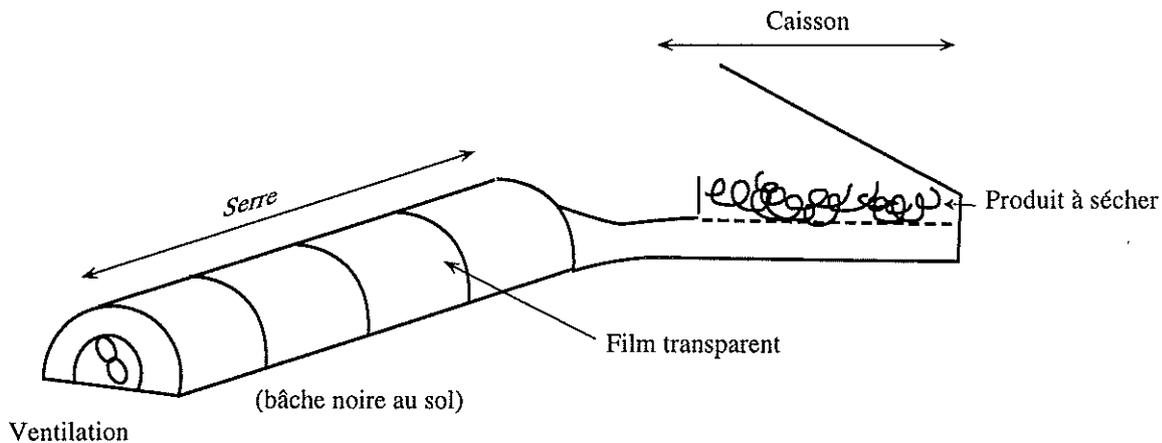


Figure VI.b1
Exemple de capteur serre

233. Le « boudin noir »

Sur le même principe que la serre, on installe un conduit noir de gros diamètre à l'extérieur. Les essais menés par le CEMAGREF traduisent un gain de température élevé mais ce système reste peu pratique : place occupée, prise au vent (figure VI.b2).

Exemple : Essai mené à Milly la Forêt en 1981 :

- longueur du boudin : 150 m ; diamètre : 1,5 m,
- période : août/septembre (météo variable),
- énergie captée en moyenne : de 117 à 29 kJ/m²/h selon le temps,
- gain de température moyen : Δt : de 9 à 2,4°C selon le temps.

Si les résultats sont intéressants dans le milieu de la journée avec une bonne luminosité, en revanche le rendement est médiocre par temps couvert, et cette énergie n'est utilisable qu'environ 10 heures par jour.

Pour un rendement maximum, le débit du ventilateur et le dimensionnement du capteur doivent être accordés.

Sur le plan économique, ce capteur présente un seuil d'intérêt déterminé par les besoins en séchage, soit le nombre de jours d'utilisation et les volumes séchés par jour (surface du séchoir). Ce seuil d'intérêt se calcule en tenant compte d'une part, du coût de la gaine et d'autre part, des économies réalisées (par conversion de l'énergie récupérée en kg de propane par exemple).

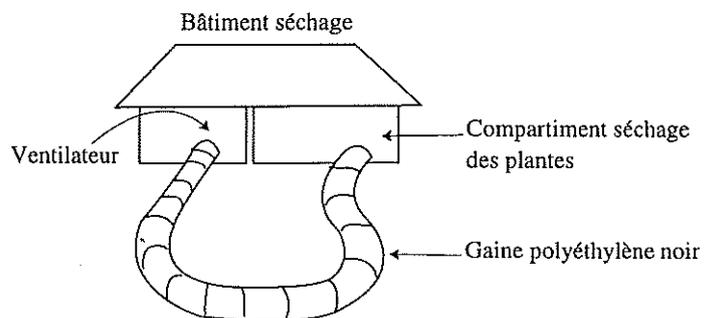
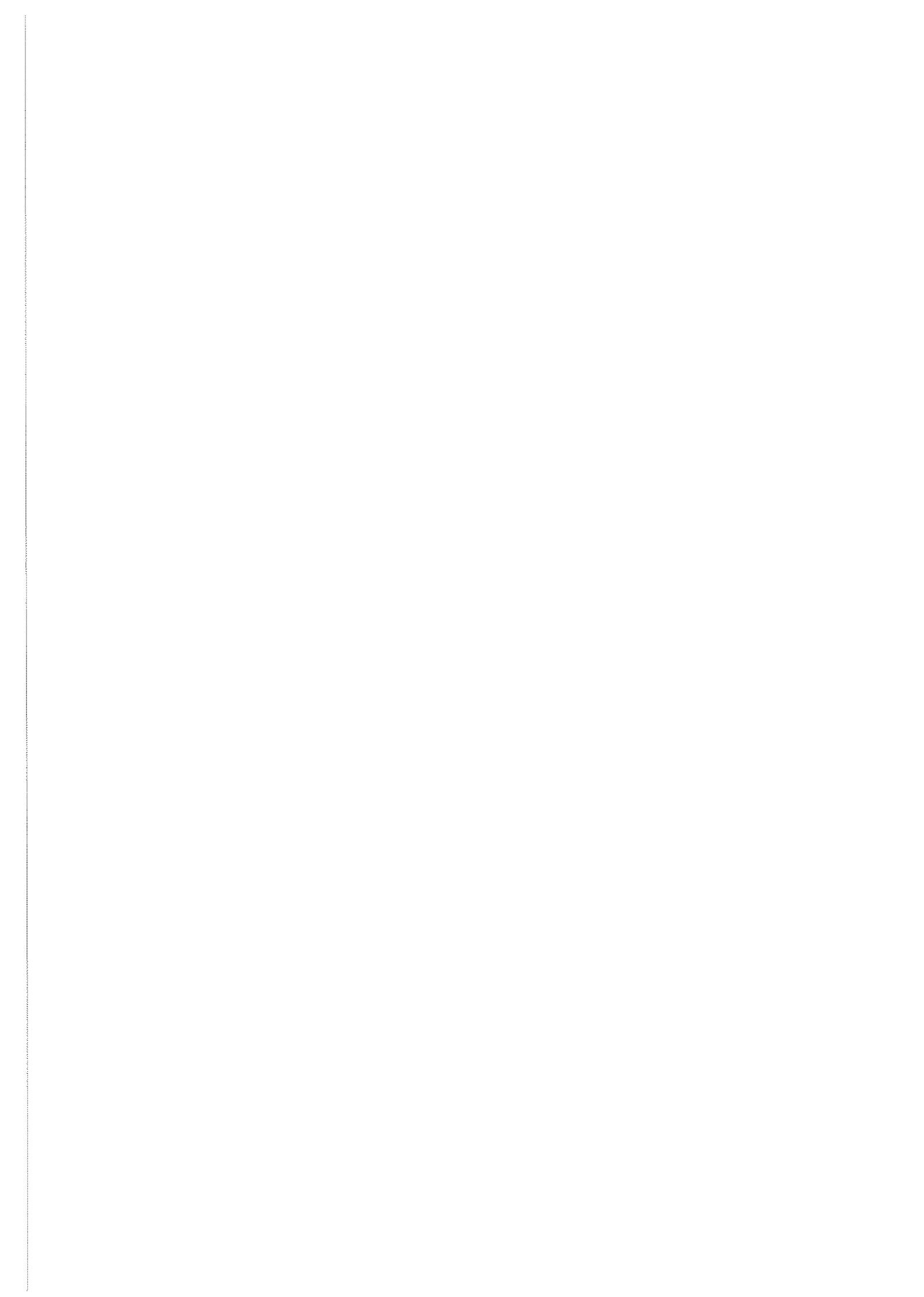


Figure VI.b2
Principe du séchage avec gaine noire



Traitements	Feuilles entières
T-0 Sans préfanage	Feuilles vertes Très belle qualité de produit
T-1 1 jour de préfanage	Feuilles vertes, qq feuilles noires Belle qualité de produit
T-2 2 jours de préfanage	Feuilles vertmarron à noir Mauvaise qualité
T-3 3 jours de préfanage	Feuilles vert-marron à noir Très mauvaise qualité

Photo 1 (photo iteipmai)
 Aspect visuel de feuilles entières de menthe poivrée avec préfanage
 (iteipmai, 1992)



Exemple : suite à l'essai de 1981 à Milly La Forêt, une approche économique fut menée en 1984 (iteipmai) avec les paramètres suivants :

- conversion de l'énergie récupérée en kg de propane,
- objectif d'un retour sur investissement à un an,
- deux diamètres de boudin (ϕ : 1 m et ϕ : 1,50 m).

Les résultats rapportés par la figure VI.b3 concluent à un intérêt pour des séchoirs relativement importants fonctionnant régulièrement.

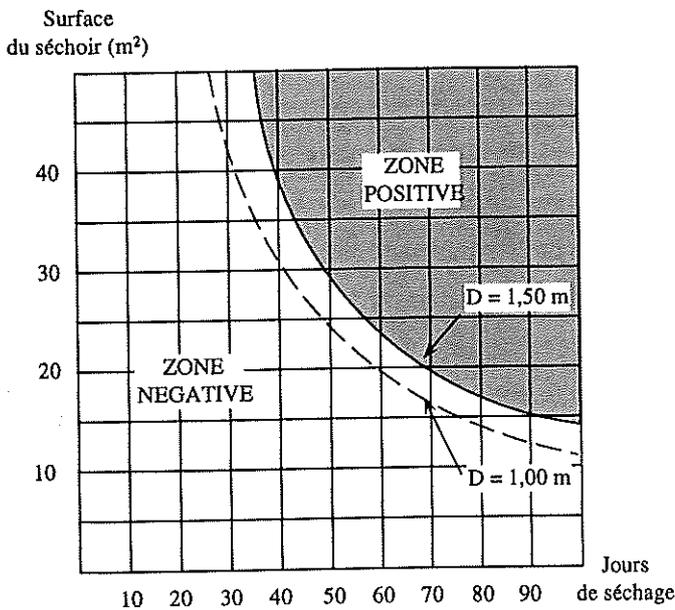


Figure VI.b3
Détermination de l'intérêt du capteur solaire en fonction de la durée annuelle d'utilisation du capteur et le dimensionnement du calsson (source : iteipmai, 1984)

234. Le mur

Une façade orientée au Sud permet de capter des calories supplémentaires. Cependant, l'angle très fermé des rayons incidents sur le mur, en comparaison avec celui pratiquement perpendiculaire obtenu sur les toitures, ne permet pas de bon rendement.

235. La toiture

Solution étudiée pour le séchage du foin de montagne en grange, elle est de plus en plus utilisée pour les plantes. L'énergie est reçue sur la toiture orientée (capteur), récupérée par une veine d'air et acheminée au séchoir (figure VI.b4).

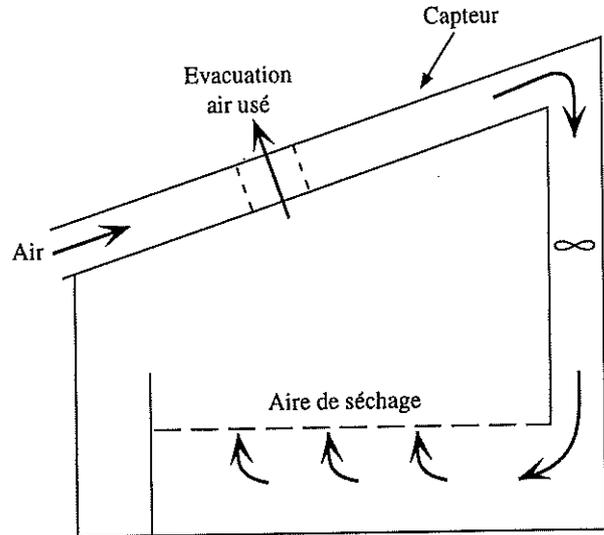


Figure VI.b4
Principe du séchage avec capteur sur toit

24. Les types de capteurs

241. Capteur à simple effet ou à effet de corps noir

L'énergie est récupérée sous la couverture exposée, par un flux d'air. La couverture de la toiture des bâtiments constitue l'absorbeur. Il suffit d'isoler entre les pannes pour constituer un capteur solaire (figure VI.b5). Ce principe est économique à réaliser, mais les pertes par réflexion, convection extérieure (vent) affectent le rendement.

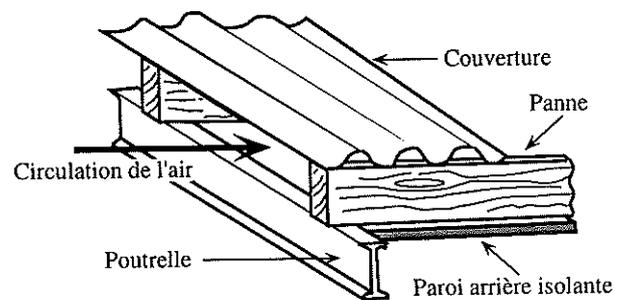


Figure VI.b5
Capteur toiture à effet de corps noir (source : CEDER)

242. Capteur à double effet ou à effet de corps noir plus effet de serre

On rajoute au principe du capteur à simple effet, un film transparent à effet de serre (figure VI.b6).

Le rayonnement est mieux exploité car les infrarouges (émis par le capteur) sont piégés par effet de serre, ainsi les pertes sont limitées. Le montage et le coût du capteur sont plus importants.

Ce type de capteur est intéressant lorsque la surface du capteur est trop limitée, ou en site très venté, ou encore pour des séchages tardifs d'automne.

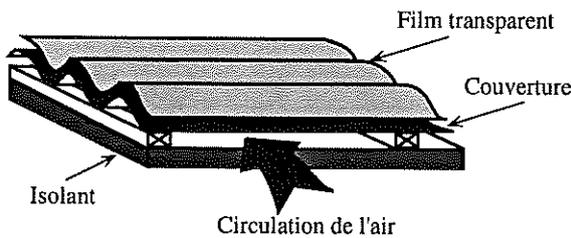


Figure VI.b6
Capteur avec effet de serre
(source : SOLAGRO)

243. Conception des capteurs

Nature de la couverture

C'est la partie destinée à être chauffée.

Différents types de couvertures sont utilisables comme absorbeur :

- tôles galvanisées oxydées non brillantes,
- tôles en bacs acier prélaqués de couleur sombre,
- toitures en Fibrociment qu'il convient impérativement de teindre d'une couleur foncée, etc...

La qualité d'une couverture est appréciable par le biais de son coefficient d'absorption et de réémission (tableau VI.b1).

On recherche un coefficient d'absorption élevé. Celui-ci est dépendant de la nature et de la couleur du matériau.

La rugosité et la couleur sombre favorisent l'absorption. La couverture en s'échauffant, perd une part de l'énergie captée par rayonnement infrarouge (tableau VI.b1).

Matériaux	Abs So	E _{IR}
Peinture noire	0,98	0,98
Peinture blanche (ZnO)	0,28	0,90
Aluminium anodisé	0,14	0,84
Fer	0,44	0,08
Tôle galvanisée neuve	0,65	0,28
Tôle galvanisée oxydée	0,8	0,13
Fibrociment	0,6	0,95
Echantillon amiante ciment (Eternit)		
. naturelle	0,52	0,91
. cerame	0,95	0,91
. ocre	0,58	0,85
. vert	0,91	0,85
. jade	0,92	0,85
. rouge-brun	0,89	0,85
. naturel plat	0,48	0,83

Tableau VI.b1
Coefficient d'absorptivité du spectre solaire (Abs So) et d'émissivité dans l'infrarouge lointain (E_{IR}) pour différents matériaux

Une couverture idéale serait :

- noire et rugueuse pour la face exposée au soleil (dessus),
- blanche et lisse pour la face côté veine d'air (dessous).

La couleur noire présente un très fort coefficient d'absorptivité du spectre solaire. De plus, la surface rugueuse limite les déperditions en freinant en surface les mouvements d'air.

L'isolant

On utilise, suivant les contraintes du marché, le matériau le moins coûteux ou le plus facile à mettre en œuvre.

Exemples :

- panneaux de particules de bois (aggloméré),
- polystyrène extrudé.

Il faut que le matériau résiste à des températures de l'ordre de 60 à 80°C et possède une bonne tenue à l'humidité.

Le film transparent

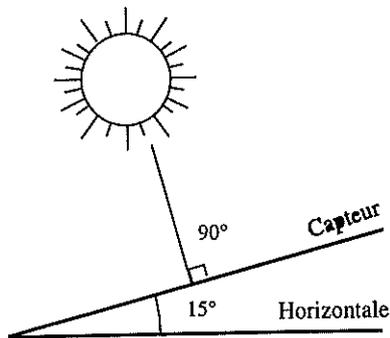
Il est conseillé d'utiliser des matières plastiques à effet de serre qui gardent leur transparence dans le temps.

Exemple : du polycarbonate.

On peut utiliser du plastique pour serre, facile à se procurer et relativement peu cher, mais qu'il faudra renouveler assez souvent (entre 3 et 5 ans).

L'exposition

L'orientation plein sud et l'exposition sous un angle de 15°C par rapport à l'horizontale sont les conditions les plus favorables. Plus les rayons incidents seront proches de la perpendiculaire par rapport à la surface du capteur et meilleur sera le rendement.



Épaisseur de la veine d'air (espace entre la couverture et l'isolant).

Il faut rechercher un compromis entre l'extraction maximale des calories et la création d'un minimum de pertes de charges dans le circuit, sachant que plus la vitesse est faible, plus les pertes de charge seront réduites. On pourra rechercher une vitesse voisine de 2 à 5 m/s.

L'épaisseur de la veine d'air peut être calculée avec la formule suivante (SOLAGRO, 1989) :

$$e = \frac{D}{V \times L \times 36}$$

e : épaisseur de la veine d'air en cm,

D : débit du ventilateur en m³/h,

V : vitesse de l'air en m/s,

L : largeur du capteur (perpendiculaire au sens de circulation de l'air) en m.

On veillera à cloisonner la veine d'air pour une circulation homogène de l'air

25. Équipement à la sortie du capteur :

- Une gaine de collecte pour récupérer l'air réchauffé dans le capteur, installée en bout de toiture;
- Une gaine de reprise achemine ensuite l'air jusqu'au ventilateur. On évitera les coudes (pertes de charges) ; dans le cas contraire on y placera des aubes directionnelles.
- Le débit du ventilateur est déterminé par les besoins de séchage, et la pression à fournir dépend des pertes de charge dans l'installation et dans le tas de plantes. Il faudra veiller à l'absence de fuites dans l'installation.

26. Caractéristiques de plusieurs réalisations

Les quelques réalisations, présentées dans le tableau VI.b2, permettent d'apporter quelques données pratiques sur les capteurs solaires.

Les différences de région, altitude, durée et période d'observation notamment, n'autorisent pas une réelle comparaison. Il serait de plus intéressant de connaître le montant du gain énergétique ainsi que le retour sur investissement de ces diverses constructions.

On relève des différences de rendement et d'investissement importantes entre les différentes solutions (tableau VI.b3).

Principe	Boudin	Serre	Toiture avec simple effet	Toiture avec effet de serre
Rendement (%) de captation	30-38	23-26	25-50	45
Investissement	faible	faible	moyen	élevée

Tableau VI.b3

Comparaison des rendements et investissements par principes de captage

Si le capteur toiture requiert l'investissement le plus élevé, il permet une production d'énergie élevée et une meilleure longévité comparé aux serres maraîchères.

Principe	Boudin	Serre maraîchère	Serre maraîchère	Toiture effet de serre	Toiture simple effet	Toiture simple effet
Nature capteur	polyéthylène noir ø 1,5 m ; L : 450 m	bâche transparente + polyéthylène noir au sol	bâche transparente + plastique noir au sol	Fibrociment noir + survitrage	bac acier brun	Fibrociment noir
Surface (m ²)	375	321	168	475	290	256
Débit air (m ³ /h)	34 000	44 000	10 000	29 000	32 400	27 500
Vitesse air (m/s)	6,14	1,8	0,2	2,9	2,25	3,8
m ³ air/m ² capteur/h	104	135	56	118	116	107
Rendement %	37,5	26	23	45	49	26,5
Energie récupérée Wh/m ³ Δt (°C)	1,8 6	1,1 3,6	1,4 4	2,2 7,5	2,4 8,3	2,4 8,1
Energie récupérée kWh/h	61	48	14	65	78	66
Capteur Investissement (F) Mat. + autoconstruction	3 800	8 350	8 250	44 500	22 000	13 000
Lieu (altitude)	Hte Savoie (450 m)	Hte Savoie (650 m)	Drôme (100 m)	Htes Alpes (900 m)	Drôme (1 100 m)	Savoie (600 m)
Usage	foin	foin	PAM	foin	foin	foin
Période observation (1982)	15/5 au 19/7	15/5 au 30/6	27/9 au 10/10	juin et sept.	5/7 au 15/7	22/6 au 9/9

Tableau VI.b2
Caractéristiques de quelques systèmes grandeur nature en fonctionnement
(source : BCMEA Rhône-Alpes)

Le choix d'un système portera sur :

- le prix d'achat ou de réalisation,
- la conception,
- la solidité, tenue au vent et à la neige,
- la longévité,
- l'encombrement,
- le gain envisageable,
- le retour sur investissement,
- les frais annuels (main d'œuvre plus entretien).

27. Conclusion

L'exploitation du soleil sous nos climats nécessite un appoint. En effet, l'utilisation d'une source énergétique complémentaire (électricité, FOD, ...)

permet de pallier au manque de rayonnement solaire la nuit, et les jours couverts et pluvieux. En début de séchage surtout, il est impératif d'utiliser un air à fort pouvoir évaporatoire, donc suffisamment réchauffé. La valorisation d'une toiture, d'une serre, permet d'économiser l'énergie (combustible, électricité) nécessaire au réchauffage de l'air. En séchage classique (à partir d'une tonne de plante fraîche/jour), les solutions solaires sont encore limitées. Par contre, pour de petites productions, à valeur ajoutée forte, l'intérêt est motivé par des notions de qualité, d'autonomie. Le domaine du solaire est vaste, et des organismes spécialisés sont bien placés pour mener des études et conseiller des réalisations (Solagro, CEDER).

3. LES APPOINTS

De faible puissance, leur usage est destiné à réhausser la température de l'ambiance de quelques degrés pour :

- améliorer le pouvoir évaporatoire,
- combler un déficit thermique (nuit, début de séchage).

En pratique, ils sont installés pour de petites structures de type solaire ou utilisant un déshumidificateur.

Les types d'appoints généralement rencontrés, ainsi que des exemples d'utilisation, sont portés dans les tableaux VI.b4 et VI.b5. Ces petits générateurs offrent à moindre frais une sécurité dans des systèmes dépendant des conditions extérieures. L'intérêt est flagrant pour seconder le capteur solaire et optimiser les performances des petites pompes à chaleur. L'utilisation est toutefois réservée à de petites unités.

Type appoint	Avantages	Limites
Convecteur électrique	- réglable - peu encombrant - souple d'utilisation	- coûteux en consommation
Poêle (bois, charbon)	- économique	- imprécis - encombrant - évacuation fumée - alimentation
Petit générateur à gaz (type réchauffeur de serre, d'ambiance)	- relativement puissant - souple d'utilisation	- gaz de combustion

Tableau VI.b4

Les types d'appoints généralement utilisés

Type appoint	Puissance	Usage	Consom.	Invest.
Convecteur	1 kW	Armoire 20 m ³	1 kWh/h	300 F HT
Poêle à bois	11,5 kW	Enceinte à claie 30 m ³	3 kg bois/h	Récup.
Torche à gaz	35 kW	Caisson 20 m ² + solaire	3 kg gaz/h	≥ 6 500 F HT

Tableau VI.b5
Exemples d'utilisation

4. LES RESISTANCES

Ces équipements transforment l'énergie électrique en énergie thermique par phénomène de résistance. Techniquement, cette solution est très intéressante :

- aucun résidu (vapeur, produits de combustion),
- régulation très fine,
- approvisionnement continu.

Par contre, la batterie et sa régulation sont lourds à amortir. A moyenne échelle (séchage d'une tonne frais par jour), le réchauffage électrique exige un réseau spécial (150 A) et une partie aéraulique aux performances précises (figure VI.b7).

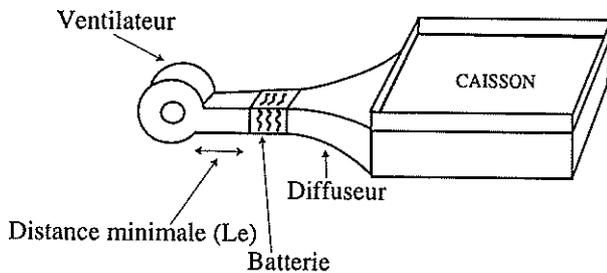


Figure VI.b7

Positionnement d'une batterie dans le circuit aéraulique d'un séchoir à caisson

Coût HT (1991 - 1992)

batterie : 100 à 200 F/kW installé

régulation : 100 à 400 F/kW installé

*Ex. : générateur 100 kW (PE ~ 30 kg d'eau/h)
20 à 90 000 F suivant régulation*

Type de résistance : blindées à ailettes (figure VI.b8)



Figure VI.b8

Résistance blindée à ailettes rectangulaires
(Source : Acim Jouanin)

Montage en section, étages (figure VI.b9)

- . par tranches en quinconces
- . avec régulation par étage

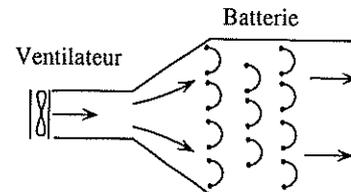


Figure VI.b9

Agencement des résistances dans la batterie

Malgré les efforts réalisés par EDF et les constructeurs de batteries, l'électricité n'est pas concurrentielle sur le plan économique avec les brûleurs à fuel ou à gaz. Cependant, les petits utilisateurs (cueillette, fleurs) y trouvent un intérêt pratique et qualitatif.

5. LES BRÛLEURS À COMBUSTION DIRECTE

(photos 2 et 3 - planche 2)

51. Généralités

A l'heure actuelle, les brûleurs sont les générateurs les plus utilisés en séchage car :

- les combustibles (gaz, fuel) sont bon marché (0,16 à 0,20 F/kWh),
- l'investissement reste raisonnable.

Coût HT du brûleur en combustion directe (1991-1992) :

- > 30 F/kW avec FOD de puissance installée avec régulation,
- > 60 F/kW avec GAZ de puissance installée avec régulation,

ex. : générateur 100 000 kcal (116 kW) à partir de 9 000 F HT en gaz, 5 000 F HT en fuel.

L'utilisation en combustion directe pose quelques inconvénients :

- eau de combustion (diminution PE),
- présence d'imbrûlés (surtout en fuel) (NO_x , SO_2 , SO_3),
- gaz de combustion (CO_2 , CO).

Mais sur le grand marché du sec, les normes et les acheteurs ne sont pas encore très regardants.

Pour certains cahiers des charges, la présence d'un échangeur peut être nécessaire, mais celui-ci affecte le rendement thermique, donc le coût du séchage.

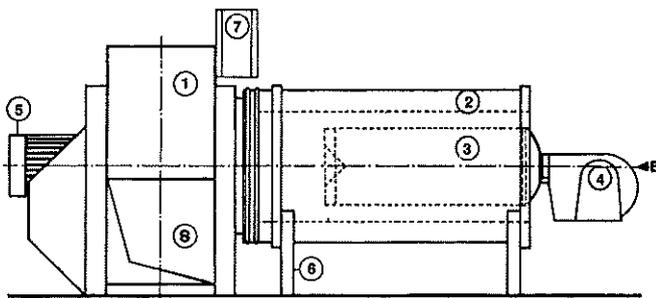
52. Montage

Avec ventilateur centrifuge (figure VI.b10)

Afin de ne pas gêner la combustion et de bénéficier d'une bonne répartition, le brûleur est monté sur l'aspiration à l'aide d'une virole.

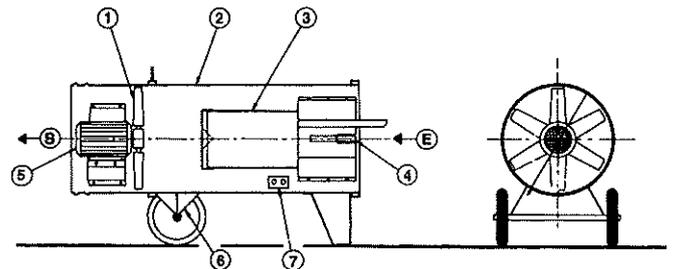
Avec ventilateur hélicoïde (figure VI.b11)

Généralement de puissance plus faible (surtout pression), le ventilateur axial est placé en aval du brûleur et dans la même gaine.



a) ventilateur centrifuge

- 1) ventilateur
- 2) corps de combustion
- 3) foyer inox
- 4) brûleur
- 5) moteur

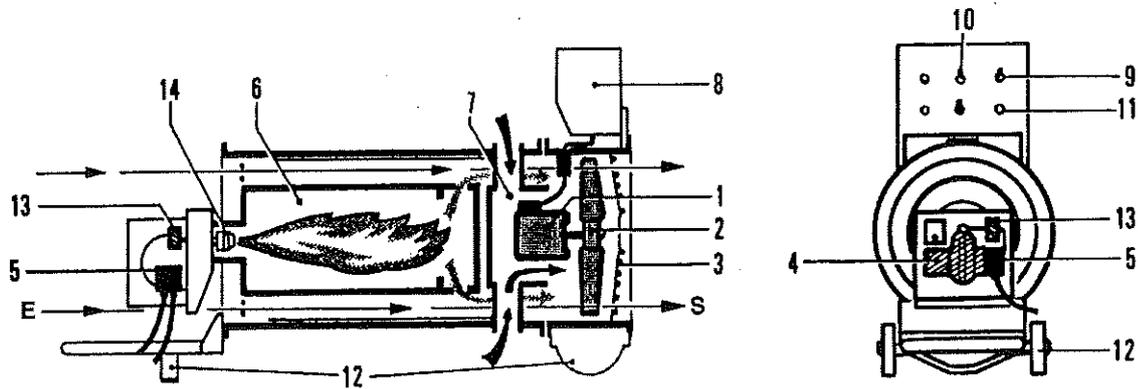


b) ventilateur hélicoïde

- 6) châssis (fixe ou mobile)
- 7) coffret de commande
- E) entrée d'air frais
- S) sortie d'air réchauffé

Figure VI.b10

Exemples de montage ventilateur + brûleur, FOD ou gaz
(source : MGE)



- | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 : moteur du ventilateur | 5 : pompe | 8 : coffret commande électrique | 13 : vanne électro -magnétique |
| 2 : roue hélicoïde alu | 6 : chambre de combustion | 9 : interrupteur M/A du brûleur | 14 : tête de combustion |
| 3 : grille de protection | 7 : caisson d'arrivée air frais | 10 : interrupteur M/A du ventilateur | E : entrée d'air frais |
| 4 : brûleur à fuel à pulvérisation | pour refroidissement du | 11 : fusibles et voyants | S : sortie d'air réchauffé |
| par moteur | moteur du ventilateur | 12 : chariot de transport | |

Figure VI.b11

Thermoportable de 52 500 à 130 000 kcal/h à combustion directe avec ventilateur à pales hélicoïdales (7 000 à 10 000 m³/h) de chez LAW (fonctionnement au fuel)

53. Fonctionnement et alimentation (tableau VI.b6)

	FOD	Propane	Gaz Naturel
Stockage	cuve classique	- bouteilles ou cuves en achat - location ou consigne	raccordement réseau GDF
Alimentation	par pompe	pression de stockage	pression du réseau GDF
Type de brûleur	à pulvérisation - mécanique - pneumatique		- atmosphérique - veine d'air - pneumatique
Régulation	mécanique : Δ pression de pulvérisation atmosphérique : électrovanne (Δ débit gaz) pneumatique : Δ débit d'air et de gaz		

Tableau VI.b6

Fonctionnement et alimentation des brûleurs suivant les combustibles

Pour le FOD, on rencontre principalement des brûleurs à pulvérisation mécanique.

Concernant le gaz, les brûleurs pneumatiques sont les plus utilisés. Précis et puissants, ils assurent une combustion optimale.

Le principe à veine d'air est principalement employé par de gros générateurs (exemple : 800 kW).

54. Régulation

Généralement commandé par un thermostat (sur sortie air), le brûleur peut avoir deux types de fonctionnement :

TOR : "tout ou rien", une allure

Mécanisme simple et bon marché, fonctionnant par intermittance, le "TOR" chauffe par à-coups.

TOP : "tout ou peu" ou à deux allures

Mécanisme plus coûteux apportant une polyvalence pour des usages divers (petite allure en été Δt < 15°C, grande allure en hiver Δt > 20°C).

Remarque : Le «modulable», un procédé MONARCH, permet une régulation souple. La combustion est meilleure et répond précisément aux besoins. Ce procédé rejoint la qualité de régulation des batteries électriques (thyristors).



Photo 2 (photo iteipmai)

Ensemble mobile MGE comprenant un générateur propane à combustion directe (brûleur torche) et un ventilateur hélicoïde

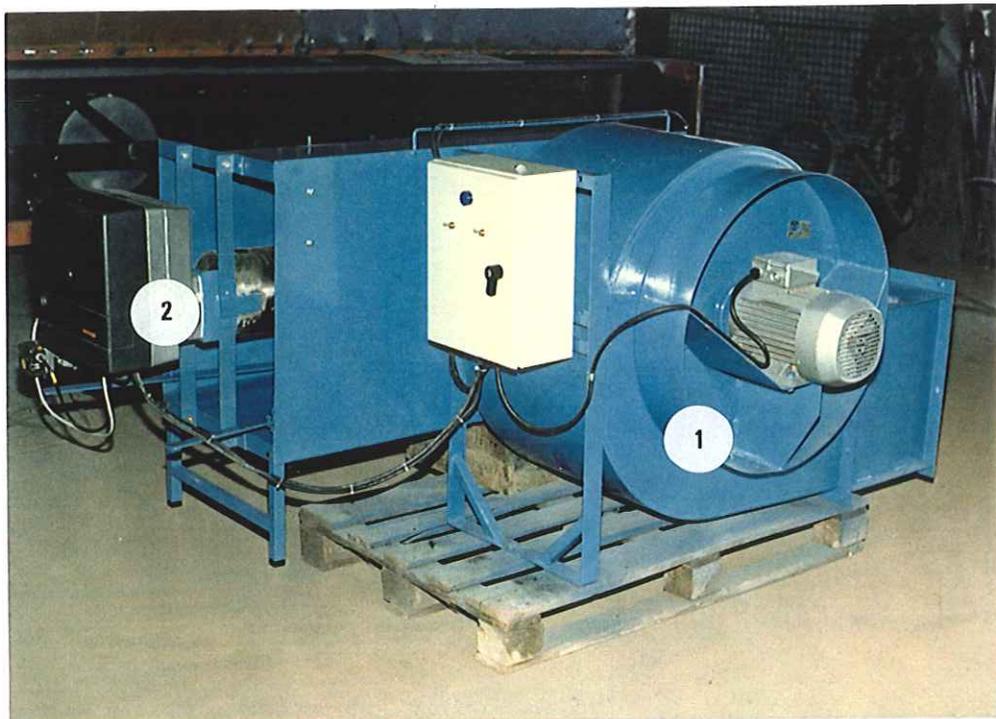
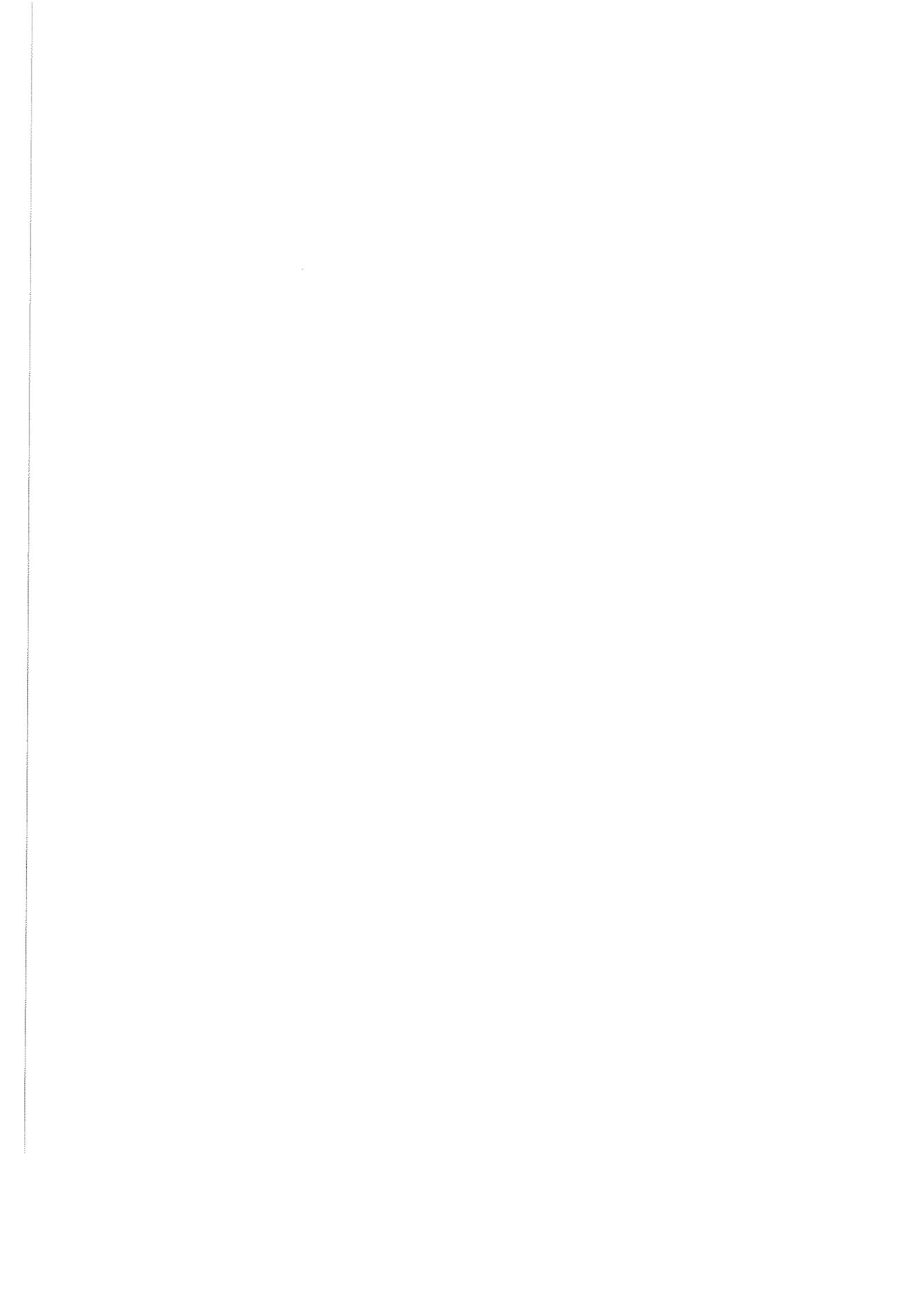


Photo 3 (photo iteipmai)

Ensemble ventilateur et générateur gaz AB250 (Alvan Blanch)
- débit ventilateur centrifuge ① : 13 000 m³/h
- brûleur ②, PC : 116 kWh
- thermostats de réglage et de sécurité



55. Sécurité

La notion de sécurité est parfois très importante dans la décision d'acquisition d'un générateur à combustion.

La sécurité est assurée par un détecteur de flamme et une veilleuse.

Une électrovanne coupe l'alimentation dès que :

- la température de l'air excède la consigne,
- la flamme s'arrête anormalement,
- le ventilateur s'arrête,
- la veilleuse s'éteint,
- la flamme dépasse la chambre de combustion.

Certains modèles sont dotés d'une alarme sonore ou visuelle.

La sécurité passe également par un entretien régulier du matériel.

56. Le marché des brûleurs

Souvent vendus en association avec le ventilateur, les brûleurs peuvent être achetés indépendamment (tableau VI.b7).

Puissance (P) kW	Régulation	Energie	Réf.	Invest. (INV) F	Coût du kW installé (INV/P) F
53-120	1 allure	FOD	WL20-A	4 890	41
	2 allures	FOD	WL20Z-A	7 050	59
70-300	2 allures	FOD	WL30Z-A	9 150	30,5
80	1 allure	gaz	WG20N/O-A	9 020	113
	2 allures	gaz	WG20ZN/O-A	9 730	122
300	2 allures	gaz	WG30N	18 900	63

Tableau VI.b7
Exemples de prix HT pour brûleurs (1992)
(source : Monarch/Welshaupt)

6. LES CHAUDIÈRES ET ÉCHANGEURS

(Tableau VI.b8)

Les chaudières et échangeurs ont un usage bien précis en séchage. Ces appareils, coûteux et de rendement réduit (inférieur à 80 - 85 %), ont l'avantage de fournir une chaleur propre (absence de produits de combustion).

Caractéristiques	Air/Air	Air/Eau	Air/Vapeur
Exemple	- brûleur à échangeur - chaudière à bois - échangeur - récupération sur cheminées - échangeur	- chaudière domestique	- chaudière industrielle
Équipement (échangeur)	- plaques et tubes	- tubes et serpentins	- tubes et serpentins
Rendement	≤ 85 %	60 à 80	50 à 75 %
T° maxi	> 200°C	≤ 90°C	≤ 150°C
Surcoût * Consommation	+ 35 %	+ 40 à + 50 %	+ 50 à + 60 %
Destination PAM	- séchage classique avec normes de qualité	- séchage classique et pseudo-industriel	- process industriel
Avantages	- simple - souple d'utilisation - air chaud, propre directement utilisable	- inertie thermique - intermédiaire	- polyvalence - t° de sortie - utilisations diverses (blanchiment/stérilisation)
Inconvénients	- surcoût - encombrement - diminution rendement	- limite physique (t° ≤ 100°C) - exige d'autres échangeurs liquide/air	- investissement - entretien

* Comparé à un système en combustion directe, pour une même énergie utilisable

Tableau VI.b8

Comparaison des types de chaudières

Ces équipements deviennent indispensables pour respecter certaines normes de qualité et permettre certains procédés (séchage haute température, blanchiment).

Le coût d'utilisation plus élevé généré par un système avec échangeur nécessite une utilisation accrue. Cette dernière peut passer par une diversification des produits à sécher en hors saison PAM, tels que légumes et graines.

De plus, ces équipements demandent un entretien plus poussé que les générateurs à combustion directe (ramonage, décairage, dépoussiérage et traitement de l'eau).

Les chaudières eau et vapeur exigent des échangeurs secondaires pour redistribuer la chaleur.

Pour le séchage des PAM, si un générateur au fuel avec échangeur peut éventuellement se justifier, le recours au gaz comme énergie ne semble pas justifier le surcoût de ce type de générateur (investissement et consommation).

Pour un ensemble mobile avec armoire de commande, contrôle de températures, ventilateur (11 500 m³/h - 3 CV - 35 mm CE) et générateur au fuel avec échangeur (175 kW maxi puissance absorbée - rendement générateur 85 %), il faut compter 50 000 F HT (source : LAW, 1994).

La figure VI.b12 présente le principe d'un générateur au fuel avec un échangeur air/air.

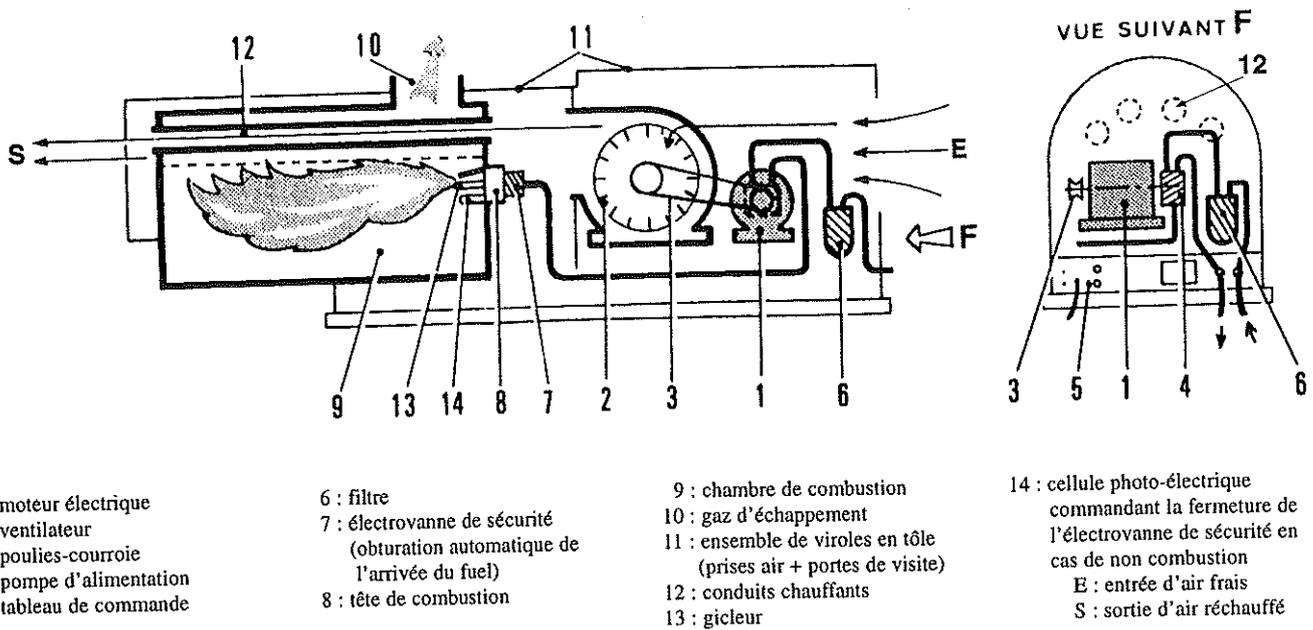


Figure VI.b12

Thermoportable de 30 000 kcal/h disponibles avec échangeur et ventilateur centrifuge haute pression (1 500 m³/h) de chez LAW (fonctionnement au fuel)

Des générateurs avec échangeurs utilisés pour le chauffage des serres horticoles peuvent être une solution. Par contre sur ces équipements, la ventilation est de faible puissance et nécessite l'ajout d'un ventilateur en dépression.

Exemples de tarifs avec échangeur (HT 1994, sources : Giordano et Marchegay)

générateur (93 kW utile) + ventilateur Axial (8 000 m³/h)

. au fuel : 13 900 F

. au gaz : 17 500 F

générateur (140 kW utile) + ventilateur Axial (10 500 m³/h)

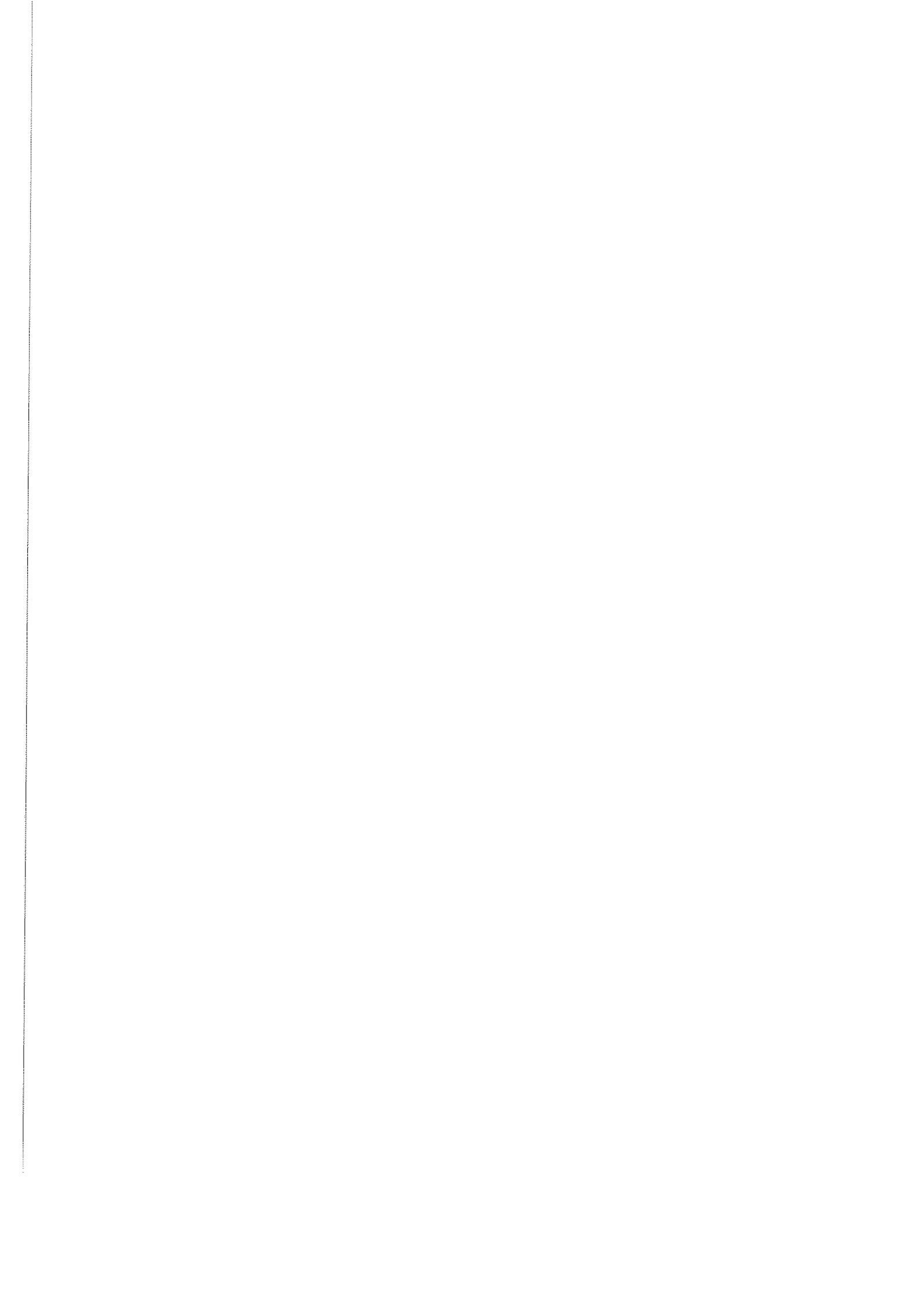
. au fuel : 17 500 F

. au gaz : 20 900 F

générateur (116 kW utile) + ventilateur Axial (10 200 m³/h)

. au fuel : 13 800 F

. au gaz : 18 800 F



Troisième partie : la pompe à chaleur (PAC)



1. INTRODUCTION

Longtemps cantonnée dans un rôle de curiosité technologique, la pompe à chaleur a connu depuis une dizaine d'années un développement important lié au renchérissement des énergies fossiles.

L'application des lois de la thermodynamique montre que la quantité d'énergie «payante» nécessaire à l'entraînement du compresseur est inférieure à la quantité d'énergie que fournit la machine : la pompe à chaleur permet des économies d'énergie.

Bien entendu, intérêt énergétique ne signifie pas automatiquement compétitivité économique, et l'investissement supplémentaire que représente en général

l'installation d'une pompe à chaleur n'est rentable que si certaines conditions relatives à son fonctionnement, à sa durée d'utilisation et au coût des différentes formes d'énergie sont réunies.

En dehors de quelques créneaux industriels bien établis, l'implantation d'une PAC relève souvent de données technico-économiques plus ou moins incertaines. Ainsi s'explique que la PAC s'impose rarement d'elle-même et que son développement dépend fréquemment d'arbitrages tenant compte de subventions ou de conditions particulières de financement des installations.

2. NOTIONS de THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉES à la PAC

21. Notion d'équivalence entre quantités de travail et de chaleur (figure VI.c1)

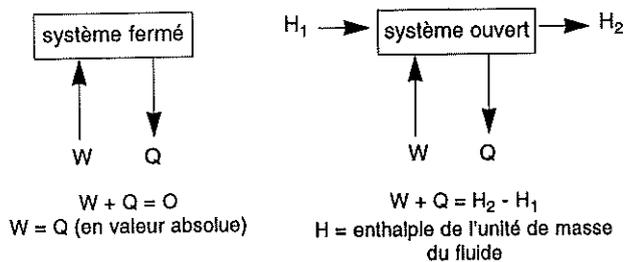


Figure VI.c1
Conservation de l'énergie

Dans un système fermé

En l'absence d'échange de matière avec l'extérieur, il y a équivalence entre les quantités de travail W et de chaleur Q que le système peut recevoir ou émettre.

Dans un système ouvert

Le bilan des énergies mises en œuvre par unité de masse de fluide venant à passer d'un état H_1 à un état H_2 s'exprime de la même façon.

Cela permet de procéder à un bilan entre énergies mécanique et thermique.

22. Evolution du système ouvert appliqué à la PAC

Le système peut transmettre de la chaleur de la source froide à la source chaude, c'est le principe de la PAC (figure VI.c2).

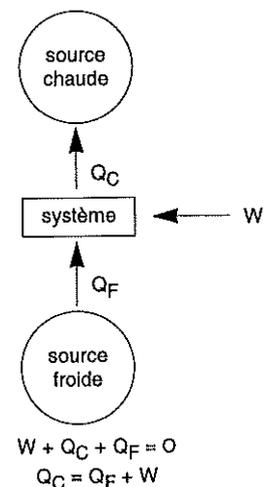


Figure VI.c2
Transfert de chaleur
(exemple : pompe à chaleur)

Il faut que la source froide puisse fournir la quantité Q_F de chaleur attendue ($Q_F = Q_C$). Dans le cas contraire, à moins de recourir à une autre source de chaleur, il faut que la quantité de travail W augmente en proportion ($Q_C = Q_F + W$). Il y a donc un rapport Q_C/W à partir duquel une PAC n'offre plus d'intérêt.

23. Notion de performance

On définit par coefficient de performance (COP), le rapport qui s'établit entre la chaleur fournie (Q_C) et la force motrice que l'on accepte de payer (W). Le COP est également appelé coefficient d'amplification, il caractérise l'aptitude d'une pompe à chaleur à économiser l'énergie :

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

T_c : température source chaude
 T_f : température source froide

Pour que le COP soit maximal, il faut un écart de température $T_c - T_f$ aussi faible que possible.

La formule précitée conduit à des valeurs théoriques qu'il convient de corriger, afin de tenir compte du fait qu'en pratique :

- les fluides utilisés ne sont jamais parfaits,

- les machines employées introduisent des pertes,
- le régime de fonctionnement des sources et la structure des appareils conduisent à des dégradations énergétiques irréversibles, donc à une réduction des performances.

En première approximation, on se contente de corriger le COP par un coefficient pondérateur expérimental k , inférieur à l'unité :

$$\text{COP pratique} = K \times \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Suivant les matériels et la taille des installations, on admet que : $k \leq 0,6$

Avant de décider une installation, il est bien entendu nécessaire de procéder à une évaluation moins empirique.

3. LA PAC

31. Fonctionnement

Il existe plusieurs types de pompes à chaleur.

Concernant la PAC utilisable dans le cas du séchage des PAM, notons qu'il s'agit d'une PAC avec cycle de condensation de type fermé (dite PAC indirecte) avec compensation thermique sous forme mécanique (compresseur).

Dans ce type de PAC, un fluide intermédiaire, dit «frigorigène» prélève de la chaleur à la source froide en s'évaporant, et la restitue à la source chaude en se condensant.

Le cycle de fonctionnement de la pompe à chaleur est le suivant (figure VI.c3) :

- le compresseur (1) comprime le fluide frigorigène à l'état gazeux,
- dans le condenseur (2), le fluide frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide, fournissant ainsi de la chaleur à la source chaude,
- le détendeur (3) fait chuter la pression du liquide,
- dans l'évaporateur (4), le fluide frigorigène se vaporise à basse pression en puisant de la chaleur à la source froide, il est ensuite à nouveau aspiré par le compresseur.

Ce sont essentiellement les changements de phase (liquide/gaz) qui permettent au fluide frigorigène de céder ou d'absorber de la chaleur.

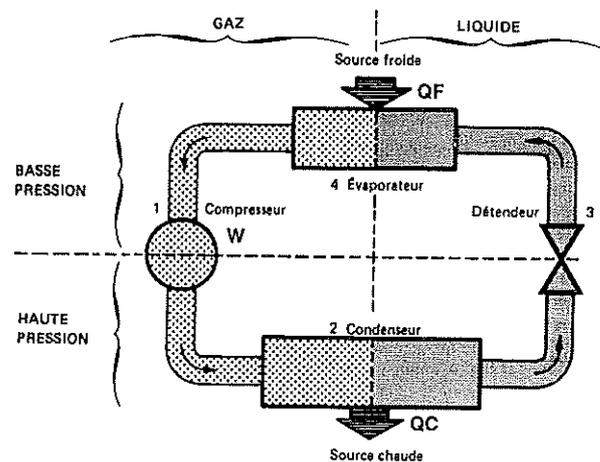


Figure VI.c3

Schéma de principe d'une pompe à chaleur compression (source : DOPEE)

Le COP pratique d'une PAC indirecte est généralement compris entre 2 et 5. Bien qu'économe en énergie, le système est handicapé par la présence de deux échangeurs. Chacun d'eux entraîne une chute de température entre la source et le fluide, ce qui augmente d'autant l'écart $T_c - T_f$ qu'il conviendrait justement de réduire au minimum pour réaliser un meilleur COP.

32. Relations air/PAC

321. Introduction

Deux types de couplage PAC/séchoir sont envisageables dans le cadre des PAM :

- PAC réchauffant l'air neuf et récupérant l'énergie sur l'air extrait du séchoir,
- PAC fonctionnant en déshumidification sur de l'air recyclé au séchoir.

Sur ce dernier principe, une explication rattachée à des valeurs pratiques (plus pédagogiques que scientifiques) permet de mieux comprendre l'intérêt énergétique de la PAC, et de clarifier son fonctionnement thermodynamique.

322. La déshumidification par PAC

Schéma de l'installation (figure VI.c4)

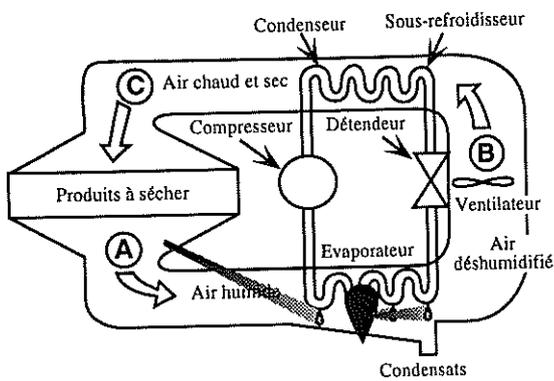


Figure VI.c4

Principe de la déshumidification par pompe à chaleur
(source : DOPEE)

Principe

L'air, en sortie de caisson, chargé d'humidité, est envoyé successivement sur une batterie froide (évaporateur) où vient se condenser une partie de la vapeur d'eau qu'il contient, puis sur une batterie chaude (condenseur) où il va se réchauffer. La chaleur latente d'évaporation de l'eau est ainsi récupérée au niveau de l'évaporateur avant d'être transférée à l'air déshumidifié pour le réchauffer au condenseur.

Caractères de l'air (tableau VI.c1)

Réf.	Type d'air	T° sèche en °C	HR* %	Teneur en eau (X) g/kg air sec	Enth. (h) en kJ/kg air sec	Caractères de l'air
A	extrait du séchoir	25,0	60	12	55,4	Tiède et humide
B	sortie évaporateur	10,5	90	7	28,4	Froid
C	sortie condenseur	41,0	15	7	59,9	Chaud et sec

* HR : humidité relative

Tableau VI.c1

Estimation de différents paramètres de l'air à trois stades de traitement avec une PAC

Interprétation sur le diagramme de l'air humide (figure VI.c5)

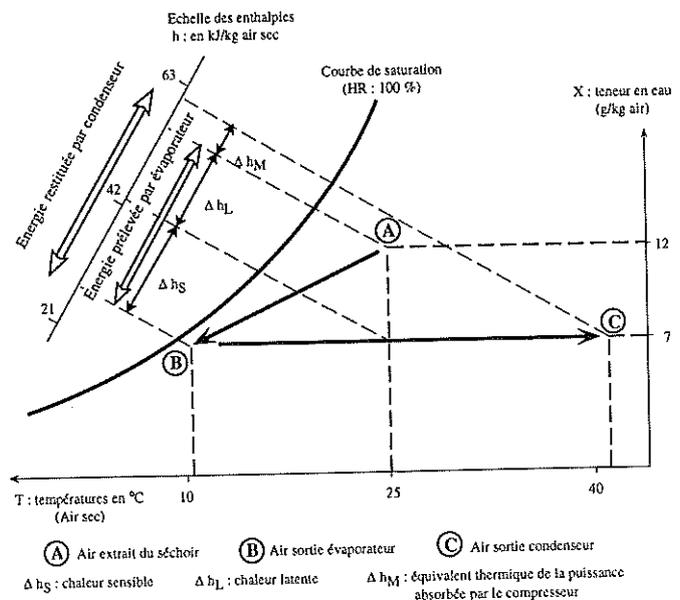


Figure VI.c5

Evolution des caractères de l'air avec une pompe à chaleur (déshumidification)

AB : l'évaporateur prélève à l'air A une puissance thermique ($h_A - h_B$) sous deux formes :

- 1) chaleur latente (Δh_L), soit une baisse de teneur en eau ($X_A - X_B$),
- 2) chaleur sensible (Δh_S), soit une baisse de température ($T_A - T_B$).

L'air A refroidit, perd une partie de sa vapeur d'eau ($X_A - X_B = 12 - 7 = 5\text{g}$) en atteignant le point de rosée. On obtient un air B froid et sec.

L'eau extraite est évacuée par le réseau de condensation et l'énergie captée ($h_A - h_B$) est transférée au condenseur via le compresseur.

BC : le condenseur restitue :

- la puissance thermique prélevée ($h_A - h_B$),
- l'équivalent thermique de la puissance électrique absorbée par le compresseur (Δh_M).

Ainsi, pour une consommation relativement faible d'énergie (Δh_M), on profite d'une énergie habituellement perdue (Δh_L).

Limites techniques

Une étude précise est difficile car les connaissances sur le séchage des plantes sont restreintes et limitées au domaine empirique.

Les Δt nécessaires ($15 - 25^\circ$) en général sont largement dépassés par les capacités d'une PAC industrielle. Q_F est alors excessif, le circuit nécessite un désurchauffeur entraînant :

- un surinvestissement,
- une perte d'énergie (ou une utilisation pour chauffer de l'eau par exemple).

Le fonctionnement en cycle fermé exige une enceinte hermétique conciliant :

- facilité de manutention,
- circulation libre de l'air.

33. Raisonner l'acquisition d'une PAC

Qu'elle soit employée seule ou associée à un système thermique, son recours n'offre d'intérêt que si :

- le bilan énergétique primaire est favorable,
- le bilan économique est intéressant.

L'étude technico-économique doit dégager un bilan d'exploitation positif.

Etude technique

En fonction des besoins de séchage (Δt , HR, débit d'air, température de séchage, quantité d'eau à extraire des plantes/h, principe de l'installation), on détermine les performances de la PAC.

Remarque : la précision sur ces données étant limitée par le manque de connaissance sur les cinétiques de séchage en plantes médicinales et aromatiques, on prendra le pouvoir évaporatoire horaire nécessaire.

Etude énergétique

Le matériel étant choisi, on compare les consommations primaires entre la pompe à chaleur et le système classique.

$$\begin{aligned} & \text{(consommation primaire du système classique)} \\ & - \text{(consommation primaire pompe à chaleur)} \\ & = \text{bilan énergétique.} \end{aligned}$$

En général, celui-ci est largement positif (selon des calculs réalisés par SORETEL en 1981, il peut s'élever jusqu'à 40 % d'économie).

Ce bilan dégage une économie annuelle en énergie (donc en valeur) à rapprocher de l'investissement.

Etude économique

Le surcoût d'investissement est-il couvert rapidement par les économies d'énergie liées à la pompe à chaleur ?

Bilan économique :

$$\frac{\text{Investissement lié à la PAC}}{\text{Economie annuelle dégagée par la PAC}} = \text{Tri} *$$

* Temps de retour sur investissement en année

En général, le seuil de temps de retour acceptable en industrie est de 3 - 4 ans. Toujours selon l'étude de SORETEL pour des exploitations de PAM de taille moyenne (4 ha), malgré des économies annuelles dépassant 13 000 F engendrées par la PAC, le temps de retour sur investissement approchait les 15 ans. A ce jour, en France, il n'y a pas de pompe à chaleur installée en PAM dans des exploitations de taille moyenne. On la rencontre chez de nombreux cueilleurs, des petits producteurs, ainsi que dans des structures coopératives en Suisse.

La PAC présente dans ces situations l'intérêt de sécher avec un air très sec à basse température des produits fragiles.

34. Utilisation de la PAC

L'investissement étant relativement lourd, ce choix ne peut concerner que des produits à haute valeur ajoutée sur des marchés bien spécifiques :

- produits à haute valeur ajoutée
 - . produits élaborés
(ex. : feuilles mondées main, pétales mondés, stigmates),
 - . matière première pour artisanat
(ex. : fleurs séchées : compositions florales, pots pourris),
 - . produits fragiles (couleur, principes actifs).
- marchés
 - . agriculture biologique, biodynamique
(ex. : BIOTOPE, Ariès),
 - . agroalimentaire : produits déshydratés,
 - . subventionnés (ex. : Suisse),
 - . contractuels (ex. : Ricolas).

Les charges de structure à petite échelle sont négligeables par rapport à la qualité commerciale obtenue et aux avantages dégagés :

- faibles dépenses énergétiques,
- faibles investissements parallèles (beaucoup de travail manuel),
- faibles places occupées,
- utilisation polyvalente de la pompe à chaleur,
 - . assainissement des locaux, des lieux de stockage,
 - . autres produits : champignons, fruits, légumes.

Sur de petites structures, les PAC (déshumidificateur) sont le plus souvent installées dans une armoire ou une enceinte close, munie de claies.

Les pompes à chaleur de petites capacités ($1 < PE/h < 5$ kg eau) produites en séries sont destinées à assainir des locaux (figure VI.c6). Contrairement aux machines industrielles, elles produisent peu de chaleur et en service, la température d'ambiance dépasse rarement 20-25°C (pour un optimum de fonctionnement de 30°C). De plus, leur ventilateur est limité en débit. Afin d'améliorer les performances de ces petits outils, on associe dans l'enceinte un ventilateur et un appoint thermique (solaire, convecteur...)

Le PE de ces matériels est généralement indiqué pour 24 heures fonctionnant dans des conditions optimales d'ambiance (température, HR).

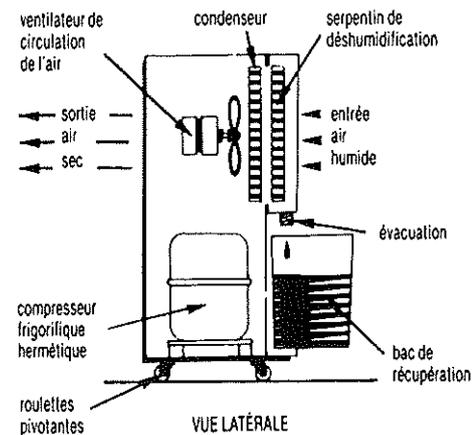


Figure VI.c6

Principe des petites PAC en déshumidificateurs
(source : Rexair)

4. LE MARCHÉ DES PAC

41. Les petits modèles (tableau VI.c2)

Type	Piscine	Confort	Industrie
Usage d'origine	déshumidification de locaux (piscine, sauna)	polyvalent et domestique	assainissement, séchage en conditions difficiles
Plage d'utilisation	$20 < t^{\circ} < 32^{\circ}\text{C}$	$10 < t^{\circ} < 32^{\circ}\text{C}$	$3 < t^{\circ} < 32^{\circ}\text{C}$
Optimum	$t^{\circ} = 30^{\circ}\text{C}$ HR = 70 %	$t^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$ HR = 60 %	$t^{\circ} = 30^{\circ}\text{C}$ HR = 80 %
Option	-	-	régulation/hygrostat
Intérêt PAM	le moins cher	intermédiaire	le top
PE/h	1 à 10 kg	≤ 1 kg	1 à 15 kg
Conso. électrique par kg eau capté	0,7 kWh	0,7 kWh	0,5 à 1,7 kWh
Invest./PE horaire	5 000 à 7 000 F/kg eau/h	4 000 à 7 000 F/kg eau/h	7 000 à 18 000 F/kg eau/h

Tableau VI.c2

Comparaison des types de pompes à chaleur de petit modèle
(sources : REXAIR - CESBRON - MUNTERS - KRUGER)

42. Les grands modèles

Il y a peu de standards, le choix se détermine par rapport à des critères plus précis que la quantité d'eau à évacuer (ex. : débit). Ils sont à considérer au cas par cas avec les fabricants et revendeurs.

43. Remarque : les déshydrateurs (figure VI.c7)

Ces appareils ont pris le relais des pompes à chaleur pour assainir les ambiances de stockage, où l'humidité posait des problèmes d'oxydation. Leur objectif est d'abaisser l'HR de l'air :

- stockage de matériaux sujets à la corrosion (électronique, armement...),
- des produits sensibles à la réhydratation (industrie, agro-alimentaire),
- séchage à basse température.

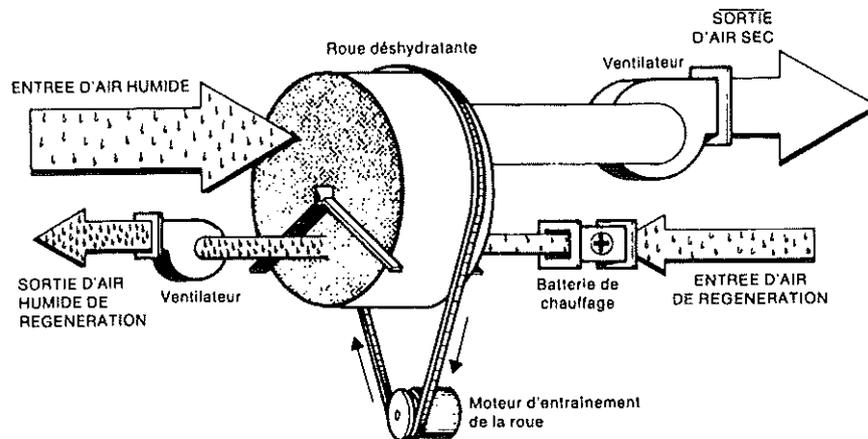


Figure VI.c7

Principe de fonctionnement
(source : Munters)

Principe

Le principe de base est l'adsorption, c'est-à-dire un captage physique de l'eau par des composants (adsorbants) neutres. Contrairement à l'absorption, il n'y a pas de réactions chimiques. L'air à traiter traverse le dispositif d'adsorption et lui cède son humidité qui est continuellement évacuée par un deuxième circuit d'air, dit de régénération. Afin de prélever le maximum d'eau, le circuit de régénération est équipé d'une batterie de chauffage en amont

L'adsorbant est un matériau solide hygroscopique qui retient jusqu'à 40 % de son poids d'eau par des forces d'adhésion. Généralement, on utilise :

- le silicagel (SiO_2),
- l'aluminium activée (Al_2O_3).

Ils permettent une régénération quasi illimitée et ne nuisent pas à l'environnement. L'adsorbant est logé dans un disque ou un carrousel en rotation, actionné simplement par poulie ou engrenage.

Intérêts et limites

. Avantages :

- conception et construction simple,
- pas d'entretien (durée de vie de l'adsorbant SiO_2 = 4 à 6 ans),
- efficace même à basse température,
- non polluant.

. Inconvénients :

- investissement important,
- consommation électrique supérieure à la pompe à chaleur,
- pas de récupération d'énergie,
- coût de revient plus élevé qu'une PAC pour une application aux PAM (tableaux VI.c3 et VI.c4).

Utilisations possibles

- couplé en aval d'une PAC pour en renforcer l'activité sur un air sec,
- à l'aspiration du séchoir.

Cela permet de sécher à des températures très basses (intéressant pour des produits sensibles tels que les semences).

Pouvoir évaporatoire	
. kg eau/j	165,6
. kg eau/h	6,9
Capacité de séchage	
. kg frais/j	215,0
. kg sec/j	49,4
Investissement F HT	97 000
Amortissement (A)	
. F/j*	323,0
. F/kg sec	6,5
* 60 j/an sur 5 ans	
Consommation électrique (B)	
. kWh	10,9
. F/jour	131,0
Coût total (A + B)	
. F/j	454,0
. F/kg sec	9,2

Tableau VI.c3

Exemple de coût de revient d'un déshydrateur par adsorption

Principe	Modèle	PE kg eau/h	Tarif F HT
PAC	Confort	0,4	2 900
		0,8	4 000
	Industrie	1	18 000
		2	20 000
		5,5	43 500
		7,2	58 000
		12,5	83 000
40 - 60	130 - 140 000*		
Piscine	1,5	16 000	
	4	25 224	
	7,8	39 000	
Déshydrateur adsorbant		1,8	30 000
		4	43 000
		6,9	97 000
		10,3	105 600
		13,7	115 800

Tableau VI.c4

Comparaison technico-économique de différents modèles (sources : REXAIR et GESBRON, 1992), *tarif 1994

44. Les coûts

Les critères principaux (PE et investissement) permettent de différencier grossièrement ces appareils. Cependant, cette comparaison (tableau VI.c4) ne prend pas en considération d'autres éléments importants tels que :

- polyvalence,
- durée de vie,
- efficacité en conditions difficiles.

Pour des petits séchoirs, les PAC de type piscine et secondairement de type industrie sont plus intéressantes que les déshydrateurs (figure VI.c8).

Pour des utilisations plus importantes, une étude personnelle est nécessaire pour cibler le matériel adéquat et en calculer l'intérêt économique.

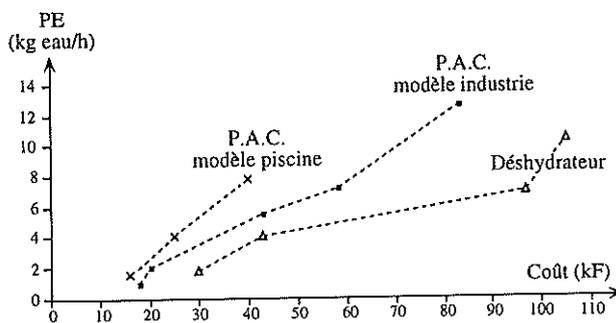


Figure VI.c8

Exemple de coût de la PAC et du déshydrateur en fonction du PE

L'utilisation d'une PAC de petit modèle (faible capacité de séchage) revient à 4 - 5 F/kg plante sèche (tableau VI.c5). Il convient d'y rajouter :

- les frais d'une enceinte,
- la charge de l'appoint (convecteur + ventilateur),
- la main d'œuvre.

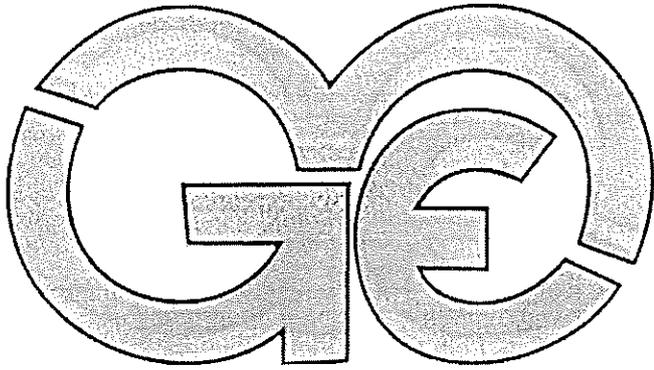
Principe	PAC		
Modèle	Types industries (cf. tab. VI.c4)		
Pouvoir évaporatoire			
kg eau/j	24	172	300
kg eau/h	1	7,2	12,5
Capacité de séchage			
kg frais/j	31	223	390
kg sec/j	7,1	51,3	90
Investissement F HT	18 000	58 000	83 000
Amortissement (A)			
F/j	60	193	277
F/kg sec	8,45	3,76	3,1
Consommation électrique (B)			
kWh	1,7	4,2	6,5
F/jour	20,4	50,4	78
Coût total (A + B)			
F/j	80,4	243,4	355
F/kg sec	11,32	4,75	3,94

Hypothèses : - Situation de séchage optimale
 - Durée de séchage 24 h - 60 j/an
 - Amortissement/5 ans
 - Plante à $Q_e = 77\%$
 - Rapport frais/sec = 4,35
 - Coût électricité 50 cts/kWh

Tableau VI.c5

Exemples de coûts de revient de trois modèles de PAC

Séchoirs



M.G. ENTREPRISE

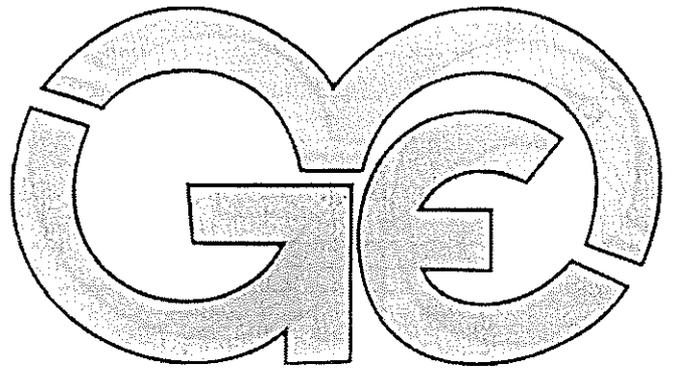
- ☞ céréales - oléagineux
- ☞ maïs, épis et grains
- ☞ semences
- ☞ noix - noisettes - amandes
- ☞ châtaignes
- ☞ ail - oignon - échalottes
- ☞ plantes aromatiques
- ☞ plantes médicinales
- ☞ racines
- ☞ fourrage
- ☞ tabac



53 40 28 66
53 40 20 95

St ÉTIENNE DE FOGÈRES
B.P. 21 - 47380 MONCLAR

Séchoirs



M.G. ENTREPRISE

- ☞ céréales - oléagineux
- ☞ maïs, épis et grains
- ☞ semences
- ☞ noix - noisettes - amandes
- ☞ châtaignes
- ☞ ail - oignon - échalottes
- ☞ plantes aromatiques
- ☞ plantes médicinales
- ☞ racines
- ☞ fourrage
- ☞ tabac



53 40 28 66
53 40 20 95

St ÉTIENNE DE FOGÈRES
B.P. 21 - 47380 MONCLAR

Quatrième partie : les enceintes



1. INTRODUCTION

Les solutions sont multiples entre le séchage naturel et artificiel, entre le séchage statique et dynamique, entre les systèmes de recyclage, de manutention.

L'enceinte doit répondre à de nombreux objectifs.

Comme pour les générateurs, les constructeurs proposent des enceintes, mais les séchoirs adaptés aux PAM sont peu nombreux et le recours à l'auto-

construction ou l'adaptation est fréquent et parfois conseillé pour des raisons pratiques (adaptation aux besoins, à la structure) et économiques (réduction de l'investissement).

Cette autoconstruction sous-entend une bonne connaissance des techniques, des normes et des produits à sécher.

2. LES OBJECTIFS

21. Convenir aux plantes

Capacité de séchage

La capacité de séchage est à évaluer en fonction :

- du calendrier de récolte pour les espèces considérées (périodes de pointe),
- des surfaces cultivées,
- des estimations de rendement,
- des durées de séchage suivant les espèces,
- du chargement de l'enceinte (hauteur du tas).

L'enceinte doit pouvoir loger le lot récolté sans nuire à ses sensibilités, donc en respectant une certaine hauteur de chargement et en limitant le tassement (tableau VI.d1).

Ce chargement dépend :

- de la masse volumique du lot frais (MV),
- des caractères propres à la plante (humidité, sensibilité, lignification),
- du type d'élaboration avant séchage (ex. : coupe, broyage),
- de la qualité recherchée,
- de la puissance aéraulique de l'installation.

Partie à sécher	MV (kg/m ³)	Hauteur du tas en caisson
Racines entières	200 à 400 kg	5 à 20 cm
Racines coupées	250 à 500 kg	5 à 15 cm
Plantes entières	100 à 150 kg	5 à 50 cm et +
Plantes entières coupées	150 à 200 kg	5 à 40 cm
Parties aériennes	50 à 150 kg	5 à 50 cm
Parties aériennes coupées	80 à 200 kg	5 à 40 cm
Feuilles	30 à 100 kg	2 à 40 cm
Fleurs	50 à 100 kg	2 à 20 cm

Tableau VI.d1

Niveau de chargement suivant les parties aériennes
(source : Itelpmai)

Le chargement doit être affiné en considérant le type de plante (tableau VI.d2).

Type	Exemple plante entière	Hauteur maxi en caisson	Durée de séchage permise
Très riche en eau	Persil	10 cm	< 6 h
Riche en eau	Menthe	≤ 45 cm	≤ 24 h
Moyennement riche	Sauge	≥ 50 cm	≤ 24 - 36 h
Pauvre en eau	Romarin Thym	150 cm	24 à 72 h

Tableau VI.d2

Exemples de niveau de chargement en caisson

Remarque : les armoires à claies et les fours se chargent peu comparés aux caissons.

Niveau sanitaire

Le niveau sanitaire concerne l'ambiance et les matériaux en contact avec les plantes. Certaines pollutions grèvent la qualité et peuvent contrarier certains cahiers des charges :

- ambiance : le local de séchage doit être isolé des sources de pollutions (poussières, germes, zones humides),
- matériaux : certaines substances peuvent se retrouver dans les produits secs et déclasser les lots. On accuse souvent les produits de traitement du bois :
 - . colles (agglomérés),
 - . pesticides : lindane (bois traités).

Remarque : en séchage de semences, les bois agglomérés à base de colle au formol peuvent même être néfastes pour la germination (FNAMS, 1981).

22. Etre accessible

Les volumes traités sont souvent importants ; ils exigent chargement, brassage et déchargement. La position de l'enceinte et l'accès autour ne doivent pas être négligés. Le manque de place est source de pénibilité, bien souvent regrettée.

Lorsque la capacité augmente, le recours à du matériel de manutention est utile et économique (cf. chapitre chaîne de transformation). Pour un caisson classique (1 tonne frais/jour), le travail manuel journalier représente 1 à 4 heures de manutention à la fourche.

23. Souplesse d'utilisation

Suivant les orientations, l'utilisateur est amené à traiter des lots différents. L'enceinte doit pouvoir y répondre :

- type de plantes différentes,
 - . hauteur variable,
- volume de récolte variable,
 - . surface de séchage modulable,
- récoltes multiples,
 - . caisson à sections ou multicaissons.

Lorsque l'exploitation est très diversifiée, il est utile de posséder plusieurs séchoirs :

- caisson, claie, aire ventilée (tampon).

Parallèlement, le générateur et le ventilateur doivent aussi s'adapter aux situations.

24. Un coût limité

Celui-ci ne doit pas être négligé.

Exemples :

- caisson : 300 à 1 000 F/m².
- armoire 20 m² : > 2 000 F/m² au sol.

La durée d'utilisation assez réduite (50 à 100 jours/an) conduit à des coûts de revient relativement élevés. En pratique, on dépasse souvent 0,5 F/kg sec

pour le seul amortissement de l'enceinte. La conception, le choix des matériaux, la durée d'utilisation et la part d'autoconstruction permettent de limiter cette charge fixe.

25. Permettre un "bon séchage"

- Circulation et répartition de l'air traité,
- Evacuation des buées.

La quantité d'eau évacuée est vite importante (100 kg secs libèrent 200 à 400 kg eau) et son évacuation est nécessaire pour ne pas :

- perturber la déshydratation,
- détériorer le bâtiment,
- souiller les stocks.

L'aération ou l'aspiration, surtout en première phase de séchage, est donc nécessaire.

26. Economiser l'énergie

La conception et l'emplacement de l'enceinte peuvent limiter les gaspillages et valoriser l'air de séchage.

Emplacement

Un lieu sec, bien exposé avec une ouverture au Sud est préférable.

Conduite

En fin de séchage, le rendement évaporatoire de l'air chute et celui-ci mérite d'être recyclé par fermeture des ouvertures et aspiration directement dans l'enceinte (trappes, fenêtres).

3. LES TYPES DE SÉCHOIR

31. Introduction

Les divers principes sont présentés par le tableau VI.d3.

32. Le séchage «naturel»

Nous présentons ci-contre (figure VI.d1) le principe du séchoir aménagé en claies mobiles.

Les claies comportent un cadre rigide supportant soit un grillage plastique (le plus économique), soit un grillage métallique (le plus solide) ou soit une toile de jute.

Les plantes sont disposées en couches fines et homogènes sur les claies.

La circulation de l'air doit être favorisée au maximum.

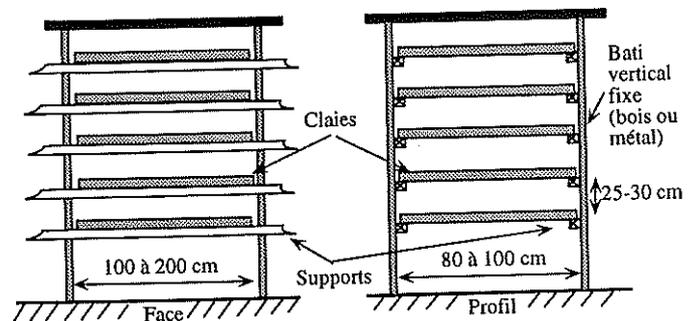


Figure VI.d1

Agencement d'un séchoir naturel avec claies mobiles

Séchoir et Caractéristiques	Statique		Dynamique	
	Naturel	Artificiel	Fours	Adaptations
Exemples	Grenier : - en bouquet - sur claies - en vrac	- Armoires à claie - Chambres de séchage - Caisson	- Séchoir à tapis (type fruits et légumes déshydratés)	- Remorques séchantes - Séchoir colonne, couloir - Séchoir à bande
Principe	Utilisation de la convection naturelle de l'air ambiant	Séchage par convection forcée d'un air réchauffé	Traitement des récoltes en continu, transformation en chaîne	Divers
Type de production	Cueillettes	Cueillettes, cultures	Cultures industrielles	Intermédiaire
Vol. concernés Pdt frais récolté/j	< 500 kg frais/j	100 kg à plusieurs tonnes	> 10 t	100 kg à 10 t
Investissement	Faible	> 20 000 F	> 2 000 000 F	20 000 à 1 000 000 F
Intérêt	- Economique - Qualité	- Gain de productivité	- Grosse capacité - Economie de main d'œuvre	- Intermédiaire
Contrainte	- Faible capacité - Manutention - Risques climatiques	- Consommation énergétique - Manutention	- Amortissement lourd	- Intermédiaire

Tableau VI.d3
Types de séchoirs

33. Les séchoirs statiques

En statique, les lots stationnent tout le long du séchage, seul le brassage intervient. La solution naturelle est réservée à des exploitations polyvalentes, pluri-actives.

Dès que le volume augmente, le recours au réchauffage et à la ventilation s'impose pour accélérer et sécuriser le séchage. Suivant le type de plante et le volume, on s'orientera vers les armoires à claie ou le caisson (tableau VI.d4).

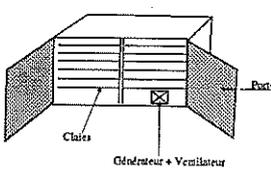
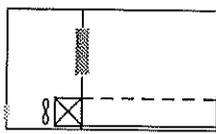
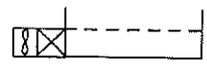
Caractéristiques	Armoire à claies	Chambre	Caisson
Principe	 <p>Ex. : séchoir tabac avec claies</p>		
Investissement F/m ² au sol	> 2 000	1 000 - 3 000	300 à 1 000
Capacité chargement kg frais/m ² sol	< 20	20 à 100	20 à 100
Capacité récolte kg frais	100 à 500 kg	500 à 2 000	> 1 000
Type de générateur habituellement utilisé	Convecteur PAC Solaire	PAC Brûleur	Brûleur
Consommation énergie kWh/kg eau	< 2,5 avec recyclage	< 2,5 avec recyclage	2,8 recyclage difficile
Maîtrise qualité	Bonne	Assez bonne	Moyenne
Intérêts	Qualité	Recyclage Capacité	Capacité Manutention mécanisable
Limites	Faible capacité Beaucoup de travail	Manutention Investissement	Consommation

Tableau VI.d4
Comparaison des séchoirs statiques artificiels

331. Conception de l'armoire

Exemple d'autoconstruction (figure VI.d2)

Matériaux :

- bois
- grille : nylon, inox, jute
- brique et plâtre

Coûts :

- Autoconstruction
- . claies : ≥ 100 F/m²
- . armoire : 2 000 à 3 000 F/m² au sol
soit environ 1 000 - 2 000 F/m³

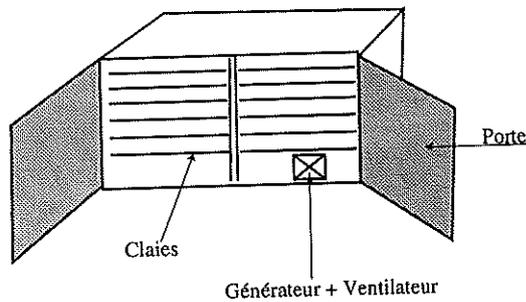


Figure VI.d2
Schéma d'ensemble petite armoire

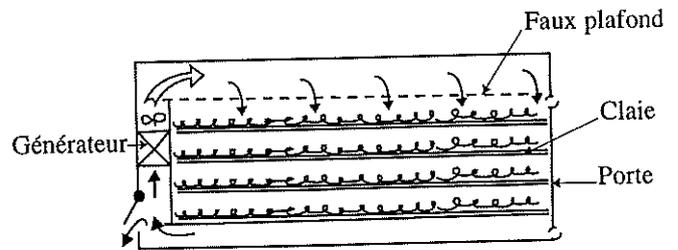


Figure VI.d3
Armoire type SERTT, vue de profil

Armoire du commerce (photo 4, planche 3)

- Constructeur SERTT (enceinte + générateur + clef en main) (figure VI.d3) :

- pour 125 kg frais/jour : 27 000 F HT (1992)
- pour 500 kg frais/jour : 65 000 F HT (1992)
- pour 1 000 kg frais/jour : 87 000 F HT (1992)

- Autre constructeur : ACK

332. Conception de la chambre de séchage (figure VI.d4)

Régulation

- sondes thermiques : sécurité plus programmation du séchage
- sondes hygrométriques : commande recyclage ou extraction de l'air usé

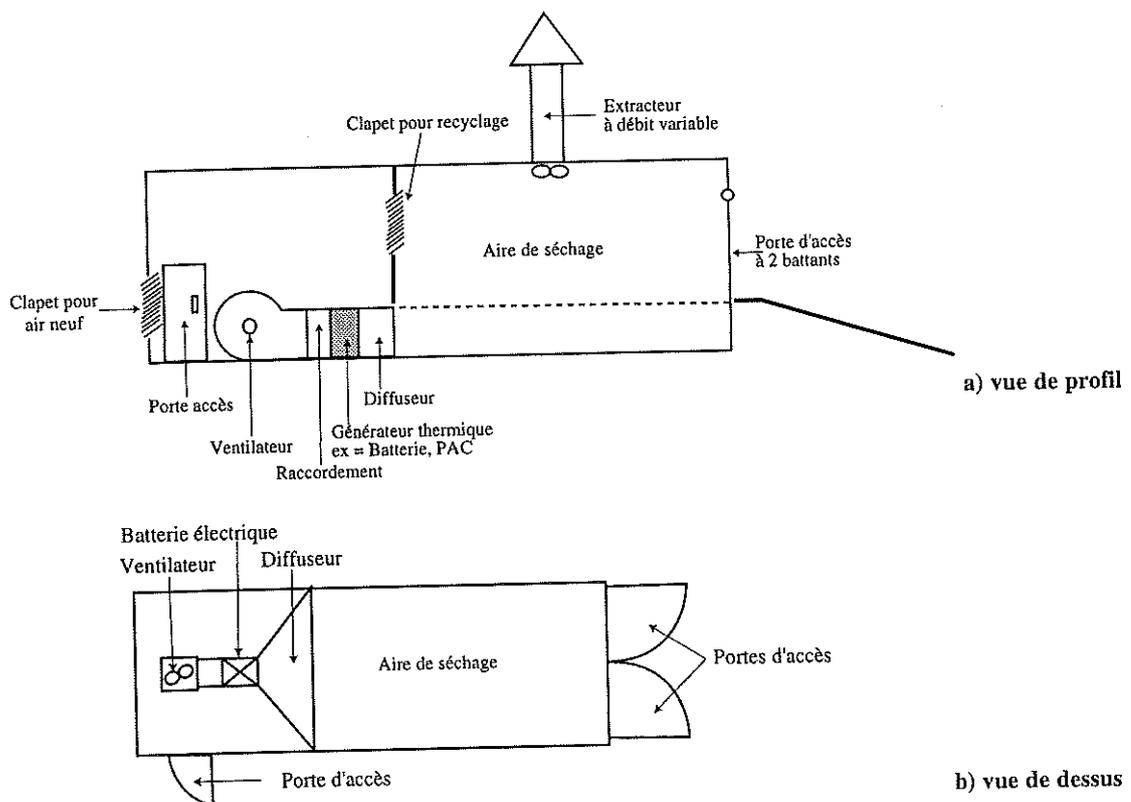


Figure VI.d4
Schéma de conception de la chambre de séchage

Dimension air de séchage

- longueur 8 - 10 m
- largeur 3 m
- hauteur 2,5 m

Construction

- Matériaux
 - . bois
 - . béton cellulaire
 - . agglo
 - . grilles, fer
- Récupération
 - . caisse isotherme
 - . adaptation d'une pièce
 - . container

Conseils pratiques

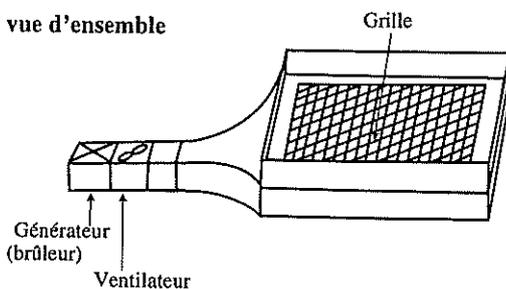
- Raccordement par diffuseur
- Respect de l'équilibre longueur/largeur = 3/2
- Frein aux cheminées sur les parois avec des butées (10-15 cm)
- Limitation des angles
- Vérification : matérialiser les flux d'air à l'aide de particules flottantes (fils, brins de laine, plumes).
- Correction : modification des parcours avec des chicanes (agglos) sous le caisson.
- Brasser souvent.

Coûts :

- Autoconstruction
 - . enceinte : 300 à 1 000 F/m²
 - . grilles : 100 à 200 F/m² (50 F/m² en récupération)
 - . fer + divers : 100 F/m²
 - . maçonnerie : 200 - 500 F/m²
 - . (+ main d'œuvre en autoconstruction : 3 à 6 heures/m²)

333. Conception du caisson (figure VI.d5)

a) vue d'ensemble



a) vue de dessus

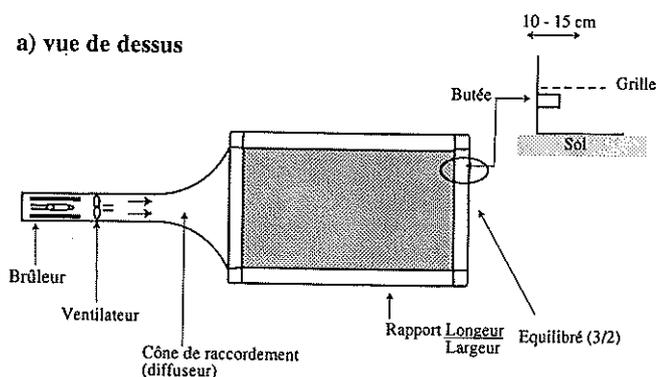


Figure VI.d5

Schéma de conception du caisson

Matériaux

- béton, agglo
- grilles
- fer
- bois

- Achat constructeur Alvan Blanch (HT, 1992)
(photos 5 et 6, planche 4)

- lit de :

- . 15 m² - 1 case : 11 000 F + maçonnerie 4 000 F
- . 30 m² - 2 cases : 25 000 F + maçonnerie 6 000 F
- . 20 m² - 1 case : 16 000 F + maçonnerie 4 200 F
- . 40 m² - 2 cases : 36 000 F + maçonnerie 9 000 F
- . 50 m² - 2 cases : 42 000 F + maçonnerie 10 000 F

334. Autres principes

Brevet MGE : «Séchoir à panier» (figure VI.d6 - photo 7, planche 3).

Le végétal peut être chargé dans le panier dès la récolte (cueillette) et être ensuite accroché sur le tunnel. Chaque tunnel peut recevoir 24 paniers.

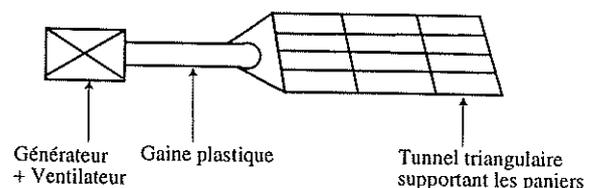


Figure VI.d6
Vue d'ensemble



Photo 4 (photo S.E.R.T.T.)

Armoire électrique S.E.R.T.T. (Modèle SIOP)

- | | | | |
|----------------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------|
| - volume utile de stockage | : 3 m ³ | - surface totale de stockage | : 10,5 m ² |
| - nombre de clayettes | : 7 | - capacité | : 125 kg de plante fraîche |
| - plage d'utilisation | : 20 à 80°C | - ventilateur centrifuge | |

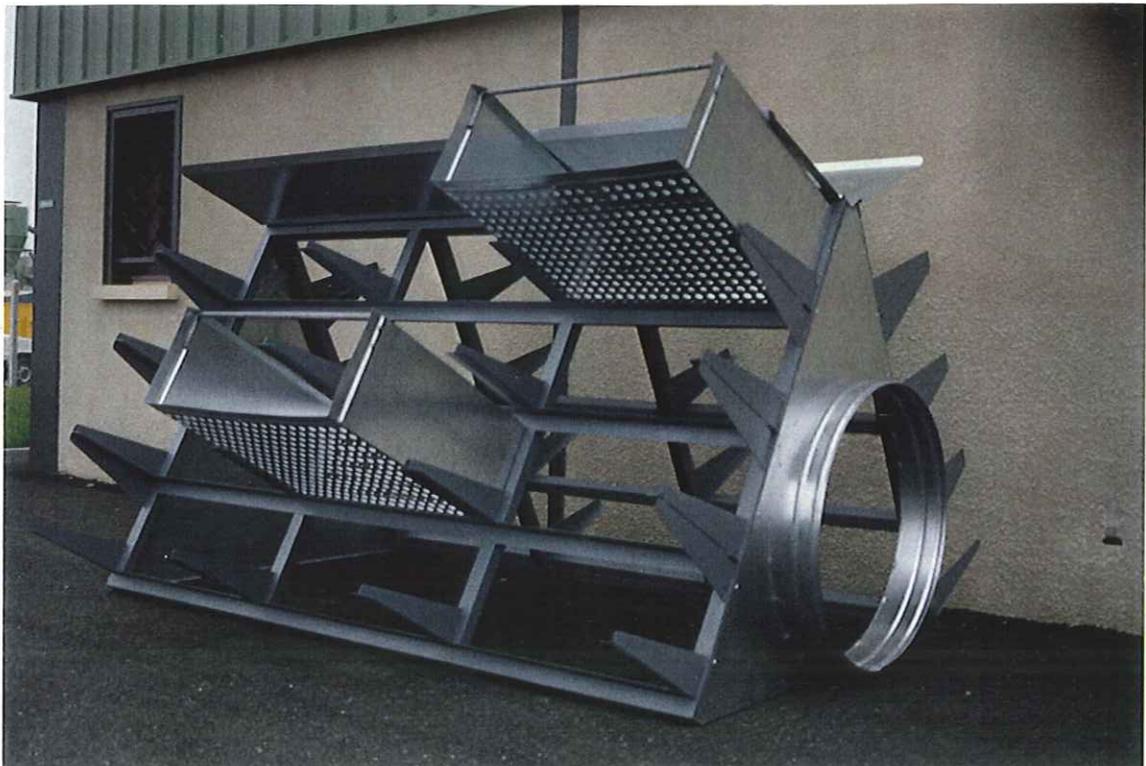
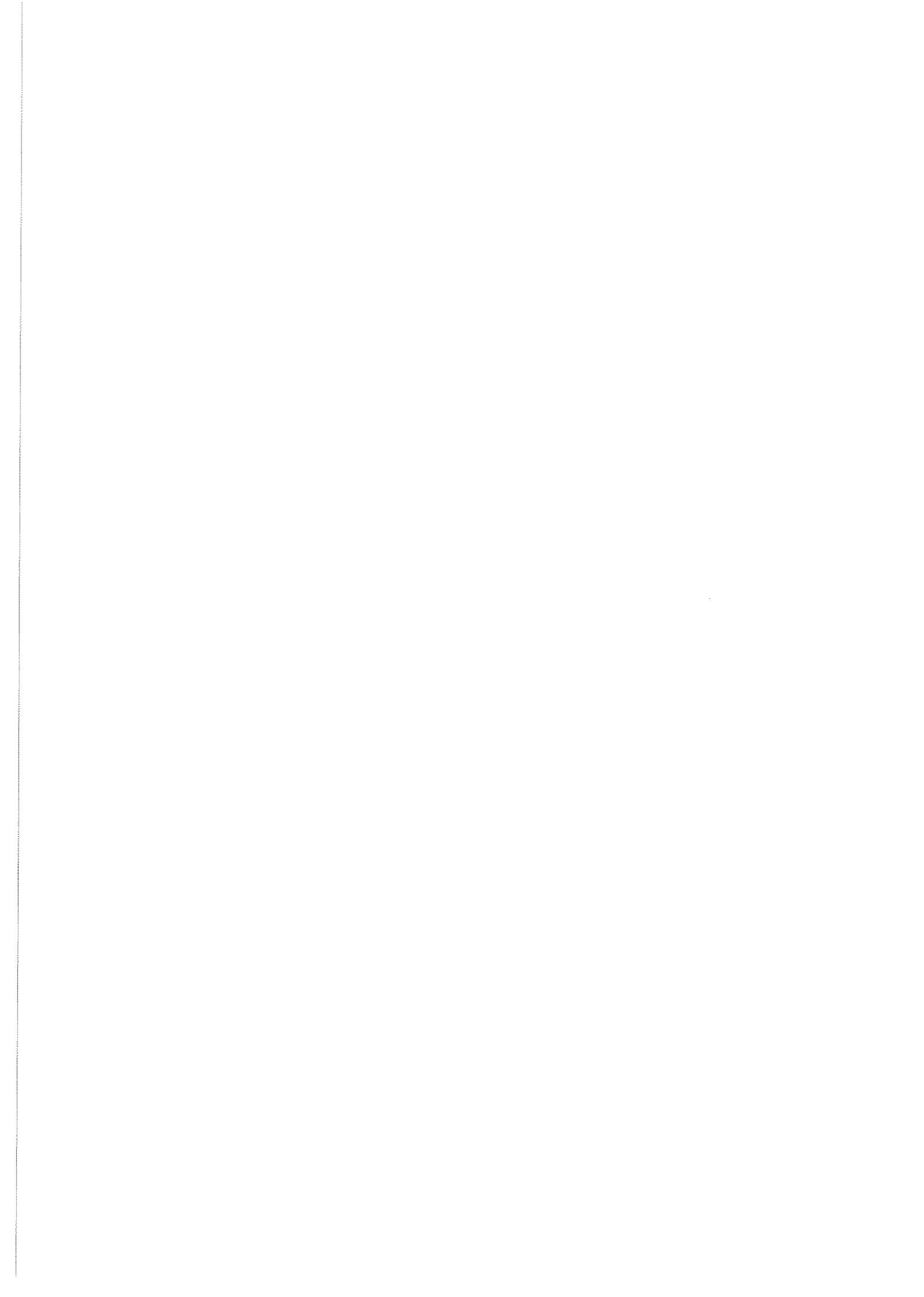


Photo 7 (photo iteipmai)

Détails du support et des paniers du séchoir statique universel à paniers amovibles (MGE)





Photos 5 et 6 (photos iteipmai)
Séchoir double caisson (Alvan Blanch)

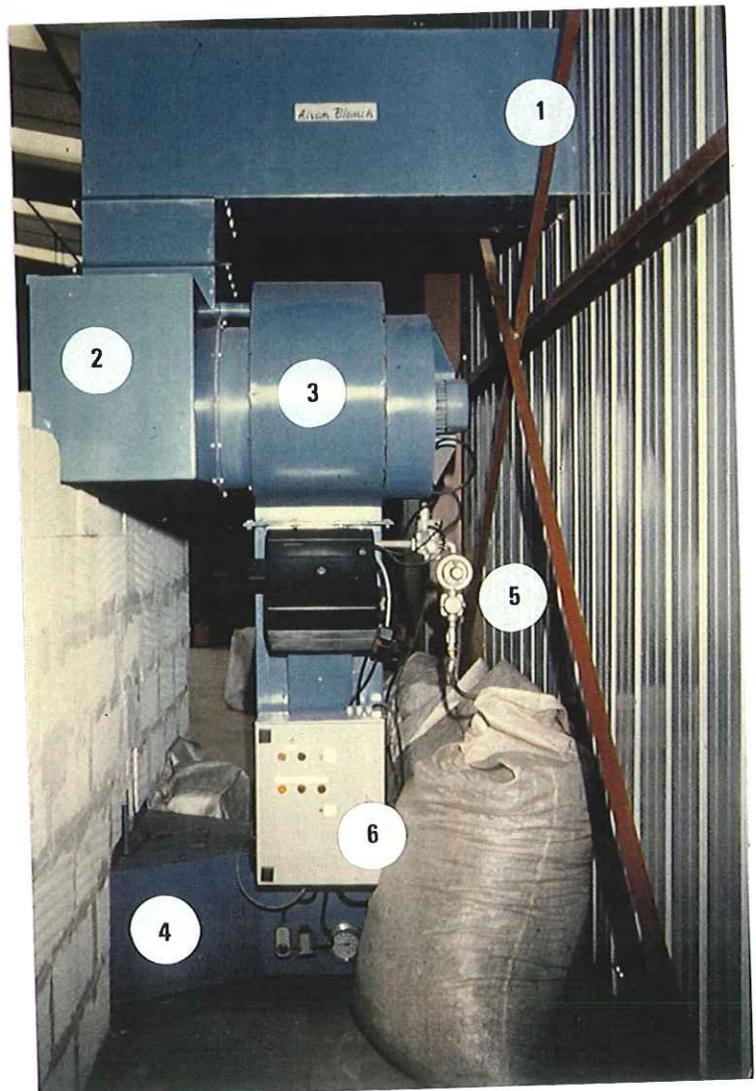
- possibilité de 4 lots différents
- surface 20 m²
- ventilateur centrifuge, débit 11 000 m³/h
- brûleur au propane, PC 140 kWh
- recyclage possible de l'air usé

ci-dessus :

- ① 2 caissons
- ② bouche de reprise de l'air usé pour recyclage

ci-contre :

- ① arrivée air extérieur
- ② reprise air usé pour recyclage
- ③ ventilateur
- ④ sortie air réchauffé
- ⑤ arrivée propane
- ⑥ armoire de commande





La capacité par tunnel est de 4,3 m³ soit 300 à 450 kg de plantes fraîches. On peut associer plusieurs tunnels à la suite. Toutes les parties métalliques sont galvanisées.

Avantages :

- polyvalence,
- faible place occupée,
- manutention rationnelle,
- traitement de nombreux lots,
- si des paniers sont non utilisés, une plaque permet d'obstruer leur emplacement.

Inconvénients :

- réservé à de petites structures.

Coût (HT, 1994, source : MGE) :

- 1 tunnel + 1 jeux de panier : 16 200 F
- 1 générateur + gaine : 13 500 F

335. Conclusion

La solution statique n'a pas de limite technique en surface et capacité, mais les frais de la manutention (chargement, brassage, vidange) et les consommations énergétiques (caisson) posent un problème économique. Les systèmes dynamiques et leurs dérivés tentent d'y remédier.

34. Les séchoirs dynamiques

341. Introduction

La matière est traitée en continu et se déplace dans une enceinte de type tunnel à l'aide de tapis.

Avantages :

- chaîne automatisée : limitation des frais de main d'œuvre,
- recyclage et valorisation de l'air,
- augmentation de la productivité.

Inconvénients :

- investissement lourd à amortir sur une saison courte,
- pas de notions de lots,
- maîtrise et adaptation de procédés difficiles.

Les séchoirs dynamiques sont complexes et rarement autoconstruits. Ils sont réalisés par des constructeurs de l'industrie agro-alimentaire et rentrent dans une chaîne de transformation.

342. Principe

C'est une succession de tapis intercalés, de brasseurs dans un tunnel à sections aux paramètres spécifiques (température, HR). Le produit subit un séchage dans des conditions relatives à son humidité, ses sensibilités. L'air de fin de séchage est recyclé en première phase. Malgré les recyclages, la capacité de séchage et l'économie de main d'œuvre, le coût de revient de ces séchoirs reste élevé.

343. Exemples de réalisation

Four NEU (figure VI.d7)

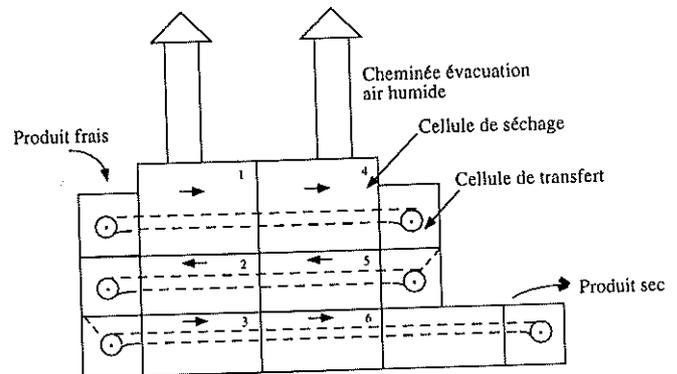


Figure VI.d7

Schéma simplifié du séchoir à tapis transporteur T2000 de NEU (Vue de profil)

Le séchoir est constitué de 6 cellules pour le séchage ainsi que de cellules de transfert.

Une gaine d'évacuation de l'air humide ainsi qu'une gaine d'entrée de l'air neuf sont prévues sur le plafond du séchoir et permettent d'alimenter latéralement chaque cellule.

Les matières à déshydrater sont déposées régulièrement sur toute la surface du convoyeur, traversé par le flux d'air brassé.

Le circuit de brassage de l'air s'effectue de la manière suivante :

- L'air aspiré par les ventilateurs passe au travers des réchauffeurs où il est porté à la température requise.
- Il est ensuite soufflé dans la chambre de traitement, traverse la matière en abandonnant ses calories et en provoquant l'évaporation de l'eau qu'elle contient.
- Après s'être refroidi, il est aspiré à nouveau par les ventilateurs et le cycle recommence.

- Indépendamment de ce mouvement de brassage de l'air sur lui-même dans chaque cellule, l'évacuation d'air humide et l'introduction d'air neuf en quantité équivalente assurent un renouvellement permanent de l'air de traitement.
- L'air neuf circule en s'humidifiant progressivement. Ses possibilités d'absorption sont donc utilisées au maximum, sans incidence notable sur la durée de traitement, et sont un facteur de réduction d'énergie consommée.

Déshydrateur type PROCTOR (figure VI.d8 et photo 8, planche 5)

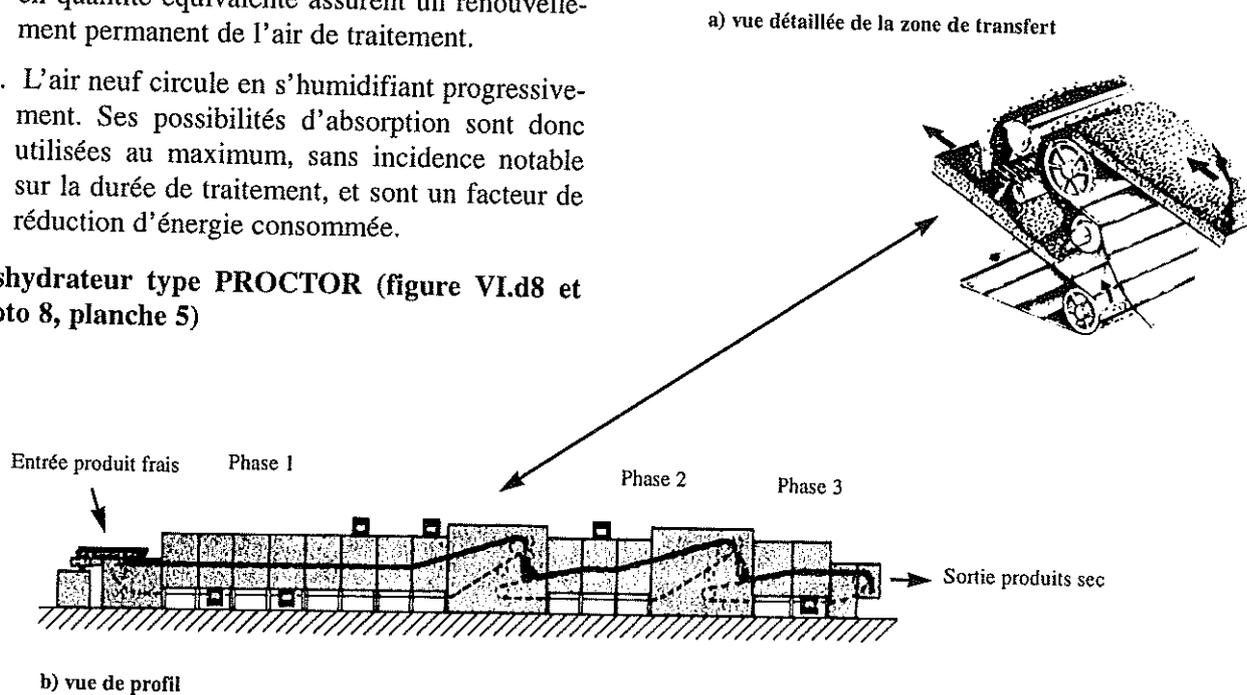


Figure VI.d8
Déshydrateur PROCTOR à usages multiples

L'air chaud est forcé alternativement à travers la couche de produit par le dessus et par le bas. Le passage à la phase suivante est réalisé lorsque le produit atteint la teneur en humidité désirée. L'épaisseur du produit ainsi que la vitesse d'avancement sont modulables pour chaque phase.

Les zones de transfert sont conçues pour empêcher l'agglomération du produit pendant le cycle de séchage et pour le retourner afin d'obtenir un séchage plus rapide, plus régulier.

344. Conclusion

Malgré des intérêts certains, cette technologie coûteuse est limitée à une utilisation de type industrielle. Le pas du séchoir statique au séchoir dynamique reste énorme, c'est pourquoi des séchoirs pseudo-dynamiques ont vu le jour.

35. Les séchoirs pseudo-dynamiques

Afin de répondre aux problèmes de capacité, de maintenance et d'énergie, des équipements intermédiaires ont été conçus pour des usages agricoles (foin, grains, fruits, fleurs, plantes aromatiques et médicinales).

351. Séchoir colonne (type houblon) (figure VI.d9)

Le séchoir est composé de caissons superposés (environ 1 m³). L'air est insufflé par le bas. Le fond de chaque caisson s'ouvre et libère le produit dans le caisson inférieur. Au cours du séchage, le produit descend et rencontre un air de plus en plus sec.

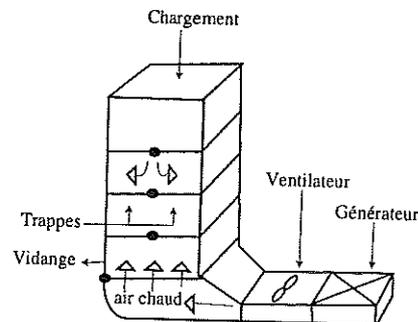


Figure VI.d9
Séchoir «colonne» type houblon



Photo 8 (photo GDF)

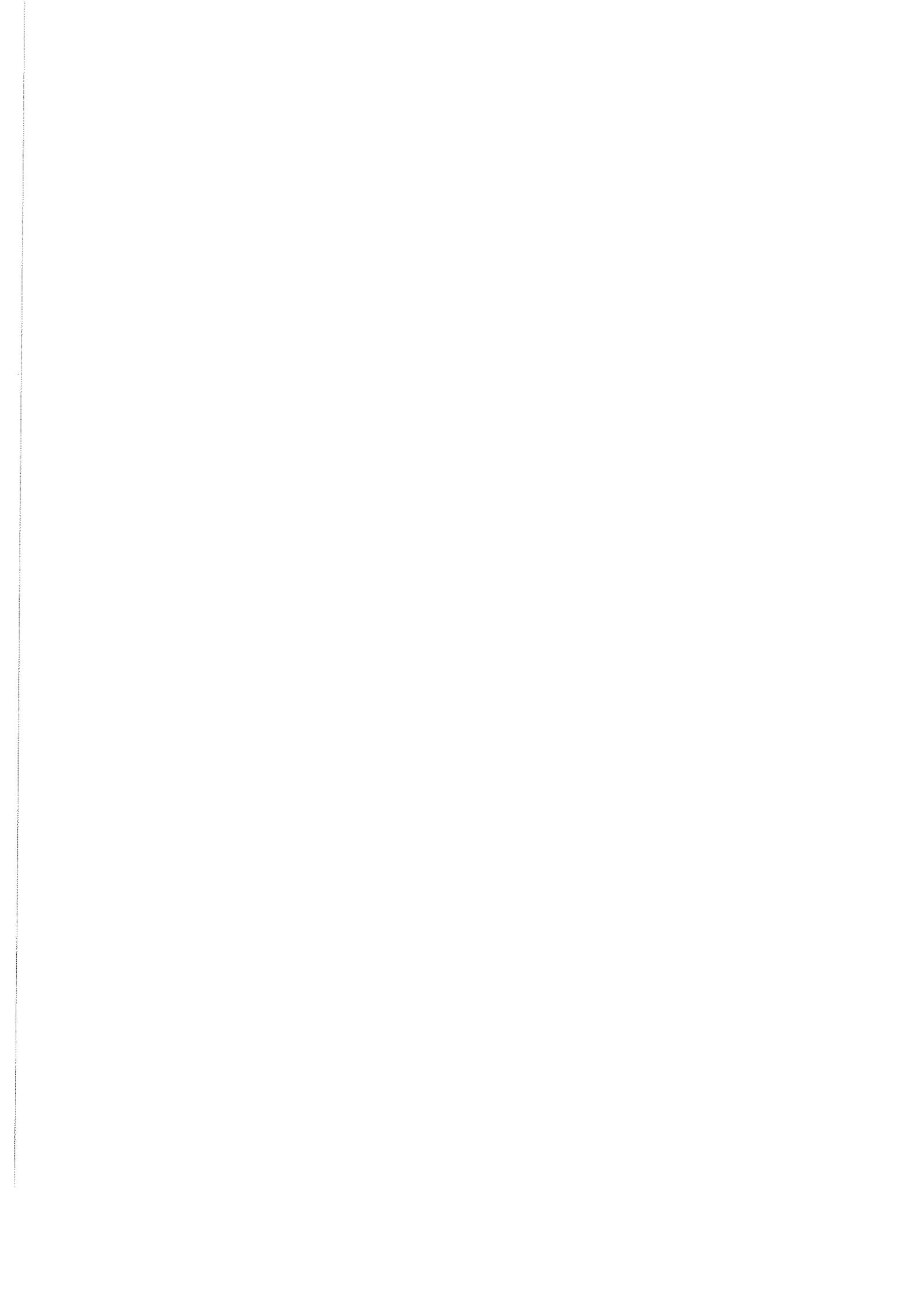
Séchoir en continu pour plantes aromatiques

- | | | | |
|---------------|---|---------------|-------------------------------|
| - longueur | : 90 m | - puissance | : 6 500 kWh |
| - énergie | : gaz naturel | - capacité | : 5 tonnes de produit frais/h |
| - température | : 40 à 100°C selon les produits traités | - 14 brûleurs | gaz direct à veine d'air |



Photo 9 (photo ACK)

Séchoir couloir à chariots (+ claies) ACK



Avantages :

- investissement réduit,
- peu de manutention,
- valorisation de l'air,
- faible place occupée.

Inconvénients :

- limité à des produits coulant et des petits lots.

Usages :

- fleurs,
- produits de faible taille.

352. Tunnel à chariots (type pruneaux) (figure VI.d10 et photo 9, planche 5)

Les chariots chargés avancent à contre-courant. Les premiers rentrés profitent d'un air sec alors que les derniers lots encore très humides reçoivent un air moins sec mais toujours séchant. L'air est en partie recyclé et toutes les deux heures, un lot rentre (frais), un autre sort (sec).

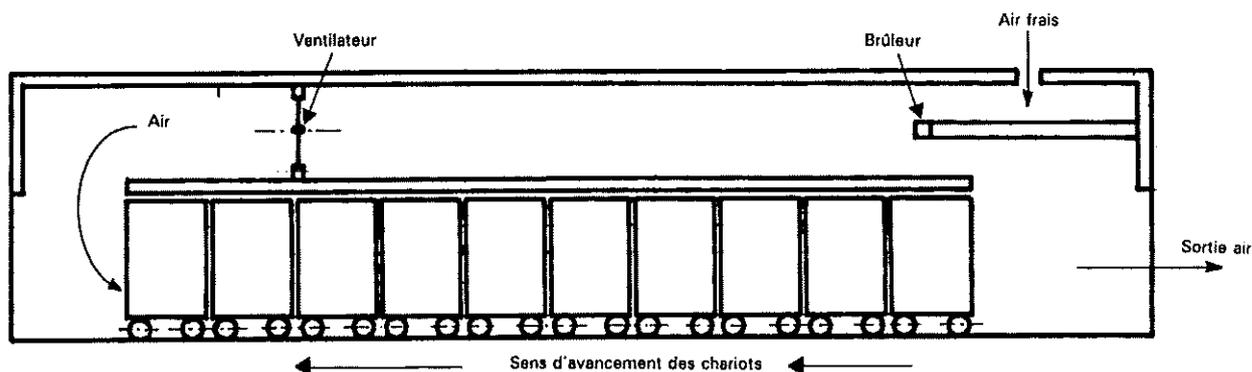


Figure VI.d10

Schéma simplifié du tunnel à chariot

353. Séchoir bi-étage (type grain) (figure VI.d11)

Le séchoir est composé de deux tapis métalliques. Le séchage se fait en deux phases et l'air de la deuxième phase est utilisé pour la première.

Avantages :

- valorisation de l'air,
- diminution de la surface occupée,
- manutention limitée,

Inconvénients :

- adaptation grain/plante difficile,
- densité : vidange manuelle,
- alimentation alternée et non continue,
- système raclage : brisure.

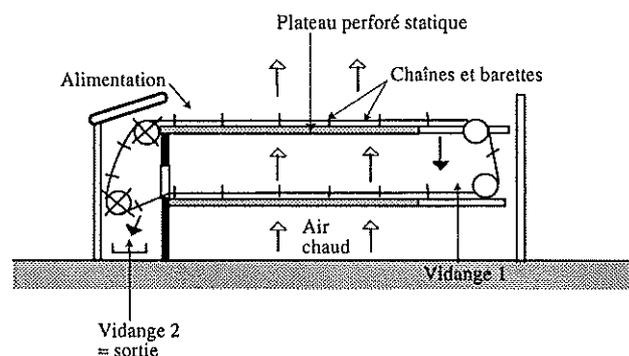


Figure VI.d11

Schéma du séchoir bi-étage : type céréales

354. Séchoir - remorque

Le caisson de séchage est une remorque agricole modifiée. Le chargement se fait au cours de la récolte, il n'y a plus de manutention jusqu'à la fin du séchage (à part le brassage).

Les remorques sont ensuite raccordées à un générateur. La bâche amovible permet le recyclage de l'air extrait.

Le déchargement peut se faire par bannage.

Avantages :

- polyvalence,
- diminution de la manutention,
- recyclage.

Inconvénients :

- tassement au transport,
- répartition de l'air imparfaite,
- investissement.

Constructeur : TAM-BUTAGAZ

- quatre remorques de 10 m³ chacune
- bloc de génération : 180 000 kcal
- PE théorique : 100 kg d'eau/h
- investissement global : ≥ 600 000 F
- consommation spécifique : 1 à 2,5 kWh/kg eau
- énergie : propane

Cette réalisation à titre expérimental n'a pas connu de suite faute d'acquéreur.

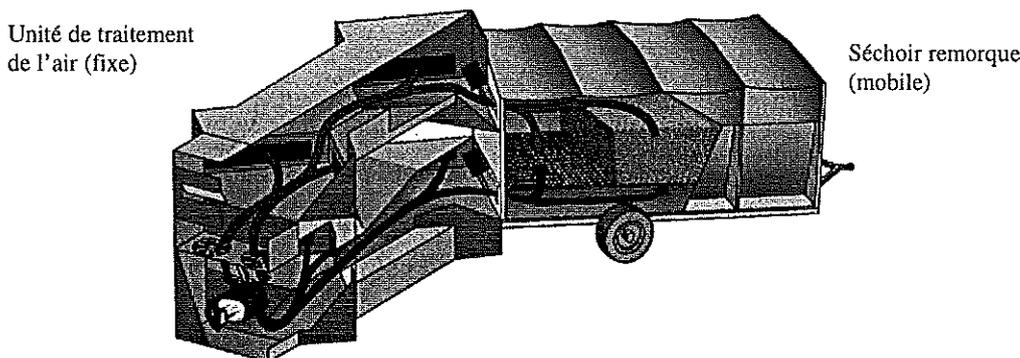


Figure VI.d12
Coupe longitudinale du séchoir remorque
(Source : Butagaz Industrie)

355. Séchoir à bande (grain/foin) (figure VI.d13)

Le séchage se fait en deux phases statiques. L'air peu saturé de la deuxième phase est recyclé et injecté à la première phase. Le déplacement est réalisé par chaîne et barette (type épandeur). Le séchoir fait bâtiment, sans besoin de bardage supplémentaire. Il peut être installé à l'extérieur.

Avantages :

- grosse capacité,
- valorisation de l'air,
- diminution de la manutention,
- polyvalence grain, fourrage, plantes.

Inconvénient :

- le déplacement par "raclage" dégrade le produit : brisure,
- encombrement.

Constructeur :

ALVAN BLANCH

Différents modèles sont repris par le tableau VI.d5.

Conçu pour le foin et les graines, ce type de séchoir ne connaît pas de réelle application en PAM. A noter que la Société ALVAN BLANCH France, rachetée en 1992, ne construit plus de matériel à usage agricole.

Modèle	Long. (m)	Pouvoir évaporatoire à 40°C (kg eau/h)	Débit à 40°C (kg pl. sèche/h)	Coût HT 1991 (F)
Mark 3	27,0	160	40	500 000
Mark 4	33,6	215	53	600 000
Mark 5	40,2	265	65	700 000

Tableau VI.d5
Caractéristiques de quelques modèles de séchoir-déshydrateuse Alvan-Blanch

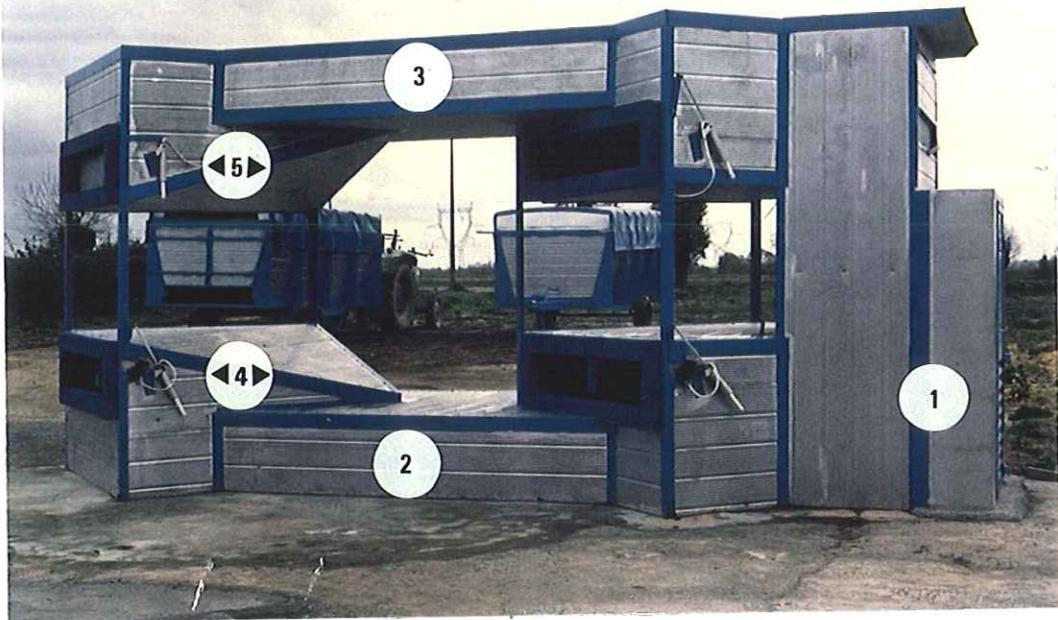


Photo 10 (photo T.A.M.)

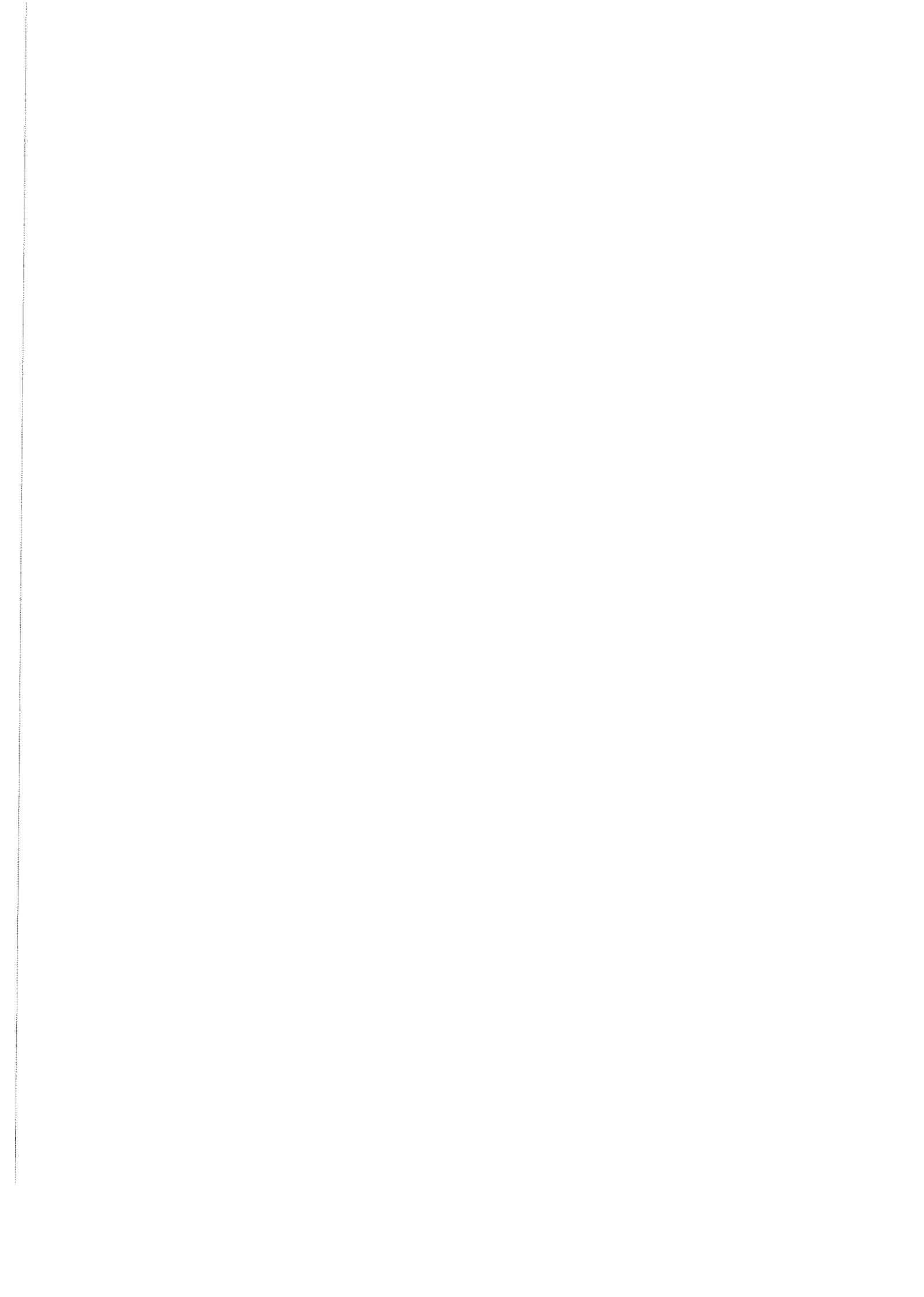
Séchoir remorque TAM - Butagaz

- bloc de génération ① : 210 kWh
- conduites air traité ② et usé ③
- bouches inférieures ④ : air traité
- bouches supérieures ⑤ : air usé
- à l'arrière plan : remorques de séchage



Photo 11 (photo iteipmai)

Séchage de lavandin super pour bouquets, dans séchoir à case
Arrivée de l'air traité depuis le fond, et circulation sous les palettes



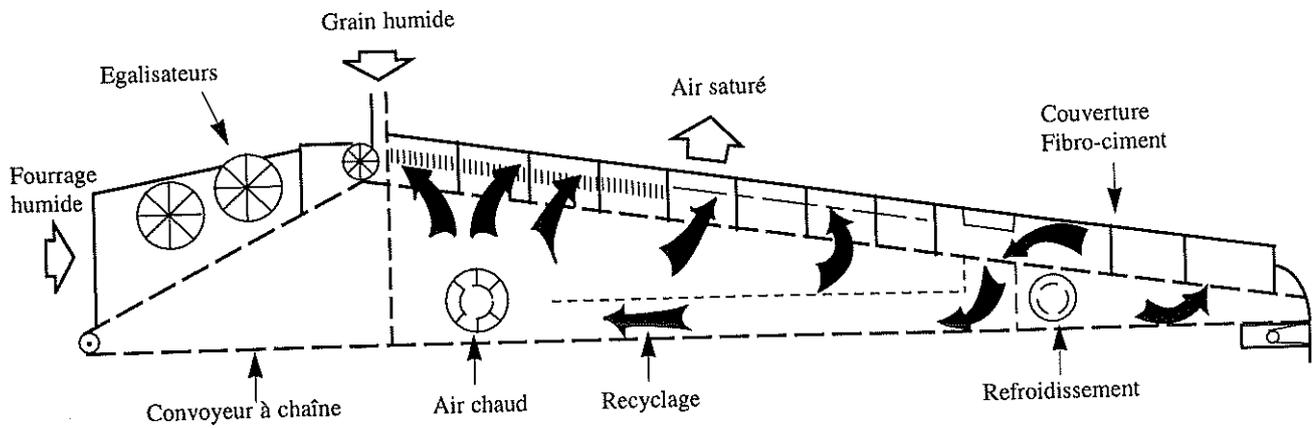


Figure VI.d13
Exemple de séchoir-déshydrateuse à convoyeur
(Source : Alvan Blanch)

36. Exemples de réalisation par auto-construction

361. Multicaissons (figure VI.d14)

L'ensemble est logé dans un hangar.

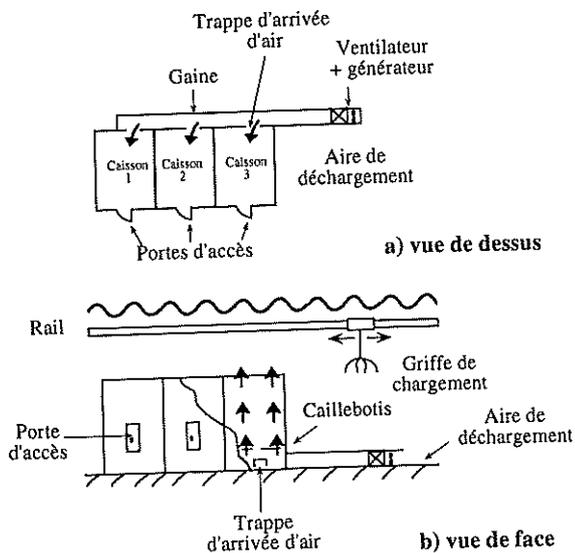


Figure VI.d14
Multicaissons (gros volumes)

Avantages :

- diminution de la manutention sur grille,
- grosse capacité,
- séchage par phase.

Inconvénients :

- consommation énergie,
- investissement.

362. Cases (figure VI.d15 et photo 11, planche 6)

La case a l'aspect d'un couloir de séchage. Le séchoir est très accessible et peut servir de lieu de stockage divers.

Avantages :

- accès,
- capacité,
- polyvalence.

Inconvénients :

- répartition irrégulière de l'air.

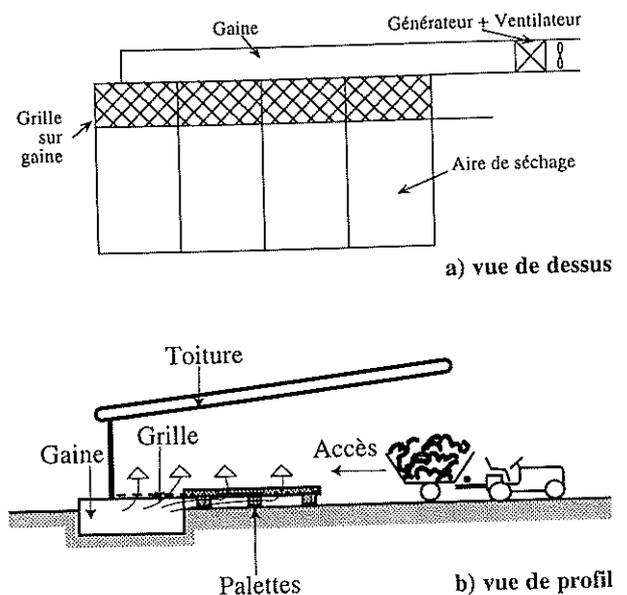


Figure VI.d15
Multicases

363. Séchoir bi-étage (type PAM) (figure VI.d16)

Le caisson supérieur est relevable par vérin et permet de remplir et vidanger le premier. L'air est ainsi mieux valorisé.

Avantages :

- meilleure valorisation de l'air,
- diminution surface occupée.

Inconvénients :

- manutention

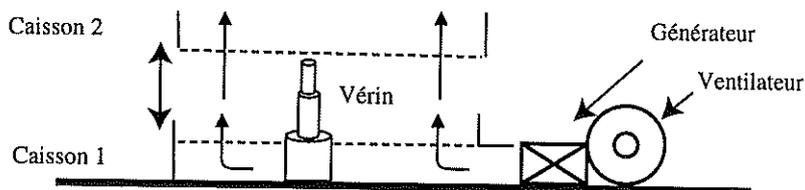


Figure VI.d16
Caisson bi-étage (PAM)

364. Caisson amovible (figure VI.d17)

Le caisson est monté lors de chaque saison pour un séchage volumineux et éphémère.

Avantages :

- démontage : bâtiment libéré après le séchage,
- modifiable.

Inconvénients :

- manutention à chaque saison,
- mauvaise étanchéité.

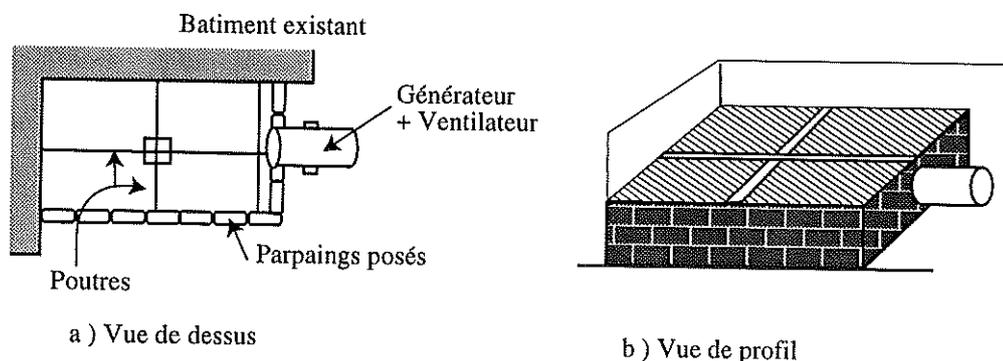


Figure VI.d17
Caisson amovible

4. CONCLUSION

A travers cette partie, nous avons pu appréhender la grande diversité des solutions de séchage.

La liste des séchoirs présentée n'est pas exhaustive. Elle reprend les grands principes, de nombreuses variantes existantes.

Encore une fois, il n'existe pas de solution unique. A chacun d'évaluer ses besoins techniques et ses possibilités de financement.



CHAPITRE VII - LA CHAÎNE DE TRANSFORMATION



1. INTRODUCTION

Peu nombreux sont les cas où le séchage est la seule opération à réaliser entre la récolte et la vente.

Généralement, le transformateur intervient en amont et en aval de la déshydratation pour élaborer le produit, éliminer les parties indésirables (terre, tiges, germes ...), améliorer la texture. C'est une véritable confection.

Chaque plante et chaque partie se traitant spécifiquement, la chaîne doit être modulable et polyvalente pour assurer souplesse et efficacité.

L'équipement d'élaboration composé de nombreux outils peut avoir diverses origines, la modification et l'adaptation est quasi-obligatoire ... Les solutions se trouvent le plus souvent dans l'expérience.

Cette partie présente les principales opérations de transformation par le biais de quelques matériels, la liste de ces derniers étant loin d'être exhaustive.

On distinguera, par rapport au poste de séchage, un circuit d'amont et un circuit d'aval.

2. LE CIRCUIT D'AMONT

21. Introduction

Objectifs

- Présenter au séchoir un produit :
 - . propre,
 - . proche du produit fini (% tige, couleur...),
 - . facilement séchable (tronçonnage),
 - . de bonne qualité (couleur, huile essentielle, ...).
- Limiter les pertes

Limites

Le produit étant fragile, ces opérations doivent être rapides tout en respectant les plantes. C'est une phase cruciale en terme de qualité, elle exige bien souvent un équipement difficile à amortir. La fourche reste encore l'outil le plus utilisé.

Exemple de procédés (figure VII.1)

- 1) Réception
- 2) Manutention
- 3) Démêlage
- 4) Coupe-broyage
- 5) Séparation - calibrage
- 6) Lavage - essorage

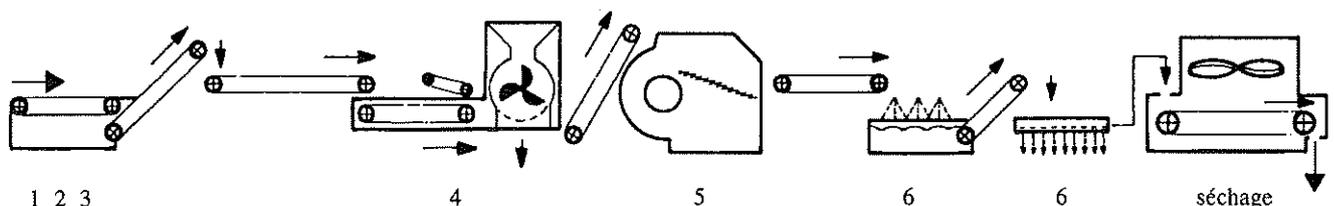


Figure VII.1
Exemple de chaîne de transformation pour PAM
(source : Jaquet)

22. Réception - Stockage

Lorsque le produit doit attendre, on lui réserve un lieu abrité (ombragé, frais, aéré) et on le brasse afin qu'il ne s'échauffe pas. Un préstockage sur claie est conseillé.

Toute phase d'attente en frais est source de dégradation de la qualité, le produit s'oxyde, brûnit, se flétrit, ces principes actifs évoluent surtout après une première élaboration (ex. : tronçonnage).

Pour une attente de longue durée, le recours à une chambre froide peut s'imposer.

23. Manutention

Ce poste, avec celui de l'énergie, constitue la plus grosse charge, charge financière mais aussi non chiffrable (pénibilité). Les manipulations sont fréquentes.

L'intégration des matériels pour la manutention pose des problèmes pratiques :

- encombrement,
- manque de souplesse pour des chaînes polyvalentes,
- limites (ex. : brassage en séchoir statique).

Manutention en frais

☞ La fourche manuelle encore bien utilisée, mais ... redoutée.

☞ La fourche hydraulique (tracteur, chariot élévateur, poste fixe).

Economiques en terme de pénibilité, elles exigent un accès et un espace mort autour des outils, souvent limités dans les bâtiments de transformation.

Investissement : > 10 000 F HT

☞ La fourche suspendue (figure VII.2)

Pratique et peu encombrante, elle est souvent limitée aux chargements et déchargements (1 seul axe).

Investissement : > 30 000 F HT

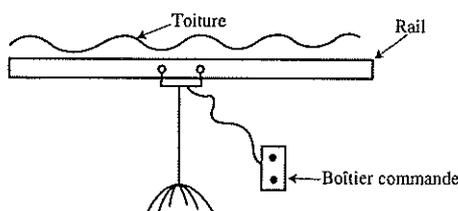


Figure VII.2

Fourche suspendue

☞ Les tapis (figure VII.3)

Simple et d'usages polyvalents, ils interviennent dans des chaînes souvent fixes et continues. Ils exigent aussi de la place (pour des raisons d'entretien, on choisira des rouleaux cage bombés au centre). Certains tapis peuvent être équipés d'un détecteur de métaux.

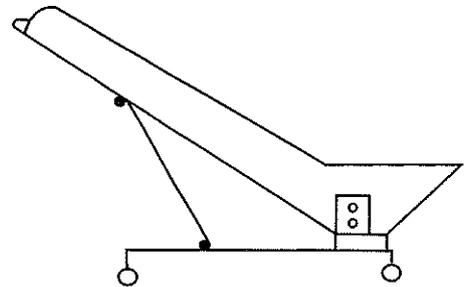


Figure VII.3

Tapis

☞ Le transport pneumatique

Système révolutionnaire dans le secteur des céréales, ce principe peut s'adapter aux plantes mais sa polyvalence se restreint à des parties courtes. En plante entière, partie aérienne non tronçonnée, le surdimensionnement des conduits n'est pas justifié. Cette technique est donc réservée aux produits secs et frais tronçonnés.

- Principes (figure VII.4)

Le produit est entraîné par un flux d'air à travers des gaines.

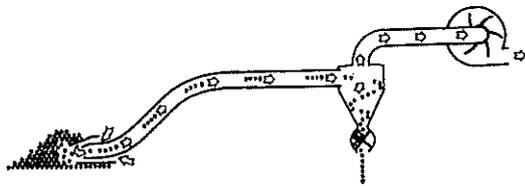
Kongsilde présente également un transport par pression/aspiration. C'est une combinaison des avantages des deux systèmes précédents. Il permet en outre d'intercaler des systèmes intermédiaires tels que pesage ou prénettoyage entre le côté pression et le côté aspiration.

Usages

- . dépoussiérage,
- . aspiration,
- . transport,
- . alimentation sasseurs, broyeurs,
- . séparation fines/brisures.

Avantages

- la mise en œuvre est économique et simple (1 motoventilateur + tuyaux + cyclone),
- diminution de la pénibilité, diminution des résidus, peu d'occupation au sol,
- adaptable à des produits de différentes densités.

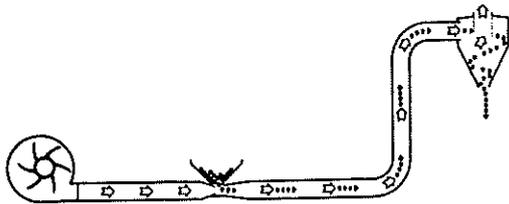


a) transport par aspiration (plusieurs entrées, une sortie)

- . admission par une écluse rotative ou une tête d'aspiration adaptée au produit
- . séparation au moyen d'un cyclone avec écluse rotative étanche

Le transport par aspiration est le plus doux et génère moins de poussière

Exemple : vidange de séchoir vers une batteuse



b) transport par pression (1 entrée, plusieurs sorties)

- . admission par un injecteur ou une écluse rotative
- . séparation air/produit au moyen d'un séparateur ou d'un cyclone

Exemple : transport à la sortie d'une machine à débit continu

Figure VII.4

Système de transport pneumatique
(source : Kongskilde)

Inconvénients

- limité aux produits fins (les parties aériennes exigent de très grosses installations),
- adaptation et mise au point délicate pour PAM de faible densité.

Coûts (HT, 1994, source : Kongskilde)

Système complet avec 10 m de tuyau :

- par aspiration : 30 000 F
- par pression avec injecteur (venturi) : 20 000 F
- avec écluse : 30 000 F

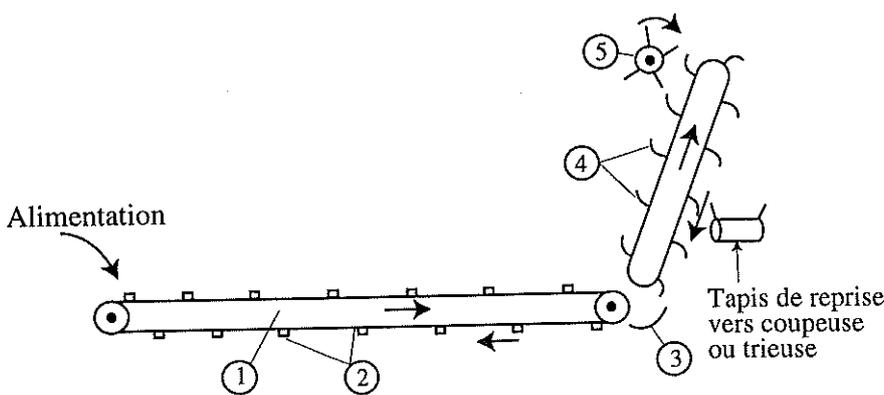
Des systèmes destinés aux PAM ont été installés.

24. Démêlage - homogénéisation

Opération indispensable pour les séchoirs continus, elle permet d'alimenter régulièrement la chaîne et d'éliminer d'éventuels déchets (terre, pierres).

La plupart du temps, ce démêlage est réalisé à la fourche lors du déchargement.

Le démêleur de type industriel peut être utilisé (figure VII.5)



- 1) tapis tampon,
- 2) chaîne et barette,
- 3) dépiereur,
- 4) griffes,
- 5) démêleur, homogénéisateur.

Figure VII.5
Démêleur type Jaquet

25. Coupe (tableau VII.1 et photo 13, planche 7)

Opération favorisant le séchage et permettant d'éliminer les parties inutiles (tiges), la coupe homogénéise le produit, augmente les surfaces d'échange et favorise l'évacuation de l'eau au séchage.

On facilite aussi les autres travaux d'élaboration en rendant le produit plus coulant, plus standard.

Certains produits ne se coupent pas car :

- ils sont fragiles :
 - . sensibilité à l'oxydation, au brunissement (ex. : estragon),
- ils sont déjà finis :
 - . fleurs,
 - . parties aériennes basse (ex. : thym),
- ils se séparent mieux par battage en sec (ex. : beaucoup de labiées : thym, origan, sarriette),
- le marché est précis
 - . sommités fleuries (ex. : reine des prés, millepertuis),
 - . feuilles mondées entières (ex. : verveine, menthe, mélisse, cassis).

La coupe mécanique est souvent suivie d'une séparation avant le séchage. Elle doit être franche, régulière et rapide.

26. Broyage (tableau VII.2)

Le broyage comme la coupe peut intervenir en amont ou en aval du séchoir.

En aval, il sert pour élaborer des plantes en poudre à destination de gélules médicinales, d'extractions pharmaceutiques et des IAA. Dans ce cas, la finesse attendue approche les 200 microns et exige une forte puissance et un tamisage ultérieur. On utilise pour cela des moulins ou des broyeurs à marteaux peu polyvalents pour le matériel végétal frais.

Le broyage d'un produit frais congelé, appelé broyage cryogénique, limite :

- la puissance demandée (broyage par chocs),
- les pertes par dégradation thermique,
- les réactions avec l'extérieur,
- favorise l'extraction ou le séchage ultérieur.

Le broyage simple de produit vert ou humide est réalisé pour certains séchages et pour de nombreuses extractions.

Caractéristiques	Hache-paille	Coupeuse améliorée	Coupe guillotine	Coupe ensileuse	Coupe «légume»
Références	classique Alvan Blanch	type industriel Jaquet	type industriel Winecker	semis industriel Frelon/Alvan-Blanch	4° gamme-IAA Urshell
Investissement F HT 1992	≥ 10 000	> 80 000	> 240 000	> 35 000	200 000 (tarif 1994)
Débit (t/h)	< 2	2	-	1 à 5	0,6 à 0,8
Qualité de coupe	passable	bonne	parfaite franche régulière	assez bonne et régulière	parfaite
Avantages	prix accessible	débit et qualité	qualité	débit - prix	potentialités
Inconvénients	rendement qualité	investissement	limité aux plantes sèches investissement	irrégularités	prix
Destination	petit producteur	herboristerie/industrie			IAA

Tableau VII.1

Mise en comparaison de quelques coupeuses

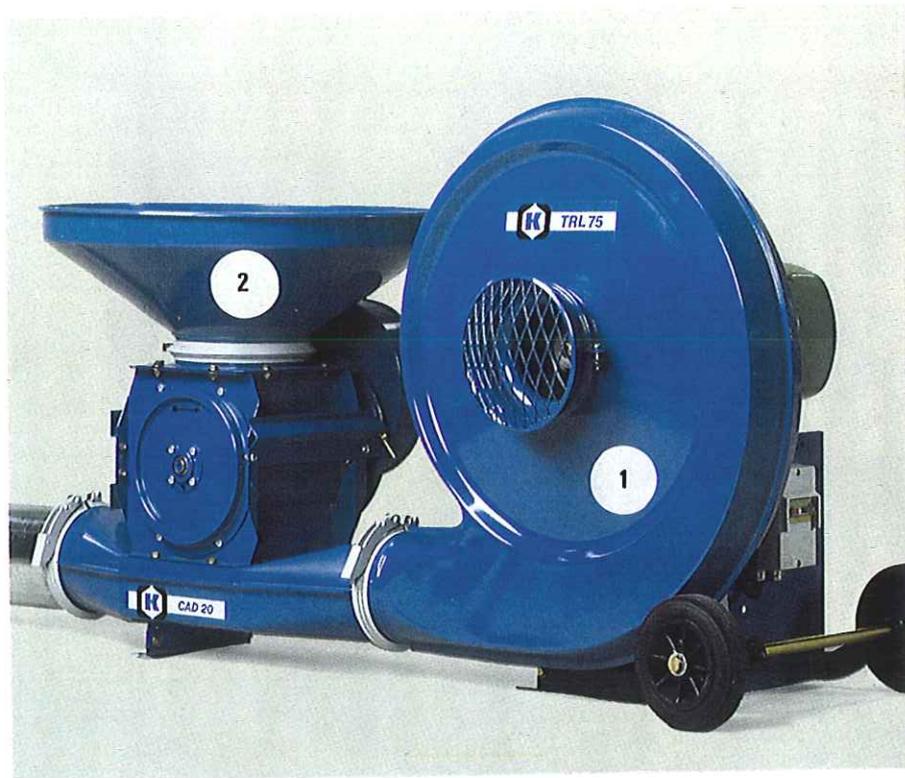


Photo 12 (photo Kongskilde)

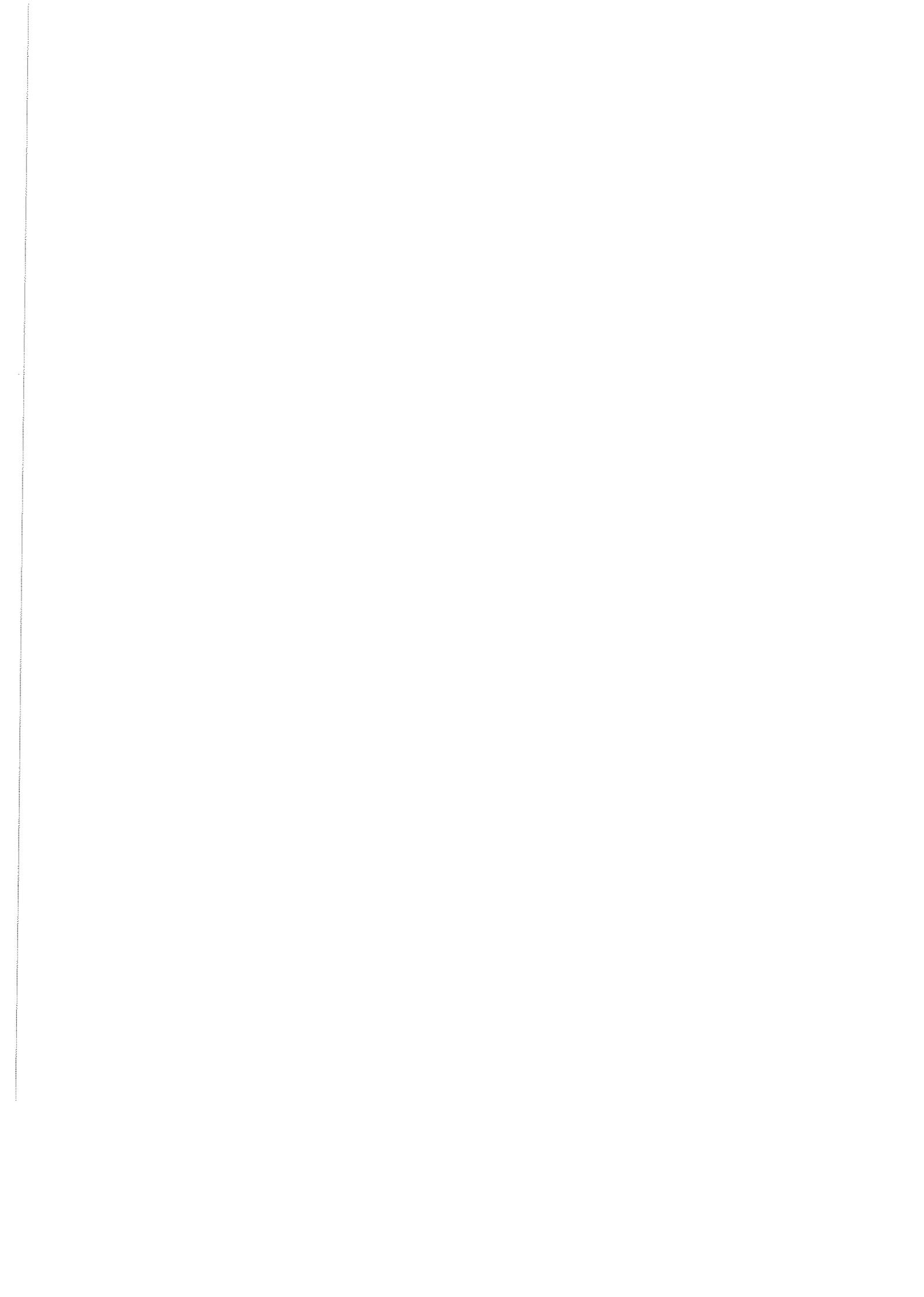
Équipement Kongskilde pour transport pneumatique

- ventilateur TRL75 ① : puissance maxi 650 mm CE, débit air maxi 3 200 m³/h
- écluse rotative CAD 20 ② : admission du produit



Photo 13 (photo itelpmai)

Découpeuse «Le Frelon» (Alvan Blanch), pour plantes fraîches
Débits de 1 500 kg/h (coupe 1 cm) à 4 000 kg/h (coupe 10 cm)



Caractéristiques	Broyeurs à couteaux		Broyeurs à fléaux	Broyeurs à chocs
Marques	ELECTRA, PROMILL, ALVAN BLANCH	PROMILL, ALVAN BLANCH	-	FORPLEX
Investissement F HT 1992	≥ 15 000	A partir de 40 000	> 20 000	Ex. : 500 000 pour produit congelé
Débit horaire	> 1 t	≥ 50 kg	> 2 t	≥ 50 kg
Qualité de broyage	Très grossière φ > 1 mm	Fine ≥ 150 μ	Irrégulière et grossière ≥ 5 - 10 cm	Parfaite
Avantages	Débit	Finesse	Débit Prix/Rendement	Qualité du produit
Limites	Coupe irrégulière	Petit débit Prix	Mauvaise coupe	Investissement Faible capacité
Destination	Frais : coupe pour séchoir Sec : «battage - réduction»	Poudres pour gélules IAA	Peu conseillé/PAM	Poudres de qualité pharmaceutique

Tableau VII.2
Mise en comparaison de quelques broyeurs

27. Séparation en frais

Objectifs

- réserver les parties nobles,
- éliminer les tiges et déchets.

Mondage manuel

Pour des créneaux spécifiques : herboristerie de qualité, marché bio et pour les plantes délicates, la séparation est réalisée en équipe de mondage.

Celle-ci travaille soit :

- au champ
 - . en prélevant sur tige (ex. : cassis, thé, verveine),
- sur l'exploitation
 - . à partir de lots récoltés (ex. : sauge officinale, souci).

Comme pour la cueillette de fleurs, cette opération est coûteuse et tend à être remplacée par des récolteuses élaborées ou par des importations bon marché.

Ventilation par tarare (figure VII.6)

Cet appareil de collection permet à moindre frais, de séparer tiges et feuilles. Il est polyvalent mais le rendement faible le réserve à de petites structures.

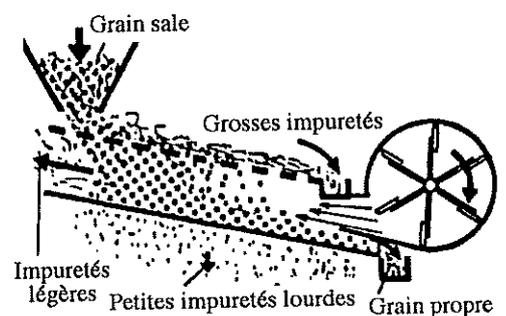


Figure VII.6
Tarare avec ventilation et tamisage combinés
(source : Motorisation et technique agricole, 1985)

Trieur industriel (type Jaquet)

Les chaînes de transformation sont équipées de gros outils assurant triage, séparation en :

- produits nobles,
- déchets,
- produits intermédiaires pouvant être recyclés par retour à la coupeuse.

Leur coût, bien souvent prohibitif, fait qu'on leur préfère des machines bricolées.

Trieur adapté (figure VII.7)

A l'aide d'un arrière de batteuse et d'un ventilateur, on peut imiter le trieur industriel après quelques mises au point.

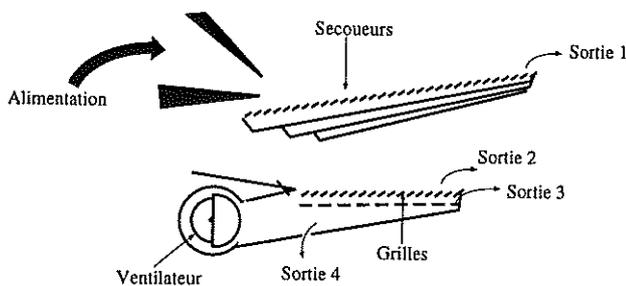


Figure VII.7

Principe du trieur dérivé de la batteuse

28. Lavage - Essorage

Certaines parties de plante exigent un nettoyage pour limiter la présence de terre et de germes. En général, on lave à l'eau :

- toutes les racines (ex. : valériane, bardane, ...),
- les plantes entières (ex. : piloselle, pissenlit, ...),
- les parties aériennes courtes (ex. : persil feuille),
- les plantes destinées à la surgélation ou l'aromatisation des plats cuisinés.

C'est une opération coûteuse en main d'œuvre et investissement, mais elle est obligatoire pour obtenir une qualité commerciale payante.

Pour les racines, les choix du terrain et de la variété influencent pour beaucoup le rendement du lavage.

Le poste lavage peut se situer en début de chaîne dès la réception, et s'associer au procédé de démêlage-homogénéisation.

Les techniques varient avec les volumes traités :

- trempage, jet, et bétonnière pour petite quantité,
- laveuse cylindrique (figure VII.8).

Coût HT, 1991 (Alvan Blanch)(photos 14 et 15, planche 8) :

- débit 1,5 à 3 t/h : 46 000 F
- débit 3 à 6 t/h : 77 000 F

Pour certaines chaînes de transformation, l'essorage s'impose. Il utilise les principes de ventilation et de vibration (figure VII.8).

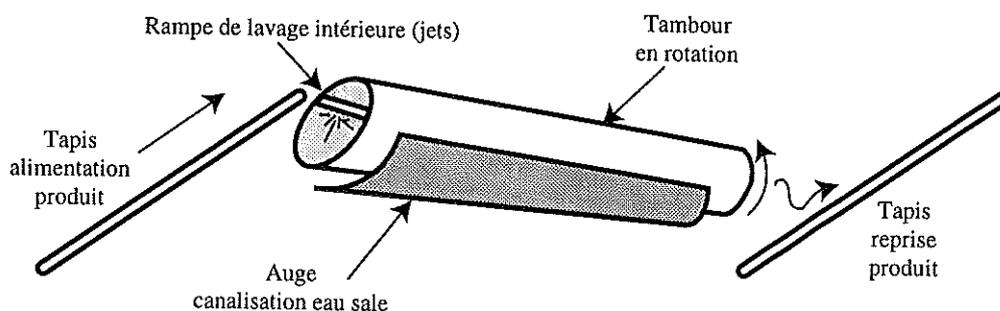


Figure VII.8

Principe de la laveuse cylindrique (type Alvan Blanch)



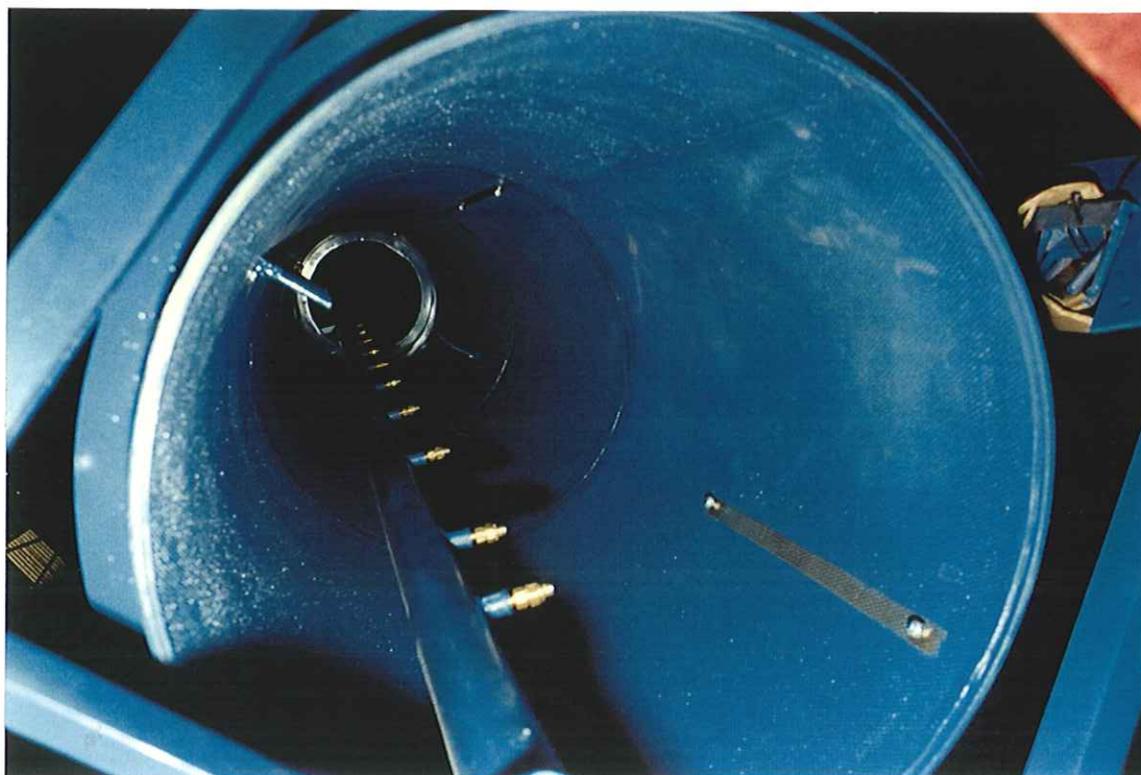
Photos 14 et 15 (photos itelpmai)

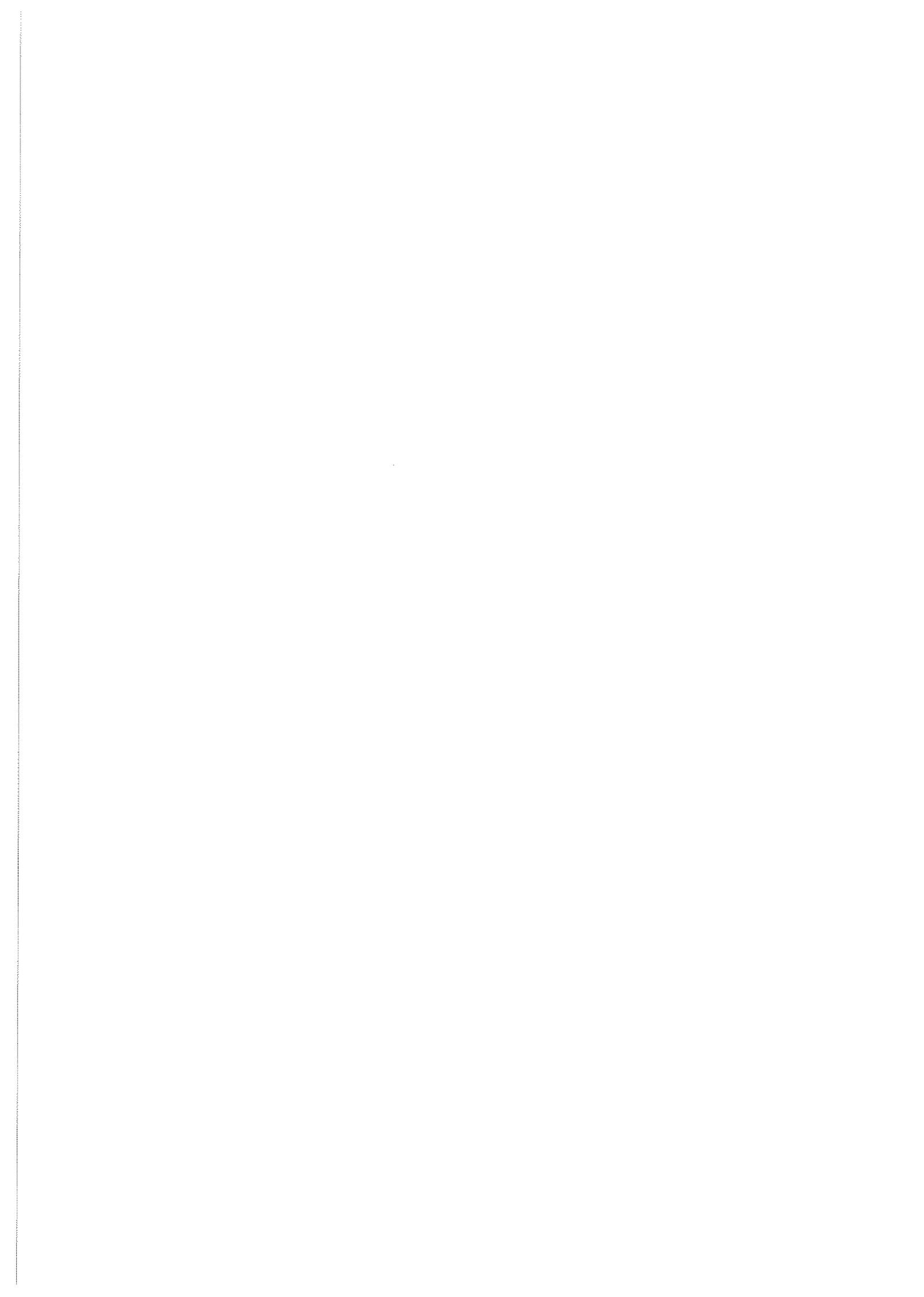
Laveuse AB 2000 (Alvan Blanch) pour racines et plantes entières

- débit : 1,5 à 3 tonnes/h
- débit eau nécessaire : 8 à 15 m³/h à 4 bars

ci-dessus : vue générale

ci-dessous : gros plan sur la rampe de lavage (intérieur tambour)





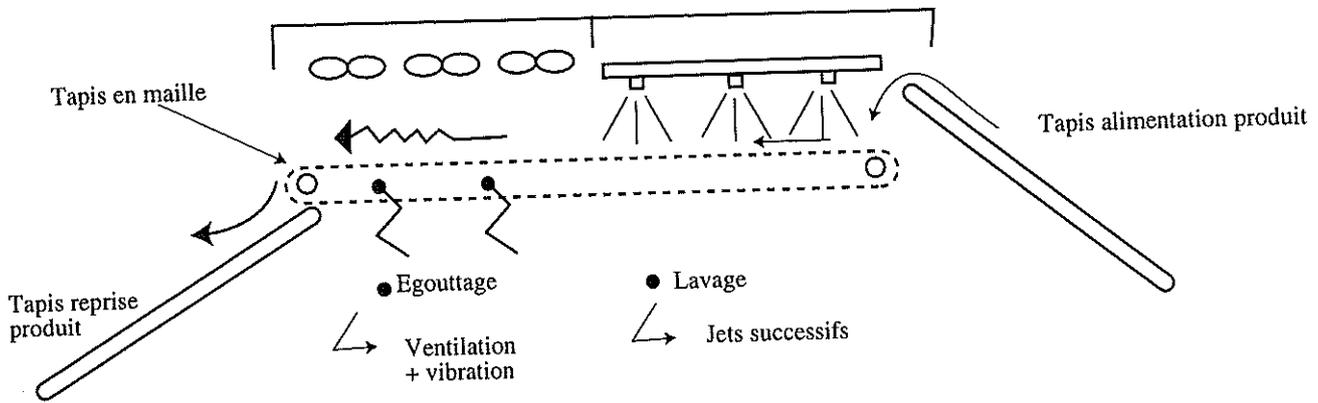


Figure VII.9
Principe d'une laveuse avec tapis

3. LE CIRCUIT D'AVAL

31. Introduction

Lorsque le séchage est terminé, avec une humidité voisine de 10 %, les plantes sont plus ou moins cassantes. Le produit va alors subir une série d'élaboration en accord avec sa forme (feuilles, plante entière, racine, ...) et sa destination commerciale (pharmacie, herboristerie, extraction,...).

Les principales élaborations rencontrées sont :

- le battage : séparation feuille/tige,
- le criblage : séparation/taille,
- la séparation secondaire : séparation/densité + taille,
- le broyage : poudre pour gellule,
- la coupe : forme commerciale,
- le conditionnement : conservation, commercialisation.

Certaines machines, comme le tarare, le sasseur ou le broyeur, seront utilisées aussi bien avec des produits frais que secs.

Remarque : le terme de «fine» employé par la suite, désigne de la poussière très fine de plante.

32. Le battage

Cette opération est très fréquente, elle permet de détacher les feuilles et les fleurs des tiges. Les constructeurs proposent quelques machines mais les transformateurs ont le plus souvent recours à des moissonneuses-batteuses adaptées et réglées (écartement batteur, débit de ventilation) pour des questions de débit horaire et d'investissement (tableau VII.3).

L'objectif de ce traitement est de se rapprocher de la qualité du mondage manuel à moindre frais.

En pratique, il entraîne des pertes en créant une quantité non négligeable de fines brisures.

Cette opération est souvent suivie d'une ou plusieurs séparations pour éliminer les parties indésirables, tiges, fragments de tiges, poussières fines, ... éventuellement les brisures.

Systèmes	Moissonneuse-batteuse classique	Batteuse Alvan Blanch (fig. VII.10)	Battage+Séparation Alvan Blanch (fig. VII.11)	Brosseuse Alvan Blanch (fig. VII.12)	Brosseuse Jaquet
Investissement HT F 1991	Location ou occasion	-	a > 35 000 b > 51 000 c > 65 000	> 50 000	-
Débit horaire kg brut/h	50 à 200	< 50	a > 90 b > 150 c > 225	< 100	≥ 70 - 100
Qualité de battage	Correcte	Correcte	Correcte	Correcte	Excellente
Aspect	Feuilles brisées	Feuilles brisées	Brisures + Feuilles	Feuilles + Brisures	Feuilles
Avantages	Economique Productif	Polyvalent	Plusieurs élaborations en un passage	-	Qualité du travail
Limites	Encombrant Qualité brute	Très faible rendement	Faible rendement Exige plantes courtes	Manque d'optimisation (réglage)	
Destination	Tous types	Petits producteurs	Producteurs moyens	-	Gros et demi-gros

Tableau VII.3
Inventaire des systèmes de battage

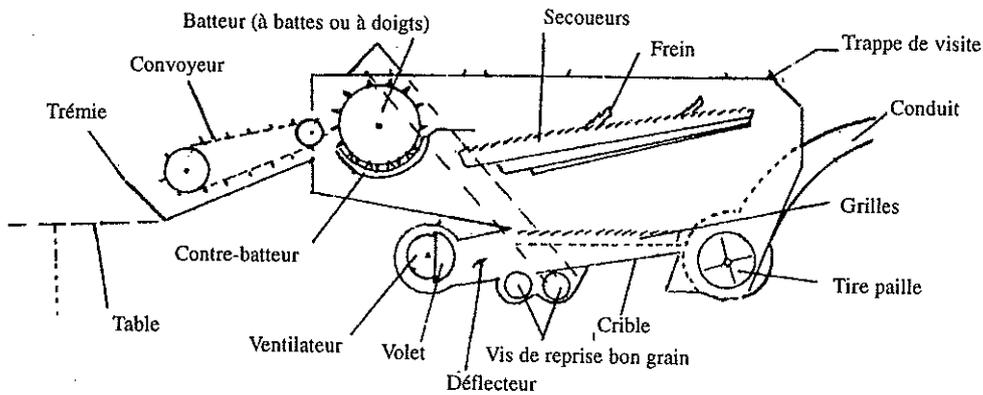


Figure VII.10
Batteuse Alvan Blanch

- A : entrée du produit
- B : premier ventilateur
- C : réception des feuilles triées
- D : batteur
- E : second ventilateur
- F : réception des feuilles après battage
- G : évacuation des morceaux de tige

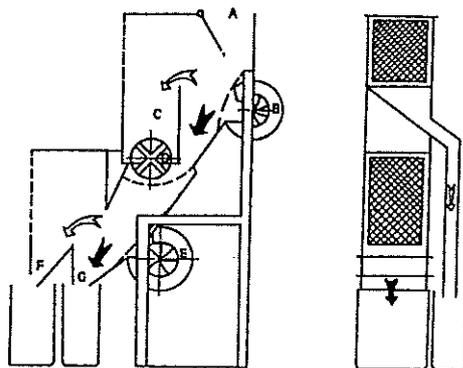


Figure VII.11
Séparateur pneumatique + battage Alvan Blanch

Après un premier triage des feuilles libres, les feuilles restant attachées aux tiges descendent dans le batteur. A la sortie de la batteuse, un deuxième triage envoie les feuilles et les tiges dans leurs bacs respectifs.

débit : 2 - 4 m³ plante sèche/heure, soit 80 à 120 kg feuilles/heure

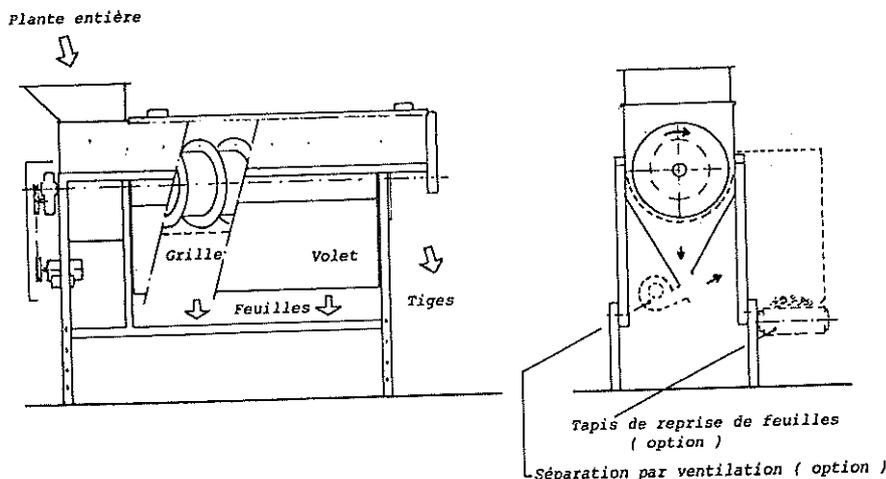


Figure VII.12

Brosseuse Alvan Blanch pour monder, trier ou calibrer de la plante entière sèche

33. La coupe et le broyage

(cf. circuit d'amont)

34. Le triage

A la sortie du séchoir, de la coupeuse, du broyeur, de la batteuse ou de la brosseuse, le triage s'impose afin d'améliorer la qualité du produit. Ce triage utilise plusieurs propriétés physiques pour séparer les différents éléments :

- taille des particules : criblage/diamètre :
 - . sasseur,
- densité + taille : séparation pneumatique :
 - . tarare,
 - . tamiseur vibrant,
 - . colonne densimétrique.

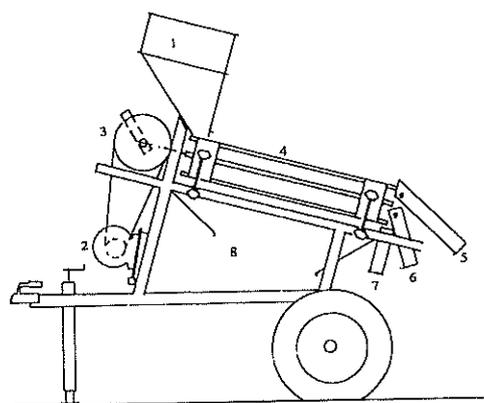
341. Le criblage (tableau VII.4)

Le crible ou tamis permet de dégrossir le produit. De conception simple et de capacité importante, il sépare les parties de nature bien différente :

- tiges, feuilles et fleurs, fines et poussières,
- feuilles + fleurs, fleurs brisées + graines et fines.

Son intégration dans la chaîne permet d'éliminer les déchets et résidus du battage et ainsi de limiter l'encombrement et le volume à traiter en finition. Travaillant sur la taille des particules, il ne peut différencier les parties de nature proche (ex. graines et fines, petits fragments de tiges et capitules de fleurs).

Le tamisage par sasseur est très couramment utilisé (figure VII.13 et photo 16, planche 9).



- 1 : trémie d'alimentation
- 2 : moteur électrique
- 3 : roue excentrique (vibration des grilles)
- 4 : 3 niveaux de grilles juxtaposables
- 5 : 1ère sortie
- 6 : 2e sortie
- 7 : 3e sortie
- 8 : 4e sortie

grosses particules

terre, poussière, fine

Figure VII.13

Sasseur mobile Alvan Blanch

Coût du sasseur mobile Alvan Blanch (HT, 1992)

Débit (en kg de thym/h) :

- 40 kg : 24 000 F
- 100 kg : 32 000 F
- 160 kg : 48 000 F

Types	Sasseurs classiques		Sasseurs industriels		Nettoyeur et séparateur à grains	Séparateur alvéolaire à grains
	CESBRON (Fixe)	ALVAN BLANCH (Mobile)	JAQUET	CHAUVIN (ph. 17, pl. 10)		
Références	CESBRON (Fixe)	ALVAN BLANCH (Mobile)	JAQUET	CHAUVIN (ph. 17, pl. 10)	TRIP. & RENAUD (Helios)	-
Produits concernés	Tous types : feuilles, fleurs, graines				Graines	Graines, Fleurs ex. : bruyère
Qualité de triage	Moyenne et nécessite une reprise pneumatique				Bonne	Bonne
Intérêts	Economique Polyvalent	Mobile (Usage collectif)	Productivité		Qualité de triage	
Limites	Faible rendement	Investissement	Encombrant + Investissement		Réservé aux produits denses (graines)	Peu polyvalent Faible Rendement
Destination	Petits producteurs, moyens producteurs	SICA CUMA	Industrie		Créneaux spécifiques Semences feuilles pures fleurs pures graines	

Tableau VII.4
Différents matériels de criblage

342. La séparation secondaire (tableau VII.5)

Afin d'obtenir des produits très élaborés pour certains marchés, une séparation finale est nécessaire. Le principe fait appel à des différences de comportements par rapport à l'air, aux vibrations.

Ces techniques concernent des produits commerciaux «purs» tels que graines, feuilles, fleurs, poudres.

Les appareils exigent une alimentation homogène et régulière, leur rendement est faible. Ils s'associent très bien avec des systèmes de transport pneumatique.

Types	Colonne densimétrique TRIPETTE & RENAUD (fig. VII.14)	Séparateur pneumatique JAQUET (fig. VII.15) (ph. 18, pl. 10)	Planshister TRIPETTE & RENAUD (fig. VII.16)	Séparateur vibrant CHAUVIN (fig. VII.17)
Principe de séparation	Densité	Densité	Taille	Taille + vibration centrifuge
Qualité de séparation	Parfaite	Parfaite	Parfaite	Bonne
Type de produits	Graines, feuilles, fleurs 3 sorties	Brisures, fines 2 sorties	Poudres, prdts fins, légers ≥ 2 sorties	Poudres, fines brisures 1 à 2 (3) sorties
Avantages	Parfaite séparation par densité Conception simple	Débit	Très bonne séparation des poudres	-
Inconvénients	Faible débit	Investissement	Peu polyvalent	-
Destination	Marché herboristerie	Marché herboristerie	Poudre gélule	Poudre gélule

Tableau VII.5
Différents matériels de séparation secondaire



Photo 16 (photo iteipmai)

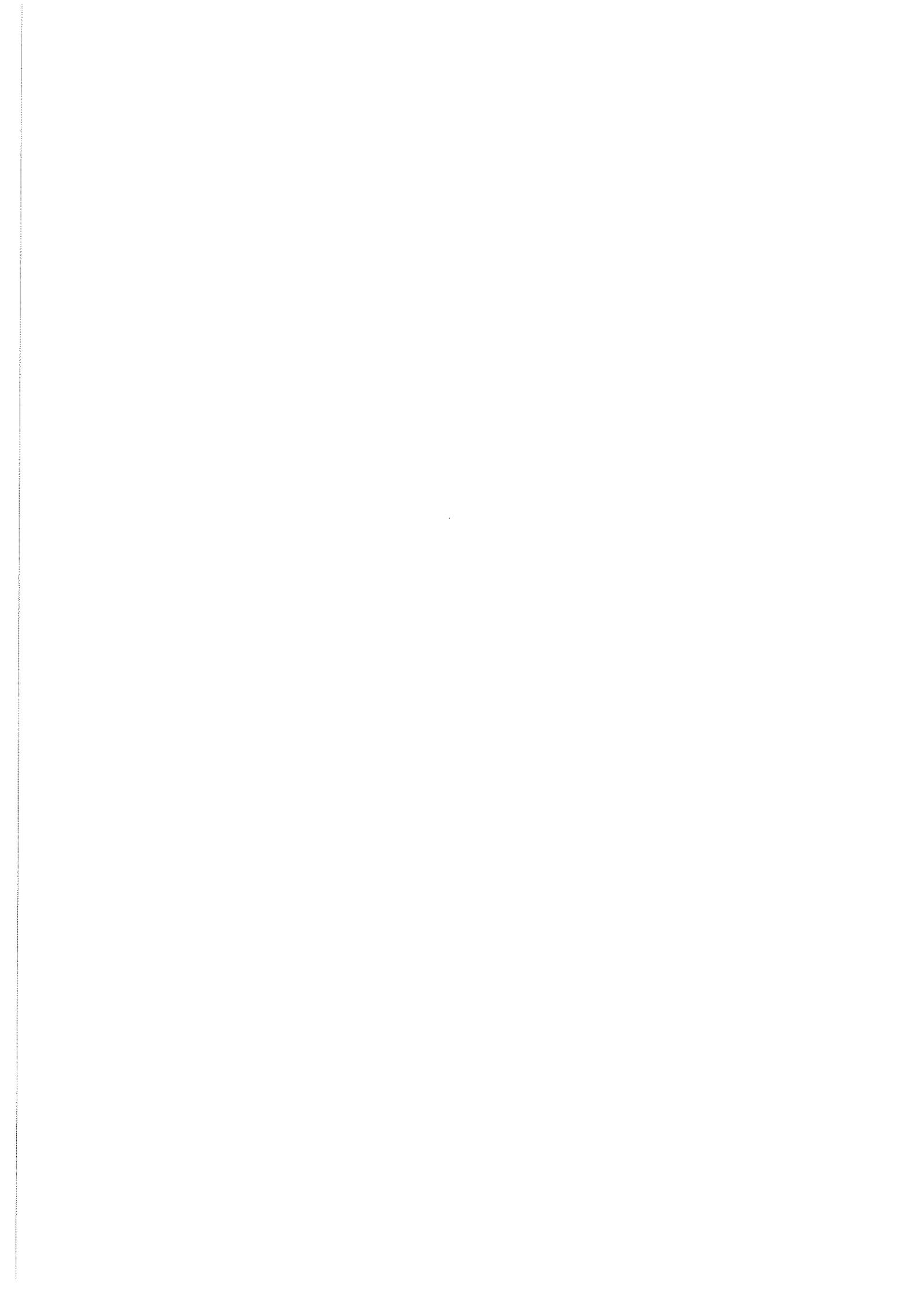
Tamisage de fleurs de matricaire avec sasseur Cesbron 3 grilles

① $\varnothing > \text{à } 1 \text{ cm}$ ② $0,5 \text{ cm} < \varnothing \leq 1 \text{ cm}$ ③ $0,3 \text{ cm} < \varnothing \leq 0,5 \text{ cm}$



Photo 19 (photo C. Vallée)

Conditionnement en fûts pour herboristerie



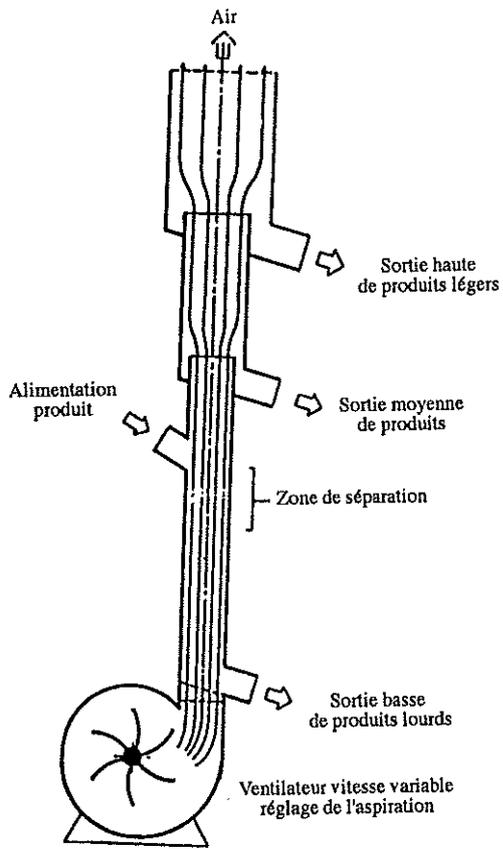


Figure VII.14

Principes de la colonne densimétrique type INRA de Tripette & Renaud

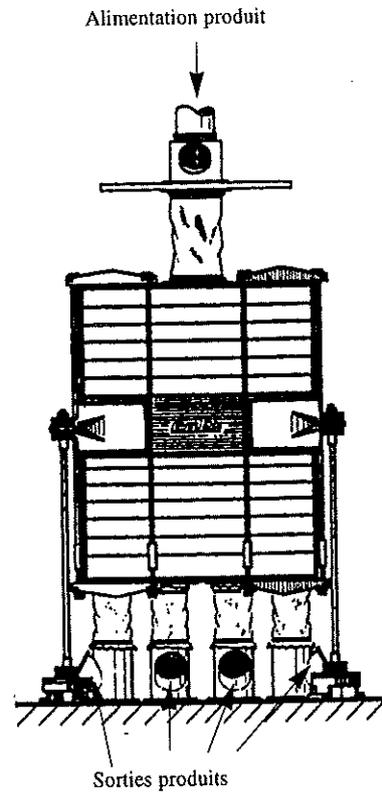


Figure VII.16

Planshister de Tripette & Renaud

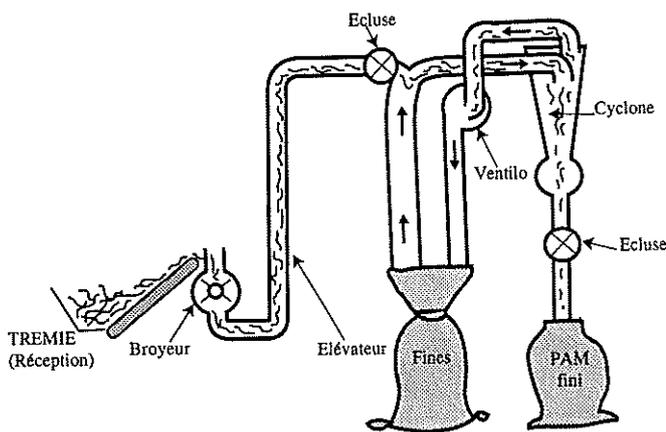


Figure VII.15

Principe du séparateur pneumatique Jaquet

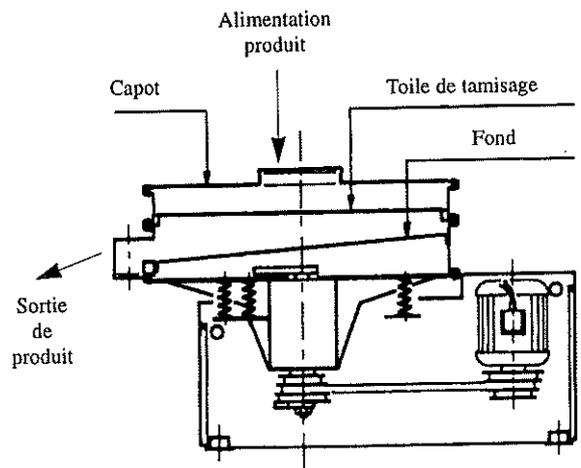


Figure VII.17

Séparateur vibrant type ROTO-SIEVE de Chauvin

35. Le conditionnement

Suivant la forme et la densité du produit, les contenants et les procédés de conditionnement changent.

Les produits en vrac, volumineux, tels que les plantes entières ou les parties aériennes, peuvent être conditionnés en balle à l'aide de presses hydrauliques spécifiques (figure VII.18).

Les produits calibrés, à plus forte densité, telles que feuilles triées ou fleurs, sont conditionnées en :

- . sacs,
- . conteners,
- . fûts (photo 19, planche 9).

36. Le stockage

Pour des soucis de gestion financière, les acheteurs demandent de plus en plus aux producteurs de stocker. Cette opération déjà coûteuse en trésorerie réclame de la place (faible masse volumique : souvent $< 150 \text{ kg/m}^3$) ainsi que des précautions particulières (faible humidité relative, absence de lumière, lutte contre les ravageurs).

Des traitements de conservation qui visent à limiter la présence d'insectes et microorganismes sont envisageables :

- «sulfitage»/gazage SO_2
- micro-ondes,
- irradiation,
- congélation.

Le gazage des lots au SO_2 , aujourd'hui abandonné, laisse la place aux rayonnements. La plupart des plantes et épices subissent ces traitements avant d'entrer sur le marché de la consommation. Le négociant évite ainsi tous risques de contamination et garantit une certaine qualité.

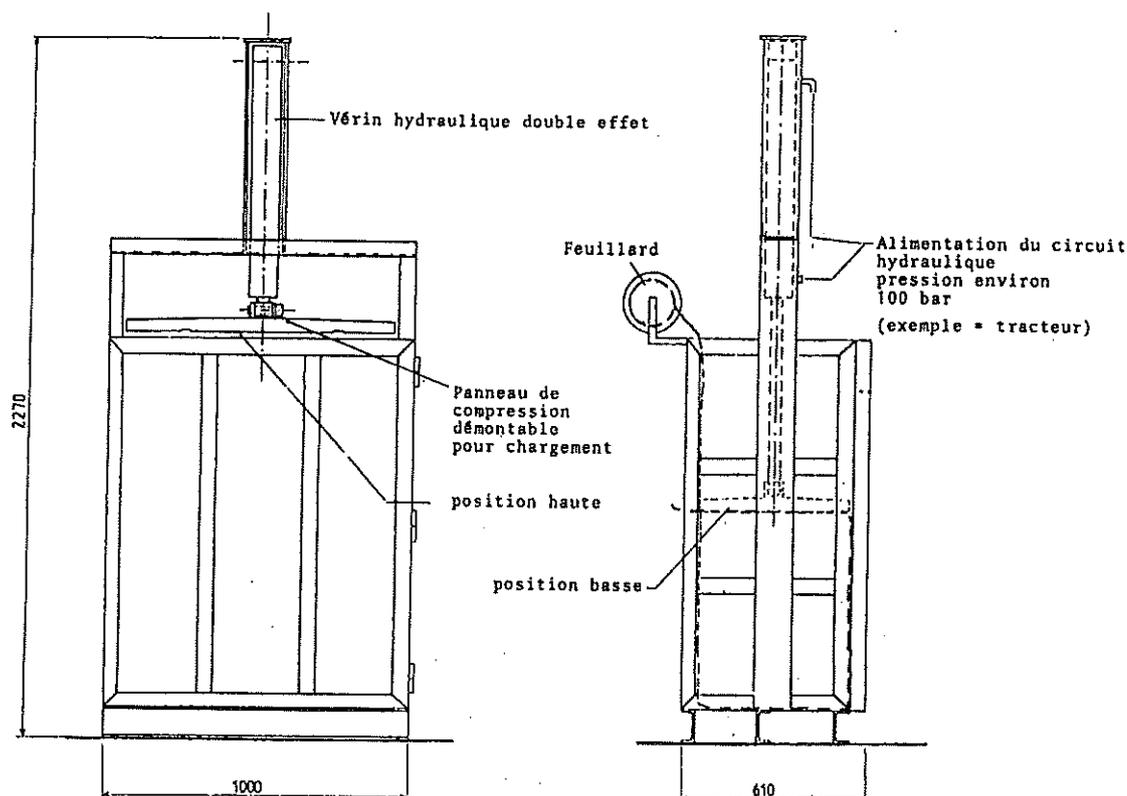


Figure VII.18

Presse hydraulique ALVAN BLANCH pour balles de plantes, sacs plastique, cartons, déchets

- force de compression : 5 tonnes
- alimentation par tracteur ou centrale hydraulique
- chargement par le haut
- dimensions des balles finies : 510 x 900 x 600 mm



Photo 17 (photo iteipmai)
 Sasseur Chauvin ① avec alimentation
 pneumatique par écluse ② + cyclone ③,
 pour feuilles et brisures

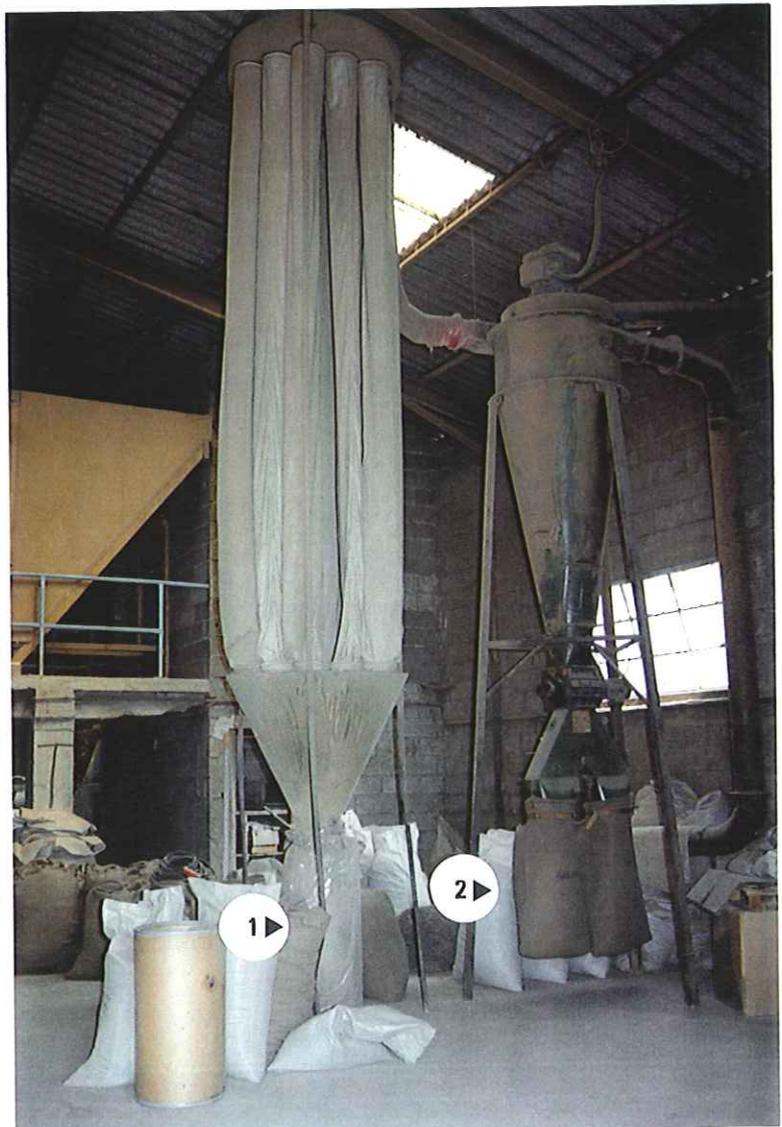
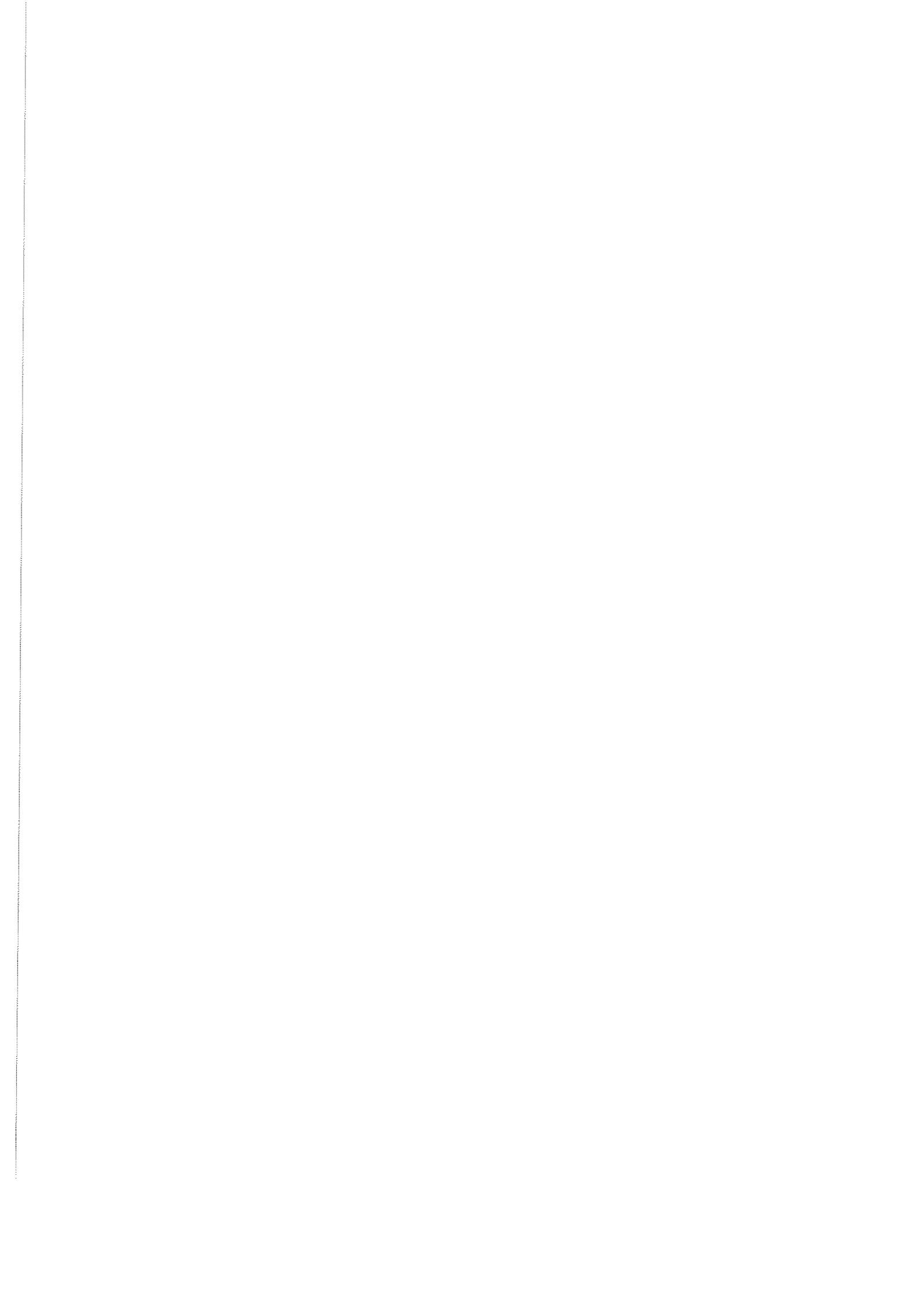


Photo 18 (photo iteipmai)
 Séparateur pneumatique pour poudres et fines ①
 et brisures ②



4. CONCLUSION

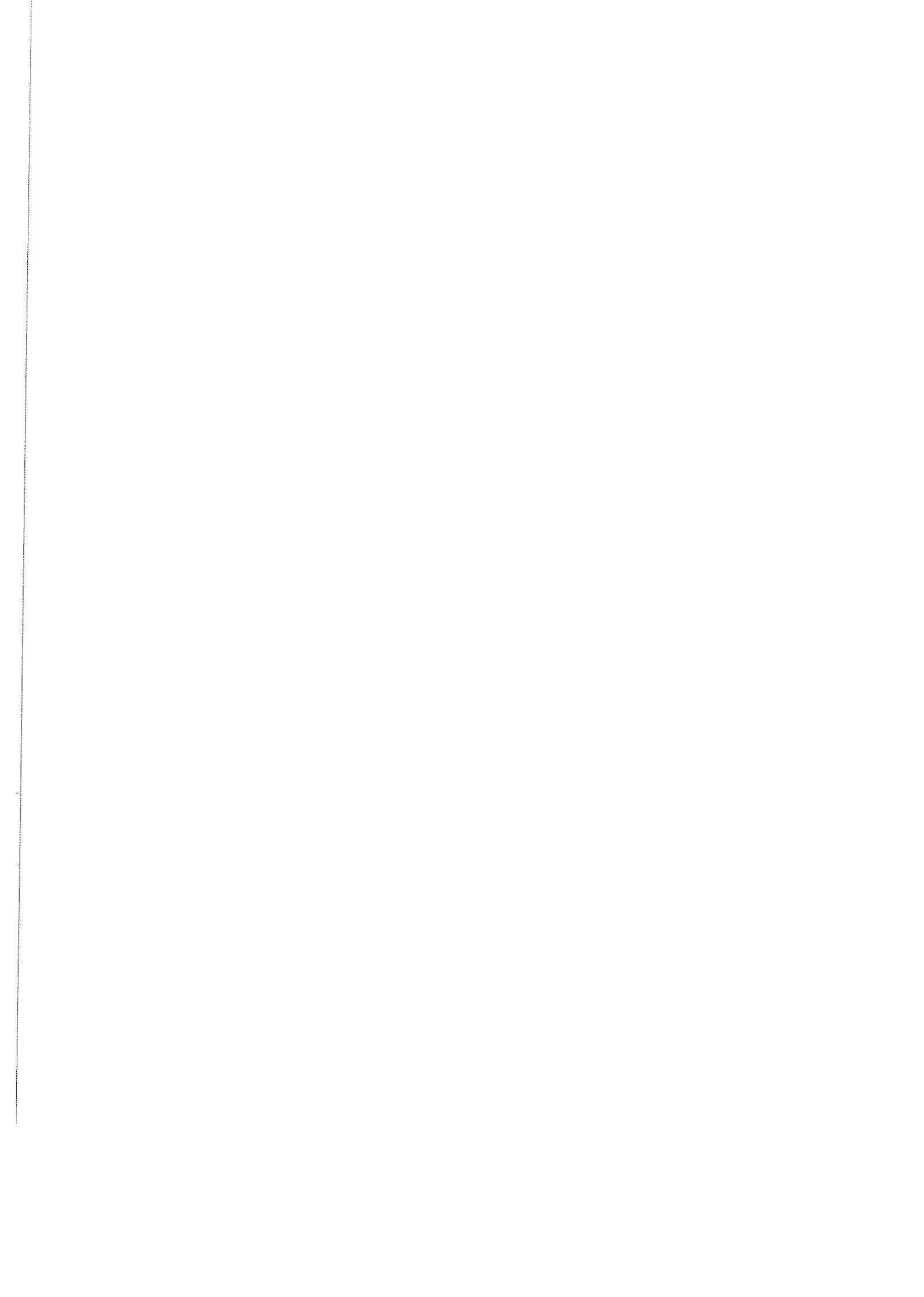
A petite échelle, l'élaboration en amont est souvent limitée à quelques travaux manuels. Par contre, pour des structures intermédiaires, voire industrielles, la mécanisation est obligatoire.

En terme d'investissement et de coût de revient, les opérations de transformation ne doivent pas être négligées.

La transformation en aval du séchage est génératrice de valeur ajoutée, et souvent indispensable.

Ces différentes opérations d'élaboration entraînent des pertes (% du produit traité) de l'ordre de :

- triage en frais : 0 à 50 %
- battage : 20 à 60 %
- sassage : 0 à 20 %
- finition : 0 à 10 %



CHAPITRE VIII - CALCUL D'UNE INSTALLATION



1. DÉMARCHES PRÉALABLES À L'INSTALLATION D'UNE UNITÉ DE SÉCHAGE

Avant de choisir une installation, il est nécessaire de se poser quelques questions pour éviter de grosses erreurs techniques et financières :

- quelles sont les plantes à sécher ?
(consignes de séchage)
- quels volumes commerciaux sont espérés ?
- quelles sont les formes commerciales ?
(état : plante entière, coupée, brisée, ...)
(normes : teneur en principes actifs, couleur, qualité microbiologique)
(conditionnement)
- quels sont les prix du marché ?
- des équipements sont-ils déjà présents ?
(récolte, coupe, séchage, triage)
- quelle est ma capacité financière ?
(investissement et trésorerie)
- Y a-t-il d'autres produits à sécher ? (légumes, fruits, grains, foin)
- quelles évolutions sont possibles dans les années à venir ?
- le projet est-il individuel ou collectif ?
- mes connaissances en séchage sont-elles suffisantes ?

Toutes ces questions simples qui peuvent paraître ennuyeuses vont permettre de cibler au mieux l'installation.

Une structure de séchage mal adaptée par faute de vigilance et par manque d'effort lors de l'étude prévisionnelle peut s'avérer très coûteuse.

Ces démarches préalables doivent donc être objectives et déboucher sur :

- un plan de séchage prévisionnel,
- une étude des marges permises par les cultures,

pour définir :

- la capacité de séchage nécessaire,
- les paramètres thermiques et aérodynamiques,
- le seuil économique pour conserver une marge intéressante,
- le financement de la structure.

2. LES DIMENSIONS DE MON INSTALLATION (figure VIII.1)

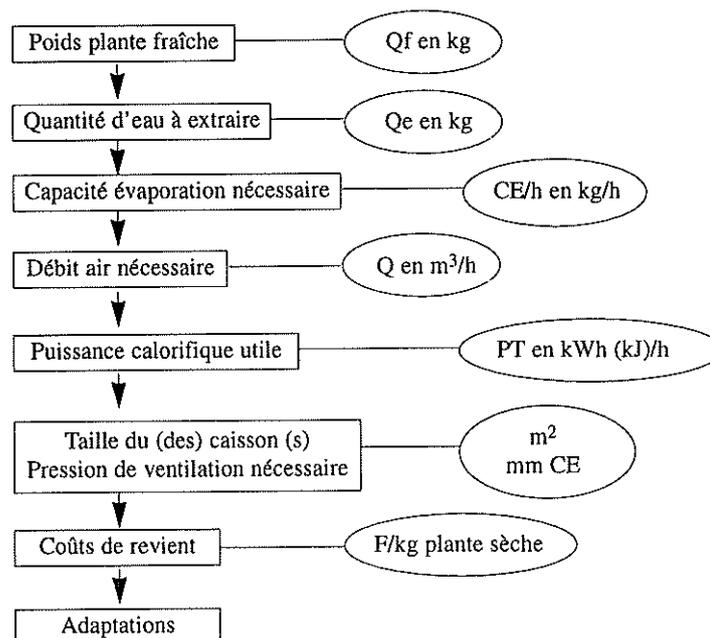


Figure VIII.1

Démarche du calcul pour dimensionner une installation de séchage

Bases de calcul :

- les plus grosses pointes de travail :

- . juxtaposer les calendriers de récolte des différentes cultures,
- . définir s'il y a plusieurs lots à sécher simultanément,
- . les récoltes peuvent-elles être étalées dans le temps (nombre de passes),
- . définir les volumes en fonction des surfaces et des rendements envisageables,

- les espèces traitées :

- . plage des températures nécessaires,
- . quantité d'eau à enlever,
- . les parties de plante traitées,
- . masse volumique,
- . hauteurs de chargement possible,

- les conditions climatiques (relevés météorologiques) :

- . périodes d'utilisation (saisons),
- . températures nocturnes et diurnes,
- . humidité relative de l'air ambiant.

Capacité d'évaporation nécessaire en pointes de travail

- poids de plantes fraîches récoltées en kg ; si élaboration en frais, tenir compte de son rendement pour déterminer le poids réel de plante fraîche à sécher : Qf

- quantité d'eau à extraire en kg : Qe

$$Q_e = \frac{\text{Humidité initiale} - \text{Humidité finale}}{100 - \text{Humidité finale}} \times Q_f$$

- capacité d'évaporation nécessaire en kg/h : CE/h

$$CE/h = \frac{Q_e}{\text{Durée idéale du séchage (h)}}$$

Débit d'air nécessaire : Q

Le pouvoir séchant de l'air n'est pas facile à évaluer. Il évolue en fonction de la phase de séchage, de la cinétique de séchage de l'espèce et des conditions climatiques.

Des observations en condition de séchage classique avec des températures comprises entre 35 et 45°C conduisent à considérer que le pouvoir évaporatoire moyen de l'air de séchage est de l'ordre de 3 g eau/m³ air.

$$Q \text{ (m}^3 \text{ air chaud/h)} = \frac{CE/H \times 1\,000}{PE \text{ moyen (3 g/m}^3\text{)}}$$

Puissance calorifique utile : PT

$$PT \text{ en kWh (kJ)/h} = Q \times CS \times \Delta t$$

CS : chaleur spécifique de l'air : 0,334.10⁻³ kWh/m³/°C

Δt : gain de température souhaité en °C (température de séchage - température moyenne air ambiant).

Taille du (des) caisson(s), et pression de ventilation nécessaire

La pression de ventilation et la surface de séchage vont dépendre de la conception de l'enceinte et du chargement de celle-ci. S'il y a présence simultanée de plusieurs lots, un cloisonnement ou la réalisation de plusieurs caissons sera indispensable.

- Taille du caisson

$$\text{Volume frais après élaboration (m}^3\text{)} = \frac{\text{poids frais}}{\text{x masse volumique.}}$$

$$\text{Surface nécessaire du caisson (m}^2\text{)} = \frac{\text{Volume frais}}{\text{Hauteur du tas recommandée}}$$

- Pression nécessaire

$$\begin{aligned} \text{Plantes} &= \text{hauteur du tas x pertes de charge (plantes)*} \\ \text{Installation} &= \text{pertes de charge (installation)} \\ \text{Total} &= \text{pression nécessaire (mm CE)} \end{aligned}$$

*selon l'espèce et la partie de la plante considérée.

Coût de revient

- Charges fixes :

- . amortissement de l'installation (séchoir + chaîne transformation + bâtiment),
- . abonnement ou location pour énergie.

- Charges variables :

- . consommation énergétique,
- . entretien,
- . main d'œuvre.

Ce coût est à intégrer au calcul global du revenu dégagé par la culture, en prenant en considération les autres charges de structures, les charges culturelles et les prix de vente.

3. EXEMPLES CHIFFRÉS

31. Production de 0,5 ha de camomille romaine (*Anthemis nobilis*) pour l'herboristerie (tableau VIII.1).

Région : Anjou

Produit : capitules récoltés manuellement

CARACTERISTIQUES	
Plante	Récolte
Hi : ≈ 80 %	5-6 cueillettes tous les 10 jours période : mi-juillet à mi-sept. main d'œuvre : 1 600 - 1 800 h/ha soit 3-4 kg/h
Hf : ≤ 10 %	
MVF* : 250 kg/m ³	
MVS** : 100 kg/m ³	
Rendement	Séchage en caisson
Cap. frais : 3,6-5,4 t/ha	hauteur du tas : 40-50 cm
Cap. sec : 0,5 -1,2 t/ha	t° séchage : 40°C
Qe : 77 %	durée réelle : 24 h

* Masse volumique frais

** Masse volumique sec

Tableau VIII.1

Poids plantes fraîches ————— 420 kg

- . 0,5 ha x 5 t = 2,5 t frais
- . 6 passages ≈ 420 kg par passe

Quantité d'eau à extraire ————— 326 kg

$$Q_e = \frac{80 - 10}{100 - 10} \times 420 = 326 \text{ kg}$$

Capacité évaporatoire nécessaire ————— 13,6 kg/h

$$CE/h = \frac{326}{24 \text{ h}} = 13,6 \text{ kg eau/h}$$

 Débit air nécessaire ————— 4 500 m³/h

$$Q = \frac{13,6 \times 1\,000}{3} \approx 4\,500 \text{ m}^3/\text{h}$$

Puissance calorifique utile ————— 30 kWh/h

$$PT = 4\,500 \times 0,334 \cdot 10^{-3} \times 20 = 30 \text{ kWh/h}$$

(Δt = 20°C)

 Taille du caisson
Pression de ventilation

 4,2 m²
50 mm CE

- Volume capitule frais :

$$\frac{420}{250} = 1,7 \text{ m}^3$$

- Surface nécessaire

$$\frac{1,7}{0,4} = 4,25 \text{ m}^2$$

- Pression nécessaire

Plante : 0,4 m x 80 mm CE/m = 32 mm CE

Installation (approximatif) = 18 mm CE

Total = 50 mm CE

Coût de revient séchage ————— 9,55 F/kg sec

- Amortissement installation (sur 5 ans) :

$$15\,000 \text{ F}/5 = 3\,000 \text{ F} \text{ soit } 5,2 \text{ F/kg sec}$$

(ventilateur + batterie électrique + caisson).

- Consommation électrique (batterie + ventilateur) :

$$\frac{816 \text{ kWh} \times 0,5 \text{ F}}{94} \approx 4,35 \text{ F/kg sec}$$

- Coût de revient du séchage : 9,55 F/kg sec

Ce coût élevé compte tenu du faible volume traité ne prend pas en compte les autres charges, notamment la récolte manuelle.

En 1988, le kg de capitules récolté main se négociait aux alentours de 70 F ; en 1994, il est tombé à 50 F/kg.

32. Production de 1 ha d'origan vert (*Origanum vulgare*) pour le marché des pizzas (qualité herboristerie) (Tableau VIII.2).

CARACTERISTIQUES	
Plante Hi : 75 % Hf : 13 % MVF* : 60 kg/m ³ MVS** : 35 kg/m ³	Récolte Durée exploitation : 15 jours 5 passages Epoque : mi-juillet (pleine floraison)
Rendement (2e année) Partie aérienne fraîche : 20 t/ha Partie aérienne sèche : 6 t/ha Feuilles et fleurs sèches : 3 t/ha Qe : 70 %	Séchage en caisson Hauteur du tas : 0,5 à 1 m t° de séchage : 30 à 40°C Durée : 70 heures

* Masse volumique frais
 ** Masse volumique sec

Tableau VIII.2

Poids plantes fraîches ———— 4 000 kg

. 1 ha x 20 t = 20 t
 . 5 passages = 4 t par passe

Quantité d'eau à extraire ———— 2 800 kg

$$Q_e = \frac{75 - 13}{100 - 13} \times 4\,000 = 2\,800 \text{ kg}$$

Capacité évaporatoire nécessaire ———— 40 kg/h

$$CE/h = \frac{2\,800}{70 \text{ h}} = 40 \text{ kg eau/h}$$

Débit air nécessaire ———— 13 000 m³/h

$$Q = \frac{40 \times 1\,000}{3} \approx 13\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Puissance calorifique utile ———— 90 kWh/h

$$PT = 13\,000 \times 0,334 \cdot 10^{-3} \times 20 \approx 90 \text{ kWh/h}$$

(Δt = 20°C)

Taille du caisson
 Pression de ventilation ———— 6,5 m²
 65 mm CE

- Volume capitule frais = $\frac{4\,000}{60} \approx 65 \text{ m}^3$

- Surface nécessaire = $\frac{65}{1} = 65 \text{ m}^2$

- Pression nécessaire :

Plante : 1 m x 50 mm CE/m = 50 mm CE

Installation (approximatif) = 15 mm CE

Total = 65 mm CE

Coût de revient séchage ———— 2,62 F/kg sec

- Investissement :

. caisson	:	30 000 F
. ventilateur	:	5 500 F
. générateur	:	7 000 F
(propane en combustion directe)		<hr/>
		42 500 F

- Amortissement annuel 42 500 sur 5 ans : 8 500 F
 soit : 1 700 F/passe, soit : 1,41 F/kg sec

- Consommation énergie :

. générateur propane : 90 kWh x 70 h : 6 300 kWh
 soit 6 300 x 0,17 F = 1 071 F

. location cuve propane : 1 475 F/5 passes = 295 F

. ventilateur : 2,5 kWh x 70 h x 0,5 F ≈ 88 F

. Total 1 454 F/passe

soit : 1,21 F/kg sec

Concernant les équipements annexes il faudra prendre en compte pour :

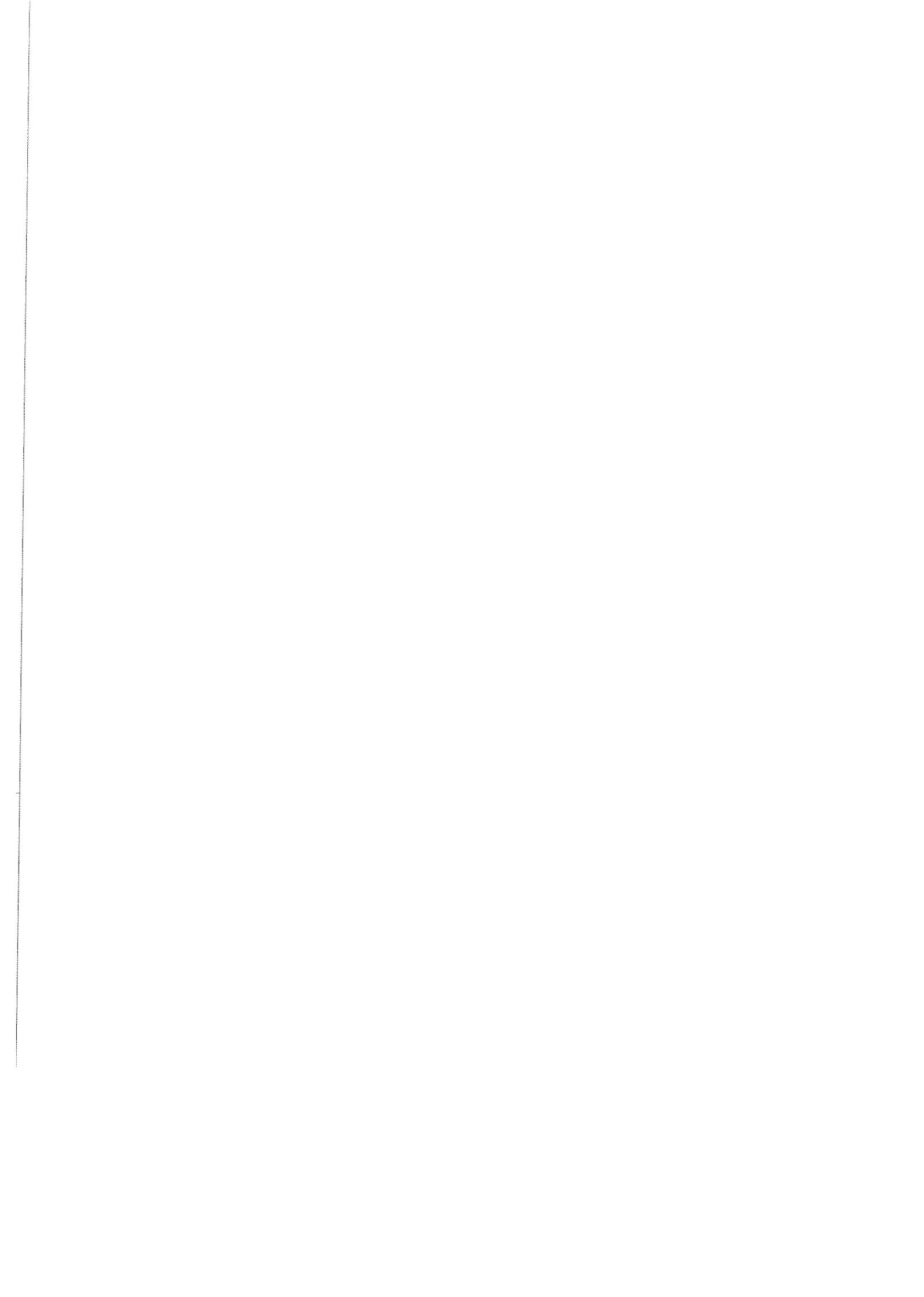
- la récolte : barre de coupe ou autochargeuse
- le battage : location ou achat moissonneuse -batteuse d'occasion
- la séparation : sasseur

4. CONCLUSION

Les chiffres présentés dans ces deux cas concrets sont à retenir pour le déroulement et la logique de calcul.

Chaque démarche doit reposer sur les conditions toujours particulières et propres à une installation.

Même si certaines données sont difficiles à estimer (établir des fourchettes), il est nécessaire de réaliser cette démarche pour concevoir au mieux son unité de séchage et de transformation, et pour déterminer des seuils de rentabilité de la culture.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR, 1992. Huiles essentielles, 4^e édition.

AFNOR, 1992. Epices et aromates, 3^e édition.

BIMBENET J.J., 1969. Les transferts de chaleur et de matière au cours du séchage des solides par l'air chaud. Thèse de Docteur-Ingénieur de la Faculté de Sciences de l'Université de Paris.

BIMBENET J.J., BRUSSET H., et LONCIN M., 1970. Effet de la présence de corps solubles sur la deshydratation des produits biologiques. *Ind. Alim. Agric.*, 87(4), p. 385-391

BOUVERAT-BERNIER J.P., BIMBENET J.J., et LEBERT A., 1989. Optimisation des conditions de séchage de la feuille de menthe poivrée. *Herba Gallica*, Tome 1, p. 83-95.

BREJON P., 1981. Le séchage des PAM, étude de principe. SORETEL.

BRUNETON J., 1993. Pharmacognosie-Phytochimie-Plantes médicinales. 2^e édition. Edition Tech. et Doc. Lavoisier, p. 481-485, 582-592.

BUZUK G.N., 1991. Effect of drying temperature on the quality and quantity of alkaloids in the raw material of some medicinal plants. *Rastitel'nye Resursy*, 27(3), p. 100-108.

COHAS M., 1988. Le rôle du séchage. Revue pratique du froid et du conditionnement d'air, 21/10/1988, p. 68-72.

Comité Economique Agricole de la Prune d'Ente et du Pruneau, 1988. L'énergie dans le séchage de la Prune d'Ente. Edition «Fruits et Légumes», 31 p.

DAUDIN J.D., et RICHARD H.J.M., 1982. Essais de séchage du persil. *Sciences des aliments*, (2), p. 405-410.

F.N.A.M.S., 1981. Séchage des oignons porte-graines. Brochure technique.

IAA, 1991. La lyophilisation par LETOILE D. Juin, p. 485-488.

iteipmai, 1981. Essai de séchage. Nouvelles sources d'énergie. C.R. Tech., p. 43-53.

iteipmai, 1982. Récolte et séchage des plantes médicinales. Bulletin d'information, 26, p. 54-68.

iteipmai, 1984. Séchage. La solution solaire par capteur polyéthylène. C.R. Tech., p. 53-74.

iteipmai, 1988. Désinsectisation par le procédé micro-ondes des plantes médicinales et aromatiques. Résultats des expérimentations, 49 p.

iteipmai, 1989-90-91. Fiches techniques.

iteipmai, 1991. Optimisation des conditions de séchage de la menthe poivrée, du basilic, et de la digitale laineuse. Compte rendu d'expérimentation, 21 p.

iteipmai, 1992. Séchage. C.R. Tech., p. 84-100.

LAROCHE G., 1987. Pompe à chaleur et compression mécanique de vapeur (application aux procédés de séparation). Edition DOPEE, 93 p.

Mémento de l'agronome, 1984, p. 681-685.

Motorisation et Technique Agricole, 1985. Nettoyeurs et trieurs de grains. Mai.

Pharmacopée française, X^e édition.

Pont-A-Mousson S.A., 1975. Formulaire.

RAOULT-WACK A.L., et GUILBERT S., 1990. La déshydratation osmotique ou procédé de déshydratation-imprégnation par immersion dans des solutions concentrées. Les cahiers de l'ENS.BANA «L'eau dans les procédés de transformation et de conservation des aliments», Tec. et Doc. Lavoisier, Paris, M. Le Meste, B. Colas eds, 7, p. 171-192

ROCHA MIER T., 1993. Influence des prétraitements et des conditions de séchage sur la couleur et l'arôme de la menthe (*Mentha spicata*) et du basilic (*Ocimum basilicum*). Thèse, 133 p.

SCOM, 1982. N° 85, 3^e trimestre.

SOLAGRO, 1989. Le séchage solaire des plantes aromatiques et médicinales, guide de conception et d'utilisation d'un séchoir.

THIYSEN H.A.C., et RULKENS W.H., 1968. Retention of aromas in drying food liquids. *Chem. Technik*, 80(47), p. 45-56.

CARNET D'ADRESSES

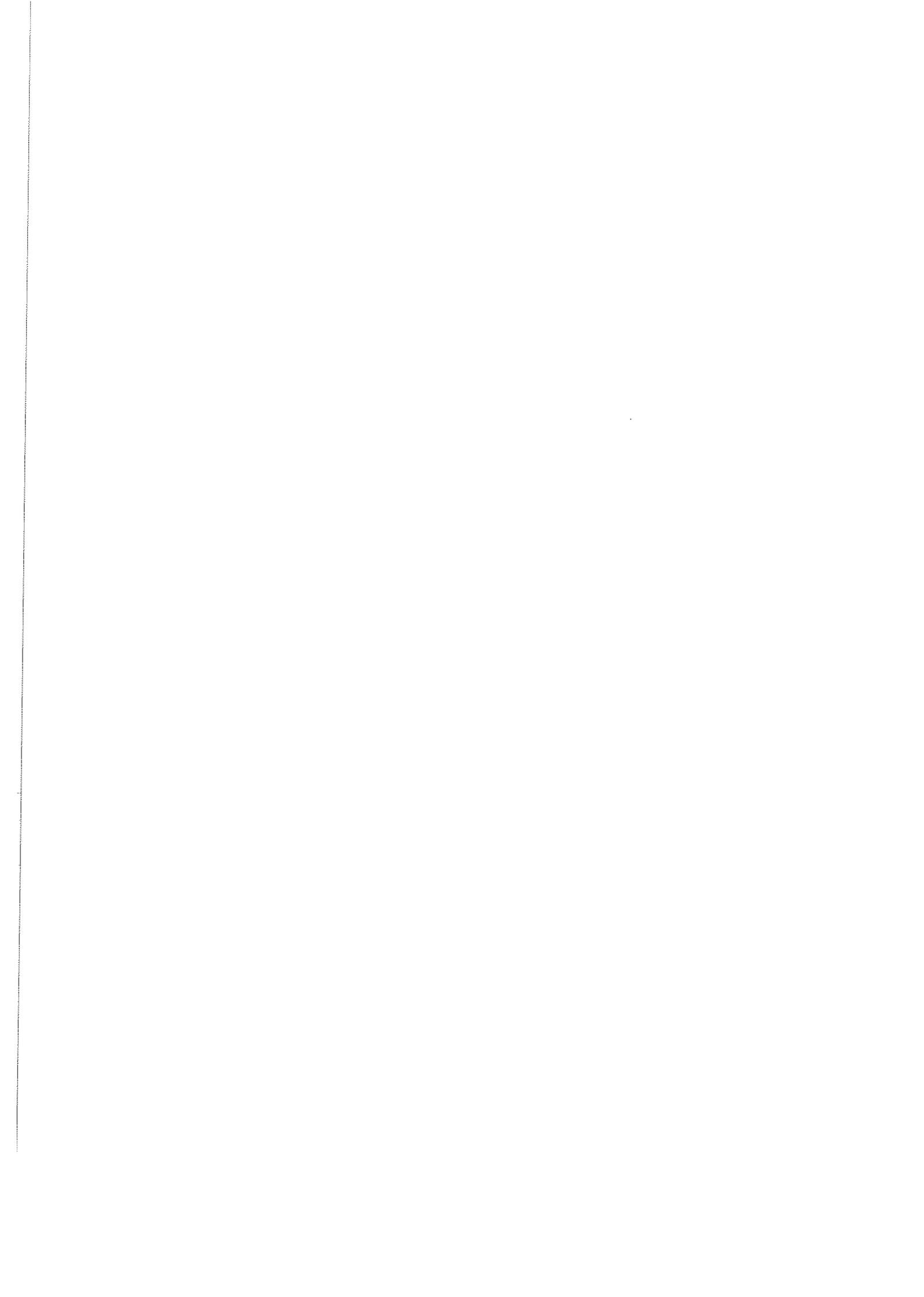
1. LISTE ALPHABETIQUE NON EXHAUSTIVE DE FABRICANTS ET DISTRIBUTEURS DE MATERIEL POUR SÉCHOIRS ET CHAINES DE TRANSFORMATION

Remarque :

Concernant le secteur chaîne de transformation une précision est apportée, à savoir :

- C : Coupe
- L : Lavage
- B : Broyage
- Ta : Tamisage
- Tr : Transport pneumatique
- S : Séparation (battage, brossage, densité)

2. ORGANISMES DIVERS (Page 155)



Fabricants et distributeurs	Séchoirs agricoles et familiaux	Séchoirs industriels	Séchoirs spéciaux	Ventilateurs	Générateurs/Brûleurs	PAC/déshumidificateurs	Grilles/tôles perforées	Chaîne transformation	Conditionnement	Matériels de laboratoire
ACK Equipement ZI Ponchut F-47130 PORT-SAINTE-MARIE tél. : 53 87 29 11 - fax : 53 87 26 35	◆							◆		
ACTIV (SERTT) ZI, rue Denis Papin F-24100 BERGERAC tél. : 53 57 87 78 - fax : 53 57 11 40	◆									
AEIB ZI - 131, rue des Vivants F-33100 BORDEAUX tél. : 56 40 25 25 - fax : 56 40 92 20				◆						
AIR GAMMA SA 10, rue François Arago - ZI Albi Saint Juery F-81000 ALBI tél. : 63 45 23 99/63 45 25 98					◆					
ALIBERT SA (Agence Alibert-Manutention) 8, avenue de la Marne - BP 805 F-49311 CHOLET CEDEX tél. : 41 71 13 50 - fax : 41 58 37 20									◆	
ALVAN BLANCH FRANCE (Activité terminée depuis 1992)										
APV 6, rue Jacquard F-27000 EVREUX tél. : 32 28 96 12 - fax : 32 28 11 83		◆								
BASSOMPIERE-SCIENTAX ZI - 12, rue Plaine F-02400 CHATEAU THIERRY tél. : 23 83 12 84					◆					
BEAL Yvan et Cie 21, avenue Agriculture F-63000 CLERMONT FERRAND tél. : 73 91 93 51 - fax : 73 90 23 11					◆					
BIAUGEAU 45, avenue Aristide Briand - BP 17 F-94110 ARCUEIL tél. : 1/42 53 77 40 - fax : 1/42 53 11 26								◆		
BLIK SARL ZI de Chênet F-91490 MILLY-LA-FORET tél. : 1/64 98 79 79 - fax : 1/64 98 79 78	◆							◆		
BUISSON Nicolas Chaudronerie de la Rimandoule F-26160 FELNIES tél. : 75 90 14 82 - fax : 75 90 42 88					◆					

Fabricants et distributeurs	Séchoirs agricoles et familiaux	Séchoirs industriels	Séchoirs spéciaux	Ventilateurs	Générateurs/Brûleurs	PAC/déshumidificateurs	Grilles/tôles perforées	Chaîne transformation	Conditionnement	Matériels de laboratoire
<p>CARRIER SA 3 bis, rue de la Garde F-44300 NANTES tél. : 40 93 90 50 - fax : 40 93 99 27</p> <p>CASTEL ZI Vern. - Rue Ponant F-29400 LANDIVISIAU tél. : 98 68 02 05 - fax : 98 68 34 22</p> <p>CHAUVIN SA 13-25, route Alfred de Vigny F-38000 GRENOBLE tél. : 76 09 30 63 - fax : 76 22 30 54</p> <p>CDP Emballage 20, rue Salengro F-77270 VILLEPARISIS tél. : 1/64 27 64 83</p> <p>CESBRON Paul 6, rue de l'Arzillé F-49120 CHEMILLE tél. : 41 30 60 16 - fax : 41 30 54 50</p> <p>CESBRON J.F. ZI rue Pâtis F-49124 SAINT BARTHELEMY D'ANJOU tél. : 41 43 85 15 - fax : 41 43 49 79</p> <p>CUENOD Thermotechnique 18, rue Bûchillons F-74100 VILLE LE GRAND tél. : 50 87 84 00 - fax : 50 95 62 64</p> <p>DEINOS SA 45, Chemin du Moulin Carron - BP 62 F-69572 DARDILLY tél. : 78 47 55 63 - fax : 78 47 47 69</p> <p>DEFENSOR FRANCE 100, bd Louis Armand F-93331 NEUILLY SUR MARNE CEDEX tél. : 1/43 00 66 33 - fax : 1/43 00 19 28</p> <p>ELECTRA F-47170 POUDENAS tél. : 53 65 73 55 - fax : 53 97 33 05</p> <p>DIMAC SA ZA route de Saint Mathurin F-49630 MAZE tél. : 41 80 68 20 - fax : 41 80 23 34</p> <p>ETIREX SA BP 107 F-02203 SOISSONS CEDEX tél. : 23 74 39 39 - fax : 23 74 39 00</p>				◆				◆ Tr		
								◆ Ta		
									◆	
								◆ Ta		
					◆					
	◆									
						◆				
								◆ B	◆	
			◆	◆						
				◆						

Fabricants et distributeurs	Séchoirs agricoles et familiaux	Séchoirs industriels	Séchoirs spéciaux	Ventilateurs	Générateurs/Brûleurs	PAC/déshumidificateurs	Grilles/tôles perforées	Chaîne transformation	Conditionnement	Matériels de laboratoire
<p>MARCHEGAY ETS Route de Fontenay F-85400 LUCON tél. : 51 56 10 40 - fax : 51 56 13 44</p> <p>MECAROUTE 68, avenue Guillaeraies F-92000 NANTERRE tél. : 1/40 97 55 60 - fax : 1/47 29 93 56</p> <p>METAL DEPLOYE SA 383, avenue Général de Gaulle F-92140 CLAMART tél. : 1/41 07 71 22 - fax : 1/46 32 34 11</p> <p>MG ENTREPRISE BP 21 F-47380 MONCLAR tél. : 53 40 28 66 - fax : 53 40 20 95</p> <p>MOTEURS LEROY SOMER Hauts de Couëron F-44220 COUERON tél. : 40 38 29 29 - fax : 40 38 29 26</p> <p>MOUGEL ZAC de la Baudinière BP 17 F-44470 THOUARE/LOIRE tél. : 40 68 05 00 - fax : 40 68 04 31</p> <p>MUNTERS SA 100 bis, rue du Général Koenig F-59136 WAVRIN tél. : 20 58 62 02 - fax : 20 58 62 07</p> <p>NEU Séchage industriel 70, rue du Collège F- 59700 MARCQ EN BAROEUL tél. : 20 45 64 56 - fax : 20 45 64 11</p> <p>NOBLE ZA Route Aix F-84120 PERTUIS tél. : 90 79 09 55 - fax : 90 09 71 84</p> <p>NORWEST (SCM Proctor et Schwartz INC) 301, Chemin du Baou des Noirs F-06140 VENCE tél. : 93 24 09 65 - fax : 93 58 87 49</p> <p>PERRUSSEL PRODUCTION ZI Prairie des Mauves - 3, allée des Vinaigriers F-44300 NANTES tél. : 40 50 73 00 - fax : 40 52 24 79</p> <p>POLY-COMBUS Avenue Magudas F-33187 LE HAILLAN tél. : 56 34 44 41</p>				♦			♦	♦		

Fabricants et distributeurs	Séchoirs agricoles et familiaux	Séchoirs industriels	Séchoirs spéciaux	Ventilateurs	Générateurs/Brûleurs	PAC/déshumidificateur	Grilles/tôles perforées	Chaîne transformation	Conditionnement	Matériel de laboratoire
<p>URSHEL International Aérogare Fret F-94310 ORLY tél. : 1/48 52 75 75 - fax : 1/46 86 00 45</p> <p>USIFROID SA 28, rue Claude Bernard F-78310 MAUREPAS tél. : 1/30 13 18 76</p> <p>VAN LEER 1, rue Manoir F-27490 AUTHEUIL-AUTHUILLET tél. : 32 35 62 65 - fax : 32 35 62 50</p> <p>VENTMECA 41, rue Sartoris F-92250 LA GARENNE-COLOMBES tél. : 1/42 42 65 69 - fax : 1/ 47 60 05 63</p> <p>WEISHAAPT SA Rue d'Athènes F-44300 NANTES tél. : 40 93 17 17 - fax : 40 93 00 40</p>		♦					♦ C		♦	

NOTES PERSONNELLES

2. ORGANISMES DIVERS

- Machinisme agricole

BCMA (Bureau de Coordination du Machinisme Agricole)
(ex-BCMEA)
11, rue de la Baume
F-75008 PARIS
tél. : 1/44 95 08 28 - fax : 1/44 95 08 32

CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts)
Parc de Tourvoie
BP 44
F-92163 ANTONY CEDEX
tél. : 1/40 96 61 21 - fax : 1/46 66 37 44

- Energie (coût, comparaison des énergies)

Observatoire de l'énergie (Ministère de l'Industrie)
97-99, rue de Grenelle
F-75353 PARIS 07 SP
tél. : 1/43 19 31 67

- Energie (maîtrise)

ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
(ex-AFME)
27, rue Vicat
F-75015 PARIS
tél. : 1/47 65 20 00 - fax : 1/46 45 52 36

- Energie renouvelable

SOLAGRO
219, avenue de Muret
F-31300 TOULOUSE
tél. : 61 59 56 16 - fax : 61 59 98 41

CEDER (Centre d'Expérimentation et de Documentation sur les Energies Renouvelables)
2, place de la Mairie
F-26110 NYONS
tél. : 75 26 22 53 - fax : 75 26 19 02

- Electricité

CFE (Centre Français de l'Electricité)
Espace Elec - CNIT
BP 4
F-92053 PARIS LA DEFENSE
tél. : 1/41 26 57 37

DOPEE (Développement d'Outils pour l'Utilisation de l'Electricité)
Espace Elec - CNIT
BP 5
F-92053 PARIS LA DEFENSE
tél. : 1/41 26 56 00

- Gaz

CFBP (Comité Français du Butane et du Propane)
129, avenue Charles de Gaulle
F-92521 NEUILLY SUR SEINE CEDEX
tél. : 1/47 45 32 06 - fax : 1/47 45 30 45

GAZ DE FRANCE
Direction de la Recherche
361, avenue Président Wilson
F-93210 LA PLAINE SAINT DENIS
tél. : 1/49 22 50 00

- Analyses

LARA Toulouse (Laboratoires Associés de Recherches Agricoles)
75, voie du Toec
F-31300 TOULOUSE
tél. : 61 49 15 95 - fax : 61 31 09 31

- Technologies (chimie extractive, laboratoire pilote)

ARCHIMEX
Chambre de Commerce et d'Industrie
F-56038 VANNES
tél. : 97 47 06 00 - fax : 97 47 56 90

- Formations

ENSIAA (Ecole Nationale Supérieure des Industries Agro Alimentaires)
1, rue des Olympiades
F-91300 MASSY
tél. : 1/69 93 50 50 - fax : 1/69 20 02 30

ENSBANA (Ecole Nationale Supérieure de Biologie Appliquée à la Nutrition et à l'Alimentation)
1, esplanade Erasme
F-21000 DIJON
tél. : 80 39 66 01 - fax : 80 39 66 11

- Météorologie

Météo France (Services Centraux)
42, avenue Gustave Coriolis
F-31057 TOULOUSE CEDEX
tél. : 61 07 90 90 - fax : 61 07 80 09

TABLE DES PRINCIPALES NOTIONS ABORDÉES

Notion	Symbole	Unité	Page
Chaleur spécifique	CS	kJ (kWh)/kg (m ³)/°C	47
Consommation d'énergie spécifique	CES	kWh/kg eau évaporée	47
Débit	Q	m ³ /h	71
Disponibilité de l'eau	Aw		12
Enthalpie de l'air	h	kJ/kg air sec	38
Humidité finale	Hf	%	11
Humidité initiale	Hi	%	11
Humidité relative	HR	%	37
Humidité relative d'équilibre	HRE		12
Pouvoir calorifique inférieur	PCI	kJ (kWh)/kg	48
Pouvoir évaporatoire	PE	g eau/kg air sec	40
Pouvoir hygroscopique			12
Pression	p	mm CE	71
Puissance	P	kW (CV)	71
Puissance thermique ou calorifique	PT	kJ (kWh)/h	48
Quantité d'eau à enlever/frais	Qe1	%	11
Quantité d'eau à enlever/sec	Qe2	%	11
Température de rosée	tr	°C	38
Température humide	th	°C	38
Température sèche	ts	°C	38

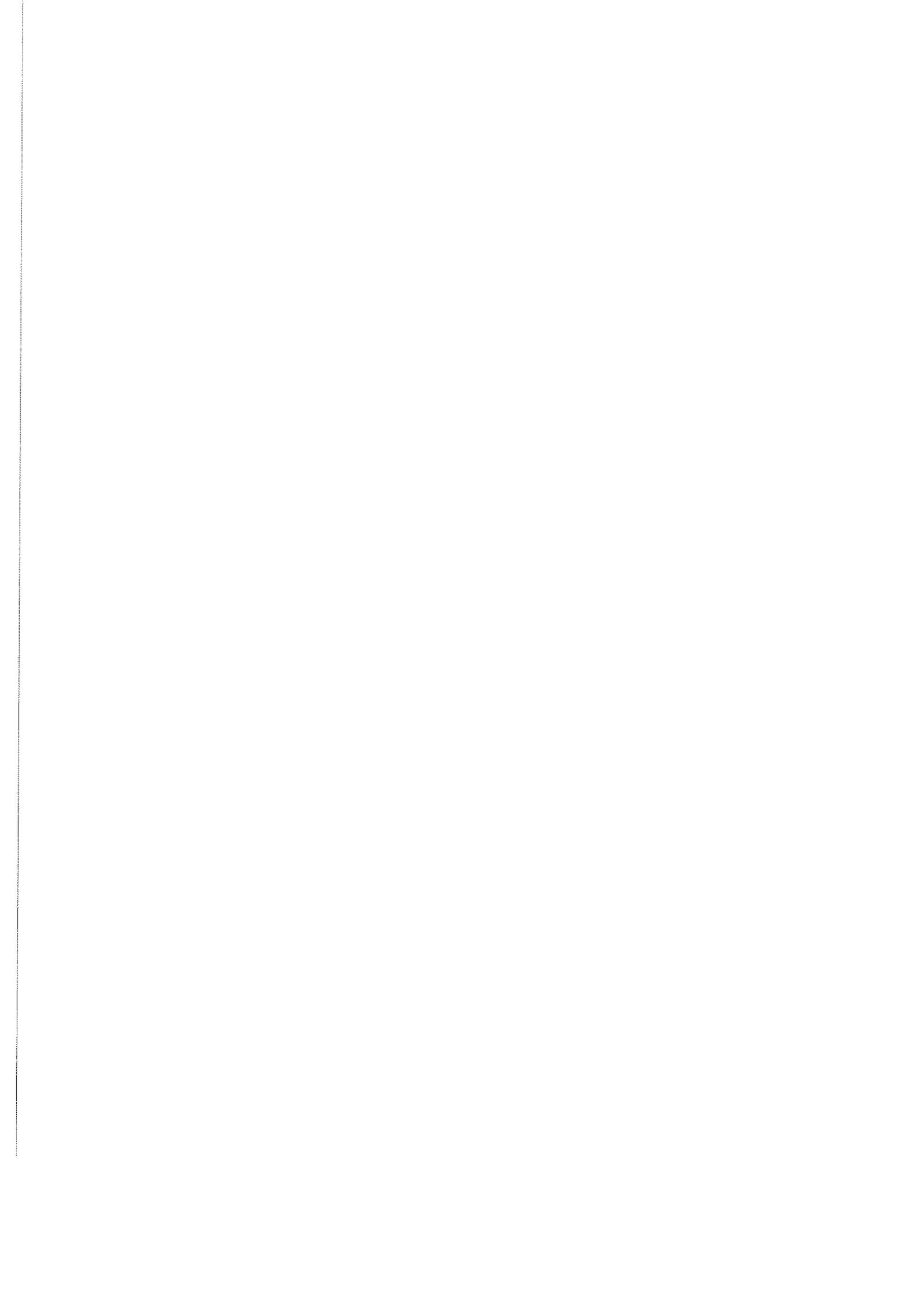


TABLE ALPHABETIQUE DES ESPÈCES CITÉES

NOMS BOTANIQUES

- Achillea millefolium* L. 17
Anethum graveolens L. 15, 20
Anthemis nobilis L. 17, 18, 19, 20, 141
Archangelica officinalis Hoffm. 15, 17, 18
Arctium major Bernh. (*A. lappa* L.) 14, 18, 20
Artemisia absinthium L. 17, 19
Artemisia dracunculus L. 19, 20
Artemisia pontica L. 21
Artemisia vulgaris L. 17
Atropa belladonna L. 16
Ballota nigra L. 20
Betula alba L. (*B. pendula* Roth.) 18
Borrage officinalis L. 18, 20
Calamintha officinalis Moench. 17
Calendula officinalis L. 18, 21
Carum carvi L. 20
Centaurea cyanus L. 20
Chelidonium majus L. 16
Chrysanthemum cinerariaefolium Vis. 16, 21
Coriandrum sativum L. 15, 17
Corydalis solida Swartz. 16
Crataegus monogyna Jacq. 18
Crocus sativus L. 18, 21
Datura stramonium L. 16
Digitalis lanata Ehrh. 16, 20, 27
Foeniculum dulce DC. 15, 20
Gentiana lutea L. 18, 19
Hieracium pilosella L. 18, 21
Hyoscyamus niger L. 16
Hypericum perforatum L. 21
Hyssopus officinalis L. 17, 19
Juniperus communis L. 17, 18
Laurus nobilis L. 14
Levisticum officinale Koch. 15, 20
Lippia citriodora H.B. et K. 17, 18, 19, 21
Matricaria chamomilla L. (*M. recutita* L.) 13, 17, 18, 20
Melissa officinalis L. 17, 19, 20
Mentha viridis L. (*M. spicata* Huds.) 15, 19
Mentha piperita L. 13, 17, 18, 20, 26, 27, 41, 81, 107
Ocimum basilicum L. 15, 19, 20
Origanum vulgare L. 15, 21, 142
Papaver rhoeas L. 18
Petroselinum sativum Hoffm. 13, 14, 15, 18, 19, 21, 107
Rosmarinus officinalis L. 17, 19, 21, 107
Ruta graveolens L. 21
Salvia officinalis L. 13, 15, 17, 19, 107
Satureja sp. 19
Spiraea ulmaria L. 19, 21
Thymus vulgaris L. 17, 18, 19, 21, 107
Tilia sp. 18, 19
Valeriana officinalis L. 16, 21
Viscum album L. 18

NOMS FRANÇAIS

- Achillée 17
Aneth 15, 20
Angélique 15, 17, 18
Armoise 17
Aubépine 18
Ballote fétide 20
Bardane 14, 18, 20
Basilic 15, 19, 20
Belladone 16
Bleuet 20
Bouleau 18
Bourrache 18, 20
Calament 17
Camomille 17, 18, 19, 20, 141
Carvi 20
Chélidoine majeur 16
Coquelicot 18
Coriandre 15, 17

Corydalle solide 16
Digitale laineuse 16, 20, 27
Estragon 19, 20
Fenouil doux 15, 20
Genièvre (Genévrier) 17, 18
Gentiane 18, 19
Grande absinthe 19
Gui 18
Hysope 17, 19
Jusquiame noire 16
Laurier commun 14
Livèche 15, 20
Matricaire 13, 17, 18, 20
Mélisse 17, 19, 20
Menthe douce 15, 19
Menthe poivrée 13, 17, 18, 20, 26, 27, 41, 81, 107
Millepertuis 21

Origan 19, 21, 142
Persil 13, 14, 15, 18, 19, 21, 107
Petite absinthe 21
Piloselle 18, 21
Pyrèthre de Dalmatie 16, 21
Reine des prés 21
Romarin 17, 19, 21, 107
Rue officinale 19, 21
Safran 18, 21
Sauge officinale 13, 15, 17, 19, 107
Sarriette 19
Souci des jardins 18, 21
Stramoine 16
Tilleul 18, 19
Thym 17, 18, 19, 21, 107
Valériane 16, 21
Verveine odorante 17, 18, 19, 21

TABLE DES MATIERES

Sommaire	3
Avant-propos	5
Remerciements	7
CHAPITRE I - LE VÉGÉTAL	11
1. Généralités	11
2. Paramètres biologiques	11
21. L'eau	11
211. L'humidité de la plante	12
212. Notion de disponibilité de l'eau - Aw	12
213. Notion d'humidité relative d'équilibre - HRE	12
214. Notion de pouvoir hygroscopique	13
22. Stabilité des principes actifs	13
221. Les huiles essentielles	15
222. Les pigments	16
223. Les hétérosides, alcaloïdes, terpènes ...	17
3. Les exigences commerciales	18
4. Caractéristiques de quelques PAM	18
41. Les différentes parties récoltées	19
42. Teneur en eau à la récolte de 20 plantes	19
43. Conditions de séchage des principales espèces cultivées	19
CHAPITRE II - LES PRINCIPES DE SÉCHAGE	25
1. Introduction	25
2. Le séchage par convection	25
21. Principe et applications	25
22. Mécanisme	28
23. Les variantes du séchage par convection	28
231. Le séchage à température variable	28
232. Le séchage à contre courant	28
233. Le séchage en couche épaisse	29
24. Conclusion	29
3. La lyophilisation	29
31. Principe et applications	30
32. Mécanisme	30
33. Appareillage	30
34. Conclusion	30

4. Le séchage par pulvérisation	31
41. Principe et applications	31
42. Mécanisme	31
43. Conclusion	31
5. Le micro-ondes	32
51. Principe et applications	32
52. Mécanisme	32
53. Conclusion	32
6. La déshydratation osmotique	33
61. Principe et applications	33
62. Mécanisme	34
63. Conclusion	34

CHAPITRE III - L'AIR

1. Généralités	37
2. L'humidité relative	37
3. Les températures	38
31. Température de rosée	38
32. Température sèche	38
33. Température humide	38
4. L'enthalpie de l'air - h	38
5. Transformation isenthalpique	40
6. Pouvoir évaporatoire PE	40
7. Diagramme de l'air humide	41

CHAPITRE IV - L'ÉNERGIE

1. Notions générales	47
11. La calorie	47
12. Autres notions	47
121. Chaleur spécifique	47
122. Consommation d'énergie spécifique	47
123. Pouvoir calorifique	47
124. Rendement thermique	48
125. Puissance thermique ou calorifique	48
2. Les différentes sources d'énergie	49
21. Energie solaire	49
211. Le gisement solaire	49
212. Les pertes	49
213. L'énergie utile	49
214. Le coût	49
22. Autres énergies dites renouvelables	49

23. Les énergies fossiles	50
231. Tarification du gaz naturel	50
232. Prix du propane	52
233. Prix du FOD	52
24. L'électricité	52
241. Estimer la puissance à souscrire	53
242. Choisir sa tarification	53
243. Utilisation de l'électricité en séchage	54

CHAPITRE V - ÉTUDE COMPARATIVE

Essai de comparaison de systèmes de séchage intégrant matériel et énergie

1. Avertissement	59
2. Déterminer un cas type d'utilisateur	59
3. Estimer les caractéristiques de l'installation	60
4. Les modes d'exploitation comparés	60
5. Que penser de l'eau de combustion ?	60
6. Comparaison technico-économique	61
61. Investissements spécifiques	61
62. Coûts énergétiques et de revient globaux	63
63. Conclusion	63

CHAPITRE VI - LES TECHNOLOGIES DU SÉCHOIR

Première partie : les éléments aérauliques

1. Le ventilateur	71
11. Paramètres	71
12. Performances	72
13. Pertes de charges	72
14. Achat d'un ventilateur	74
141. Choix des performances	74
142. A quel Prix ?	75
2. Les conduites d'air	75
21. Côté aspiration	75
22. Côté refoulement	76
23. La répartition de l'air soufflé	77
3. Conclusion	78

Deuxième partie : les éléments thermiques

1. Introduction	81
2. L'exploitation du solaire	81
21. Introduction	81
22. Fanage au champ	81

23. Utilisation de capteur	82
231. Le grenier	82
232. La serre	82
233. Le "boudin noir"	82
234. Le mur	83
235. La toiture	83
24. Les types de capteurs	83
241. Capteur à simple effet ou à effet de corps noir	83
242. Capteur à double effet ou à effet de corps noir plus effet de serre	84
243. Conception des capteurs	84
25. Equipement à la sortie du capteur	85
26. Caractéristiques de plusieurs réalisations	85
27. Conclusion	87
3. Les appoints	87
4. Les résistances	88
5. Les brûleurs à combustion directe	89
51. Généralités	89
52. Montage	89
53. Fonctionnement et alimentation	90
54. Régulation	90
55. Sécurité	91
56. Le marché des brûleurs	91
6. Les chaudières et échangeurs	92
Troisième partie : la pompe à chaleur (PAC)	
1. Introduction	97
2. Notions de thermodynamique appliquées à la PAC	97
21. Notion d'équivalence entre quantités de travail et de chaleur	97
22. Evolution du système ouvert appliqué à la PAC	97
23. Notion de performance	98
3. La PAC	98
31. Fonctionnement	98
32. Relations air/PAC	99
321. Introduction	
322. La déshumidification par PAC	99
33. Raisonner l'acquisition d'une PAC	99
34. Utilisation de la PAC	100
4. Le marché des PAC	101
41. Les petits modèles	101
42. Les grands modèles	101
43. Remarque : les déshydrateurs	102
44. Les coûts	103

Quatrième partie : les enceintes

1. Introduction	107
2. Les objectifs	107
21. Convenir aux plantes	107
22. Etre accessible	108
23. Souplesse d'utilisation	108
24. Un coût limité	108
25. Permettre un «bon séchage»	108
26. Economiser l'énergie	108
3.- Les types de séchoir	109
31. Introduction	109
32. Le séchage «naturel»	109
33. Les séchoirs statiques	110
331. Conception de l'armoire	110
332. Conception de la chambre de séchage	111
333. Conception du caisson	112
334. Autres principes	112
335. Conclusion	113
34. Les séchoirs dynamiques	113
341. Introduction	113
342. Principe	113
343. Exemples de réalisation	113
344. Conclusion	114
35. Les séchoirs pseudo-dynamiques	114
351. Séchoir colonne	114
352. Tunnel à chariots	115
353. Séchoir bi-étage	115
354. Séchoir remorque	116
355. Séchoir à bande	116
36. Exemples de réalisation par autoconstruction	117
361. Multicaissons	117
362. Cases	117
363. Séchoir bi-étage	118
364. Caisson amovible	118
4. Conclusion	119

CHAPITRE VII - LA CHAINE DE TRANSFORMATION

1. Introduction	123
2. Le circuit d'amont	123
21. Introduction	123
22. Réception - stockage	124
23. Manutention	124
24. Démêlage - homogénéisation	125

25. Coupe	126
26. Broyage	126
27. Séparation en frais	127
28. Lavage - essorage	128
3. Le circuit d'aval	129
31. Introduction	129
32. Le battage	129
33. La coupe et le broyage	131
34. Le triage	131
341. Le criblage	131
342. La séparation secondaire	132
35. Le conditionnement	134
36. Le stockage	134
4. Conclusion	135
CHAPITRE VIII - CALCUL D'UNE INSTALLATION	
1. Démarches préalables à l'installation d'une unité de séchage	139
2. Les dimensions de mon installation	139
3. Exemples chiffrés	141
31. Production de 0,5 ha de camomille romaine pour l'herboristerie	141
32. Production de 1 ha d'origan vert pour le marché des pizzas	142
4. Conclusion	143
Références bibliographiques	145
Carnet d'adresses	147
1. Liste alphabétique non exhaustive de fabricants et distributeurs de matériel pour séchoirs et chaînes de transformation	147
2. Organismes divers	155
Table des principales notions abordées	157
Table alphabétique des espèces citées	159
Table des matières	161