

INFORMATION — FAM — ETH

Juin 1988/168 / P/W

Station de recherches laitières
CH-3097 Liebefeld

Ecole polytechnique fédérale de Zurich

Climat des caves des fabricants de gruyère Colloque du 22.2.88 à Grangeneuve

Auteurs:	FAM	Chr. Steffen J.-P. Häni P. Meier M. Schädeli
	EPF-Zürich	F. Emch A. Gisler A. Sierro
	UCPL	J.-M. Hofmann

CLIMAT DES CAVES DES FABRICANTS DE GRUYERE

Table des matières	Page
Chr. Steffen, directeur FAM	
Introduction	3
J.-M. Hofmann, UCPL	
1. Problèmes lors de la planification des caves	4
1.1 Chronologie d'un projet	4
1.2 Points importants lors de la phase de planification	4
J.-P. Häni, P. Meier, M. Schädeli, FAM	
2. Effets des défauts de climatisation sur la qualité du gruyère	5
2.1 Introduction	5
2.2 Problèmes fréquemment rencontrés au niveau du climat des caves à gruyère et leurs conséquences sur la qualité	6
2.2.1 Manque d'isolation	6
2.2.2 Manque d'échantéité	6
2.2.3 Sources de chaleur dans les caves	7
2.2.4 Installations de climatisation mal conçues	7
2.2.5 Manque d'aération des caves	8
2.3 Illustration photographique	9
F. Emch, A. Gisler, A. Sierro, ETH-Z	
3. Technique de climatisation dans les locaux de maturation du gruyère	12
3.1 Premiers résultats généraux sur le climat des caves de fabricants de gruyère	12
3.1.1 Le gruyère	12
3.1.2 Le local de stockage	14

3.2	Bases théoriques	16
3.2.1	Climat des caves et humidité d'air	16
3.2.2	Technique des mesures	20
3.3	Facteurs influençant le climat des caves	22
3.3.1	Construction et situation des caves	22
3.3.2	Isolation des murs et du plafond	27
3.3.3	Les portes, les fenêtres et l'échange d'air	29
3.3.4	Les conduites	30
3.3.5	Le fromage	30
3.4	Installations de climatisation	31
3.4.1	Introduction	31
3.4.2	Caves sans installations de climatisation	31
3.4.3	Caves avec refroidissement non forcé	32
3.4.4	Caves avec chauffage du sol	33
3.4.5	Caves avec chauffage monté au mur	35
3.4.6	Caves avec installation interne d'appareils à circulation d'air sans canaux	37
3.4.7	Caves avec installation interne ou externe d'appareils à circulation d'air avec canaux	41
3.5	Conclusions et recommandations	46
3.5.1	Le fromage et le fromager comme facteurs influençant le climat des caves	46
3.5.2	La cave comme facteur influençant le climat	47
3.5.3	L'installation de climatisation comme facteur influençant le climat	48

INTRODUCTION

Pourquoi a-t-il fallu constater récemment que le problème du climat des caves faisait de plus en plus l'objet de discussions dans la pratique, notamment lors de la transformation de fromageries existantes ou de la construction de nouvelles fromageries ?

Le gruyère est l'un des fromages qui doit mûrir longuement. Les conditions de maturation peuvent avoir une influence plus ou moins marquée sur la qualité. Le climat des caves joue un rôle primordial dans la formation de la croûte du gruyère, si importante pour le développement de l'arôme. Il ne faut cependant pas considérer ce facteur de manière isolée. Les conditions essentielles dépendent de la qualité du lait, des cultures et du mode de fabrication du fromage. Un bon traitement sérieux et régulier en cave et l'observation régulière des fromages par le spécialiste sont aussi importants que le climat des caves pour obtenir une fabrication de qualité.

Le gruyère a une tradition bien établie. Le traitement de la croûte en a toujours fait partie. Pourquoi avons-nous tout à coup ces dernières années des problèmes avec le climat des caves ? N'en avons-nous pas auparavant ? Il existe plusieurs raisons pour que les questions de climat des caves soient discutées de façon de plus en plus détaillée. En voici quelques-unes :

- Au cours des vingt dernières années, le travail en cave a pu être simplifié pour beaucoup de fromages, et notamment pour l'emmental. Pour le gruyère un travail important en cave est cependant resté. Il n'est par conséquent pas facile de trouver le personnel qualifié pour faire ce travail en connaissance de cause.

On a en outre constaté que divers défauts des fromages sont amplifiés ou même provoqués par le traitement en cave.

- Un point important est l'augmentation de la production au cours des années soixante et septante. La production journalière a considérablement augmenté dans beaucoup de fromageries. Cela a eu pour conséquence, d'une part, qu'on a dû monter de nouveaux équipements dans les locaux de fabrication et d'autre part, qu'on a dû agrandir les caves ou encore en construire de nouvelles. On attendait beaucoup de ces nouvelles caves. On était certain qu'on pouvait maintenant équiper des caves de telle façon que le climat soit uniforme jusque dans leurs moindres recoins. On espérait ainsi simplifier grandement les soins aux fromages. En pratique, on a remarqué que ces souhaits n'ont pas été exaucés et le professeur Emch dirait ici "ne pouvaient certainement pas être exaucés".

Ce colloque sert d'entrée en matière à la discussion sur le climat des caves, il permet de mieux cerner le problème et offre des bases scientifiques et pratiques. C'est la raison pour laquelle un large public touché par ces questions a été invité à y participer. Les documents ci-joints permettront aux participants de relire et d'étudier en toute tranquillité les exposés présentés à cette occasion. Nous considérons ce colloque comme un "point de départ" pour continuer les discussions dans la pratique.

1. PROBLEMES LORS DE LA PLANIFICATION DES CAVES

1.1 Chronologie d'un projet

- demande du requérant auprès de sa Fédération laitière à l'intention de l'Union centrale des producteurs suisses de lait (UCPL)
- prise de position des instances respectives appelées à accorder des aides financières requises
- établissement du cahier des charges
- élaboration du projet
- appréciation et prise de position sur le projet
- décisions définitives par les instances, soit
 - . amélioration foncières (montagne)
 - . crédits d'investissements
 - . commission des crédits en économie laitière
- décision finale du requérant et réalisation
- contrôle final par l'UCPL

1.2 Points importants lors de la phase de planification

- description et intentions du requérant
- identification et responsabilité du requérant
- conception et élaboration du projet

- choix
 - . anciennes caves / caves nouvelles
 - . chauffage au sol: oui / non
 - . rapport volume fromage / volume total
- acquis donné
 - . aération
 - . isolation et pare-vapeur
- utilisation
- financement

2. EFFETS DES DEFAUTS DE CLIMATISATION SUR LA QUALITE DU GRUYERE

2.1 Introduction

Les chiffres du tableau ci-dessous proviennent d'un essai qui consistait à contrôler l'évolution de la qualité du gruyère durant sa maturation.

Tableau 1: Défauts de l'extérieur à 3 mois 1/2 et 7 mois

Défauts	T o t a l	
	3 1/2 mois %	7 mois %
fromage cuit	0.5	0.1
transpiré	12.1	7.1
jouffles en talon	0.4	0.3
fausses places	1.3	1.4
bords cuits	6.6	5.4
peu emmorgé	1.0	0.3
trop emmorgé	0.3	0.3
total (2108 meules)	22.2	14.9

On remarque que:

- 1/5 environ des fromages ont des défauts à l'extérieur
- les défauts sont moins importants après 7 mois
- les défauts "transpiré" et "bords cuits" sont de loin les plus répandus, surtout en été.

Pour cet essai, 8 fromages de chaque fromagerie produisant du gruyère étaient réservés et appréciés respectivement à l'âge de 3 1/2, 7 mois et ceci à raison de 4 fromages des productions respectives d'hiver ou d'été.

Tableau 2: Défauts de l'extérieur à 3 mois 1/2 et 7 mois respectivement en hiver et en été

Défauts	H I V E R		E T E	
	3 1/2 mois %	7 mois %	3 1/2 mois %	7 mois %
fromage cuit	0.8	0.0	0.2	0.3
transpiré	1.2	0.4	21.8	12.9
jouffles en talon	0.3	0.3	0.5	0.3
fausses places	1.8	1.5	0.9	1.3
bords cuits	5.5	2.6	7.7	7.8
peu emmorgé	1.8	0.1	0.2	0.5
trop emmorgé	0.7	0.0	0.0	0.6
total (2108 meules)	12.1	4.9	31.3	23.7

2.2 Prolèmes fréquemment rencontrés au niveau du climat des caves à gruyère et leurs conséquences sur la qualité

2.2.1 Manque d'isolation sur les murs extérieurs et les plafonds; --> effets négatifs sur les conditions climatiques des caves suivant les saisons (température et humidité relative).

Conséquences sur la qualité:

en été, extérieur des fromages transpiré,
en hiver, morge collante, bords cuits etc.

2.2.2 Manque d'étanchéité des dalles entre le local de fabrication et les caves --> l'isolation s'imbibe d'eau et se détériore très rapidement.

Ces problèmes sont souvent liés à des installations techniques (p.ex. pompe à lait ou pompe à caillé) installées à la cave, ou encore à des conduites d'eau défectueuses noyées dans les dalles.

Conséquences sur la qualité:

extérieur des fromages détérioré par de l'eau qui passe à travers les dalles, ainsi que:
en été, extérieur des fromages transpirés, en hiver, morge collante, bords cuits etc.

- 2.2.3 Sources de chaleur dans les caves:** p.ex. conduites chaudes (vapeur - eau condensée - eau chaude - conduites à lait - conduites à caillé), cuves à fromage dont le fond communique avec les caves, chaudière à vapeur, local technique qui provoquent de très fortes irrégularités de climat et ceci malgré l'isolation.

Conséquences sur la qualité:

l'extérieur des fromages se trouvant à proximité de ces sources de chaleur subit des dommages appelés:

- . transpiré
- . peu emmorgé

- 2.2.4 Installations de climatisation mal conçues,** p.ex. évaporateurs à air forcé installés à proximité des fromages, corps de chauffe à petite surface fixés au plafond, buses de pulvérisation d'eau qui provoquent des excès d'humidité localisés etc.

Conséquences sur la qualité:

problèmes avec l'extérieur des fromages dus aux irrégularités du climat:

- . manque d'humidité --> extérieur transpiré - peu emmorgé,
- . excès d'humidité --> fromages cuits, trop emmorgés.

Les règles suivantes devraient toujours être observées:

1. chauffage à basse température installé dans le sol,
2. refroidissement avec des éléments à grande surface fonctionnant si possible à l'eau glacée et sans pulsation d'air,
3. humidification par pulvérisation d'eau,
4. déshumidification par changement d'air au moyen de bouches d'aération bien dimensionnées et réglables (sauts-de-loup ou tuyaux d'aération avec clapets de réglage).

2.2.5 Manque d'aération des caves: l'humidité et l'ammoniac dégagés par les fromages doivent pouvoir être évacués et ceci sans que le climat ne subisse d'influences négatives (attention aux fenêtres).

Conséquences sur la qualité:

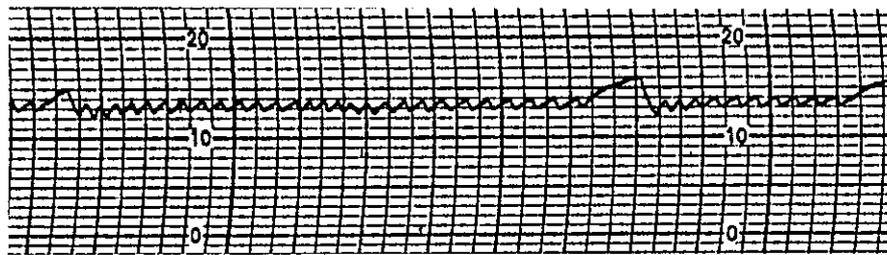
- . trop emmorgé
- . morge gluante-collante
- . bords cuits
- . jouffles

2.3 Illustration photographique

Exemple de l'irrégularité du climat dans une cave à gruyère mal isolée :



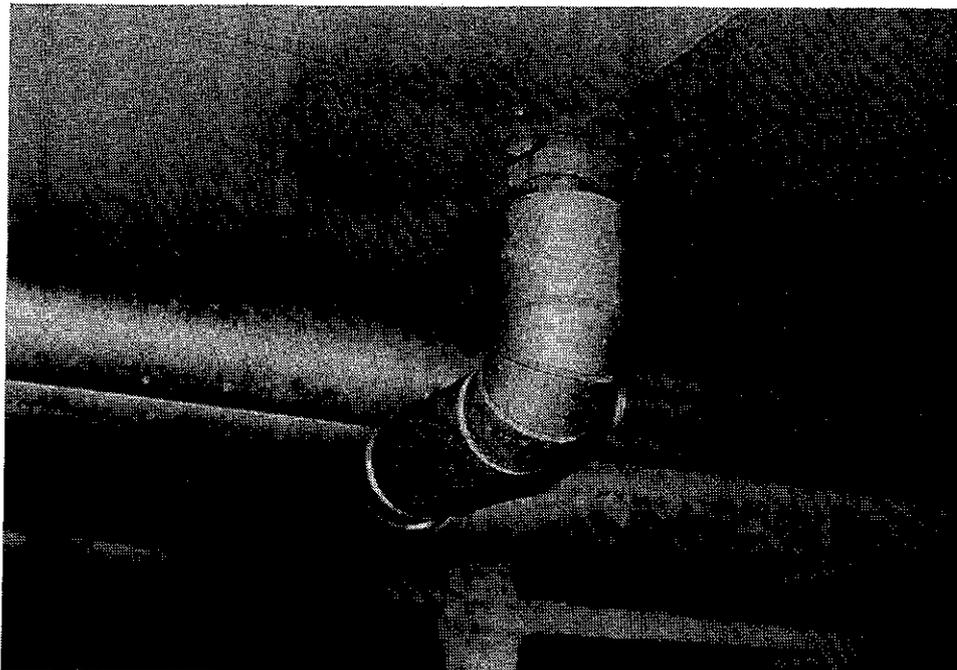
Humidité relative (%)



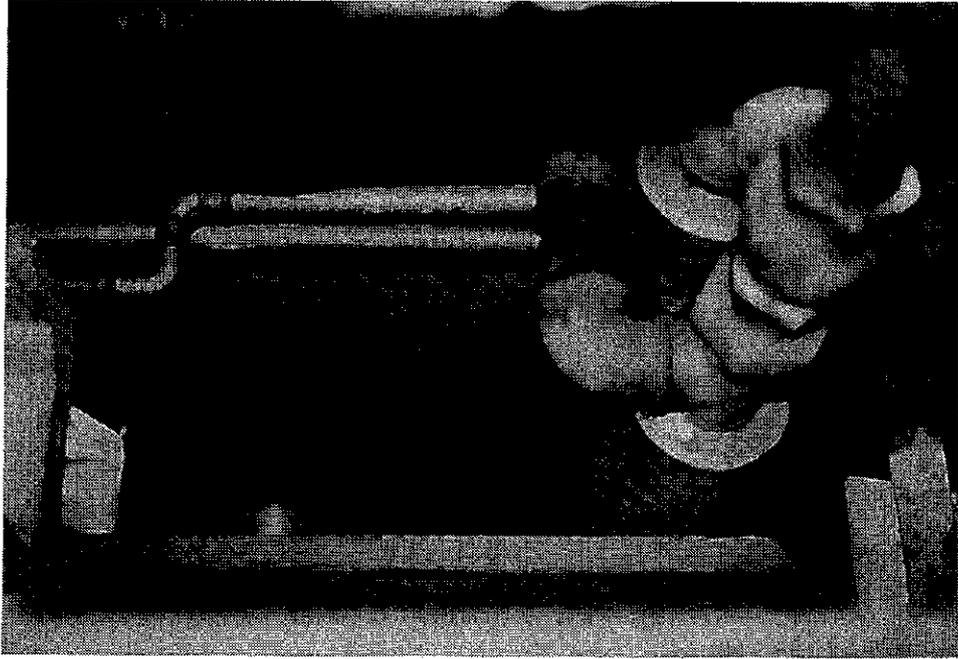
Température (°C)

Sources de chaleur dans des caves à gruyère: grosses irrégularités du climat

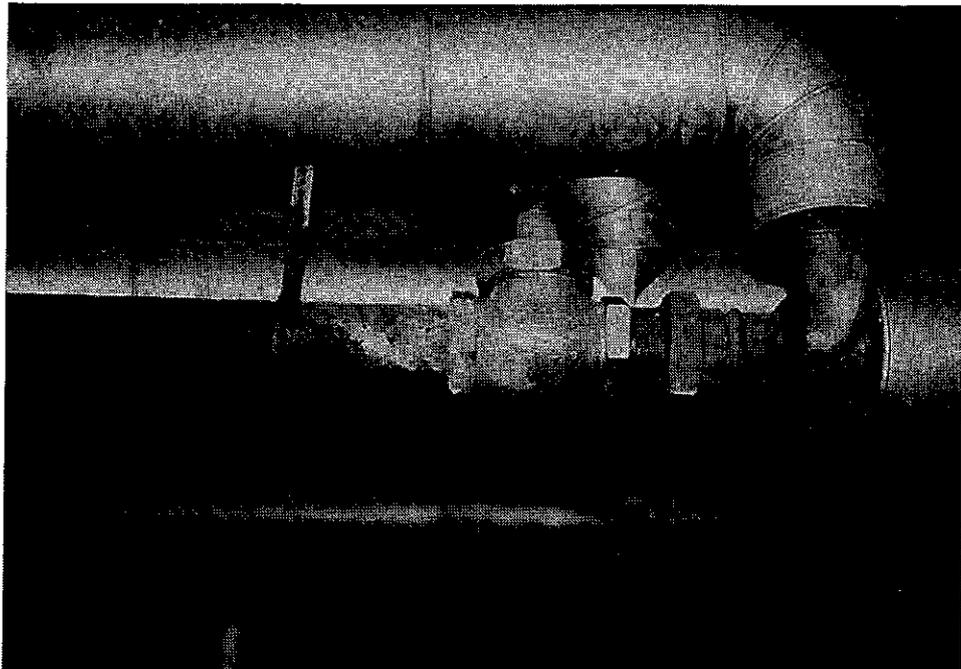
Exemple 1



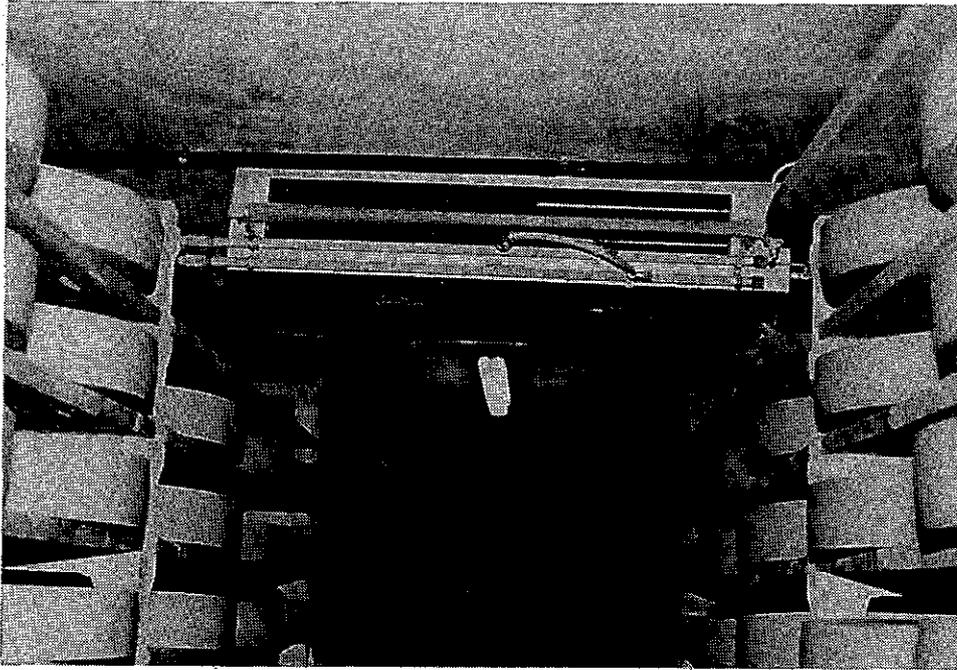
Exemple 2



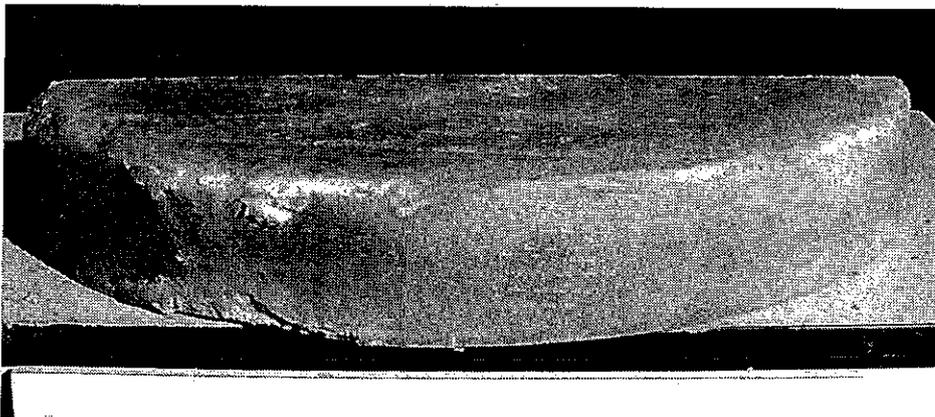
Exemple 3



Evaporateur à air forcé: microclimat inexistant pour les pièces de fromage voisines



Conséquences d'un climat trop humide sur le croûtage du fromage



3. TECHNIQUE DE CLIMATISATION DANS LES LOCAUX DE MATURATION DU GRUYERE

3.1 Premiers résultats généraux sur le climat des caves de fabricants de gruyère

Pour fabriquer du gruyère de bonne qualité, il ne suffit pas d'appliquer les méthodes de fabrication appropriées. Après la fabrication, il faut créer, en tenant compte des frais, les conditions les plus favorables pour la maturation et le stockage des fromages, en particulier en ce qui concerne la température, l'humidité relative et, dans certains cas, la vitesse de l'air. Le climat des caves influence, en effet,

- la multiplication et les propriétés de la flore microbienne de la morge
- l'état de la surface des meules
- la perte de poids ou l'absorption d'humidité
- les soins à dispenser par le fromager
- l'extérieur des meules
- la qualité des fromages et leur classement et, par conséquent,
- le rendement financier

Pour faciliter la compréhension des problèmes de climatisation des locaux d'affinage, il est indiqué de définir d'abord quelques principes et de résumer les premiers résultats obtenus avec les gruyères et les locaux de stockage dans ce domaine.

3.1.1 Le gruyère

1. Chaque meule crée dans l'air qui l'entoure une humidité d'équilibre, malgré d'éventuelles fluctuations de la température ambiante. Pour le gruyère, l'humidité d'équilibre est de 94 à 97% d'humidité relative. La meule conditionne donc elle-même son environnement immédiat. Cet état d'équilibre peut être perturbé par une forte évacuation d'air sec touchant directement la surface des fromages, par de l'eau condensée, par des flaques d'eau ou par un climat très sec de l'environnement immédiat. Il en résulte des défauts tels que fromages cuits, détachement de la morge, arrêt de la multiplication de la flore bactérienne de la morge ou graissage. Le fromage est très sensible aux fluctuations d'humidité, même si la plage de mesures ne dépasse pas 90 à 100% d'humidité relative. Cela indique déjà que les éléments de construction et l'équipement technique qui influencent l'humidité relative doivent répondre à de grandes

exigences. Cela montre également que la notion de "humidité relative" doit être commentée, car les lois auxquelles est soumis l'air humide sont peu connues.

2. L'humidité relative idéale des caves d'affinage est un peu plus basse que l'humidité d'équilibre créée par le fromage, soit de 90 à 95 %. Cela permet une légère élimination d'eau des fromages pendant la maturation. La déshumidification est donc une fonction principale de la climatisation.

3. Une humidité relative trop basse entraîne le dessèchement rapide de la surface des meules, des valeurs trop élevées provoquent des défauts de la croûte (ramolissement) et une croissance bactérienne atypique de la morge.

4. Il n'a pas encore été élucidé dans quelle mesure une température et une humidité relative optimales contribuent au déroulement favorable de la maturation.

5. L'humidité permanente au voisinage des fromages (l'eau des surfaces intérieures des murs ou des refroidisseurs ayant une température inférieure au point de rosée) provoque des défauts sur la surface des fromages ou parfois à l'intérieur des meules.

6. La température influence la vitesse de maturation, les processus biochimiques se déroulant pendant la maturation et la multiplication de la flore bactérienne de la morge. L'installation de climatisation est destinée à maintenir la température ambiante désirée, que ce soit par le chauffage ou par le refroidissement, selon la saison de l'année. D'après les recommandations de la Station de recherches laitières, Liebefeld, la température des caves chaudes doit être de 15 à 18°C, celle des caves froides de 12 à 15°C.

7. Les climatiseurs ne devraient pas perturber ou perturber aussi peu que possible le microclimat autour des fromages et éviter de fortes circulations d'air. En outre, il faut veiller à ce que la même température et la même humidité relative règnent dans toute la cave et non seulement dans certaines parties du local (homogénéité de la température et de l'humidité relative).

8. Dans ce contexte, il faut retenir que les instruments de mesure peu coûteux dont on dispose actuellement ne permettent pas de régler la température et l'humidité relative avec une précision suffisante.

9. De même, il convient de se demander quel est l'emplacement le plus approprié des instruments de mesure pour obtenir des valeurs représentatives (valeurs de consigne) qui permettent de commander les climatiseurs.

3.1.2 Le local de stockage

Après avoir présenté quelques aspects généraux de la climatisation pour les meules, il s'agit de définir les critères auxquels doit répondre un local de stockage destiné au gruyère.

1. En premier lieu, il faut des murs étanches, une fermeture hermétique des portes et des fenêtres s'il y en a, un plafond lisse sans poutres saillantes. En principe, le local de stockage ne devrait pas avoir de fenêtres; à leur place, on apportera des ouvertures d'admission d'air et d'évacuation, ce qui permet d'éviter des entrées d'air incontrôlées.

2. Il est nécessaire de prévoir une isolation thermique des murs, des portes et du plafond ainsi qu'une barrière anti-vapeur. Si les locaux au-dessus des caves d'affinage sont équipés de cuves multiples et de chaudières à vapeur ou à l'eau, il faut renforcer l'isolation du plafond.

3. Au-dessus des caves de stockage et d'affinage devraient se trouver des locaux non chauffés ou, ce qui serait préférable, des locaux chauffés. À défaut d'une telle superstructure, les murs froids de la cave à proximité des fromages, où se forme facilement de l'eau de condensation, doivent être légèrement chauffés en hiver et pendant les périodes froides. Il en est de même pour les parties exposées du plafond.

4. Il faut prévoir un espace de tête minimum entre le plafond et la dernière rangée de fromages, qui devrait d'ailleurs être couverte. Il sera de 0,4 m si le local est équipé d'un système de refroidissement non forcé et si le plafond est sans poutres. Si le traitement d'air est assuré par des appareils à circulation d'air qui évacuent l'air traité directement dans le local, l'espace de tête sera de 0,7 m. Pour les systèmes équipés de canaux évacuant l'air obliquement en direction du plafond, un espace de tête de 0,4 m suffit. Par contre, celui-ci doit être de 0,5 à 0,6 m au minimum si les orifices d'évacuation se trouvent sur la partie inférieure des canaux.

5. L'admission d'air frais doit toujours être assurée. Les orifices d'admission doivent pouvoir être entièrement fermés.

6. Un espace de 30 à 40 cm séparera le mur des tablars afin de pouvoir faire circuler l'air transversalement ou le long du mur. Cela est également nécessaire au cas où la température des murs est inférieure au point de rosée, ce qui peut provoquer des bords cuits et des fausses places.

7. Il est indiqué d'installer des sas ou d'aménager des entrées auprès des portes des caves.

8. Le local de stockage doit être exempt de conduites chaudes ou froides ainsi que de conduites et de pompes à caillé.

9. Dans des caves bien construites, avec une bonne isolation et munies d'une couche imperméable à la vapeur d'eau, l'eau destinée aux soins des fromages est à utiliser avec modération.

10. Il faut éviter des injections d'eau dont la température est inférieure au point de rosée de l'air ambiant. Dans les locaux de stockage de gruyère, le point de rosée est, en général, de 1°C plus bas au maximum que la température de la cave. Il en résulte une déshumidification de l'air au lieu d'une humidification. Un tel effet se produit souvent en hiver et pendant les périodes froides, quand la température de l'eau est basse. Le sol des caves, dont la température est, en général, proche du point de rosée ou inférieur à celui-ci, peut également avoir un effet déshydratant.

11. Les meules doivent être serrées et non pas disséminées sur les tablars. Des rideaux permettent de bien subdiviser le local et de maintenir une humidité relative élevée dans l'espace qu'ils abritent.

12. Des locaux rectangulaires se prêtent bien au stockage du gruyère. La hauteur du local doit permettre d'empiler 11 gruyères (soins manuels), en tenant compte de l'espace de tête nécessaire.

La complexité de ces détails montre combien il est nécessaire d'établir les bases de la climatisation des caves avant de discuter les différents systèmes de climatisation. Il s'agit de définir le climat des caves, la réaction de l'air humide après l'apport ou la perte d'eau et d'énergie thermique et de donner quelques précisions sur la technique

des mesures. En outre, il faut étudier la question de savoir comment on peut influencer le climat des caves.

3.2 Bases théoriques

Pour définir le climat des caves, on a recours à différents paramètres physiques, à savoir l'état de l'air humide, la température ambiante, la vitesse d'air et la teneur en eau de l'air, facteurs très importants pour la maturation des fromages.

3.2.1 Climat des caves et humidité d'air

Les calculs et les discussions sur l'air humide s'appuient en général sur les paramètres suivants:

- vitesse d'air	m/s
- pression atmosphérique	mbar
- température	°C
humidité d'air	
- teneur en eau absolue	g/kg
- teneur en eau maximale	g/kg
- humidité relative	%
- point de rosée	°C

L'humidité d'air absolue indique la teneur en eau de l'air à un moment donné. Cette valeur est exprimée en grammes d'eau par kg d'air sec.

La teneur en eau maximum de l'air correspond à la quantité maximum de vapeur d'eau, exprimée en grammes, que peut contenir un kilogramme d'air sec à une température déterminée. Si la teneur en eau absolue est égale à la teneur en eau maximum, l'air est saturé; cela signifie qu'il ne peut plus absorber aucune quantité d'eau sous forme de vapeur.

L'humidité d'air relative est exprimée par le quotient de l'humidité absolue et de l'humidité maximum:

$$\text{humidité relative} = \frac{\text{teneur absolue en eau}}{\text{teneur maximum en eau}}$$

L'humidité relative indique le degré de saturation de l'air humide. Tout changement de température modifie aussi l'humidité relative, si l'humidité absolue reste constante.

Le point de rosée indique la température à laquelle la vapeur d'eau se condense. Comme l'humidité absolue, le point de rosée définit la teneur effective en eau de l'air humide. Lorsque de l'air humide est refroidi à la température du point de rosée, sa teneur absolue en eau est identique à sa teneur maximum et l'humidité relative est de 100%.

Les processus se déroulant sur la surface des fromages dépendent surtout de la température et de l'humidité relative. Alors que la température influence avant tout la vitesse des processus biochimiques à l'intérieur et à l'extérieur de la meule, l'humidité relative est déterminante pour la vitesse d'essuyage après l'emmorgement, les pertes de poids et la croissance de la morge.

Le diagramme de MOLLIER de l'air humide

Le diagramme de MOLLIER montre clairement les rapports entre la température et l'humidité d'air.

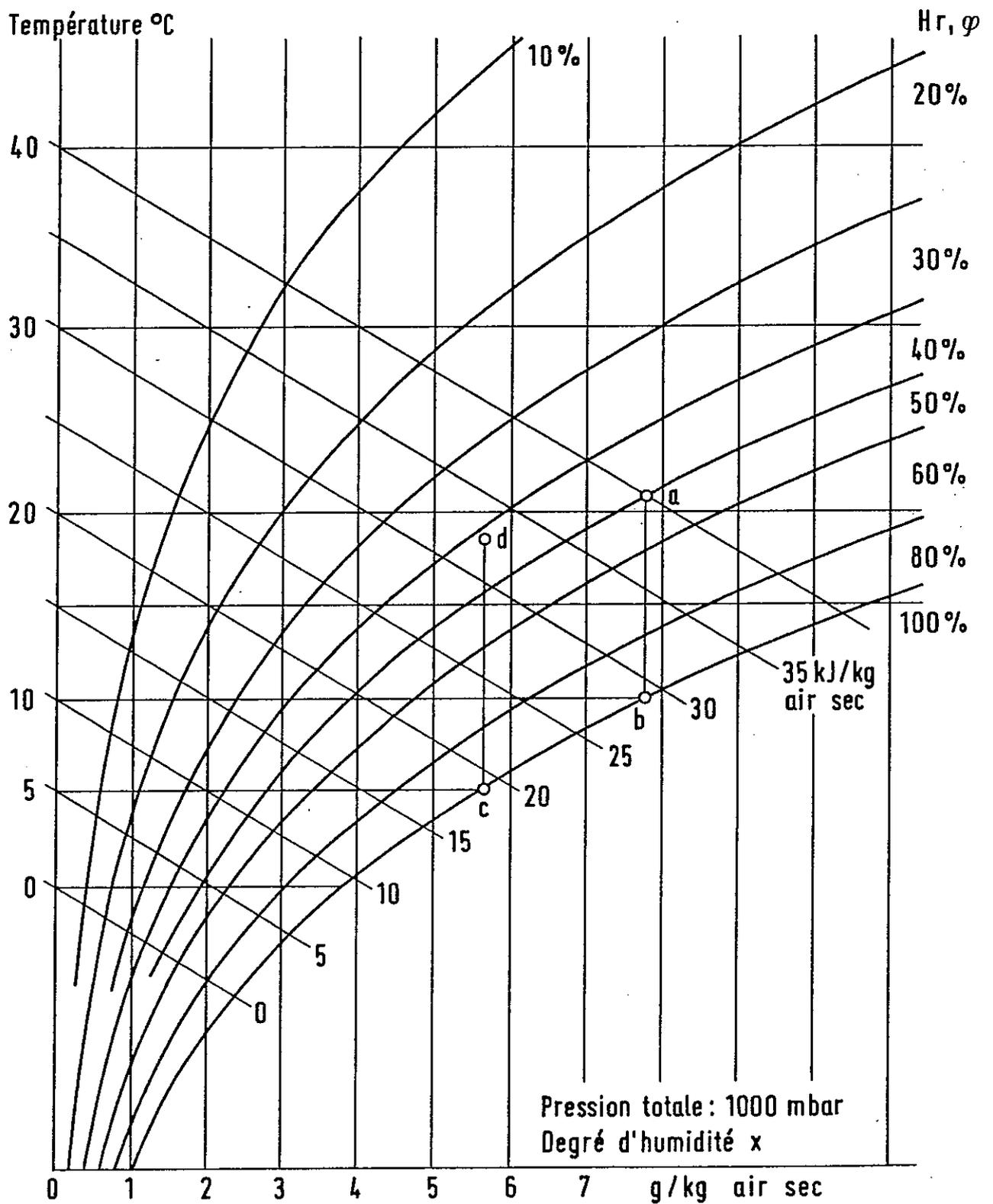


Fig. 1: Le diagramme de MOLLIER

Il est applicable pour une pression globale déterminée; elle est de 1000 mbar pour le diagramme de la figure 1. L'humidité absolue est indiquée par l'abscisse, la température par l'ordonnée. Le diagramme présente entre autres paramètres les courbes d'humidité relative constante et la ligne de saturation.

La ligne de saturation est le lieu géométrique des points de rosée. Graphiquement, l'humidité relative ne peut être déterminée qu'approximativement, notamment pour des températures basses et des degrés de saturation élevés.

La figure 1 montre en outre quelques exemples de changements d'état de l'air humide tels qu'ils se produisent dans les caves:

Le refroidissement d'air

L'air à l'état T_a est refroidi à la température T_c . Le refroidissement inscrit dans le diagramme de Mollier (fig. 1) a d'abord l'allure d'une droite, l'humidité absolue demeurant constante. Si l'humidité absolue reste constante et la température baisse, l'humidité relative augmente. Le point b sur la droite de saturation indique le point de rosée, où commence la condensation. A mesure que progresse le refroidissement, l'état de l'air se développe sur la ligne de saturation jusqu'au point d'intersection c avec l'isotherme T_c . L'air a donc perdu $x_a - x_c$ grammes d'eau par kilogramme d'air sec, bien qu'il continue d'être saturé.

Le chauffage d'air

Lorsqu'on chauffe de l'air humide, son état suit une droite de teneur en eau constante. Lorsque l'air c est chauffé à la température T_d , l'humidité relative diminue avec l'augmentation de la température et une humidité absolue constante.

La déshumidification d'air

Le refroidissement d'air humide, la condensation, puis le chauffage constituent un procédé combiné appliqué par les systèmes de climatisation pour déshumidifier.

L'humidification d'air

Certains processus de refroidissement entraînent un dessèchement involontaire de l'air humide. On peut de nouveau humidifier cet air par l'apport de vapeur ou par aérosol d'eau. Si on utilise l'eau sous forme d'aérosol, elle doit s'évaporer avant de pouvoir modifier l'humidité d'air.

3.2.2 Technique des mesures

Une mesure précise de la température ambiante est aussi importante que la détermination de la teneur en eau absolue pour définir le climat des caves. Comme il ressort du diagramme de Mollier, de petites erreurs de mesure de la température entraînent d'importantes déviations pour l'humidité relative.

Il est important que les caves d'affinage soient équipées d'hygromètres fiables dont les mesures soient exactes, même si l'humidité relative est élevée. L'hygromètre devrait être insensible à l'air contenant de l'aérosol, avoir une réaction immédiate aux changements, être facile à entretenir, peu coûteux et résistant à l'ammoniac. Il n'y a aucun capteur qui réponde à ces exigences. Même l'hygromètre à point de rosée et le psychromètre ne permettent pas de déterminer l'humidité relative avec une très grande exactitude. Les hygrostats capillaires qu'on trouve dans les caves ont un champ de mesure de 5 à 90% d'humidité relative et une exactitude de $\pm 5\%$. Peu coûteux et faciles à manier, ils sont très répandus. Par la dilatation de leurs cheveux, ils enclenchent et déclenchent le commutateur de l'humidificateur sans nécessité d'autres régulateurs. Malgré une exactitude médiocre et une réaction lente aux changements de climat, ces instruments peuvent être utilisés pour commander automatiquement les humidificateurs à condition de les contrôler et de les adapter régulièrement. De toute manière, les installations actuelles de refroidissement et d'humidification ne permettent pas un conditionnement d'air satisfaisant, même si la méthode de mesure et de réglage est bonne.

Dans la pratique, le climat des caves se mesure au centre du local, à hauteur d'homme. Les valeurs ainsi mesurées sont considérées comme valables pour le local tout entier. Jusqu'à présent, les mesures n'ont été effectuées qu'aux endroits où il était possible pour le fromager de lire l'instrument, un psychromètre d'Assmann, par exemple. On n'a pas effectué des mesures à proximité des murs, sur les tablars ou directement au-dessus des fromages. Le fromager,

qui connaît ses caves ainsi que les réactions saisonnières des fromages, essaie de compenser le manque d'homogénéité du climat en variant l'intensité du traitement ou en déplaçant les fromages de secteurs humides de la cave dans des parties plus sèches. Pour ce faire, il tient surtout compte de l'aspect des fromages et des observations faites.

Méthode de mesures pour les analyses effectuées

Avant d'effectuer les mesures, il faut inspecter le local et faire le point des facteurs influençant le climat, à savoir la construction de la cave, l'apport de chaleur et les installations de climatisation, qui doivent être décrites en détail.

Pour mesurer la température et l'humidité relative, on fixe sur un réseau tridimensionnel les points de mesure répartis sur le local tout entier. Dans ce "système de coordonnées à trois dimensions", on établit trois ou quatre niveaux de mesure où l'on applique simultanément jusqu'à dix psychromètres. Les mesures sont assistées par un micro-ordinateur, qui fait également l'évaluation des résultats.

Le nombre des points de mesure et la hauteur des niveaux de mesure dépendent des dimensions du local. Le niveau de mesure le plus bas correspond à la hauteur de la première rangée de fromages, le niveau de mesure moyen se trouve au centre et le niveau de mesure le plus haut correspond à l'avant-dernière ou à la dernière rangée de fromages. L'ordinateur effectue 20 mesures individuelles par point de mesure pour déterminer la température d'air à l'état sec et à l'état humide. Pour chaque paire de valeurs, l'humidité relative ainsi que les écarts types des trois catégories de valeurs sont calculés automatiquement. Selon les dimensions de la cave, on compte de 200 à 500 points de mesure.

Les figures 2 à 5 présentent les résultats d'analyses effectuées dans une cave bien climatisée (fig. 2 et 3) et dans une cave de climatisation insuffisante (fig. 4 et 5). Sur l'abscisse sont inscrites les valeurs pour la température et l'humidité relative. Sur l'ordonnée figurent le nombre des valeurs mesurées aux niveaux $H_0 = 0,3$ m, $H_1 = 1,3$ m, $H_2 = 2,2$ m ainsi que leur somme.

La figure 2 montre une excellente répartition des valeurs mesurées pour la température (13,3 à 14,1 °C). La figure 3 indique les valeurs correspondantes pour l'humidité relative, également bien réparties (94 à 97,5 %). Tant pour la température que pour l'humidité relative, les résultats obtenus aux différents niveaux sont très semblables et présentent une répartition homogène.

Par contre, les résultats présentés dans les figures 4 et 5 ne répondent pas aux conditions requises. Dans la figure 4, les températures varient de 12,8 à 17,1 °C. En outre, il y a des gradients de température: au niveau le plus bas (H_0), les valeurs mesurées fluctuent entre 12,8 et 14,8 °C, et au niveau H_2 de 13,7 à 17,1 °C. Ces températures variables ont pour conséquence des humidités relatives de 84 à 95,5 % au niveau le plus haut et de 90,5 à 99,5 % pour les fromages inférieurs, comme le montre la figure 5. Il en résulte que la dispersion des résultats de la température et de l'humidité relative est trop grande pour tout le local. Ces deux facteurs essentiels pour le climat des caves témoignent d'une inhomogénéité indésirable.

3.3 Facteurs influençant le climat des caves

Outre les effets décrits, les facteurs suivants exercent une influence importante sur le climat des caves: l'installation de climatisation, la construction des caves et leur situation à l'intérieur du bâtiment, les fromages stockés et l'intensité du traitement des fromages.

3.3.1 Construction et situation des caves

La construction des caves destinées aux fromages à croûte emmorgée doit permettre de créer et de maintenir un climat humide. A cet effet, elles doivent être bien isolées et protégées d'influences extérieures perturbant le climat, telles que l'apport ou la perte de chaleur ou l'afflux d'air sec extérieur. Lors de la construction du bâtiment, il faut éviter le plus possible les ponts de froid. Les caves souterraines sont mieux protégées des influences

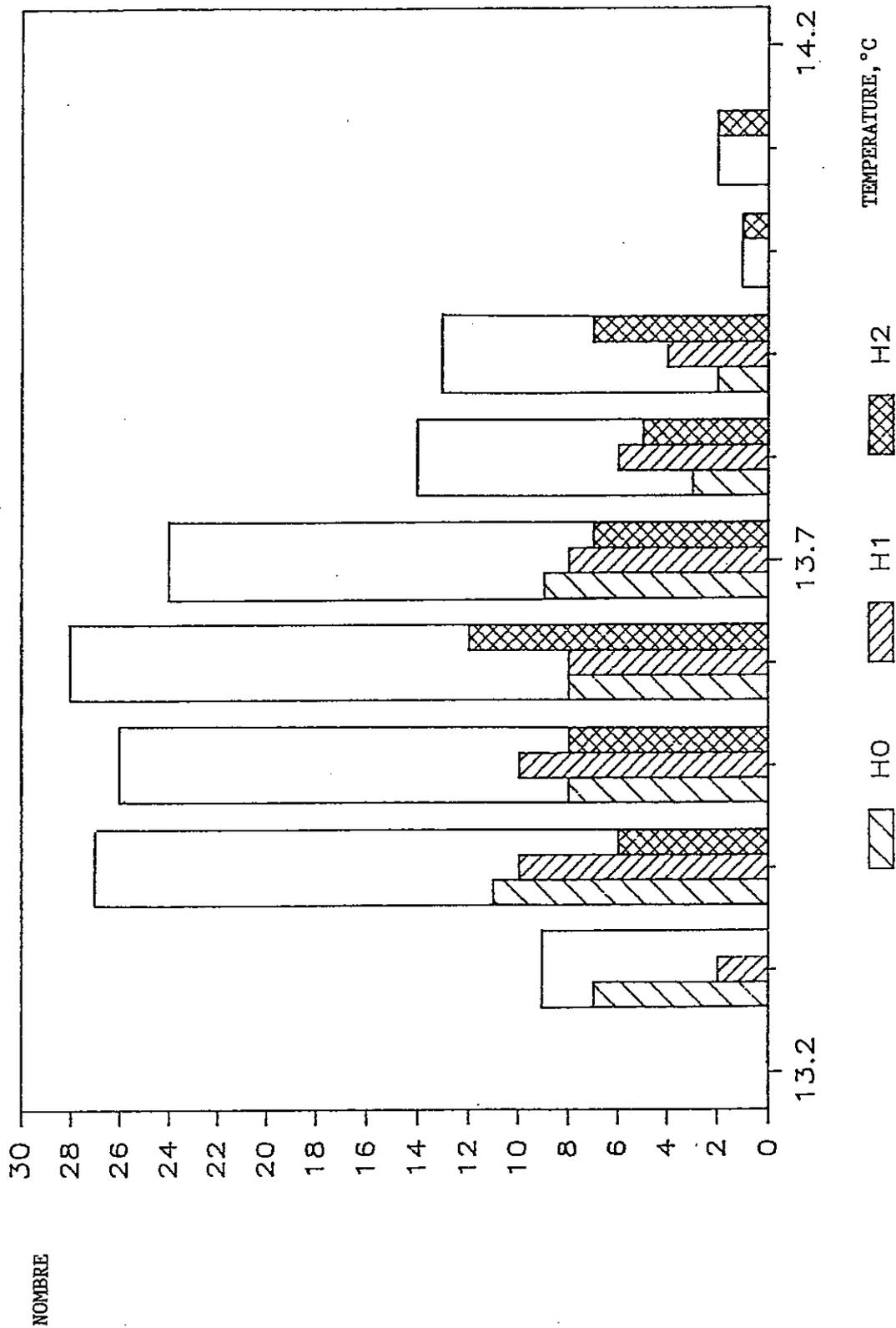


Fig. 2: Répartition des valeurs mesurées pour la température dans une cave bien climatisée (A)

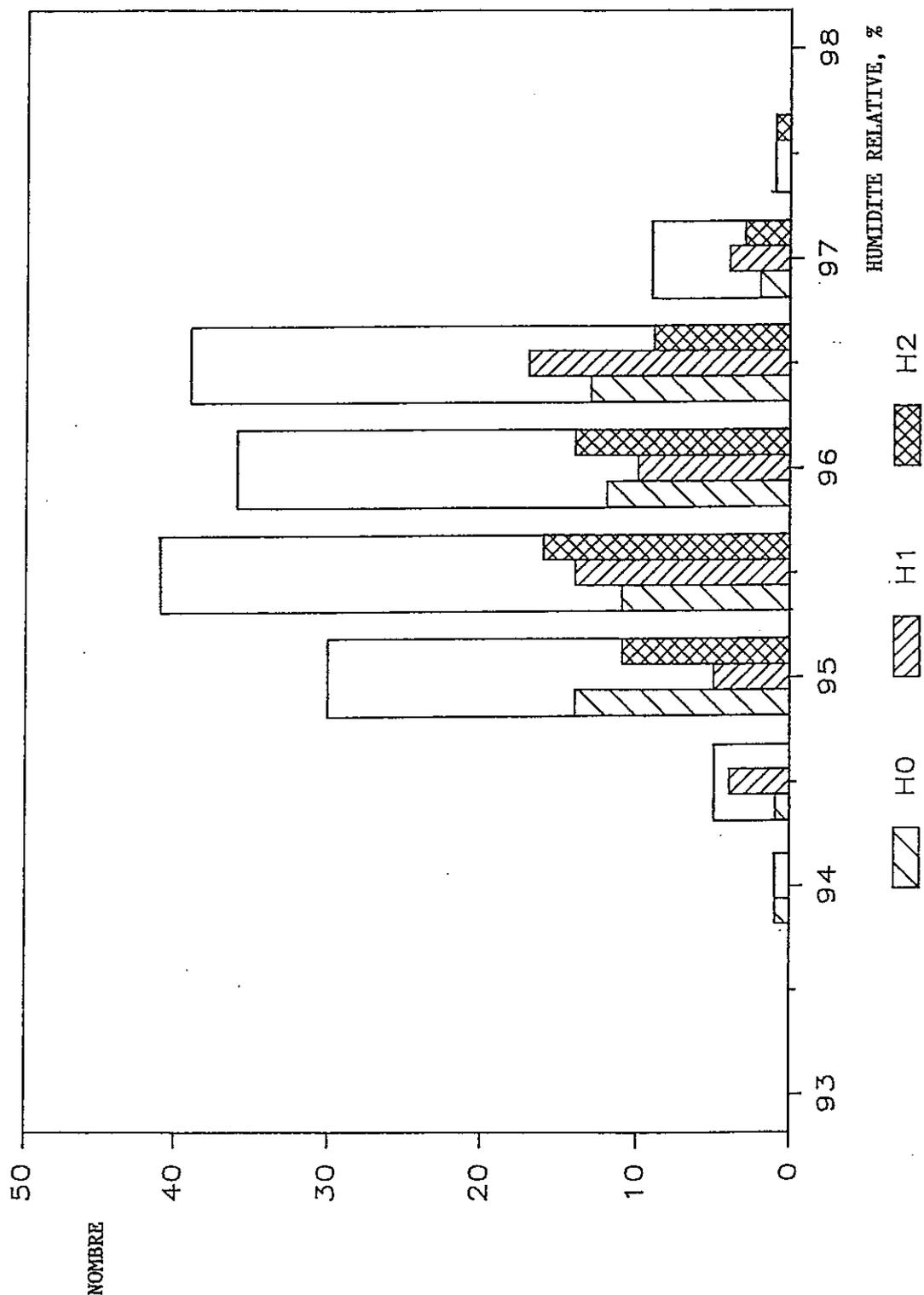


Fig. 3: Répartition des valeurs mesurées pour l'humidité relative dans une cave bien climatisée (A)

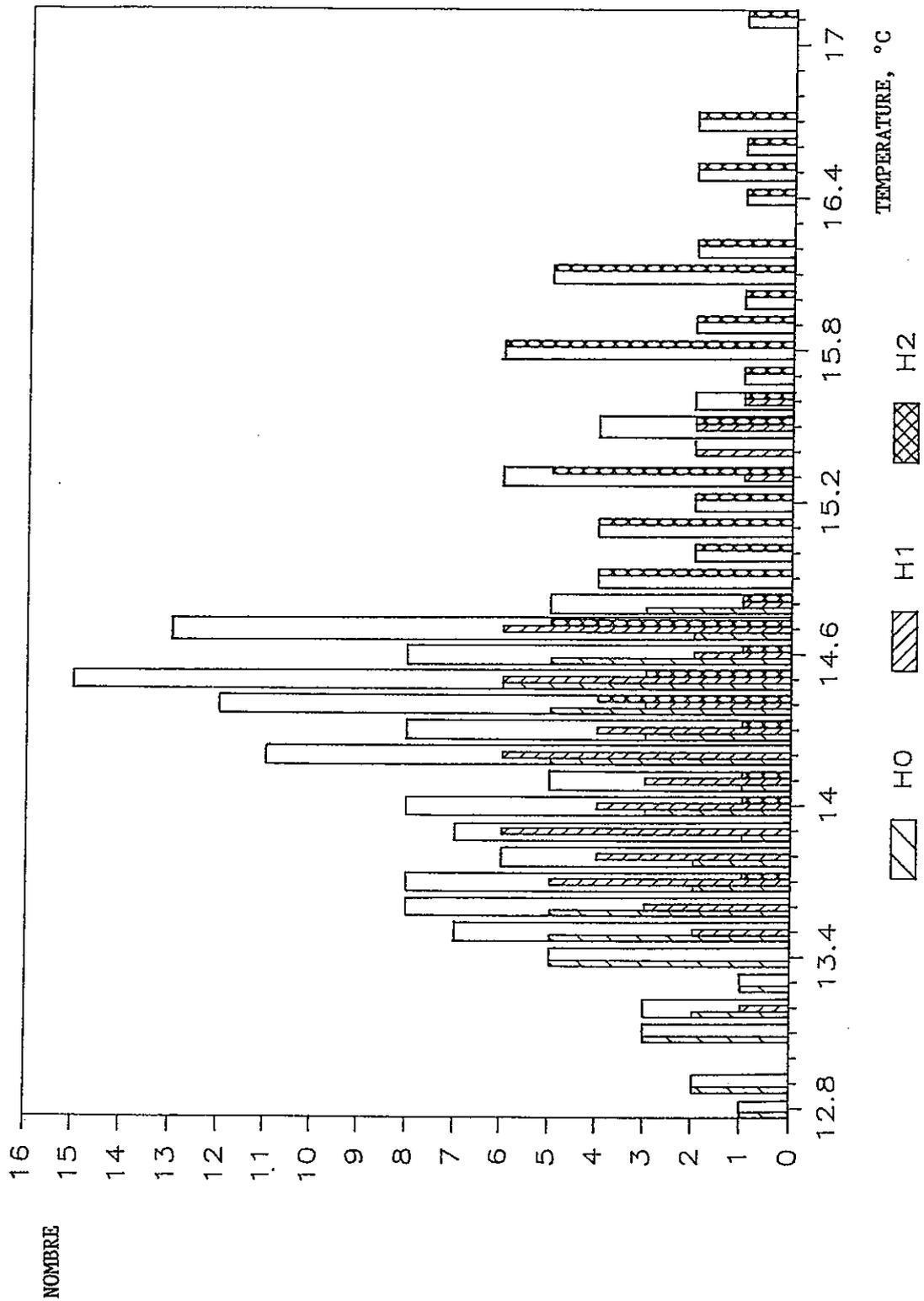


Fig. 4: Répartition des valeurs mesurées pour la température dans une cave de climatisation insuffisante (B)

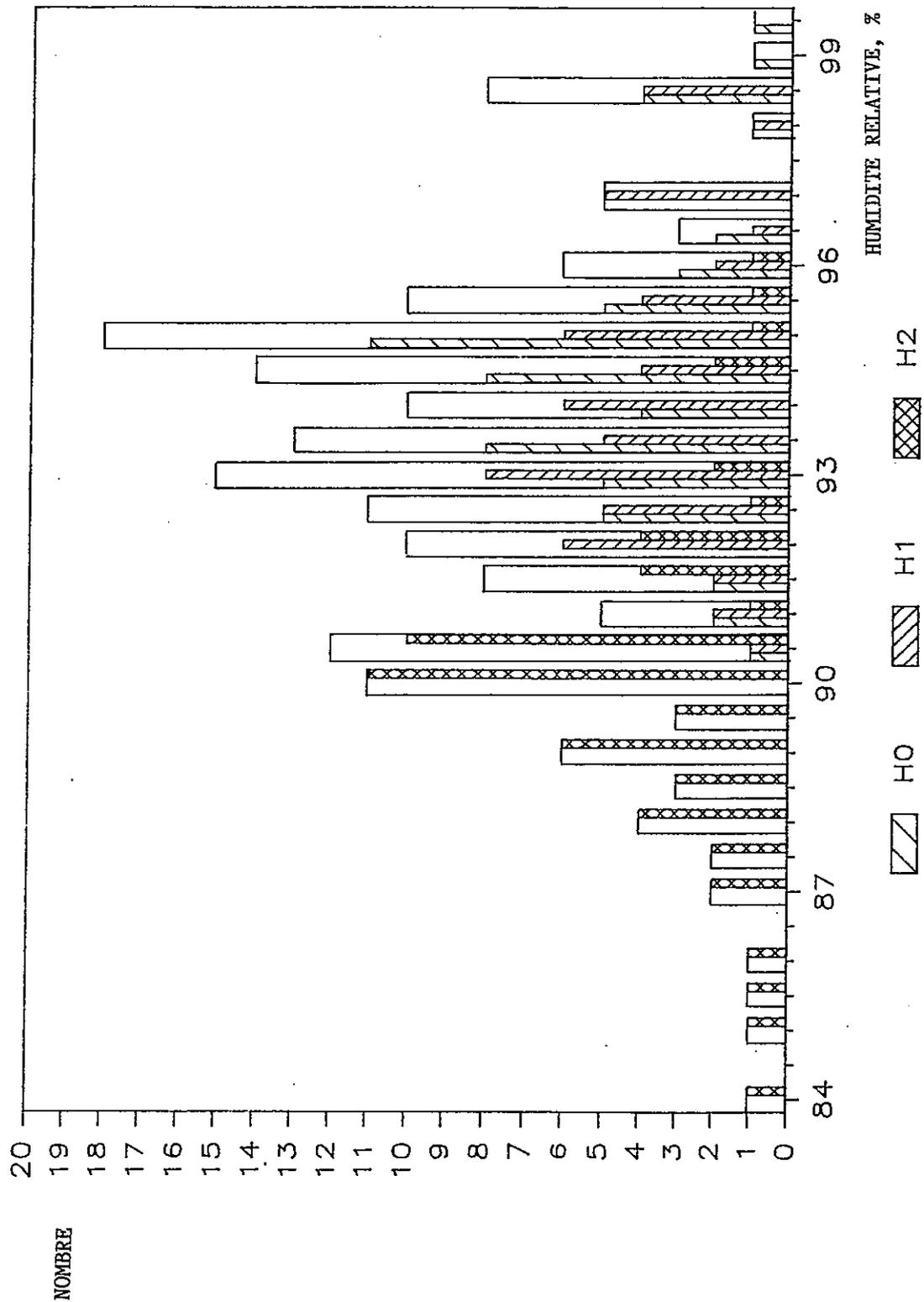


Fig. 5: Répartition des valeurs mesurées pour l'humidité relative dans une cave de climatisation insuffisante (B)

climatiques extérieures que les murs transmettent, alors que les caves au-dessus du sol sont plus exposées aux fluctuations de la température extérieure; par conséquent, elles requièrent une meilleure isolation thermique que les caves souterraines. Les caves souterraines, en particulier l'espace de tête et la dernière rangée de fromages, subissent l'influence des locaux qui se trouvent en dessus. Un parking ou des locaux de fabrication d'une fromagerie comme superstructure sont des facteurs déterminants pour la température du plafond. Sous un parking, la température du plafond de la cave variera selon la saison, donc apport de chaleur supplémentaire en été et perte de chaleur en hiver. Dans une cave située au-dessous de locaux de fabrication, l'apport de chaleur sera constant pendant toute l'année. Dans les caves sans superstructure, la température du plafond baisse parfois en hiver au-dessous du point de rosée, et des gouttes se forment au plafond, même si celui-ci est bien isolé. Il est possible d'éviter cet inconvénient en prévoyant un léger chauffage du plafond.

3.3.2 Isolation des murs et du plafond

Les murs doivent être construits de façon à éviter autant que possible la formation d'eau de condensation aux murs et au plafond pendant les périodes de basses températures extérieures. On empêche ainsi que la température de surface des murs ne baisse au-dessous du point de rosée de l'air de la cave. A une température de 14°C et avec une humidité relative de 95%, l'air a un point de rosée de $13,2^{\circ}\text{C}$. Les murs de pièces d'habitation sont construits de telle manière que leur température soit en hiver de 1 à 2 degrés plus basse que la température ambiante. Les caves fromagères doivent être mieux isolées afin d'éviter la formation de gouttes aux murs et aux plafonds. Quand on choisit l'isolation, il faut tenir compte de la chute de pression de la vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de la cave. Il se produit une diffusion permanente de vapeur d'eau à travers l'isolation si celle-ci n'est pas protégée par une barrière anti-vapeur. A défaut, il y a condensation dans la couche isolante surtout en hiver, ce qui réduit considérablement l'effet isolant. Cependant, de telles barrières mécaniques ne sont jamais entièrement étanches (joints défectueux, endommagements). Il est donc recommandé d'utiliser des matières isolantes imperméables à l'eau. On peut apporter l'isolation sur la face intérieure ou la face extérieure des murs ou comme couche intermédiaire du murage. Installée à l'intérieur des caves, l'isolation doit être protégée contre des endommagements mécaniques. Il est difficile d'installer des conduites et des

armatures aux murs et au plafond déjà isolés, alors que l'isolation est facile à remplacer. L'isolation intérieure produit des effets défavorables lorsqu'il y a peu de fromages dans la cave. La capacité thermique spécifique d'une couche isolante est basse. Or, à la suite d'une entrée d'air chaud extérieur dans une cave presque vide, la température augmente. L'isolation intérieure ne peut compenser suffisamment ce changement de température. Dans une cave déjà existante, l'isolation intérieure est, en général, la seule possible.

Lorsque l'isolation est appliquée à l'extérieur du mur ou comme couche intermédiaire du murage de la cave, le mur agit comme tampon sur la température ambiante. Lors du choix ou de l'installation d'une telle isolation, il faut cependant considérer que son contrôle ou son remplacement est presque impossible.

Du côté pratique, on affirme souvent que des murs intérieurs ont la caractéristique d'accumuler de l'eau et agissent ainsi comme tampon sur l'humidité. Il est vrai qu'un mur en briques non protégé peut absorber et dégager de l'humidité. L'absorption d'eau dans le mur se fait par condensation de vapeur d'eau à l'intérieur des briques. Pour que cela soit possible, il faut que la température du mur soit plus basse que la température ambiante, ce qui ne se produit que pendant les périodes froides. Or, l'eau condensée diminue l'effet isolant et l'humidité du mur augmente. Près de la surface des murs, l'air est presque saturé d'humidité, ce qui nuit aux fromages qui se trouvent à proximité. L'humidité accumulée dans les murs ne sort pas avant que la température des murs ne dépasse la température ambiante, donc pas avant l'été. Lors de cette évaporation, l'air s'humidifie. Dès que le mur est desséché, l'effet tampon est supprimé jusqu'à ce que le mur soit de nouveau humidifié. Dans certaines caves, l'humidification de l'air se fait avec de l'eau ruisselant sur les murs. Or, lorsque la température de cette eau est plus basse que celle de l'air, elle provoque une condensation sur la surface des murs au lieu d'humidifier l'air, jusqu'à ce que la température ambiante soit plus ou moins identique à celle de l'eau ou du mur. Etant donné que l'eau du robinet est en général plus froide que la température ambiante, il faudrait chauffer l'eau en fonction de la température ambiante. Au voisinage de ces murs, l'atmosphère est saturée de vapeur d'eau, ce qui a, comme il a déjà été dit, un effet négatif sur les fromages se trouvant à proximité.

Si l'isolation du plafond est insuffisante, la température de celui-ci augmente au-dessous des chaudières et des cuves multiples, et les fromages touchés risquent de se dessécher.

Dans quelques caves, le sol est humide par suite d'une humidité relative élevée: c'est que la température de surface du sol est inférieure au point de rosée, ce qui entraîne la condensation de vapeur d'eau sur le sol. Il s'ensuit que l'humidification de l'air par le mouillage du sol n'est possible que dans les cas de température accrue du sol.

3.3.3 Les portes, les fenêtres et l'échange d'air

La mise en place d'une fenêtre dans une cave de fromages améliorerait sans doute les conditions de travail du personnel. En outre, elle permettrait à un fromager attentif d'adapter systématiquement le climat de la cave en l'aérant au besoin et de décharger ainsi l'installation de climatisation. On sait toutefois que dans les logements les pertes de chaleur les plus importantes sont attribuables aux fenêtres et aux portes. Dans les caves de fromages, de telles ouvertures entraînent une augmentation de l'apport thermique. Surtout lorsque les fenêtres sont exposées au sud, l'insolation peut chauffer, malgré des capuchons, certains endroits de la cave et dessécher ainsi les fromages.

La qualité des portes de la cave dépend de son emplacement. S'il s'agit d'une porte extérieure, il faut l'isoler et la calfeutrer afin d'éviter l'échange de chaleur à travers la porte fermée. Un sas dont la température diffère légèrement de celle de la cave permet de maintenir le climat en cas de mouvements de stocks, qui entraînent toujours des échanges d'air, plus ou moins prononcés, selon le gradient de température. Certains locaux de stockage sont munis en outre de portes battantes automatiques en matière plastique, qui empêchent un échange d'air trop fort lorsque les portes isolantes sont ouvertes.

Des puits d'élévateurs ouverts et des traversées de plafond conduisant directement aux locaux de fabrication provoquent en général des échanges d'air et des apports de chaleur involontaires. On évitera si possible de telles ouvertures ou les munira de portes isolantes ou de fermetures hermétiques.

Dans la mesure où la protection contre des effets extérieurs défavorables est assurée par des éléments de construction de la cave, la nécessité d'une climatisation à l'aide d'installations diminue et l'homogénéité du climat augmente.

3.3.4 Les conduites

Des conduites de vapeur et d'eau chaude dans la cave, même si elles sont bien isolées, augmentent la température localement, ce qui diminue l'humidité relative. Les fromages avoisinants se dessèchent. La chaleur dégagée doit être éliminée par le climatiseur.

3.3.5 Le fromage

Plusieurs analyses ont révélé que les fromages stockés exercent une grande influence sur le climat des caves. Chaque fromage crée un microclimat dans son environnement immédiat en échangeant de l'humidité avec l'air ambiant. Dans un microclimat constant, le fromage expulse autant d'eau qu'il n'en absorbe. C'est un équilibre d'humidité. Elle varie selon l'âge des fromages, leur degré d'essuyage et leur teneur en eau. De jeunes fromages provenant directement du bain de sel présentent une humidité d'équilibre inférieure à 90%, pour des fromages d'un certain âge, fraîchement emmorgés, elle est de 97 à 98%. Quand on maintient l'humidité d'équilibre, les fromages ne perdent plus de poids, ne se dessèchent plus après l'emmoirgement et présentent des fausses places et des bords cuits avec le temps. Le climat autour des fromages devraient donc être à même d'éliminer sans cesse de petites quantités d'eau de leur environnement immédiat. D'autre part, quand les pertes d'eau sont trop importantes, les fromages se dessèchent, ce qui se produit en général sur les derniers tablars, en particulier lorsque l'espace de tête est trop grand ou lorsque ces fromages ne sont pas couverts. Une grande densité de fromages dans une cave d'affinage crée un climat constant d'une humidité relative élevée. Dans une cave partiellement vide, les parties non occupées présentent des humidités relatives plus basses que les parties garnies de fromages. Dans un pareil cas, on peut éviter des pertes d'humidité trop importantes des secteurs occupés en installant des rideaux et en couvrant les fromages.

3.4 Installations de climatisation

3.4.1 Introduction

Les climatiseurs sont destinés à maintenir dans la cave un climat déterminé. Ils doivent refroidir ou chauffer le local de stockage selon la saison, l'isolation, la superstructure et la situation de la cave. Mais leur principale tâche est la déshumidification puisque les soins des fromages et les fromages eux-mêmes apportent de l'eau à la cave. D'autre part, le refroidissement déshumidifie l'air de la cave en été: il faut donc la doter d'un humidificateur. Eventuellement il faut aussi prévoir un apport d'air frais.

Dans les fromageries examinées de type artisanal, la climatisation va de la cave naturelle sans équipement spécial jusqu'à la climatisation entièrement automatisée, munie de canaux pour la circulation d'air. A une exception près, le traitement d'air se fait dans la cave même.

Des analyses du climat ont été effectuées dans 45 caves d'affinage de gruyère et 7 caves d'affinage de tilsit pendant toutes les saisons de l'année.

3.4.2 Caves sans installations de climatisation

Les mesures effectuées dans les caves sans climatiseurs ont montré que le climat extérieur influence le climat des caves en été et en hiver. Toutes les caves examinées se trouvaient au sous-sol et la plupart étaient mal isolées. Toutes les caves présentaient des gradients de température très marqués en été et en hiver. Ils étaient renforcés par un plancher froid ou par des plafonds chauds dans les caves se trouvant au-dessous de locaux de fabrication. Dans certaines caves, la température moyenne était de 10 °C env. en hiver et de 17 à 18 °C en été. Pendant toute l'année, l'humidité relative était plus basses près du plafond, conséquence d'un apport de chaleur excessif par le plafond. La perte accrue d'eau provoquait le dessèchement des fromages du dernier tablar. Les autres meules, en particulier celles du milieu, ont produit une humidité relative équilibrée, malgré les différences de température. Cela signifie que la teneur en eau absolue change et que les fromages créent leur propre microclimat en dégageant de l'eau.

Quel est l'effet de ces conditions climatiques sur les fromages?

Le maintien d'une humidité relative élevée par l'immersion et l'élimination d'air sec devrait empêcher le dessèchement excessif des fromages. Le métabolisme de la flore microbienne et, par conséquent, la vitesse de maturation dépendent cependant de la température. En hiver, on constate un ralentissement de la maturation des fromages et en été une accélération de la croissance de la moisissure. L'augmentation de la température de stockage et la réduction de l'humidité relative provoquent en outre le graissage et la fermentation secondaire.

3.4.3 Caves avec refroidissement non forcé

Le refroidissement non forcé consiste à éliminer l'excès de chaleur par des refroidisseurs installés au plafond ou aux murs. On utilise comme réfrigérant de l'eau glacée ou un fluide frigorigène comme le fréon. L'eau qui se condense sur les refroidisseurs est remplacée à l'aide de pulvérisateurs d'eau ou de buses à air/eau qui injectent du brouillard dans les caves.

En hiver, les climatiseurs n'étaient pas enclenchés, et le climat des caves examinées était semblable à celui de locaux sans climatisation. On a constaté des gradients de température très marqués et des changements de température plus ou moins importants, selon l'apport de chaleur.

En été, les gradients de température sont moins prononcés. Le refroidissement non forcé mélange l'air de la cave, sans cependant créer un climat homogène. Les valeurs mesurées en haut (à 2,2 m env.) fluctuent fortement, alors que celles mesurées en bas ou au centre (à 0,3 et à 1,2 m env.) sont moins variables. En été, les valeurs mesurées pour l'humidité relative sont proches de la saturation à cause de l'humidification de l'air.

Les climatiseurs simples provoquent, à courts intervalles, d'importantes fluctuations de température et d'humidité relative. En particulier, l'enclenchement et le déclenchement des appareils font osciller considérablement la température. Lorsque la vapeur d'eau de l'air humide refroidi condense sur le refroidisseur, l'hygrostat enclenche l'humidificateur avec une inertie plus ou moins grande qui est fonction de son temps de réponse. L'effet plutôt "grossier" de ces installations de climatisation, en particulier de l'humidificateur et du refroidisseur, provoque de fortes inhomogénéités de l'air des couloirs. L'échange de l'air entourant les fromages et de l'air traité, dû aux différences de température et de pression de vapeur, ne se réa-

lise que lentement. Des fluctuations même importantes dans l'air des couloirs n'ont pas d'influence défavorable sur les fromages.

Les refroidisseurs installés aux murs créent un climat froid et très humide dans leur environnement immédiat. Les fromages se trouvant à proximité perdent moins de poids, mais leur croûte subit des dégâts, même quand ils sont couverts.

Les atomiseurs d'eau répandent rapidement un brouillard dense dans la cave, mais la plupart de l'eau pulvérisée se dépose sur le plancher sous forme de gouttelettes sans s'évaporer. Pour que l'eau s'évapore, il faut que sa température ne soit pas inférieure à la température ambiante. Dans certaines caves, les mesures ont montré que la température de l'eau pulvérisée était inférieure au point de rosée de l'air de la cave. Cela a déshumidifié la cave au lieu de l'humidifier. La pulvérisation doit être orientée de façon à éviter tout contact direct entre les fromages et les gouttelettes d'eau.

Une isolation suffisante minimalise les perturbations que les climatiseurs provoquent dans le climat des caves, puisque la diminution de l'apport de chaleur réduit les besoins de refroidissement et d'humidification.

S'il faut refroidir les caves pour maintenir la température adéquate en été, il est nécessaire de chauffer certains locaux en hiver. Les chauffe-eau traditionnels et les chauffages électriques mobiles entraînent de grandes augmentations de température locales. Une autre possibilité est le chauffage du sol ou des murs.

Dans aucune des caves examinées, on n'a trouvé une installation de refroidissement non forcé pour la déshumidification de l'air en combinaison avec un chauffage.

3.4.4 Caves avec chauffage du sol

Le chauffage du sol consiste, en général, en une conduite d'eau formée de plusieurs tubes installés dans le sol des couloirs. La température d'entrée de l'eau est de 30 à 40 °C, la température de sortie un peu plus basse. La température peut être réglée manuellement, à l'aide d'une soupape ou avec un thermostat qui commande une soupape automatique en fonction de la température de la cave et/ou de la température extérieure.

Dans quelques caves avec chauffage du sol, des refroidisseurs sont installés aux murs; l'humidification se fait par l'emmorgement, auquel s'ajoute, dans certains cas, le mouillage du sol. Ce sont des caves sans superstructure ou avec superstructure partielle ou entière. L'étanchéité des portes et des fenêtres est médiocre ou insuffisante, mais l'isolation des locaux est bonne.

En hiver, le climat des caves est en général favorable. Les valeurs mesurées pour la température et l'humidité relative correspondent aux valeurs recommandées. Celles-ci sont de 12 à 15 °C pour la température et de 90 à 95 % pour l'humidité relative pour la cave froide et respectivement de 15 à 18 °C et de 90 à 95 % pour la cave chaude. La dispersion des valeurs mesurées est petite. Cette homogénéité du climat doit s'attribuer au courant de convection. Si le plancher est chaud, l'air monte et se mélange avec l'air plus froid qui descend. Les valeurs mesurées à proximité du sol présentent les variations les plus importantes.

Il s'est également révélé qu'il n'y a pas des différences significatives pour la température et l'humidité relative dans les couloirs et entre les tablars de caves avec chauffage du sol.

Sans refroidissement, de tels locaux subiront en été des augmentations de température inadmissibles.

3.4.5 Cave avec chauffage monté au mur (fig. 6)

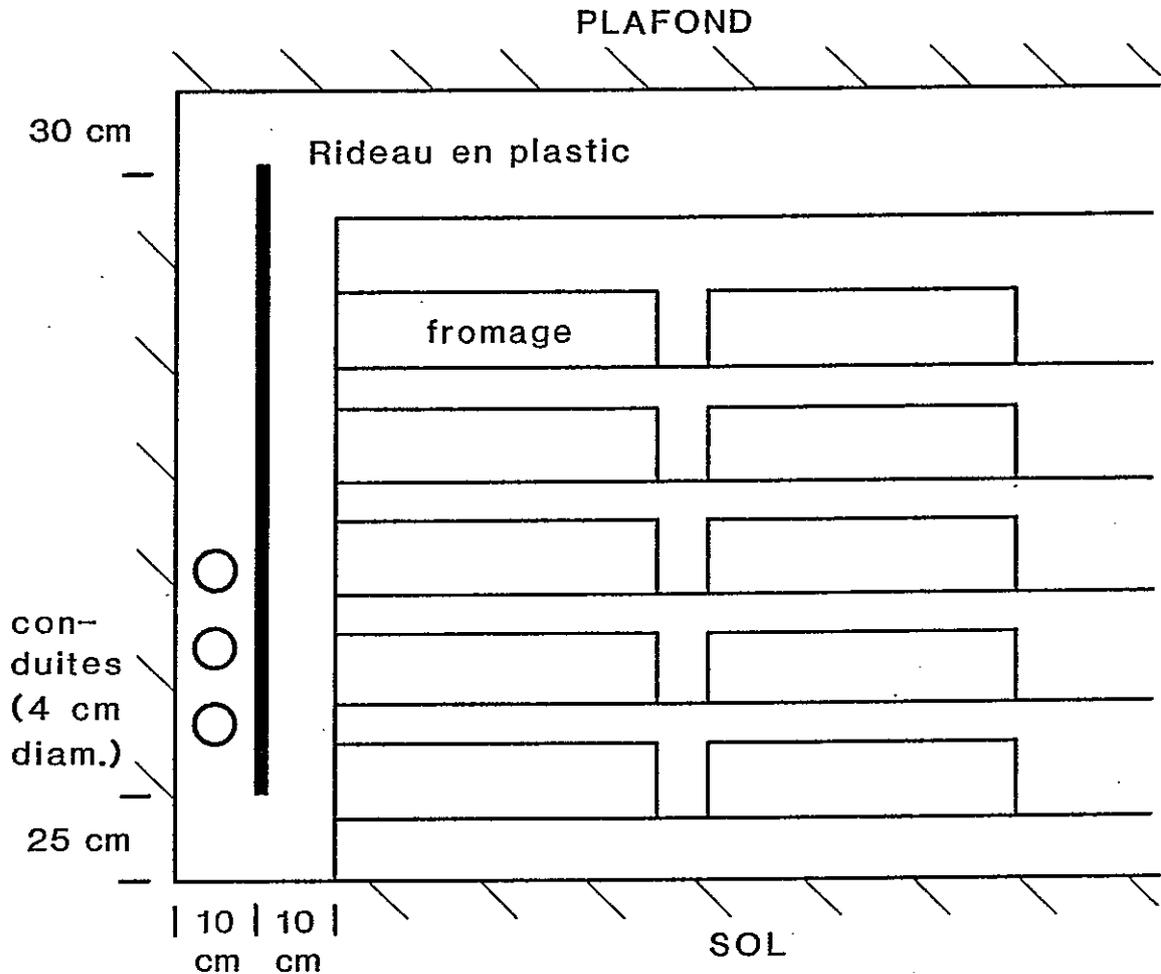


Fig. 6: Cave avec chauffage placé contre le mur

Dans les caves examinées, le chauffage des murs et de la cave consiste en une conduite d'eau longeant le mur à une distance de 25 cm du sol. Cette conduite se trouve sous forme de triple serpentín sur les murs qui sont très froids et humides en hiver. Un rideau en plastique qui est ouvert vers le sol et le plafond est suspendu à 10 cm du mur et protège les fromages. La température d'entrée de l'eau chaude est de 31 à 36 °C, la température de sortie de 30 à 34 °C. Le réglage se fait au moyen d'une soupape thermostatique. Ces caves ne contiennent pas d'autres installations de climatisation, sauf des refroidisseurs à convection naturelle.

Ces caves, bien isolées et très étanches, sont sans superstructure.

En hiver, les valeurs mesurées pour la température et l'humidité relative correspondent aux valeurs recommandées. Malgré l'absence de superstructure, la dispersion des valeurs est petite, ce qui peut s'attribuer à la qualité de l'isolation ainsi qu'au chauffage ménageant des caves.

La conduite d'eau chaude au long du mur et le rideau en plastique produisent les effets suivants:

1. L'espace cerné par le rideau où se trouve le triple serpentin est nettement plus chaud et plus sec, surtout près du plafond, que le reste de la cave. Cela est dû au fait que l'air chauffé monte et que le rideau agit comme une cheminée.

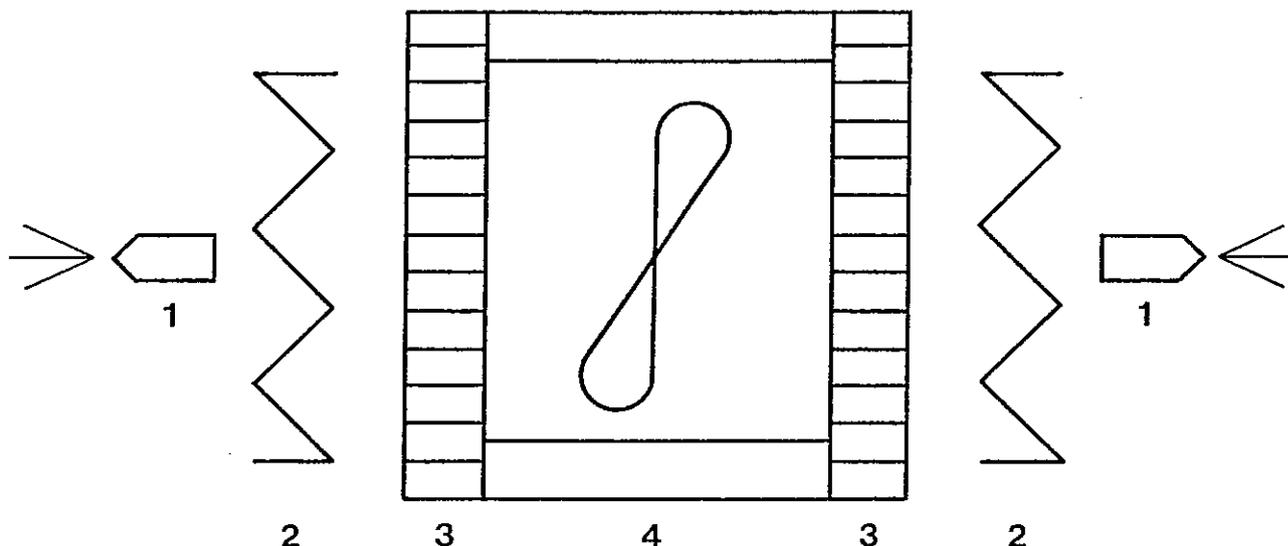
2. La température de surface des parties exposées des plafonds et des murs est nettement supérieure au point de rosée de l'air des caves examinées. Même pendant les périodes les plus froides, ces parties restent donc exemptes d'eau de condensation.

3. La chaleur produite par la conduite en forme de triple serpentin, qui est protégée par la feuille en plastique, se répand plusieurs mètres au-delà de son environnement immédiat.

4. L'essuyage des fromages, après l'emmorgement, est satisfaisant.

En été, le climat des caves refroidissables est bon. Les caves non refroidies présentent une température accrue.

3.4.6 Caves avec installation interne d'appareils à circulation d'air sans canaux (fig. 7)



- 1 Buses (eau / air)
- 2 Chauffage par résistance
- 3 Élément de refroidissement
- 4 Ventilateur

Fig. 7: Appareil à circulation d'air sans canaux

Les appareils à circulation d'air sont des unités compactes composées de ventilateurs axiaux, d'échangeurs de chaleur pour le refroidissement, de chauffages par résistance et de buses à air/eau. L'appareil est installé au-dessous du plafond, au milieu du couloir. Un ou deux ventilateurs axiaux aspirent l'air du couloir, le font passer par deux registres de refroidissement et évacue l'air ainsi traité latéralement dans le couloir.

Les appareils à circulation d'air sont munis de thermostats et d'hygrostats. Les capteurs de température sont des ressorts hélicoïdaux remplis d'un fluide; pour l'humidité relative, on se sert d'hygromètres capillaires.

Les climatiseurs peuvent être actionnés à main ou automatiquement, selon la confiance que les fromagers mettent en l'efficacité des appareils et des instruments de mesure: certains fromagers préfèrent l'actionnement automatique.

Ils ne changent presque jamais les valeurs de consigne. D'autres les modifient chaque jour, selon les observations qu'ils font du climat et des fromages. Dans plusieurs locaux d'affinage, les fromagers mettent en marche les appareils à circulation d'air au besoin, pour quelques heures de service continu ou intermittent.

Au-dessus des caves examinées se trouvent, en général, des locaux de fabrication, des appartements, des magasins ou des bureaux; parfois elles sont sans superstructure. L'isolation est mauvaise, médiocre ou de bonne qualité. Quelques locaux d'affinage ont des sas, des fenêtres et des ouvertures d'admission d'air frais.

Dans les caves équipées d'appareils à circulation d'air sans canaux, les conditions climatiques sont beaucoup plus défavorables que dans les caves sans climatisation ou avec climatisation non forcée et chauffage du sol ou des murs. Les valeurs extrêmes et souvent aussi les valeurs moyennes dépassent les valeurs recommandées et les fluctuations ne sont pas acceptables si l'on veut assurer l'affinage optimal des gruyères.

Ce manque d'homogénéité du climat s'explique comme suit:

Les appareils à circulation d'air ne délivrent que de l'air de température et d'humidité relative extrêmes. Il est très différent de l'air de la cave. Cet air primaire est expulsé des deux côtés de l'appareil dans le couloir. Dans la partie supérieure et au centre de la cave, le mélange avec l'air ambiant est insuffisant, et le climat qui en résulte est inhomogène. Par ailleurs, une partie des fromages est touchée par des circuits d'air de température et d'humidité très défavorables.

Ces données sont présentées graphiquement dans la figure 8.

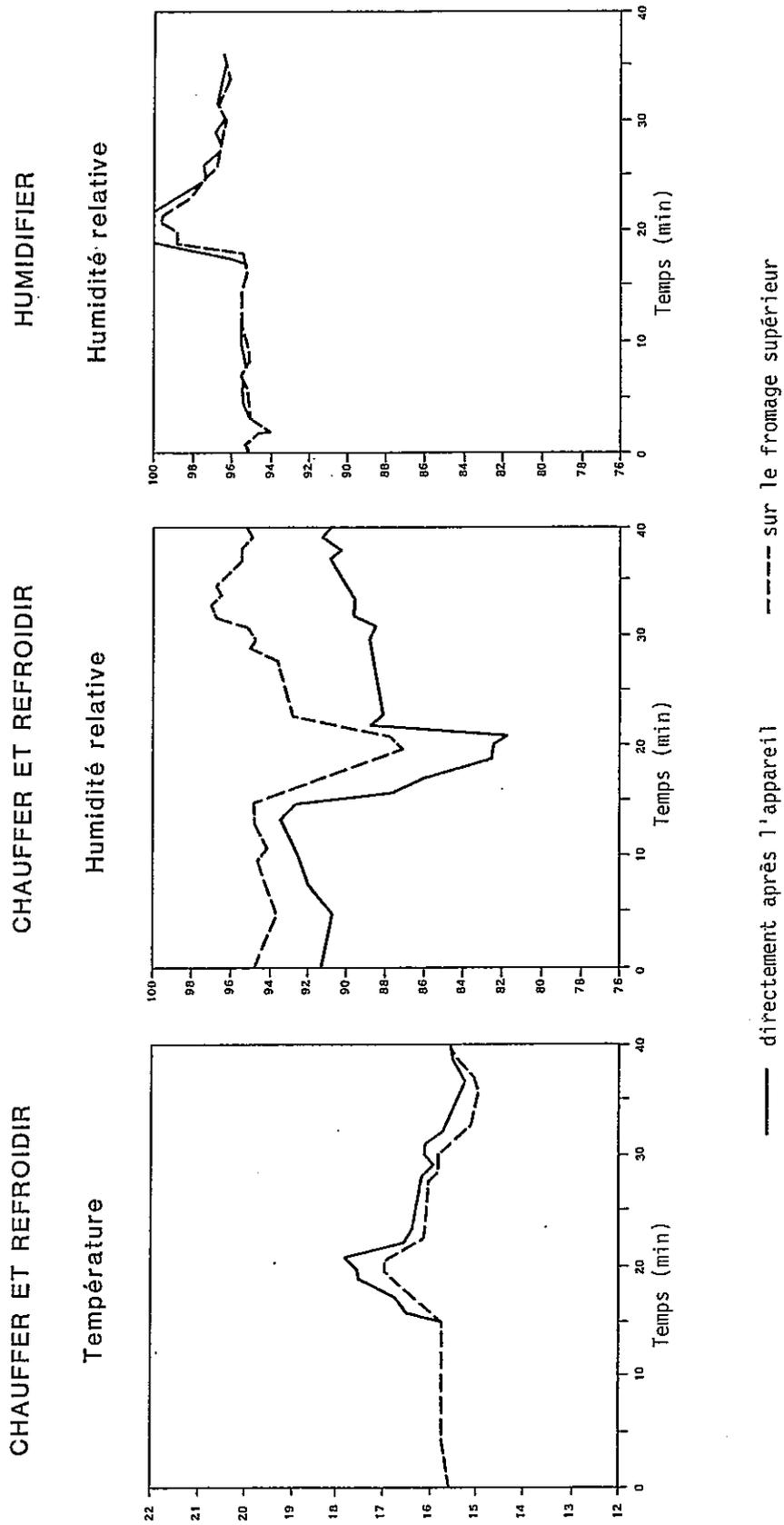


Fig. 8: Fluctuations du climat générées par un appareil à circulation d'air sans canaux

Le climat au-dessus de la dernière rangée de fromages est soumis à des fluctuations à courts intervalles, comme la température et l'humidité relative de l'air primaire. Lorsque les appareils à circulation d'air travaille sans interruption, pendant deux heures, par exemple, le climat est plus homogène, mais ces fromages subissent l'effet direct de l'air primaire ou d'un mélange insuffisant d'air primaire et d'air ambiant. Les conditions climatiques restent défavorables, même si la distance des fromages est de 1 ou de 2 m plus grande que la portée indiquée par le fabricant.

Le degré de mélange de l'air primaire et de l'air de la cave dépend surtout de l'espace de tête, qui est, en général, trop restreint pour des raisons économiques. Il en résulte que l'air évacué par les appareils entre en contact avec un grand nombre de meules. Dans de telles conditions, les fromages supérieurs subissent en outre l'effet de l'air aspiré. Celui-ci est plus chaud dans la partie supérieure de la cave, en particulier quand l'isolation du plafond est insuffisante. Il en résulte une diminution locale de l'humidité relative et, par conséquent, un dessèchement supplémentaire des fromages.

Dans de telles conditions, on couvre parfois la rangée supérieure des fromages avec des planches. Il ne faut cependant pas surestimer l'efficacité de cette mesure. Les fluctuations de température et d'humidité relative au-dessus des fromages restent les mêmes, qu'ils soient couverts ou non. On constate une augmentation de l'humidité relative au-dessus des fromages couverts. Cela indique une tendance accrue à maintenir le microclimat créé par les fromages.

3.4.7 Cave avec installation interne ou externe d'appareils à circulation d'air avec canaux (fig. 9)

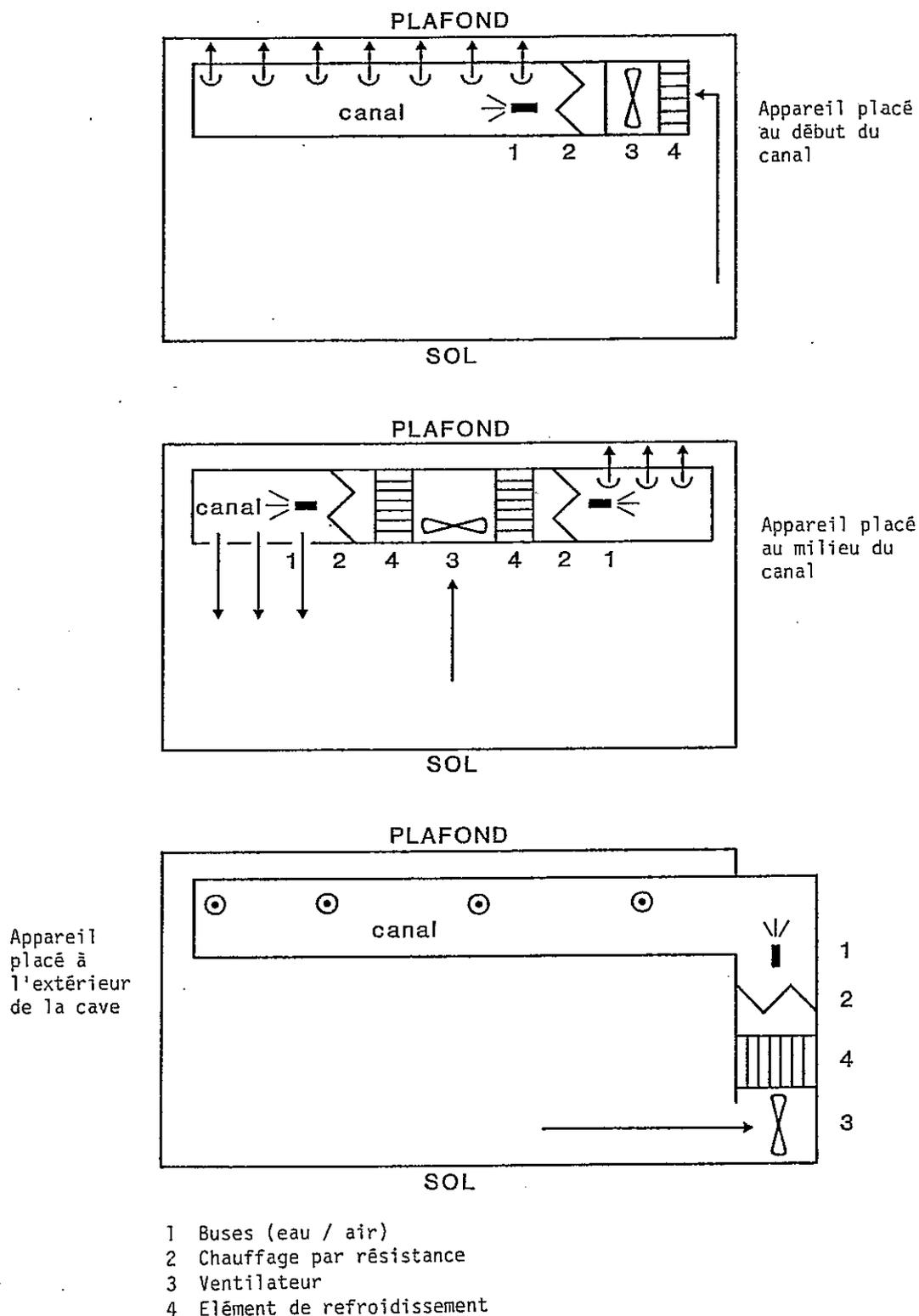


Fig. 9: Appareil à circulation d'air monté à l'intérieur ou à l'extérieur

L'appareil à circulation d'air interne est composé d'un ventilateur axial, d'un registre de refroidissement à détente directe, d'un chauffage par résistance et d'une buse à air/eau. Ces éléments constituent, avec les canaux d'air, le système de climatisation. Il se trouve sous le plafond au-dessus des couloirs. Les appareils à circulation d'air sont montés à une des extrémités ou au centre des canaux.

Si l'appareil se trouve à l'extrémité du canal, le profil de celui-ci est rond. Il est en matière plastique et comporte des orifices orientés obliquement vers le plafond. Si l'appareil est monté au centre du canal, le système est équipé de deux registres de refroidissement, de deux chauffages par résistance et de deux buses. Si le profil du canal est circulaire, celui-ci est également en matière plastique et possède des rangées de trous orientés obliquement vers le plafond. Si le profil est rectangulaire, le canal a des fentes de dimension réglable, orientées vers le sol. Les canaux rectangulaires sont en acier inoxydable.

Les systèmes de circulation d'air externes sont munis de canaux rectangulaires en acier inoxydable. Ce sont les seuls éléments du système se trouvant à l'intérieur de la cave; ils sont installés sous le plafond. Ils ont des ouvertures rondes qui laissent sortir l'air latéralement, parallèlement au plafond.

Les données suivantes s'appliquent aussi bien au système interne de circulation d'air qu'au système externe. Les installations sont commandées par des thermostats et des hygromètres. En général, il s'agit de thermomètres à résistance électrique et de capteurs capacitifs d'humidité.

Dans toutes les caves examinées les installations sont actionnées automatiquement. La situation et la construction des caves sont très diverses. Au-dessus de la plupart des caves sont aménagés des locaux de fabrication, des appartements ou des locaux où se trouvent des compresseurs. Quelques-unes n'ont pas de superstructure. Une cave se trouve au-dessus du sol, trois murs étant exposés aux influences atmosphériques extérieures. La qualité de l'isolation est de mauvaise à excellente. Quelques locaux ont des ouvertures fermantes, isolées ou non isolées, pour l'admission d'air frais. Une des caves a une porte qui mène directement à l'extérieur. Il y a des caves avec et d'autres sans sas. Dans toutes les caves examinées, la distance entre les fromages et les murs est suffisamment grande (au moins 30 à 40 cm) pour créer des laminages d'air transversaux par les canaux.

Ce système crée de meilleures conditions climatiques que les appareils à circulation d'air sans canaux. Deux caves seulement présentent des moyennes inférieures aux valeurs recommandées. Abstraction faite de ces cas extrêmes, l'homogénéité du climat généré par les systèmes de circulation d'air avec canaux est excellente. En été surtout, les variations de température sont beaucoup plus basses par rapport aux valeurs obtenues avec des installations sans canaux. Il en est de même, pour l'humidité relative, qui reste stable dans toutes les saisons.

On a analysé le climat de quatre locaux d'affinage bien isolés, sans superstructure, avant et après l'installation de canaux d'air. Une comparaison directe montre que les variations de température et d'humidité relative sont nettement plus basses dans les caves avec canaux. Ce système fait, en effet, disparaître, dans les couches moyennes et supérieures de la cave, l'inhomogénéité qui est caractéristique des appareils à circulation d'air sans canaux.

Les conditions climatiques favorables générées par les canaux peuvent être attribuées à deux causes principales:

1. La plus grande partie de l'air primaire, grossièrement traité, en sortant de l'appareil, reste d'abord à l'intérieur du canal. Il se mélange avec l'air de la cave après avoir passé par les ouvertures du canal. Même les fromages du dernier tablar n'entrent jamais en contact avec de l'air primaire pur ou insuffisamment mélangé.

Les graphiques de la figure 10 montrent que les grandes fluctuations de température et d'humidité relative se produisant, à petits intervalles, à l'intérieur des canaux, influencent très peu les fromages les plus exposés des derniers tablars.

Selon la figure 11, les résultats sont les mêmes pour des périodes de mesure prolongées. Il n'est pas nécessaire de couvrir la dernière rangée de fromages.

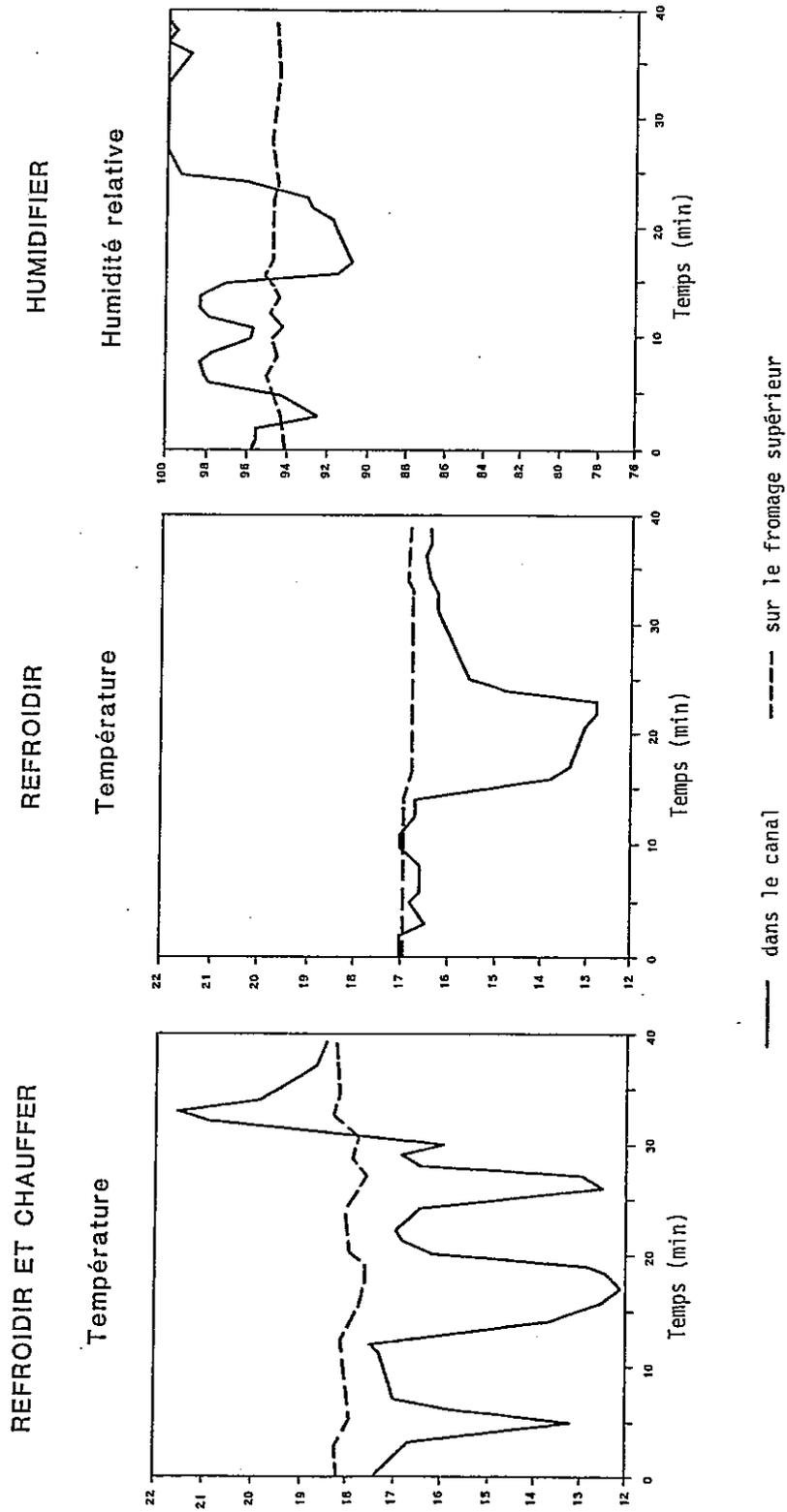


Fig. 10: Fluctuation du climat produite par un appareil à circulation d'air avec canaux

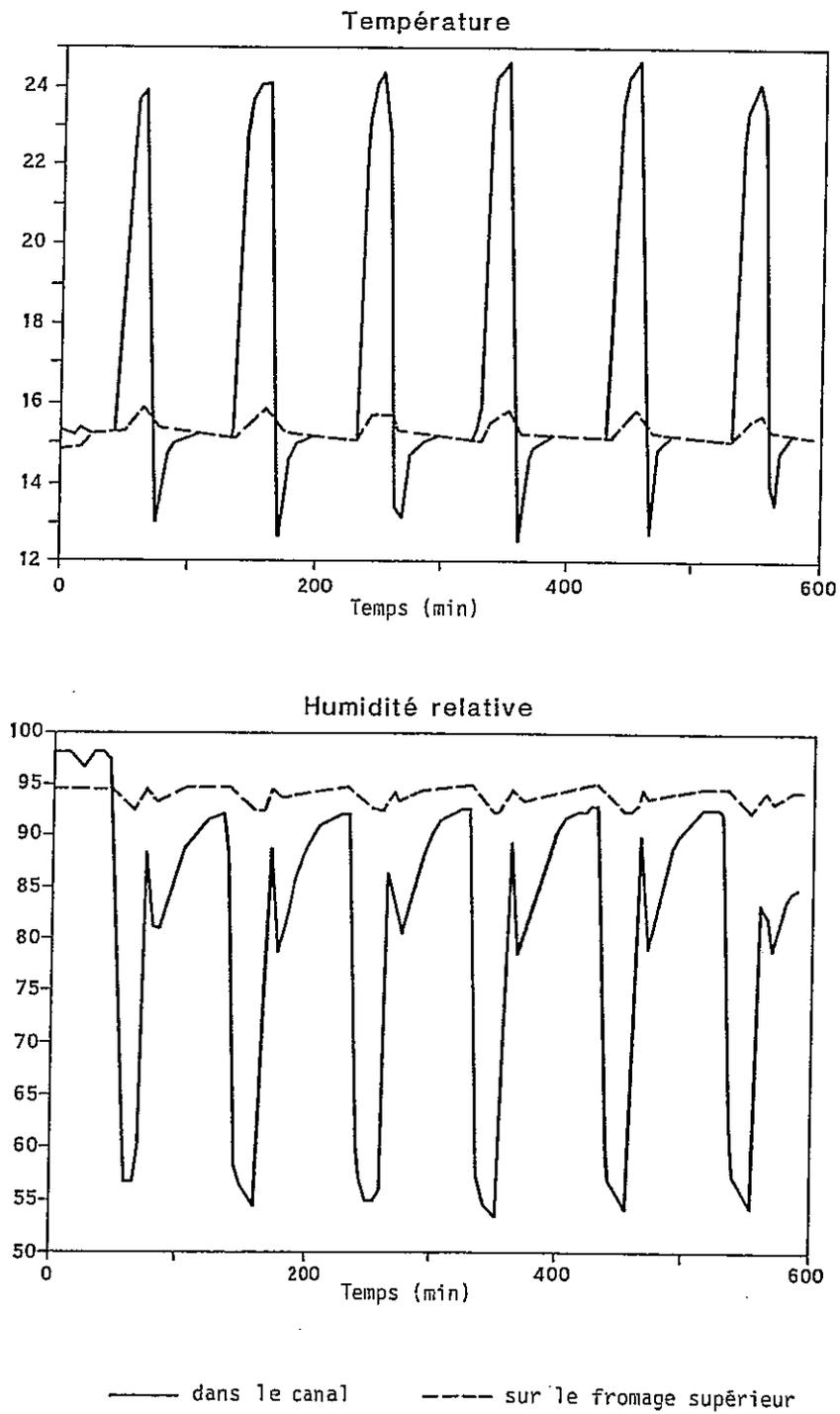


Fig. 11: Fluctuation du climat produite par un appareil à circulation avec canaux pendant chauffage

2. Le système sans canaux fait circuler l'air au long des couloirs. Par contre, le système avec canaux, pourvus d'orifices d'évacuation orientés obliquement vers le plafond, produit deux laminages d'air transversaux qui atteignent pratiquement le local tout entier. Ils permettent de mieux mélanger l'air primaire avec l'air de la cave et de répartir plus régulièrement ce mélange d'air dans les couloirs et parmi les tablars.

Les canaux dont les orifices d'évacuation sont dirigés vers le sol ne génèrent pas des circuits d'air transversaux aussi prononcés. L'air ne se mélange que dans les couloirs.

Un autre avantage des canaux est celui-ci: dans une cave dont un mur extérieur est très exposé, les canaux de deux appareils à circulation d'air sont installés parallèlement au mur. Ils sont pourvus d'ouvertures orientées obliquement vers le plafond. Cet arrangement qui produit des laminages d'air transversaux permet d'éviter que la température de surface du mur extérieur ne tombe nulle part au-dessous du point de rosée de l'air ambiant.

L'acier inoxydable comme matériau de canaux présente un désavantage: il maintient la chaleur des canaux après le déclenchement du chauffage et des ventilateurs, et la température de l'air à l'intérieur du canal continue d'augmenter. Cela peut s'éviter dans des canaux en matière plastique.

Enfin, il faut signaler deux différences entre l'installation interne et le montage externe des systèmes: l'installation interne influence l'environnement immédiat des appareils à circulation d'air pendant des périodes prolongées de refroidissement ou de chauffage. Ce phénomène ne se produit pas pour l'installation externe, qui est cependant plus coûteuse et qui n'est payante que pour de grands entrepôts.

3.5 Conclusions et recommandations

3.5.1 Le fromage et le fromager comme facteurs influençant le climat des caves

Il a déjà été mentionné au début que l'humidité relative d'un local d'affinage doit être légèrement inférieure à l'humidité d'équilibre des fromages. Cela garantit un essuyage suffisant et l'absence de fromages cuits.

Etant donné qu'aucune des installations de climatisation examinées ne répond entièrement à cette exigence, le fromager doit essayer d'influencer l'essuyage: il modifiera la fréquence et l'intensité du traitement selon l'état de la croûte et installera des rideaux ou des couvertures pour protéger les fromages.

Localement, les tablars doivent être entièrement occupés de fromages. Des places vides ont un effet de dessiccation sur les meules avoisinantes. Des secteurs inoccupés de la cave doivent être délimités par des rideaux. Des fromages jeunes créent dans leur environnement une humidité relative plus basse que des fromages mûrs et ne doivent pas être stockés dans leur voisinage.

La quantité totale d'eau apportée au local par les soins doit être éliminée. Il est donc recommandé de limiter l'utilisation d'eau.

3.5.2 La cave comme facteur influençant le climat

Il est avantageux d'aménager les caves d'affinage au sous-sol, au-dessous de locaux chauffables, afin d'éviter la formation d'eau de condensation ou de gouttes d'eau au plafond. Les locaux construits au-dessus du sol sont plus exposés aux influences extérieures. Les caves ayant comme superstructure des locaux de fabrication équipés de cuves multiples, de chaudières à vapeur, de réservoirs à eau chaude ou de compresseurs nécessitent une bonne isolation du plafond. Si les cuves multiples ou les chaudières sont installées de façon qu'une partie se trouve dans le local d'affinage, elle doit être bien isolée.

Dans les caves sans superstructure, une bonne isolation du plafond est indispensable. L'installation d'un chauffage sous le plafond empêche l'action du froid en hiver et la formation d'eau condensée.

Des sas sont à prévoir pour pouvoir déplacer les machines à froter les fromages et comme éclusage de climat. Il est préférable de les isoler. Si la porte n'est pas précédée d'un sas, il faut au moins suspendre un rideau en plastique devant la porte.

Une bonne isolation facilite la climatisation du local. La couche isolante doit être protégée contre l'humidité et les dégâts mécaniques.

Le transport des jeunes fromages se fait de préférence avec un ascenseur donnant sur un sas. Des dispositifs de transport qui font descendre les meules par une ouverture au plafond sont moins avantageux: ils sont souvent insuffisamment isolés et constituent d'importantes sources de chaleur.

Le bain de sel provoque des diminutions locales de l'humidité relative. Il faut donc le couvrir. Dans de nouveaux bâtiments, il faut l'installer à l'extérieur du local d'affinage.

Le tracé des locaux d'affinage doit être simple et ne pas comporter d'angles. La hauteur de l'espace de tête dépend du système de climatisation utilisé.

3.5.3 L'installation de climatisation comme facteur influençant le climat

Un local d'affinage pour le gruyère nécessite une installation de climatisation. Dans les caves sans climatisation, les températures et les taux d'humidité ne sont appropriées aux fins prévues que pendant les périodes de transition, si certaines conditions bien définies sont remplies.

Les refroidisseurs installés au plafond au-dessus des couloirs et travaillant par convection naturelle permettent d'obtenir un climat favorable si l'espace de tête est de 40 cm au moins. Lorsque le local est bien isolé, il n'est pas nécessaire d'installer un humidificateur, car l'eau qui se condense sur le refroidisseur est renouvelée par les soins des fromages. La déshumidification qui s'impose éventuellement en hiver peut être réalisée avec un refroidissement commandé par l'hygrostat. Le chauffage est nécessaire pour éviter une diminution trop forte de la température de cave. A cet effet, on peut prévoir un chauffage du sol combiné, qui est facile à installer et à manipuler. Le climat ainsi généré est assez homogène. Avant d'installer le chauffage, il faut examiner s'il est nécessaire de poser des conduites d'eau chaude dans les murs extérieurs très exposés ou dans le plafond de caves sans superstructure.

Les refroidisseurs installés aux murs faisant partie du système de refroidissement non forcé ne sont pas recommandés. Par manque de place, la distance entre les éléments et les fromages est, en général, trop petite; il se forme de l'eau de condensation par endroits et les fromages subissent des dégâts zonaux.

Les appareils à circulation d'air interne sans canaux ne sont pas appropriés à la climatisation de locaux d'affinage pour le gruyère, notamment lorsque l'espace de tête manque ou qu'il est trop petit. Si l'on utilise ce système de climatisation, il faut un espace de tête d'au moins 70 cm, et les fromages doivent être protégés du contact direct avec l'air primaire et les projections d'eau provenant des buses. On peut améliorer l'homogénéité du climat en ajoutant des canaux aux appareils à circulation d'air.

Le profil des canaux du système de circulation interne doit être circulaire. Les ouvertures orientées vers le plafond dont les canaux sont pourvus permettent de créer des circuits d'air transversaux. L'espace de tête sera de 40 cm au moins. Le plafond doit être lisse pour ne pas gêner les mouvements d'air. Si l'évacuation d'air par les canaux est effectuée vers le bas, dans les couloirs, il est recommandé de prévoir un espace de tête de 50 à 60 cm. Les canaux seront en matière plastique, faciles à nettoyer et pourvus d'un raccordement flexible avec l'appareil à circulation d'air (vibrations). Les buses à eau/air pour l'humidification se trouveront à l'intérieur du canal; ils doivent être accessibles. Il est important que l'humidificateur soit raccordé aux ventilateurs.

Pour créer des laminages d'air transversaux, la distance entre les fromages et les murs doit être de 30 à 40 cm au moins.

L'installation des appareils à circulation d'air au centre du local ou à l'extrémité du canal dépend de l'espace disponible. Des différences dans l'homogénéité du climat ne se font remarquer que lorsque les phases de refroidissement ou de chauffage sont très longues.

Quant au climat produit, les systèmes externes de traitement d'air ne se distinguent pas beaucoup des systèmes internes, mais ils sont coûteux et ils ne sont pas nécessaires pour de petites entreprises.

L'apport d'air frais dans le local d'affinage doit être contrôlé; il est destiné en premier lieu à déshumidifier, et non pas à approvisionner la morge en oxygène. Il sert en outre à éliminer l'ammoniac. En été, l'aération, de courte durée, se fera pendant les nuits fraîches. En hiver, il est préférable de conduire l'air frais à travers un local chauffé avant de le faire entrer dans la cave pour la déshumidification. A cet effet, des orifices d'admission d'air frais avec des fermetures isolées sont appropriés.

Pour le séchage des murs et des plafond mouillés en hiver, il suffit de peu de chaleur pour augmenter au-dessus du point de rosée la température de surface des parties exposées.

Plus une installation de climatisation est puissante, plus les critères auxquels doivent répondre les instruments de mesure et les régulateurs sont sévères. Les instruments bon marché n'offrent qu'une exactitude moyenne. Quand on indique la justesse, il faut toujours tenir compte du point de mesure. Il n'est pas facile de trouver, dans la cave, l'emplacement optimal des instruments de mesure. Il est recommandé au fromager de contrôler régulièrement le climat dans quelques parties choisies de la cave à l'aide de psychromètres manuels.

* * * * *