

CHAPITRE VI

L'EXPÉRIENCE DE SAALBURG⁽³³⁵⁾

On a procédé à d'excellentes reconstitutions de certains bâtiments de Saalburg après la grande fouille de Jacobi et Cohausen. Le bâtiment qui a servi à l'expérience est également une reconstitution (chauffage domestique) qui fut achevée en 1902. Cette même année, on procéda à certains essais en présence de l'empereur d'Allemagne. Ce dernier écrivit d'ailleurs une carte postale à Th. Momm- sen le 22 août 1902 où il lui fait part de la bonne marche de l'expérience et où l'on aperçoit qu'il avait déjà saisi le principe de base du système de mise à feu, c'est-à-dire le feu sans grille avec un grand afflux d'air par-dessus.

En 1910, lors de la reconstruction générale de Saalburg, une firme avait installé ses bureaux dans cette même pièce chauffée par hypocauste, et cela marchait...

1. ÉQUIPEMENT D'ESSAI

— *Le local* (fig. 309)

La « tubulature » de la chambre était amenée jusque sous le plafond et fermée. Sauf pour les colonnes de *tubuli* (séries) représentées sur la figure 309 avec des chiffres entourés d'un cercle (ex. : ⑦ ou par des 0. Ces séries de *tubuli* ouvertes débouchaient par un coude droit, à l'extérieur, juste sous le toit (fig. 310). Il y avait huit cheminées (chiffres dans cercles). F. Kretzschmer trouvait que c'était trop. C'est pour cette raison que l'on s'est servi uniquement de quatre cheminées (1, 3, 7, 8), les autres ont été fermées par-dessus et sont représentées par des 0 entourés d'un cercle. Le 6 était aveugle car il reposait sur un des murets du canal de chauffe.

— *Nombreux thermomètres d'essais* : — enregistreurs
— thermomètres médicaux pour les surfaces

— La température a été mesurée au pied des cheminées numérotées : dans les *tubuli* du bas, on a pratiqué une ouverture à peu près à 10 cm au-dessus de la *suspensura* et on y a introduit un thermomètre à résistance (désigné par le signe m.u.). Pour mesurer la température des fumées à la sortie des cheminées, on y a introduit (dans 1, 3, 7, 8) un thermomètre à 30 cm en-dessous du sommet de la « tubulature » (et représenté, fig. 309, par le signe Ob.m.)⁽³³⁶⁾.

— La mesure de la température derrière le foyer (c'est-à-dire à la sortie du canal de chauffe) était particulièrement importante. On y avait mis un thermomètre électrique en pratiquant un trou dans le sol de la *suspensura*. La partie « sensible » était suspendue à 4 cm en-dessous de la *suspensura* dans la chambre de chaleur. Toutes les températures ont été enregistrées. Le thermomètre électrique est noté m. 16.

— Les températures extérieures et intérieures étaient également importantes : température extérieure : prise à 6 m du bâtiment et à 2 m de hauteur ; température intérieure : au milieu de la pièce par un thermomètre suspendu.

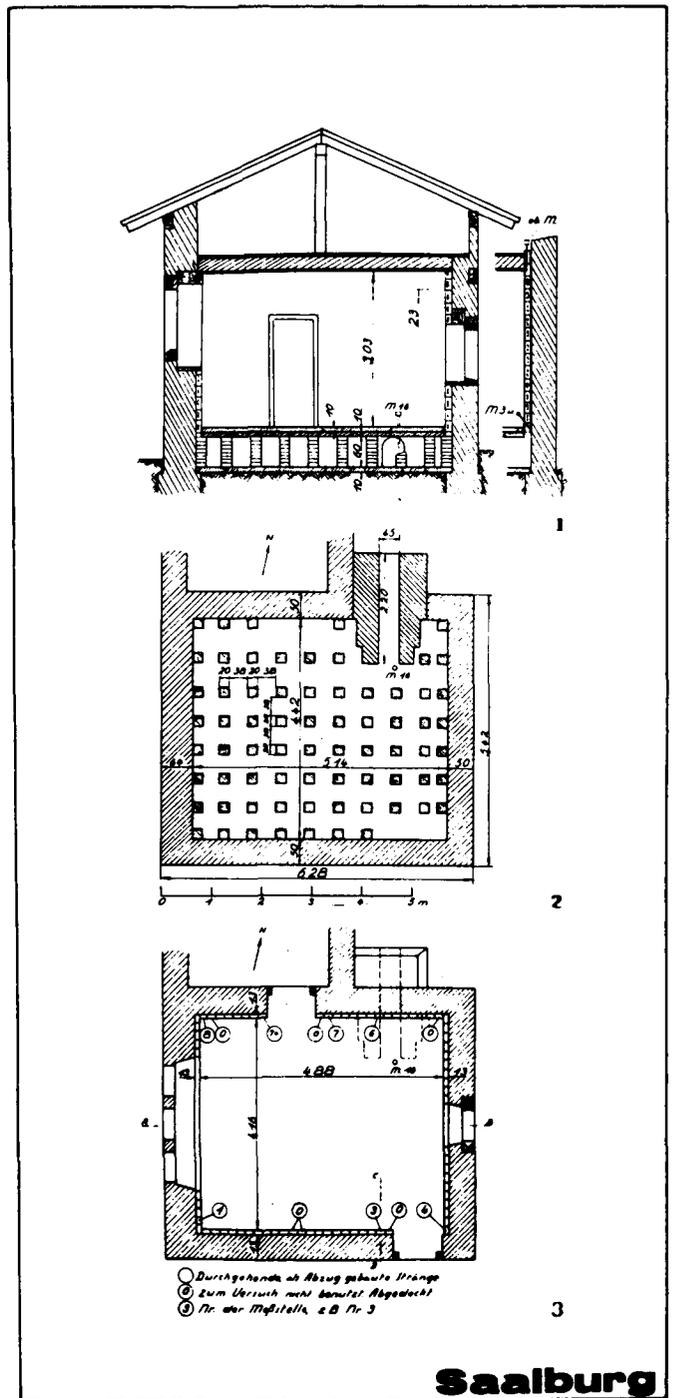


Fig. 309

On a mesuré également la température du sol au milieu de la pièce (fig. 313). Cette température est désignée dans les graphiques par le signe 9b (voir plus loin).

— On peut voir les variations de température de ces différents endroits dans les graphiques représentés à titre documentaire (fig. 314, 315, 316, 317, 318 : graphiques).

Pour lire ces graphiques, il faut savoir que :

- le n° 16 est la température particulièrement importante qui est mesurée juste à la sortie du foyer (canal de chauffe) (fig. 311) ;

- le n° 9b est la température du sol au milieu de la pièce (*suspensura*) (fig. 312) ;
- Ex représente la courbe de température extérieure pendant toute la durée de l'expérience ;
- en traits interrompus (salle) est représentée la température ambiante de la pièce ;
- toutes les autres courbes représentent les variations des températures des cheminées (1ob, 3ob, 7ob, 8ob, ou 1U, 3U, 7U, 8U).
(chiffres + ob = mesures au-dessus de la cheminée)
(chiffre + U = mesures au bas de la cheminée)

Ensuite, F. Kretzschmer explique qu'il a procédé à des mesures concernant la composition des gaz circulant dans l'hypocauste (ce qui est moins important pour nous) ainsi que le tirage à certains moments et certains endroits (ces dernières mesures sont marquées dans les graphiques de température par des X). Il nous rapporte que, bien que disposant d'un appareillage très sophistiqué pouvant mesurer des courants d'air extrêmement faibles jusqu'à 1/100 mm WS avec une exactitude de lecture de 1/10 mm WS, il n'a pu mesurer ce « courant » tant il était faible. Il a donc constaté que le courant ne peut en aucun cas avoir dépassé 0,1 mm WS, ce qui est extrêmement faible (WS = Wasser Saüle = colonne d'eau ; mesure de pression exprimée en allemand, ex. : 1 mm WS = pression exercée par 1 colonne d'eau de 1 mm de hauteur).

— Les températures à la surface supérieure de la *suspensura* et des murs intérieurs sont représentés par des chiffres sur la figure 313. Les lignes des températures sont des *lignes isothermes*. Cette figure 313 doit être comprise comme représentant un rabattement de trois des quatre murs de la pièce autour de la *suspensura* qui se trouve au centre. Le quatrième mur n'a pas été étudié parce qu'il n'était « tubulé » que partiellement et avait, de ce fait, une température inférieure à celle de la pièce.

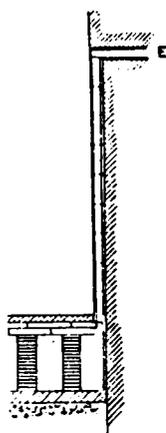


Fig. 310 : Sortie de cheminée (système de Saalburg)

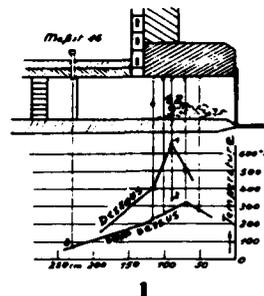
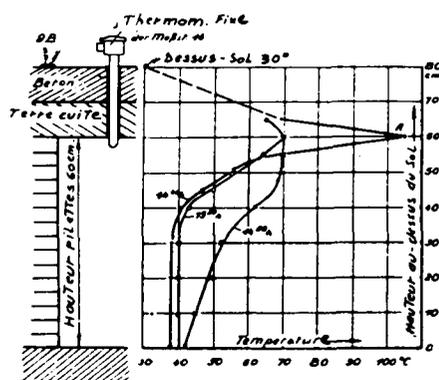


Fig. 311 : Courbe dessus : courbe de temp. (par rayonnement) au-dessus du foyer (voûte) ; courbe dessous : temp. dans le foyer (1,2). Températures dans et au-dessus du feu le 30/12/51 de 14 h 30 à 16 h.



2

Fig. 312 : Température en dessous du thermomètre 16 le 29/12 de 14 h 30 à 15 h 05, à trois moments différents. Le graphique montre que les températures étaient plus élevées au-dessus qu'en dessous. Le point A marque une brusque élévation de la température au moment où la porte du foyer fut ouverte pour une mesure (appel d'air frais).

2. DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIENCE⁽³³⁷⁾

F. Kretschmer rappelle que la reconstitution de la pièce où se déroula l'expérience est fautive parce que, dans l'Antiquité, elle n'était pas « tubulée ». Il se réjouit de cette erreur qui va lui permettre de démontrer par l'expérience le bien-fondé de sa théorie qu'il appelle *Règle-H* :

- les bains sont toujours « tubulés » (hypocauste à pilettes avec murs creux) ;
- les chauffages domestiques ne le sont jamais (hypocaustes à pilettes sans murs creux)⁽³³⁸⁾.

Cette règle est le résultat de nombreuses années d'observations et de réflexions, écrit-il. Il faut distinguer les deux systèmes parce qu'on comprend à présent facilement qu'un sol avec une température de 25° à sa surface représente une surface de chauffe suffisante pour le volume de la pièce à chauffer, tenant compte de la perte de chaleur occasionnée par les murs. Cela est évident, écrit-il, sinon on n'aurait pas retrouvé d'hypocaustes à pilettes sans « tubulature » dans des endroits si nombreux. Lorsqu'un chauffage par le sol suffit, ce serait un non sens technique et économique de l'élargir par une surface de chauffe quatre fois plus grande et qui devait être, de plus, très coûteuse. F. Kretschmer déduit donc de ces observations que, lorsque le chauffage mural existait, il devait avoir un but différent.

Pour expérimenter la *Règle-H*, on devait mesurer la température des murs creux aux deux extrémités, c'est-à-dire une fois lorsqu'ils étaient entièrement parcourus par les fumées, et une fois lorsqu'ils formaient un cul-de-sac pour les fumées (sans issues). De plus, dans cette expérience, on devait tenir compte également du texte de Pline le Jeune⁽³³⁹⁾ où il est dit qu'on pouvait régler l'apport de chaleur qui parcourait la « tubulature ». F. Kretschmer admet cependant que ce texte est difficile à interpréter correctement.

Pour les deux raisons invoquées ci-dessus, pendant les deux premiers jours de l'expérience, on a amené le principal courant de fumée à travers la « tubulature » du mur sud, où les cheminées 1, 3 et 4 étaient ouvertes. Dans le mur nord, il n'y avait que la cheminée 8 qui fonctionnait (fig. 309). Le 29 décembre, à 15 h 40, le système fut inversé. On utilisa les cheminées 7, 7a et 8 dans le mur nord et, dans le mur sud, uniquement la cheminée 3, toutes les autres étant fermées avec des couvercles métalliques. La température du sol fut mesurée le 28 et le 29 décembre, celle des murs le 30 et le 31 décembre. Les conditions de mesure au sol n'étaient pas unitaires. Malgré cela, en raison

de la très grande réserve de calories qu'il contenait, on a pu calculer les valeurs moyennes de la figure 5 avec une exactitude qui ne dépasse pas 1 ou 2% d'erreur.

L'essai débuta le 27 décembre à 8 h du matin. On fit d'abord un feu de bois (bois de caisse haché fin). Cela brûla tout de suite sans refouler et provoqua un courant vers l'intérieur assez faible mais efficace. Après quelques minutes, on rechargea avec du charbon de bois. Pendant tout ce temps, la porte du foyer était restée ouverte. On la ferma à 10 h 20. L'air ne rentrait plus que par un trou (dans la porte) de la grandeur d'une pièce de monnaie et par les fentes existant entre la porte et les murets. La surface totale des ouvertures peut se chiffrer à 8 cm². Dans ces conditions, la flamme visible disparaît et le feu se met à *couver* (comme un feu de coke). F. Kretzschmer cite alors un texte de Status⁽³⁴⁰⁾ où il est question d'un feu qui couve. Le feu va couvrir jusqu'à la fin de l'expérience, c'est-à-dire quatre jours plus tard. La porte du foyer restera toujours fermée et ne sera ouverte que pour les mesures effectuées dans le foyer et le rechargement (fig. 3). Le trou accessoire d'aération restera fermé également.

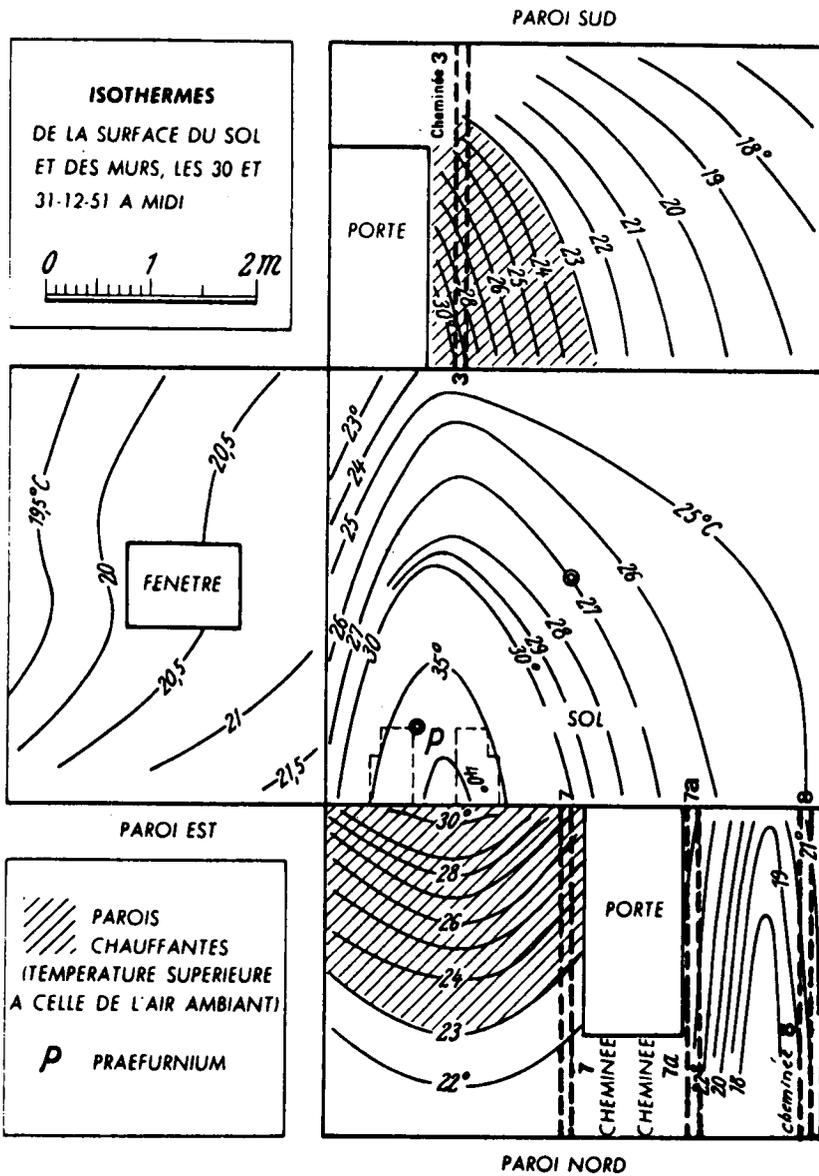
Après l'allumage, les cheminées se remplirent d'une fumée épaisse qui se répandit dans l'espace sous le toit (?). On pouvait entrer dans la pièce, mais on ne pouvait s'y tenir. Ce phénomène a duré deux heures et une intense odeur de « goudron de bois » s'est maintenue toute la journée et elle n'a jamais totalement disparu pendant toute la durée de l'expérience.

Le feu était examiné deux à trois fois par jour. Le moment et l'heure ainsi que la quantité de combustible ajouté se voient sur les figures 314, 315, 316, 317 et 318. La dernière observation se faisait le soir et le feu ensuite couvrait toute la nuit. Il ne s'éteignit jamais. Son entretien était facile. L'analyse élémentaire du charbon de bois a donné un résidu de 1,4% de cendres. Le charbon de terre en a jusqu'à 10 et 20%. Il n'y avait pas de cendres dans le *praefurnium* au début de l'expérience. Le feu ne fut ni nettoyé, ni débarrassé de ses cendres pendant les cinq jours de l'expérience. Le sixième jour, lorsqu'il fut éteint, il restait trois à quatre poignées de cendres. Le chauffeur antique, conclut F. Kretzschmer, pouvait en prendre à son aise⁽³⁴¹⁾.

Qui a vu le feu de Saalburg, poursuit F. Kretzschmer, est étonné de l'exactitude de la description de Status. Le poète dit : « *Languidus ignis inerrat aedibus* » et le technicien traduit le « *Ignis languidus* » par « traîne » sans courant ni direction apparente et sort à la vitesse minimum de l'hypocauste.

Nous avons vu que le tirage était tellement faible qu'il était immensurable. Il provoqua, par ce fait, très peu de cendres et de suie dans l'ensemble de l'hypocauste et on n'en trouva aucune trace sur les instruments de mesure. F. Kretzschmer s'explique ainsi pourquoi les ouvertures de nettoyage sont rares dans les hypocaustes⁽³⁴²⁾.

L'expérience se termina le 31 décembre à 8 h du matin où on chargea le feu pour la dernière fois. F. Kretzschmer continua cependant l'enregistrement des températures jusqu'au 3 janvier 1952 (fig. 316).



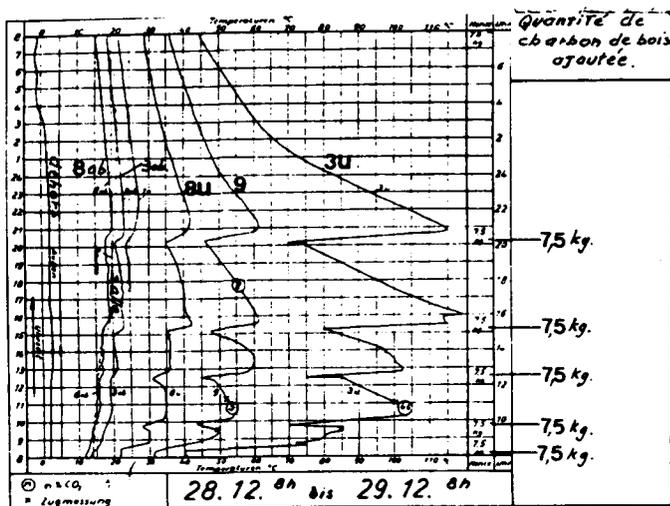


Fig. 314 : Temp. enregistrées du 28 au 29/12/51

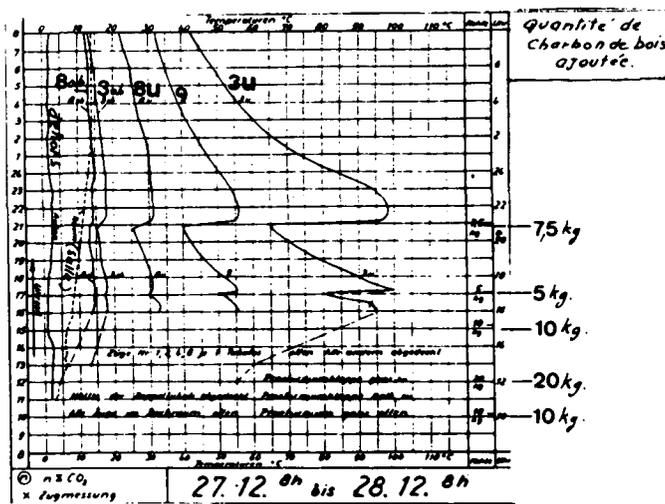


Fig. 315 : Temp. enregistrées du 27 au 28/12/51

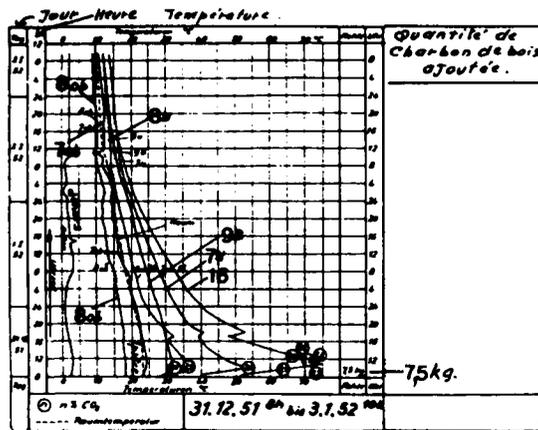


Fig. 316 : Temp. enregistrées à la fin de l'expérience, du 31/12/51 au 31/12/52.

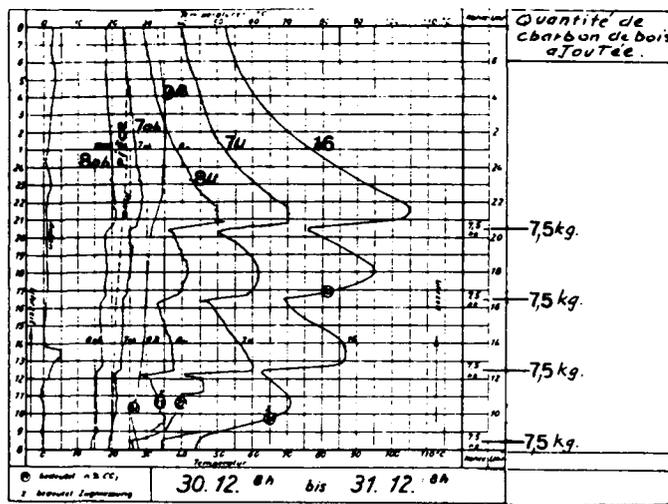


Fig. 317 : Temp. enregistrées du 30 au 31/12/51

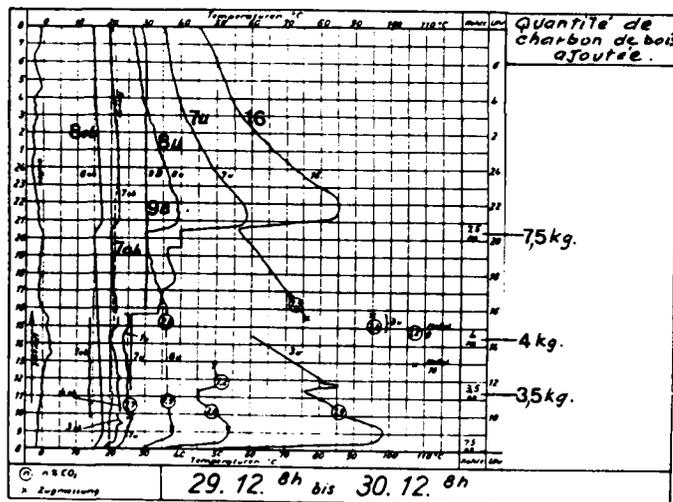


Fig. 318 : Temp. enregistrées du 29 au 30/12/51

3. LE FEU (« *IGNIS LANGUIDUS* »)

Un feu, pour brûler, a besoin de l'oxygène de l'air. L'air se compose de 79 parties d'azote (N₂) et de 21 parties d'oxygène (O₂). 1% d'oxygène se transforme donc, en brûlant, en 1% d'oxyde de carbone (CO₂). Un kilo de charbon de bois nécessite, pour brûler, de 9,4 Nm³ (Nm³ = mètres-cubes d'air à 0° et à pression atmosphérique de 760 mm). Par ce processus, tout l'oxygène serait transformé en CO₂. Donc la fumée se composerait théoriquement de 79% de N₂ et de 21% de CO₂, ce qui serait théoriquement le maximum de CO₂. Mais aucun feu ne brûle véritablement de cette manière : pour le maintenir allumé, il faut un afflux supplémentaire d'air. Si on lui donne trois fois plus d'air, par exemple, on dira qu'il a 3 unités de supplément, etc... et il n'y aura que 1/3 de l'air qui se transformera en CO₂. Dans ce cas, la fumée ne se compose plus que de 7% de CO₂, 14% de O₂ et 79% de N₂ inerte. A partir de la quantité de CO₂ produite, on a pu calculer ce qu'il a fallu comme superflu d'air ; c'était, dit F. Kretzschmer, un des buts de l'expérience de Saalburg.

Le superflu d'air *régit la température* et ne participe pas au brûlage (il ne produit pas de chaleur), mais doit être chauffé par le feu. Avec un kilo de charbon de bois (5.570 calories), on peut porter l'air nécessaire (9,4 m³) à une température maximale déterminée. Le double de la quantité d'air ne peut être chauffé qu'à la moitié de cette température maximale (10 x plus d'air = 1/10 de la température maximale, etc.). Donc, *plus grand est l'apport d'air, plus basse est la température des fumées*. Cela va nous aider à comprendre la suite.

Aujourd'hui, dans nos poêles, le feu est alimenté en air par une grille sur lequel il repose. L'air traverse le lit du feu. Le charbon et l'air se confondent intimement et tout l'air « brûle ». Le *praefurnium*, par contre, ne connaît pas la grille, il ne marche que par l'air qui passe au-dessus, et il ne se consomme d'air que la quantité qui est en contact avec la surface du foyer. Donc tout l'air qui passe par-dessus ce foyer ne se transforme pas chimiquement et est entraîné plus loin avec les fumées.

Ensuite, F. Kretzschmer résume :

- 1) *Feu avec grille* (air passant à travers le foyer) : *l'élément de « brûlage » primaire est l'air* et il brûle autant de charbon qu'il y a d'air.
- 2) *Feu sans grille* (air passant par-dessus le foyer) : *l'élément primaire de brûlage est le charbon*, il ne brûle pas autant d'air qu'il y a de charbon, le contact entre les deux éléments est mauvais.

Cette idée, pense F. Kretzschmer, est la clef du mystère de la construction et du fonctionnement de l'hypocauste :

Les poêles modernes (grilles) montrent un écoulement régulier de la température des fumées. Dans les figures 314 à 318, ce qui saute directement aux yeux, ce sont les formes des courbes de températures (cheminées) en « dents de scie » et tout à fait irrégulières parce que, dès qu'on ajoutait du charbon, les températures montaient brusquement. Ensuite, elles redescendaient, d'abord rapidement, puis peu à peu. Cela ne veut pas dire que la consommation du charbon de bois était aussi rapide que la descente de la courbe de chaleur des fumées. Les courbes descendantes prouvent, au contraire, que le feu pouvait brûler des nuits entières. En voici l'explication : la surface du charbon « frais » est très « réactive », elle utilise momentanément, pour la combustion, beaucoup de la quantité d'air frais en superflu qui passe par-dessus, d'où une augmentation intense de la chaleur. Avec la combustion, le charbon se recouvre ensuite d'une couche de dépôts et de résidus et la surface de « réaction » diminue, la combustion devient plus lente. Le feu, peu à peu, utilise de moins en moins de la quantité d'air disponible qui passe au-dessus. Lorsqu'on approche un courant d'air régulier, les quantités d'air superflu descendent rapidement pour remonter directement après.

F. Kretzschmer donne ensuite un tableau (fig. 320) où il a consigné une série de mesures prises au-dessus du foyer à des moments différents (col. 1). En colonne 2, il donne la quantité de CO inversement proportionnelle à la quantité d'air superflu (col. 3) et directement proportionnelle aux températures du foyer (col. 4).

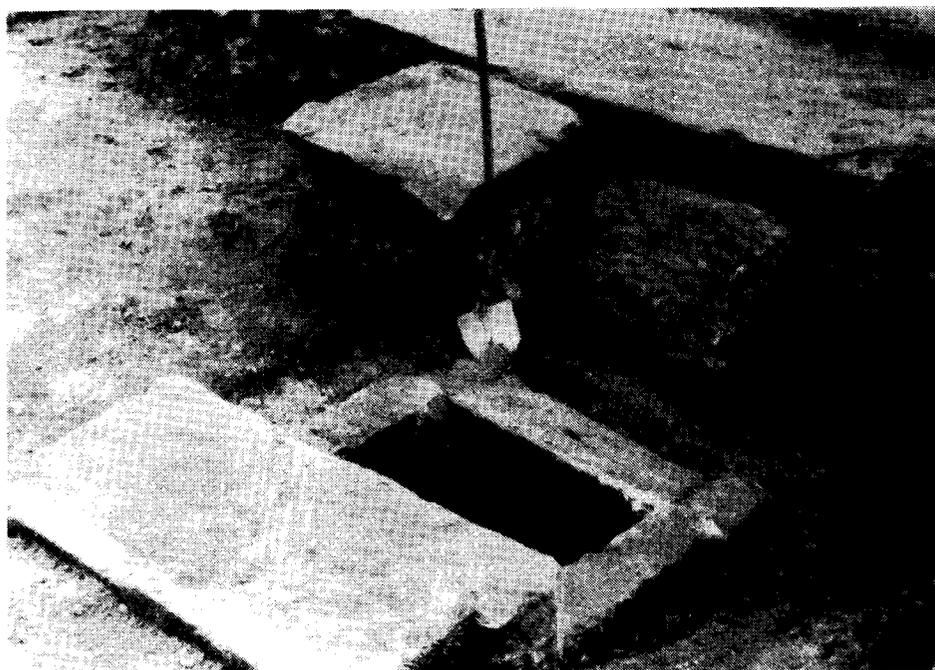


Fig. 319 : Saarbrücken* (D)

Note

Contrairement au bois et au charbon de bois, il semble que le charbon de terre fut rarement employé. Cela provient du fait que, s'il était déjà connu dans l'Antiquité, il ne connaissait pas une extraction systématique. Bien que, à Saarbrücken et dans plusieurs autres endroits en Sarre, il semble que cette extraction ait eu lieu, puisque, dans certaines caves du *vicus*, on a retrouvé des réserves de houilles et qu'il existait aux alentours de ce même *vicus* des galeries d'extraction⁽³⁴³⁾ (fig. 319). Le second endroit que nous connaissons et où il est fait mention de trouvailles de charbon de terre dans le canal de chauffe est le site gallo-romain de la place St-Lambert⁽³⁴⁴⁾. Cependant, l'emploi systématique de la houille ne devait pas être d'un grand intérêt, puisque, nous l'avons vu, son emploi nécessite un tirage conséquent avec un système à grille, ce qui n'était pas le cas dans les hypocaustes.

1	2	3	4
Temps écoulé après l'allumage	Quantité de CO ₂	Quantité d'air (unités)	Température de brûlage
Heure	%	n	C°
0	6	3,2	725
0,33	5,3	3,6	650
0,66	4,7	4	580
1	4,1	4,6	520
1,5	3,4	5,8	490
2	2,6	7,4	320
3	1,9	10	245
4	0,9	22	115
5	0,6	30	78

Fig. 320

4. LES CHEMINÉES

Après un calcul très précis, dont nous faisons grâce des détails au lecteur, F. Kretzschmer en a déduit que le besoin d'énergie (courant d'air), pour entretenir un feu sans grille, est extrêmement faible. *La vitesse de l'air dans le volume total de la chambre de chaleur est infiniment petite*. Si l'on sait que l'énergie nécessaire descend, d'après la loi de Bernouilli, avec le carré de la vitesse, on ne sera pas étonné de constater que le besoin d'énergie est de l'ordre de 1/10 mm WS, ce qui est proche de 0.

F. Kretzschmer calcule ensuite que le besoin d'énergie (tirage) de l'air chaud (0,2 mm WS) plus le besoin d'énergie des fumées (0,04 mm WS) nécessitent une hauteur théorique de cheminée de 1,60 m (pour une moyenne de température de 40° dans les cheminées — ce qui est donné par les graphiques : fig. 314, 315, 316, 317, 318 — et une température extérieure de 0°).

Cependant, en tenant compte d'une température extérieure plus chaude, des températures de cheminées plus basses, de l'incertitude de la mesure du courant de l'air qui passe par la porte du *praefurnium*, on portera, écrit F. Kretzschmer, par sécurité, la hauteur des cheminées au double. Cela donne 3,20 m et correspond à peu près à la hauteur des cheminées de Saalburg (3,50 m). La cheminée ne peut pas être plus haute pour une installation d'habitation parce que le « *Ignis Languidus* » s'embraserait et se transformerait en un déluge de flammes. Les courbes en « dents de scie » des températures (graphiques) deviendraient des lignes droites ascendantes atteignant très vite les valeurs maxima.

C'est sur cette constatation que F. Kretzschmer base sa conviction que les cheminées n'allaient pas au-dessus du toit. Ce qui explique également, pour lui, l'installation de la Basilique de Trèves. Pourquoi les cheminées n'avaient-elles que 8 m de hauteur pour un bâtiment de 30 m ? Parce qu'elles ne pouvaient pas être plus hautes, répond F. Kretzschmer.

Cependant, il faut reconnaître que, dans les chauffages des grands ensembles, on travaillait avec des températures plus élevées et donc avec un tirage plus important que dans les petits hypocaustes privés. La Basilique de Trèves nous donne une mesure pratique : pour une hauteur de cheminée de 8 m, on calcule plus ou moins une force de tirage de 1,5 mm WS.

C'est donc avec une toute autre disposition d'esprit que l'on doit aborder le chauffage dans les grands thermes. Le « *Ignis Languidus* » de Statius brûlait probablement sous la salle d'un jeu de balle, appartenant sans doute à une installation privée ou un petit bain de luxe. Nous ne pouvons nous imaginer que cette description soit valable pour les *praefurnia* géants comme ceux du *caldarium* des thermes impériaux de Trèves. On y mettait des arbres entiers. Ausone parle de tas impressionnants et de flammes sauvages⁽³⁴⁵⁾. Pour une fois, Ausone n'exagère pas. Il faut se représenter le besoin immense de chaleur que requéraient ces grands bâtiments qui, autrement, n'auraient pu chauffer des *caldaria*, *tepidaria* et *sudatoria* aussi grands que ceux dont on peut voir les vestiges aux thermes impériaux de Trèves, par exemple. La montée de la température dans les thermes est justement ce qu'a exprimé le progrès technique. Sénèque⁽³⁴⁶⁾ comme *Laudator temporis acti* se plaint que la nouvelle mode des bains emploie une eau tellement chaude qu'on pourrait y exécuter un esclave condamné en le coulant dans l'eau : une température beaucoup plus haute que les 40 à 70° de la figure 313. « Il est 11 h, l'heure du bain, les thermes de Néron fument considérablement... »⁽³⁴⁷⁾. Tout ceci ne correspond plus à l'image de Statius : « *Ignis Languidus* ».

Pour les installations à grande capacité de chauffage, on avait besoin de cheminées plus hautes. On ne sait si elles montaient jusqu'au-dessus du toit ; ce n'était pas le cas aux thermes de Stabies à Pompéi.

5. LES ÉCHANGES DE CHALEUR

Ce qui suit ne peut s'expliquer et se comprendre que si, au départ, on utilise un foyer sans grille. Les fumées, nous l'avons vu, se répandent à très petite vitesse à travers la « grande chambre de chaleur ». Elles prennent le chemin de la plus courte résistance, c'est-à-dire la distance (liaison) la plus courte entre le *praefurnium* et la cheminée. C'est sur ce trajet que se fait la plus grande perte de chaleur (transfert), le reste est « espace mort ». Pour confirmer ceci du point de vue expérimental, F. Kretzschmer a fait fonctionner l'installation avec une seule cheminée et il a renouvelé cette expérience plusieurs fois. Le résultat a confirmé ce qu'il croyait. La figure 313 montre comment, sur une ligne qui va de P à la cheminée 3, se pressent les maxima de température. A la suite de cet essai, la répartition des températures au sol est mauvaise et elle aurait été meilleure si on avait ouvert toutes les cheminées en même temps. Le chauffeur antique le faisait certainement. L'expérience prouve également que le nombre élevé de cheminées n'était pas un choix délibéré mais une nécessité : avec une ou deux cheminées, cela ne fonctionnait pas d'une manière satisfaisante, et là, où on n'a retrouvé qu'une ou deux cheminées encastrées, on doit supposer que les autres étaient « avancées ».

Le passage de chaleur à travers un mur suit cette loi : la quantité de chaleur (Q) qui traverse un mur est égale à la surface chauffée (S) multipliée par la chute de température (Δt) et la capacité conductrice (c) :

$$Q = S \times \Delta t \times c$$

Q est le besoin de chaleur de la pièce (d'une grandeur donnée). Si Δt et c sont grands, S peut être petit, ce qui est le cas pour les feux à grille : la différence de température entre le feu et la pièce est de plusieurs centaines de degrés. La surface chauffante d'un poêle en métal est, pour cette raison, de l'ordre de 1 m².

Le chauffage antique fonctionne en processus contraire. La température dans la chambre de chaleur est minime, de même que la température de passage c dans la *suspensura* de plus ou moins 20 cm d'épaisseur. Par conséquent, la surface chauffante est grande.

F. Kretzschmer vérifie ensuite ces considérations par les chiffres ; c'est pourquoi il pose comme exigence de base une température moyenne, dans la pièce d'expérience, de 21°.

Pour les bâtiments modernes à murs fins, on calcule un besoin de chaleur de 30 à 40 Kcal./m³/h. Pour les murs épais comme ceux de la pièce d'expérience, on peut compter que, pour un froid d'hiver moyen (température extérieure), une quantité de chaleur de 25 Kcal./m³/h est nécessaire. La pièce ayant 60 m³, son besoin de chaleur est donc porté à :

$$25 \times 60 = 1.500 \text{ Kcal./heure}$$

F. Kretzschmer calcule ensuite l'apport de chaleur. Pour cela, il faut connaître la température moyenne régnant dans la chambre de chaleur. Comme point de repère, il y a les courbes de température de la cheminée 3u dans la figure 7 et les courbes 16 (thermom. foyer), 7u et 8u dans la figure 8. La valeur moyenne de la température de la chambre de chaleur ne saurait être déterminée avec certitude, mais F. Kretzschmer l'estime de 60 à 63°. Si on considère que la température moyenne de la pièce est de 21°, on aura alors, après l'échange de chaleur, une chute $\Delta t = 40^\circ$. Il manque néanmoins des mesures exactes pour déterminer c (= conductibilité de la *suspensura*), mais, en analogie avec les matériaux de construction modernes, F. Kretzschmer l'estime au minimum à c = 2,2. La quantité de chaleur donnée par le sol et par heure pourra donc se calculer ainsi :

$$Q = S \times \Delta t \times c = 20 \times 40 \times 2,2 = 1.760 \text{ Kcal./h.}$$

De plus, écrit F. Kretzschmer, il n'y a qu'un tiers de la chaleur qui est transmise par *convection*, la plus grande partie l'est par *rayonnement* (ceci fut prouvé par des calculs plus compliqués que nous ne rapportons pas ici). Mais ce qui est important, c'est que l'apport de chaleur avec 1.760 Kcal./h est supérieur au besoin de chaleur qui est de 1.500 Kcal./h. Ce calcul, prétend F. Kretzschmer, est valable pour tous les hypocaustes et il en déduit une règle générale :

Un hypocauste doit donner une capacité de chaleur plus grande que celle qu'exige la pièce à chauffer qui se trouve au-dessus, avec une surface égale de sol et hauteur habituelle (3 m) pour une température de pièce normale..

On peut également calculer la perte de chaleur des cheminées à partir de la chaleur de la fumée par rapport à la capacité de chauffage du charbon. Cependant, les possibilités d'erreurs dans les « bilans de chaleur » sont très grandes. On n'arrive pas à exprimer ce calcul avec une très grande précision et on se cantonne dans un certain ordre de grandeur. Cela permet tout de même à F. Kretzschmer d'exprimer une nouvelle règle :

Après le chauffage de l'hypocauste, il y a encore une partie importante de chaleur disponible à utiliser.

Cette chaleur peut être du même ordre de grandeur que celle absorbée par la *suspensura*. Cette chaleur supplémentaire peut servir à trois usages :

- 1) pour un nombre plus élevé de cheminées,
- 2) pour chauffer plusieurs chambres de chaleur,
- 3) pour les murs creux (« tubulés »).

A propos de 1) : la surface de chauffage des cheminées est naturellement petite mais les parois en terre cuite des cheminées sont de bonnes conductrices de chaleur et le recouvrement n'a que trois à quatre cm d'épaisseur. Tenant compte de cela, le chiffre de transfert de chaleur moyen est à peu près 15 fois plus grand que celui de la *suspensura*. On peut donc en déduire que les cheminées non-emmurées arrivent à produire une chaleur considérable. Cela explique également pourquoi le type de cheminée « avancée » fut le plus courant.

A propos de 2 : voir plus loin, pp. 187-188.

A propos de 3 : la valeur moyenne des températures de cheminées était de 20°.

Si, dans les figures 314, 315, 316, 317 et 318, nous considérons séparément les courbes de température de chaque cheminée (au-dessus = sortie), on s'aperçoit que 3ob, 7ob et 8ob descendaient parfois en-dessous de la température de la pièce. Comment cela s'explique-t-il ?

Comme tous les murs, les *tubuli* donnent de la chaleur non seulement vers l'extérieur (pièce), mais aussi vers l'intérieur (mur). Cependant, à l'extérieur, il fait beaucoup plus froid qu'à l'intérieur et Δt (perte de chaleur) est beaucoup plus grand vers l'extérieur que vers l'intérieur. C'est pourquoi, malgré les murs épais, la température des cheminées peut descendre en-dessous de la température de la pièce. Aujourd'hui, nous laissons passer l'air chaud du poêle (courant de chaleur) directement dans l'atmosphère de la pièce. Le profane pense que le chauffage sert à compenser la perte de chaleur des murs. Exprimons cela autrement : la chaleur fournie par le poêle équivaut à la perte de chaleur des murs. L'air des *tubuli* de Saalburg ne faisait pas le détour par l'intérieur de la pièce mais couvrait directement une partie de la perte de chaleur des murs. De cette façon, cet air chaud se laissait utiliser jusqu'au-dessous de la température de la pièce. C'est un système qui améliore l'économie de l'ensemble et les pertes des cheminées tombent de 10 à 7%. La perte des poêles modernes se situe aux environs de 12% et au-delà.

6. LE « MYSTÈRE » DES *TUBULI*

Les isothermes nous apprennent, dit F. Kretzschmer, que la répartition des températures au sol n'est en aucun cas homogène. Les courbes des températures les plus élevées se situent sur la plus courte distance entre le foyer et la cheminée 3. Les cheminées 7 et 8, apparemment moins efficaces, prennent alors tout le champ des températures et des courants de chaleur d'une façon asymétrique vers le coin nord-ouest de la pièce.

F. Kretzschmer passe ensuite à l'étude de ce qui se passe dans la « tubulature ». Ici aussi, écrit-il, le courant des gaz chauds suit le chemin de la moindre résistance et on peut déjà supposer, sans expérience, que les étroites fentes murales entre des *tubuli* voisins ont une résistance telle qu'elles ne jouent pratiquement aucun rôle en tant que passage. L'expérience le confirme. Le chemin de la moindre résistance est le tuyau lui-même et c'est ce dernier qui prend la plus grande partie du tirage, alors que les deux ou trois tuyaux verticaux voisins peuvent provoquer un petit tirage secondaire. Cela se reflète clairement dans la figure 313. Les hautes températures murales se concentrent devant les cheminées. A côté, elles tombent rapidement et, plus loin, la température de la surface descend en-dessous de la température de la pièce.

Dans le cas des *tegulae mammatae*, cela peut être graduellement différent mais non dans le principe. Dans la figure 313, les températures des murs qui se trouvent au-dessus de 23° se trouvent dans la zone hachurée et seule cette dernière donne de la chaleur (elle se trouve en grande partie devant les cheminées). F. Kretzschmer prétend que si, à côté des cheminées, il n'y avait pas de « tubulature », la figure 313 ne serait pas fondamentalement différente. De plus, si on tient compte de la « tubulature », on s'aperçoit que la zone hachurée n'a aucune signification (graphique) par rapport à toute la surface du mur (le mur ouest se comportant à peu près de la même façon que le mur est). Il faut encore ajouter à tout cela que toutes les surfaces non-hachurées, non seulement ne donnent pas de chaleur, mais en plus, en absorbent.

Après avoir rassemblé tous les arguments, issus de ses observations, F. Kretzschmer en arrive à émettre une remarque intéressante qui sera à l'origine d'une polémique importante qui survint entre lui et certains de ses collègues : *les murs « tubulés » ne chauffent pas ! Ils sont sous-chauffés et ne fonctionnent donc pas comme une surface chauffante.*

Il apporte ensuite une autre preuve, dans le chapitre où, notamment, il explique pourquoi on a trouvé un si grand nombre de chambres de chaleur mises les unes à la suite des autres, communiquant entre elles par des passages dans les murs et souvent chauffées par un seul foyer. Par exemple, la chambre de chaleur du *caldarium* envoyait souvent un surplus de chaleur, par des passages muraux (pl. 1, n° 13), dans le *tépidarium* qui exigeait moins de chaleur. Si la « tubulature » avait été chauffante, elle aurait été parcourue par l'air chaud et les fumées, dans la première pièce (*caldarium*), pour s'échapper ensuite à l'air libre, et la chambre contiguë n'aurait rien récolté. Or, dit F. Kretzschmer, *la dispersion très grande de ce système de chauffage (pièces en enfilade) force à la conclusion que les gaz ne circulaient pas dans les tubuli mais y stagnaient, la « tubulature » n'était donc pas chauffante*⁽³⁴⁸⁾.

F. Kretzschmer se demande ensuite à quoi elle pouvait servir. Voici son explication : rappelons-nous, dit-il, la *Règle-H* = seuls les *bains* sont « tubulés ». Donc, l'usage des murs creux doit être en rapport d'une quelconque façon avec les installations de bains. Dans ces derniers, les remous d'eau (baignoires, *labrum*, bassins individuels, etc...) étaient fréquents. L'eau devait se répandre sur le sol. Là où se trouvait la plinthe, il devait y avoir une gorge creuse qui faisait le tour de la pièce et qui était étanche⁽³⁴⁹⁾. Cette eau, qui se déversait sur le sol chauffé par dessous, s'évaporait et déjà, avant qu'on invente les murs « tubulés », se déposait sur les murs froids. Ceux-ci ruisselaient d'humidité, les peintures murales en souffraient et les constructions en bois des voûtes pourrissaient (*concameratio*). Vitruve⁽³⁵⁰⁾ conseille de les protéger par un vide. Avec la mode et le développement des techniques de l'hypocauste et les passages de chaleur dans les vides ventilés, les températures des bains avaient augmenté. Des courants de vapeur très dense traversaient la pièce. Peut-être doit-on interpréter dans ce sens le passage de Martial⁽³⁵¹⁾ lorsqu'il parle des thermes pleins de vapeur. Ces thermes qui devaient, selon F. Kretzschmer, ressembler à une buanderie.

Actuellement, pour éviter les dépôts de vapeur et la condensation sur les murs, la solution est l'isolement des murs à la chaleur par une couche d'air. Les *tubuli* et *tegulae mammatae*, selon F. Kretzschmer, obéissaient au même principe (couche d'air isolante), mais d'une façon infiniment plus efficace, car ils étaient reliés à l'hypocauste et il y avait donc, dans le mur creux, un apport constant de fumées chaudes, que ce soit par diffusion ou par un véritable courant aérodynamique, même s'il était très faible. Il n'y avait pas production efficace de chauffage, mais la température des murs était suffisamment élevée pour empêcher la condensation de vapeur et par conséquent l'écoulement de l'eau le long de ceux-ci.

F. Kretzschmer fait remarquer, en outre, que les zones hachurées (fig. 313) pouvaient entraîner une post-vaporisation de l'eau qui aurait pu se répandre sur le mur à ces endroits. Le mal était donc évité, dit-il, les murs décorés restaient secs et l'atmosphère de la salle restait claire.

7. LE CLIMAT DE LA PIÈCE

Un jour et demi après le début de l'expérience, la pièce avait atteint la température de 23°. Cette température s'est maintenue presque inchangée pendant toute la durée de l'expérience. Aucune observation ne fut plus satisfaisante que cette régularité.

Près d'un tiers de la chaleur était transmise des surfaces chauffantes par convection⁽³⁵²⁾. Le reste, la plus grande partie, par rayonnement. Le rayonnement ne provoque pas de courant d'air, et, grand avantage, il se fait sentir sans se faire remarquer. La porte d'entrée conduisait directement dans le froid hivernal. Si on l'ouvrait, on ne le sentait pas dans le centre de la pièce.

Les chauffages à eau chaude modernes « travaillent » avec des températures de surface qui vont de 60 à 80°. Cette température est suffisamment élevée pour soulever les poussières ambiantes et notamment les particules organiques. Ces particules sèches « retombées » irritent la respiration et donnent cette impression de sécheresse de l'air. On essaie de lutter contre ce phénomène (d'ailleurs sans résultats appréciables) par des récipients remplis d'eau qu'on accroche aux radiateurs. Notre « *Ignis Languidus* », constate F. Kretzschmer, évitait ce désagrément et le climat de la pièce restait toujours subjectivement agréable parce que ressenti comme de l'air frais chauffé.

F. Kretzschmer achève ce passage en rappelant que l'entretien du feu était extrêmement commode. On devait l'attiser souvent au début ; ensuite, le soir et le matin. Le feu aurait pu tenir ainsi tout un hiver.

8. UTILISATION DE LA CHALEUR EXCÉDENTAIRE ET *PRAEFURNIUM* D'APPOINT

F. Kretzschmer rappelle tout d'abord qu'à la sortie de l'hypocauste, il y a encore une grande partie de la chaleur qui est disponible et utilisable (surtout dans les bains, voir plus haut). La technique romaine en a tenu compte. Dans les grands bâtiments, cela était devenu une règle (et n'était pas rare dans les bâtiments plus modestes). Cette technique du chauffage simultané de plusieurs pièces contiguës par un seul *praefurnium* nous amène à traiter du problème du réglage du chauffage. Sur la fig. 133, nous voyons deux *praefurnia*, l'un au sud-ouest (b), à côté duquel se trouvait (pour F. Kretzschmer) le « foyer de transition », et un autre plus petit au nord-ouest (x) devant le *tepidarium* (P). F. Kretzschmer se demande s'il s'agit de deux installations séparées. Les passages que l'on a trouvés, allant du *caldarium* (Q) jusque dans les pièces du nord-est, s'opposent à cette idée (dans la mesure où le plan est dessiné correctement). F. Kretzschmer pense que le foyer (b) est le foyer principal. Si on considère les hautes températures passant sous le *caldarium*, celles-ci devaient suffire, par climat tempéré, pour chauffer toutes les pièces jusqu'au nord-est. Cependant, dit-il, ce système n'était pas suffisant en hiver et on mettait alors le petit *praefurnium* (x) en action. C'est pourquoi il appelle ce dernier *praefurnium* d'appoint. Peut-être y en avait-il encore un de plus au nord-est, mais cela est incertain.

Pour les techniciens du chauffage, poursuit F. Kretzschmer, cela est plus qu'une nécessité. Une installation aussi grande doit pouvoir se régler dans des limites variant de 10 à 100%. C'est pourquoi, actuellement, et dans les grands bâtiments, on place deux chaudières de chauffage central, une petite et une grande. Lorsque les températures extérieures sont tempérées, la petite chaudière suffit. Quand il fait froid, c'est la grande qui prend le relais. Cela marchait de même pour les chambres de chaleur qui étaient connectées entre elles, les unes à la suite des autres.

Il existait, d'autre part, un deuxième processus de réglage. Lorsqu'il faisait trop froid, l'utilisation de la chaleur excédentaire n'était pas utilisée pour d'autres pièces. Les gaz chauds étaient dirigés (aspirés) vers les *tubuli* (ou cheminées) de la pièce à chauffer principale. Donc la surface de chauffe supplémentaire était, par ce procédé, plus efficace et la pièce directement connectée restait sans chauffage⁽³⁵³⁾.

Pour isoler la chambre de chaleur principale d'une chambre contiguë qui lui était connectée, on pouvait utiliser des fermetures à glissières (on en a retrouvées au Kastell de Weissenbourg⁽³⁵⁴⁾ où des fentes pour de telles glissières ont été conservées). Ces dernières pouvaient servir également à fermer les *praefurnia*⁽³⁵⁵⁾. On peut imaginer aisément que les premières fermetures aient été en terre cuite. C'est pourquoi, pense F. Kretzschmer, on en a retrouvé si peu.

Ce que l'on retrouve également souvent, ce sont des chambres de chaleur contiguës de conceptions différentes (une à poêlons, l'autre à canaux), le tout avec un foyer unique. Les fouilleurs les ont souvent considérées comme des installations autonomes. Pourquoi alors trouve-t-on toujours les deux différents systèmes juxtaposés ? F. Kretzschmer suppose, dans ce cas, que ces installations étaient couplées par une ouverture (passage de chaleur) à glissière. Habituellement, les glissières étaient fermées et les deux chambres de chaleur fonctionnaient parallèlement. Mais, par temps doux, un seul *praefurnium* était allumé et on ouvrait la glissière entre les deux chambres qui fonctionnaient alors avec un seul *praefurnium*. F. Kretzschmer est persuadé que l'utilisation de la chaleur en surplus jouait, dans l'Antiquité, un très grand rôle.

Le site des thermes de Glanum* (1^{er} état) illustre parfaitement ce que nous venons d'écrire à propos des hypocaustes contigus, des passages d'air chaud et des *praefurnia* d'appoint (fig. 321). En 1 se trouve le *Caldarium* avec son exèdre K et son *praefurnium* M. En H, le *tepidarium* avec son *praefurnium* d'appoint L. Il existait entre le *caldarium* et le *tepidarium* trois passages d'air chaud (1, 2 et 3) indiqués par des flèches. On peut supposer qu'il a existé entre I et H des fermetures réglables⁽³⁵⁶⁾, auquel cas on pouvait allumer l'un ou l'autre *praefurnium*, ou les deux à la fois selon le degré de chaleur souhaité et en fonction de la température extérieure. En c, les cheminées.

(330) Les chapitres consacrés à l'expérience de Saalburg et au chauffage de la Basilique de Trèves ne sont pas, de notre part, des travaux originaux. Ils sont les résumés d'articles que F. Kretzschmer a écrit à la suite de cette expérience. Si nous avons cru utile d'en reproduire certaines parties, c'est parce que cette littérature, qui n'est pas connue en langue française, complète utilement la partie descriptive de ce travail.

(331) H. THEDENAT, *Hypocaustis, hypocaustum*, dans DAREMBERG-SAGLIO, *D-A*, t. III, (1900), p. 350.

(332) Général MORIN, *Note sur les appareils de chauffage et de ventilation employés par les romains pour les thermes à air chaud*, dans *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres de l'Institut de France*, 1^{re} série, t. VIII, Paris, 1874.

(333) R.J. FORBES, *Studies in Ancient Technology*, vol. VI, Leiden, 1958.

(334) *Aula Palatina* (Trèves), voir note 103.

(335) Nous allons, dans ce chapitre, résumer l'article de F. Kretzschmer, *Hypocausten*, pp. 8-41 (voir abréviations).

(336) Ob = oben = dessus ; m. = messung = mesure.

(337) Il faut, dans ce chapitre, se référer constamment aux figures.

(338) Il admet cependant des exceptions à cette règle.

(339) PLINE LE JEUNE (Epist., II, 17, 9).

(340) STATIUS (*Silvae*, I, 5, 58).

(341) Signalons que beaucoup de *praefurnia* furent retrouvés remplis de cendres (voir exemples p. 94).

(342) Cela explique aussi, peut-être, les grandes différences d'encrassement dans les hypocaustes : certains ne portent aucune trace de cendre ou de suie, d'autres sont remplis de couches épaisses. Cela dépendait probablement du combustible employé. Il faut cependant admettre que les dépôts dans les cheminées et la « tubulature » sont plus rares que dans les chambres de chaleur.

(343) A. KÖLLING, *Über den Gebrauch der Steinkohle im Bereich des Saarkohlenbeckens in römischer Zeit*, dans *Germania*, 37, 1959, pp. 246-250.

(344) Liège* (B) (1907)

(345) AUSONE, *Mosella* (v. 337).

- (346) SENEQUE (*Epist.*, XI, 86, 10).
- (347) Traduction libre de MARTIAL (*Epigr.*, X, 48).
- (348) Ce qui nous paraît étonnant, c'est que F. Kretzschmer utilise quatre séries de *tubuli* verticaux faisant office de cheminées. Etant donné que les « séries » sont nombreuses dans l'hypocauste de Saalburg (fig. 309), cela nous paraît fort peu. Si plusieurs cheminées supplémentaires avaient été ouvertes, la surface murale aurait présenté des isothermes beaucoup plus réguliers et la zone hachurée se serait étendue et, peut-être, dans ce cas, les murs seraient-ils devenus chauffants ? D'autre part, la multiplication des cheminées aurait augmenté le tirage et par conséquent la consommation de combustible.
- (349) F. Kretzschmer prétend que ces gorges *creuses*, dans les bains, sont tellement courantes le long de la jointure des murs avec la surface supérieure de la *suspensura* que leur seule présence peut, dans les fouilles, servir de preuve à l'existence d'un bain (il cite ensuite deux exemples seulement). Cela nous étonne, car nous n'avons rencontré aucune gorge creuse de ce genre dans nos recherches. Ce qui, par contre, est très courant, ce sont les joints étanches en quart et rond qui garnissaient les jointures des murs perpendiculaires dans les fonds de baignoires ou sur les *suspensura*.
Exemples : — Tongres* (B),
— Liège* (1907) (B), etc...
- (350) VITRUVÉ, V, 10 : « Il convient qu'au-dessus des bains chauds, il y ait une double voûte pour que la vapeur qui pénètre se dissipe dans l'intervalle qui les sépare et ne pourrisse pas aussi vite la charpente » (Trad. : De Bioul).
- (351) MARTIAL (*Epigr.*, VI, 42).
- (352) *Convection* : mouvement d'un fluide dû à une variation de la température (dans ce cas : air chaud) (Petit Robert, 1973).
Rayonnement : émission et propagation d'un ensemble de radiations avec transport d'énergie et émission de corpuscules (Petit Robert, 1973).
Conduction : transmission de la chaleur dans un corps conducteur (Petit Robert, 1973).
- (353) Rappelons-nous le passage de PLINE LE JEUNE : « Huc illuc digerit » (*Epist.*, II, 17, 9). Cette expression semble trouver, selon F. Kretzschmer, dans ce processus de réglage, sa signification la plus plausible, notamment lorsqu'on pense à l'hiver italien.
- (354) F. KRETZSCHMER, *Hypokausten*, p. 35.
- (355) Voir *praefurnium* de Rulles* (B).
- (356) Le rapport de fouilles n'en parle pas.

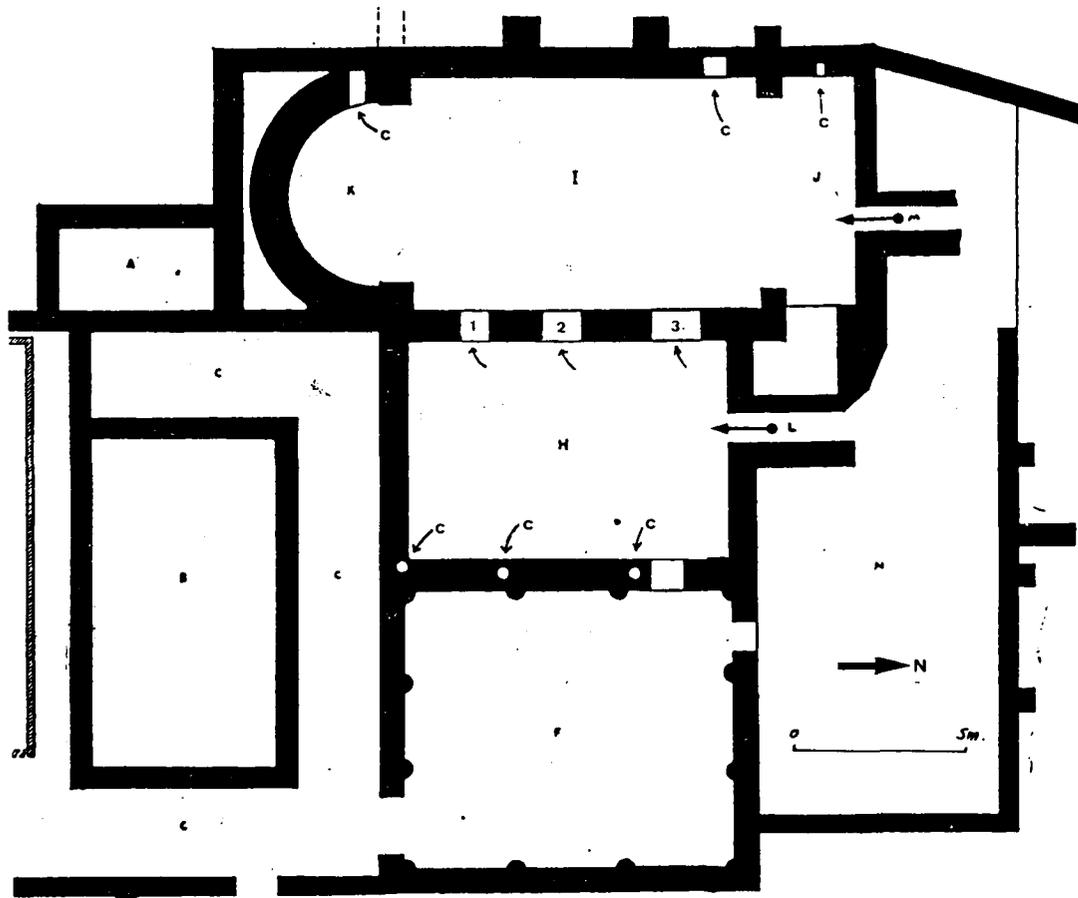


Fig. 321 : Glanum* (F)