

Matériaux de terre cuite

Matières de base et fabrication

par **Michel KORNMANN**

Ingénieur civil des Mines, Docteur Ingénieur

Consultant technique (Lancy Genève)

Ancien Directeur technique du Centre technique des tuiles et briques (Paris)

1. Argile et la plasticité.....	C 905v2 – 2
1.1 Principales formes minéralogiques	— 2
1.2 Charges superficielles de l'argile et couches limites	— 3
1.3 Limites de liquidité, de plasticité, de retrait au séchage	— 3
1.4 Sol argileux et concentration en argile	— 4
1.5 Granulométrie du sol argileux	— 4
1.6 Argile et séchage	— 5
1.7 Eau et argile.....	— 6
1.8 Composition des mélanges argileux	— 6
1.9 Autres composants du mélange de production	— 6
1.10 Influence des composants principaux	— 8
2. Fabrication	— 8
2.1 Extraction des matières premières	— 8
2.2 Préparation de la pâte	— 10
2.3 Façonnage.....	— 11
2.4 Séchage	— 13
2.5 Cuisson	— 15
3. Environnement et salubrité	— 18
3.1 Émissions dans l'air	— 18
3.2 Émissions dans l'eau.....	— 19
3.3 Déchets	— 19
3.4 Salubrité	— 20
4. Conclusions.....	— 20
Pour en savoir plus.....	Doc. C 907v3

Les matériaux de terre cuite sont utilisés dans le bâtiment depuis des millénaires et ceci dans tous les pays du monde. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs. Les caractéristiques des produits de terre cuite permettent à ceux-ci d'être employés dans toutes les parties de la construction avec efficacité. Ce sont essentiellement les briques, apparentes ou non, les tuiles, les éléments pour planchers, les conduits de fumée, les bardages, les carreaux rustiques, etc.

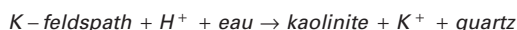
Ces matériaux sont fabriqués à partir d'argiles communes. Après une préparation poussée du mélange, la « terre glaise » est mise en forme, séchée et finalement cuite. Les produits deviennent souvent rouges à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et au blanc).

Dans ce dossier, on décrit les différentes étapes du procédé de fabrication, de l'extraction dans la carrière jusqu'au stockage des produits finis sur le parc, en passant par la préparation de la terre, la mise en forme, le séchage et la cuisson.

Dans l'article associé [C 906], on donne des informations sur les propriétés de la terre cuite et on parle des différents produits de terre cuite disponibles sur le marché français [1], [2]. La mise en œuvre de ces produits dans les ouvrages [3] fait l'objet d'autres articles parallèles.

1. Argile et la plasticité

Les mélanges de production des produits de terre cuite sont préparés à base d'argiles, qui sont principalement des phyllosilicates hydratés d'aluminium. Le préfixe phyllo exprime que la forme de ces silicates est en feuillets. Ce sont des produits de la dégradation chimique des composants des roches magmatiques originelles, en particulier les feldspaths et micas des granites, selon une réaction du type :



Selon la roche d'origine, les conditions et le temps de réaction, on obtient les différentes argiles, qui deviennent de plus en plus décomposées jusqu'au quartz final.

1.1 Principales formes minéralogiques

Produits de réactions électrochimiques, les argiles se présentent sous forme de très petits feuillets [4] dont la structure est caractérisée par la superposition de deux couches (figure 1) :

- couche tétraédrique « T » (tétraèdres d'atomes d'oxygène autour d'un atome central de silicium Si) (figure 1a) ;
- couche octaédrique « O » (octaèdres d'ion hydroxyles OH⁻ avec, au centre, un ion aluminium Al⁺⁺⁺) (voir figure 1b).

Ces deux couches peuvent s'associer de différentes façons : on distingue les feuillets à deux couches (O, T) et les feuillets à trois couches (T, O, T).

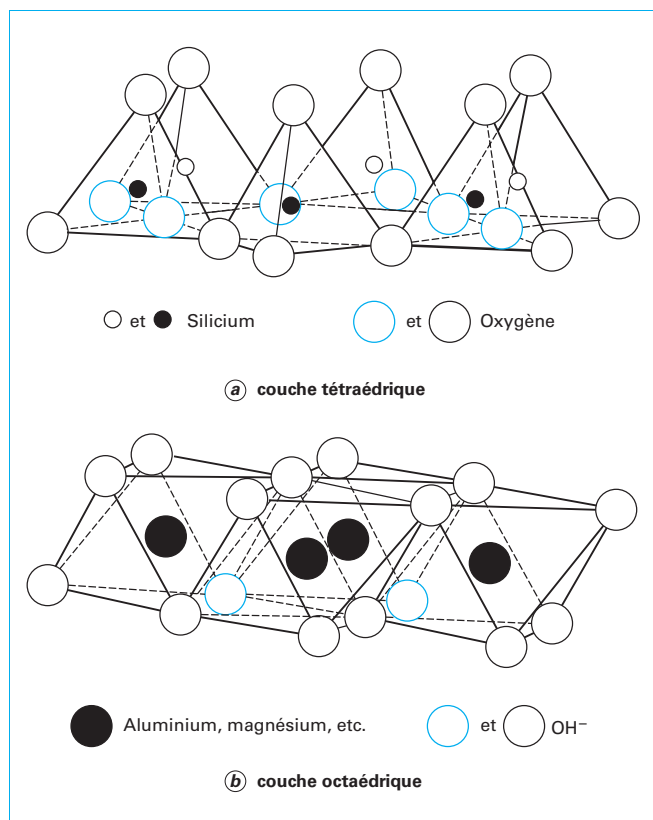


Figure 1 – Couches T et O des argiles

Il peut y avoir des substitutions ioniques dans la couche T (Si⁴⁺ est remplacé par Al³⁺) et dans la couche O (Al³⁺ est remplacé par Mg²⁺ ou Fe²⁺). Ces substitutions entraînent un manque d'ions⁺, et les couches ne sont plus neutres électriquement. Pour conserver la neutralité, des cations (K⁺, Na⁺, Ca²⁺,...) vont venir s'absorber, en particulier entre les couches et les feuillets. Ces cations additionnels sont plus ou moins liés et échangeables. Certaines argiles présentent donc une capacité d'échange cationique élevée. Les molécules d'eau sont attirées par ces cations et les argiles présentent une grande capacité d'absorption d'eau, entraînant parfois une certaine expansion de la maille.

Suivant l'arrangement des couches dans le feuillet et les substitutions ioniques, on obtient les nombreuses argiles dont les principales sont les suivantes [5].

■ Kaolinite

Il s'agit d'un composé simple à deux couches O-T (figure 2a). Pour associer les couches, un atome oxygène de la couche T est remplacé par un ion hydroxyle de la couche O. La composition chimique est 2SiO₂.Al₂O₃.2H₂O. Le feuillet est neutre, il n'y a pas d'absorption de cation. L'espace inter couche est vide. Il n'y a pas d'échange cationique. L'épaisseur du feuillet est constante à 7,2 Å.

■ Smectite

Il s'agit d'un groupe d'argiles à 3 couches TOT, avec différents niveaux de substitutions et de charge (0,2 à 0,6). Les cristaux sont généralement très fins.

Par **exemple**, dans une de ces variétés, la montmorillonite, (Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂.nH₂O, un Al³⁺ de la couche octaédrique sur 8 est remplacé par Mg²⁺ (figure 2b). Le feuillet devient partiellement négatif et pour compenser, des cations (Ca²⁺ ou Na⁺) viennent s'absorber de façon peu énergétique.

Les smectites se caractérisent par leur capacité d'échange cationique élevée. Des molécules d'eau peuvent pénétrer entre les couches, l'argile est gonflante et l'unité structurale va varier de 10 à 21 Å, selon la concentration en eau. Elles absorbent donc plus d'eau que les autres.

■ Illite

Il s'agit encore d'un composé à trois couches TOT. Ici, ce sont les ions K⁺ qui assurent l'équilibre électrique. Il y a une charge négative importante dans les couches, les ions sont liés de façon forte, et il y a une très faible capacité d'échange cationique. L'épaisseur de la structure est constante : 10 Å.

■ Chlorite

C'est aussi un feuillet à 3 couches. Ici, la couche absorbée est à base d'ions Mg⁺⁺ hydratés et est très stable. Il s'agit presque d'une couche supplémentaire de brucite. La structure est proche de TOT-O. La capacité d'échange est limitée et la structure demeure stable à 14,1 Å.

■ Les **principales propriétés** de ces argiles sont comparées au tableau 1.

On voit que les smectites, très fines et gonflantes, montrent des propriétés assez différentes de celles des autres argiles.

Les feuillets décrits ci-dessus sont généralement empilés les uns sur les autres pour former les cristaux d'argile, qui sont de très petites tailles, souvent en forme de plaquettes (généralement grande longueur, inférieure à 2 µm, et épaisseur, une fraction de µm).

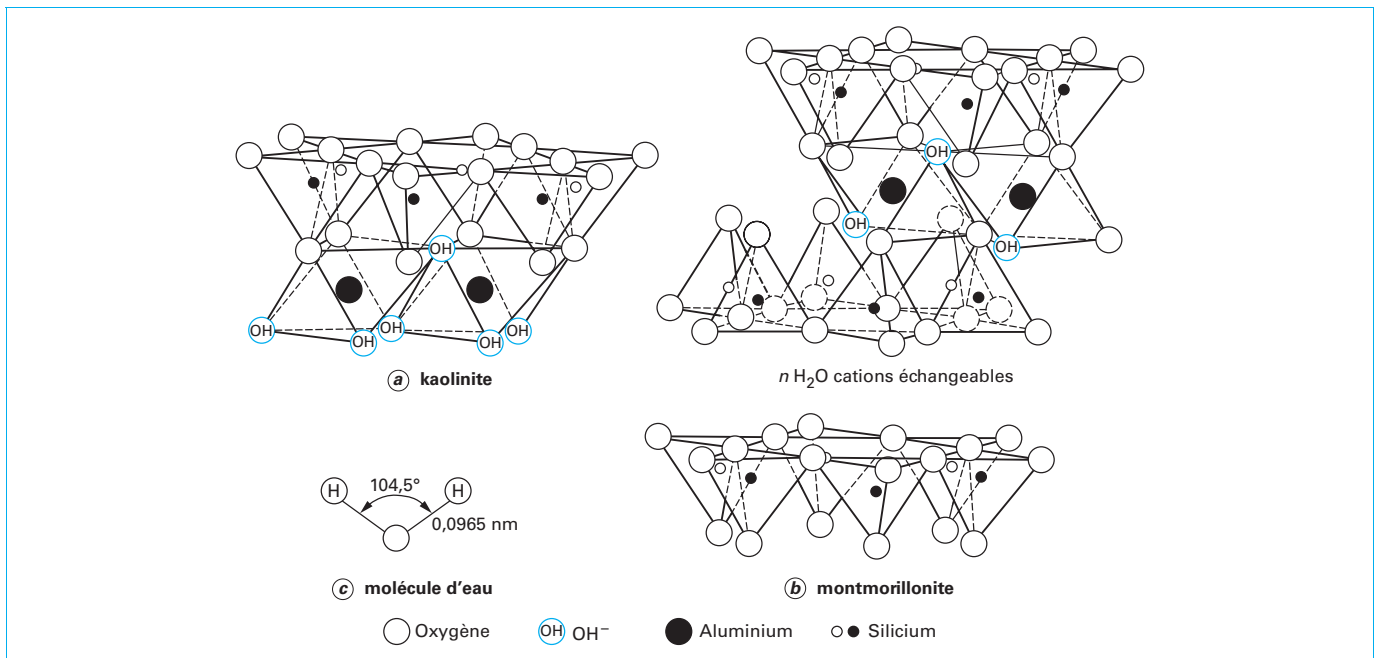


Figure 2 – Structure de la kaolinite (OT) et de la montmorillonite (TOT)

Tableau 1 – Comparaison des propriétés de différentes argiles

Minéral	Couches	Épaisseur du feuillet (Å)	Nombre de feuillets par cristal primaire (ordre de grandeur)	Cations absorbés en compensation	Capacité d'échange cationique en centimole(+)/kg	Expansion à l'humidité	Surface spécifique (en m^2/g)	Charge des couches/formule
Kaolinite	TO	7	Quelques centaines	Sans	3-15	Faible	5-20	Neutre
Smectite	TOT	10-21	Une dizaine	Ca^{2+} , Na^+ hydratés entre feuillets et externes	80-150	Élevée	700-800	Négative, Faible charge (0,2 à 0,6)
Illite	TOT	10	Quelques dizaines	K^+ secs entre feuillets et externes	10-40	Faible	100-200	Négative, Forte charge (0,8 à 0,9)
Chlorite	TOT	14,1	Une centaine	Mg^{2+} externe	10-40	Faible	5-20	Positive

1.2 Charges superficielles de l'argile et couches limites

Les plaquettes d'argile présentent en surface des ions chargés négativement. Les molécules d'eau au voisinage sont orientées par ces distributions de charge et s'adsorbent à la surface, par couches successives. La molécule d'eau possède une énergie de liaison d'autant plus élevée qu'elle est proche de la surface. Les premières couches fortement liées sont pratiquement fixées sur l'argile. Les suivantes sont plus faiblement liées, mais ont un comportement visqueux différent de celui de l'eau libre. Il y a formation d'une double couche électrostatique à la surface des feuillets d'argile.

Les épaisseurs de cette double couche varient de $0,01$ à $0,4 \mu\text{m}$ [6], ce qui est beaucoup plus épais que le feuillet lui-même. Les épaisseurs varient avec la valence du cation, la concentration de sels, la température (voir figure 3) [7].

1.3 Limites de liquidité, de plasticité, de retrait au séchage

En partant d'un mélange d'argile dans l'eau qu'on sèche lentement, on observe trois limites successives au fur et à mesure que l'humidité diminue. Ces limites ont été définies par Atterberg [8] :

– **liquidité**. Au dessous de cette limite, le mélange n'est plus réellement liquide. À cette limite, les doubles couches électrostatiques qui entourent les particules d'argiles commencent à interférer entre elles, les interactions colloïdales apparaissent. On parle donc d'« eau colloïdale ». Le matériau devient alors plastique. Il garde sa forme et ne coule plus de lui-même. Cependant, un effort limité déforme le matériau dont la résistance dépend des couches d'eau colloïdale. Il n'y a pas d'élasticité non plus. Au fur et à mesure que le mélange sèche, on observe un retrait du matériau correspondant à la diminution de l'épaisseur des couches d'eau colloïdales. Le

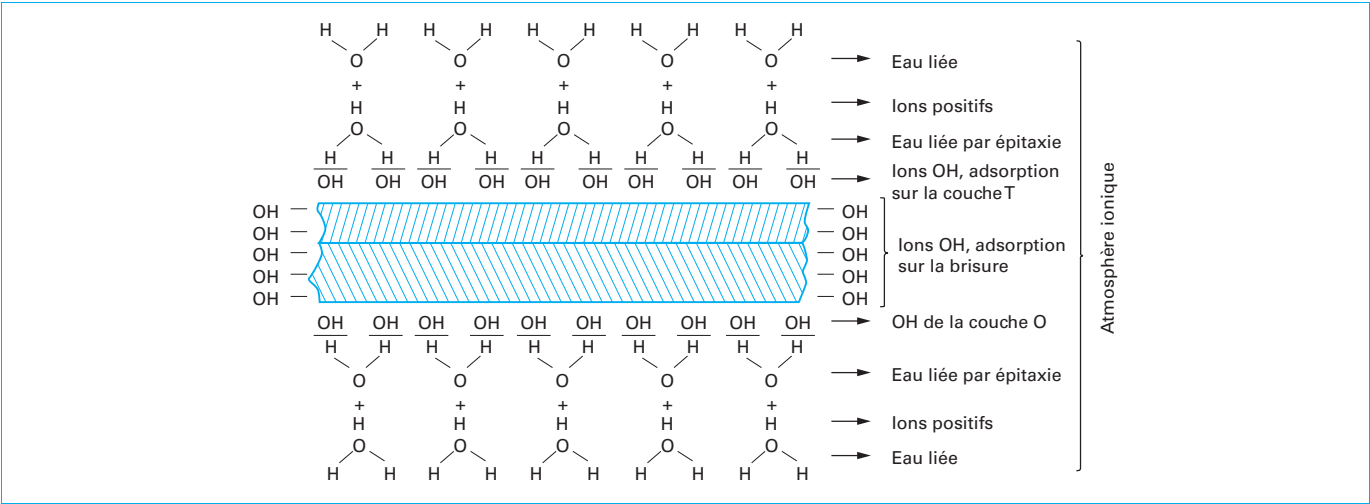


Figure 3 – Liaison des phases aqueuses à la surface de l’argile (source CTMNC, d’après [7])

Tableau 2 – Valeurs typiques des limites de liquidité, plasticité et retrait de différents argiles					
Minéral	Limite de liquidité (en %)	Limite de plasticité (en %)	Indice de plasticité (en %)	Limite de retrait (en %)	Activité A
Montmorillonite	100-900	50-100	50-800	8-15	1-7
Illite	60-120	35-60	25-60	15-17	0,5-1
Kaolinite	30-110	25-40	5-70	25-29	0,5
Chlorite	44-47	36-40	8-7		

matériau reste saturé d’eau. Dans les smectites, les forces colloïdales sont très importantes, avec des doubles couches épaisses et les limites de liquidité sont très élevées ;

- **plasticité**. Cette limite est atteinte quand les particules commencent à se toucher de façon mécanique et la plasticité se perd. L’intervalle entre les limites de liquidité et de plasticité est dit « indice de plasticité ». En continuant le séchage, la réduction de volume ne peut plus compenser la perte d’humidité et de l’air pénètre dans l’argile qui n’est plus saturée en eau ;
- **retrait** parfois appelée la « limite de Bigot ». En dessous de cette limite, il n’y a plus aucun retrait, même si l’humidité diminue encore.

On donne des exemples de ces limites pour des argiles pures (tableau 2).

L’activité d’un mélange argileux est définie comme le rapport de l’indice de plasticité à la teneur en particules d’argile (< 2 µm).

On peut placer les argiles et les différents sols argileux dans un abaque de plasticité. Gippini [9] utilise un plan limite de plasticité/indice de plasticité (figure 4).

1.4 Sol argileux et concentration en argile

Dans un gisement argileux, les argiles sont rarement déposées pures, mais sont mélangées à d’autres éléments granuleux de plus grande taille, limons, sables et graviers, et à des matières organiques ; l’ensemble forme le sol argileux. Ces éléments de plus grande taille sont inertes et sont appelés « dégraissants ».

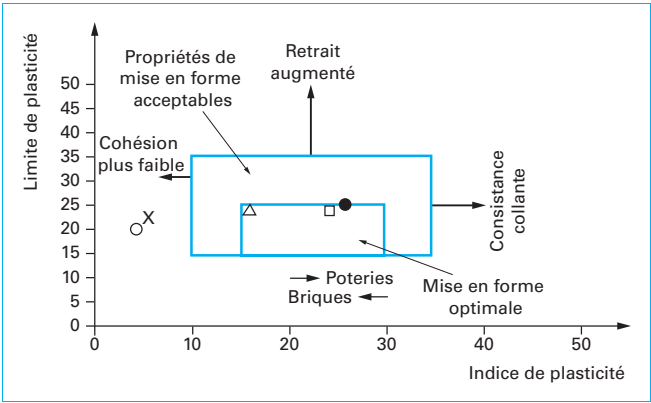


Figure 4 – Classification des sols argileux (d’après [9])

Les concentrations relatives en argiles et en dégraissants d’un sol argileux dépendent des conditions locales de dépôt de la couche à la formation du sol.

1.5 Granulométrie du sol argileux

Quand on réalise une analyse granulométrique d’un sol, on répartit les différentes fractions selon la taille. On notera que le mécanicien des sols appelle « argile » les sols très fins sans faire référence à la structure cristallographique.

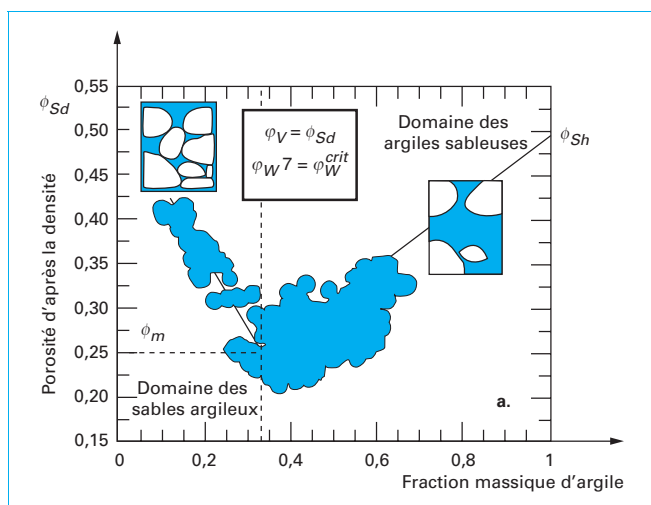


Figure 5 – Porosité d'un sol en fonction de la concentration volumique d'argile (dégraissant mono granulaire) (d'après [10])

Tableau 3 – Classes granulaires d'un sol en France

Taille de particules (en mm)	Nom traditionnel de la fraction [8]
> 2	Gravier
0,2 < < 2	Sable grossier
0,2 < < 0,02	Sable fin
0,02 < < 0,002	Limon
0,002 < < 0,0002	Argile grossière
< 0,0002	Argile fine

Un sol peut être mono granulaire (tous les grains de la même taille) ou présenter une distribution étalée entre les différentes classes. La distribution granulométrique est liée à la formation du sol (origine, mode de transport et de dépôt). Quand le sol est mono granulaire, la porosité est élevée. Elle est de 26 % dans un arrangement hexagonal compact, et de 37 % dans un arrangement au hasard.

On peut obtenir des porosités plus faibles en remplissant les espaces restés vides par des grains plus petits. Dans un sol composé d'argile et d'un dégraissant monodispersé, Revil [10] a mesuré la porosité du sol en fonction de la quantité d'argile. Les porosités les plus faibles sont alors observées vers 35 % d'argile en volume (voir figure 5).

Quand la quantité d'argile est plus faible, les grains de dégraissant se touchent et font la structure de la matière ; les vides ne sont pas remplis par l'argile, la porosité est importante et assez grossière. C'est la zone du sable argileux.

Quand la concentration est supérieure à 35 %, les grains de dégraissant flottent dans une matrice d'argile qui a, elle-même, une certaine porosité très fine. C'est une argile sableuse.

La porosité du mélange et sa distribution ont une grande influence sur la perméabilité à l'eau et à la vapeur et, donc, sur le séchage. Elles ont aussi une grande influence sur les propriétés du produit cuit.

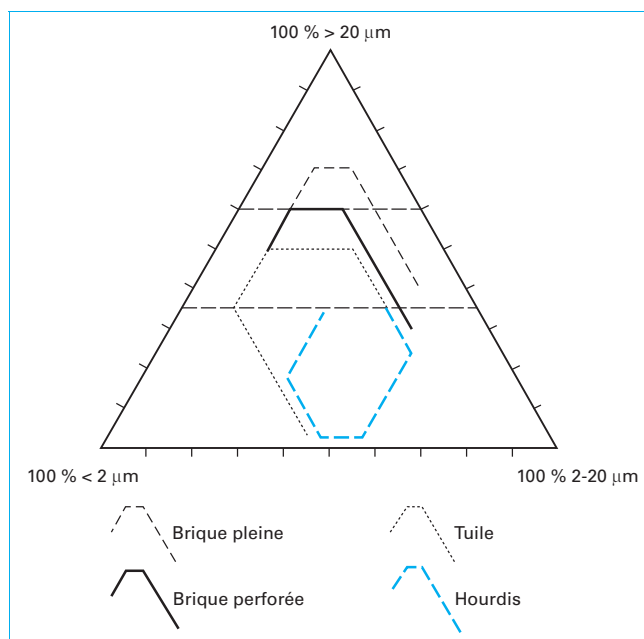


Figure 6 – Diagramme de Winkler et Niesper (source CTMNC)

Un sol argileux présente les propriétés de plasticité de l'argile, mais partiellement réduite par le dégraissant. On peut en mesurer les limites de liquidité, plasticité et retrait. Celles-ci dépendent des concentrations en argiles et de leurs activités.

Dans la nature, le dégraissant n'est pas mono granulaire, mais présente une certaine distribution.

Parfois, la composition en argile et la distribution granulométrique du sol de la carrière sont directement acceptables pour la production. De façon plus habituelle, il faudra préparer un mélange de production, qui inclura différentes argiles et des dégraissants pour obtenir un mélange acceptable pour le produit fabriqué.

Selon la taille moyenne et la répartition des grains, la surface spécifique du mélange (m^2/g) va varier. Si la fraction inférieure à 0,002 mm est très importante, le sol est très riche en argile, il présente une grande surface spécifique, on dit qu'il est « gras » ; il est très plastique, se met en forme facilement, et a des bonnes propriétés mécaniques après séchage et cuisson. Si cette fraction est faible, le mélange est pauvre. Le sol est peu plastique et ses propriétés en sec et cuit seront limitées.

Par contre, une argile grasse est très peu perméable et sera difficile à sécher. Si le sol de la carrière est trop riche en argile, il faudra alors ajouter des dégraissants dans le mélange argileux de production pour améliorer le séchage. Si elle est trop pauvre, il faudra peut être faire des ajouts d'argiles plus plastiques.

Selon le produit et le procédé de fabrication, on a donc besoin de plus ou moins d'argile dans le mélange. Les tuiles à emboîtement demandent des concentrations en argile plus élevées que les briques extrudées. Winkler et Niesper ont ainsi délimité les compositions nécessaires à la réalisation de pièces données pour les conditions de fabrication allemandes (figure 6).

1.6 Argile et séchage

Un mélange argileux présente un retrait entre la limite de liquidité et la limite de retrait. Les mécaniciens des sols mesurent ce retrait par des essais de dessiccation et déterminent ainsi la limite de retrait volumique (XP P94-060-1). Le retrait en volume est d'abord égal à la perte d'eau, puis il s'annule à la limite de retrait.

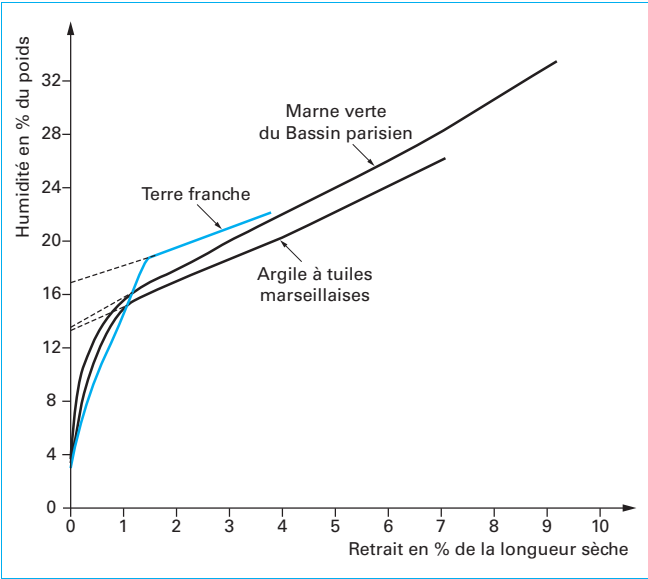


Figure 7 – Courbe de séchage selon Bigot (source CTMNC)

Les céramistes caractérisent le retrait en traçant des courbes de Bigot : le retrait n’est mesuré que dans une seule direction sur de petites éprouvettes linéaires. L’état sec est pris comme origine du diagramme. L’état humide est à droite du diagramme. Le test est facile et précis, mais implique que le mélange soit isotrope. Au début du séchage, le retrait est linéaire avec la perte de poids (voir figure 7), puis il s’annule à la limite de retrait. Quand il n’y a pas de smectite dans le mélange, le changement de pente est brusque. Au-delà de la limite de retrait, le séchage se poursuit sans retrait ; on vide les interstices entre les grains et l’eau qui s’échappe est dite « eau interstitielle ».

Pour les mélanges utilisés en briqueteries et tuileries, le retrait linéaire (exprimé en % par rapport à la longueur sèche) varie de 4 à 8 % environ, selon la nature minéralogique de l’argile, la teneur en éléments dégraissants, la teneur en eau de façonnage, la compression subie par l’argile lors de son passage dans la filière...

1.7 Eau et argile

L’eau peut être présente dans l’argile de différentes façons, du plus stable au moins stable (tableau 4).

Dans la zone non saturée (correspondant à l’eau d’interposition), il se forme de nombreux ménisques air/eau dans les pores. L’eau liquide des pores de l’argile est en équilibre avec l’humidité de l’air extérieur et présente donc une isotherme d’absorption. L’eau y est soumise aux forces de capillarité, d’où l’apparition de forces de succion. Il est possible de tracer toutes ces caractéristiques sur une même figure (figure 8), avec w (%) concentration en eau, e (%) expansion hydrique, S_r (%) humidité de l’air en équilibre avec l’argile, s (kPa) succion de l’argile.

1.8 Composition des mélanges argileux

Les mélanges argileux utilisés en France sont très variées, tant sous l’aspect âge géologique, mode de formation, nature cristallographique et composition chimique. On montre ci-dessous quelques analyses chimiques de mélange, ainsi que les limites courantes observées en France.

Tableau 4 – Différents types d’eaux dans les argiles	
Types d’eaux	Énergie de liaison
Eau de constitution	Il faut chauffer à haute température pour détruire les liaisons chimiques et fournir la chaleur de décomposition
Eau d’hydratation	C’est l’eau liée, qui s’en va à relativement basse température, n’entraîne pas une destruction de la structure de la smectite gonflante, mais une variation de dimension de la maille de la smectite. On parle aussi d’« eau zéolitique ». On fournit la chaleur d’hydratation
Eau absorbée	C’est l’eau hygroscopique qui se fixe dans les premières couches autour des feuillets d’argile. La chaleur d’adsorption est de l’ordre de 2 650 kJ/kg _{eau}
Eau d’interposition	C’est l’eau qui reste entre les particules quand il n’y a plus de retrait. Elle part dans la deuxième partie du séchage. Elle est en équilibre avec l’humidité de l’air extérieur
Eau colloïdale	C’est l’eau autour des particules, entre la limite de retrait et la limite de liquidité. Elle intervient dans la plasticité et le séchage se fait avec retrait. La chaleur d’évaporation est légèrement supérieure à la chaleur de vaporisation de l’eau (2 500 kJ/kg _{eau})
Eau libre	On la trouve dans les barbotines, au-delà de la limite de liquidité

1.9 Autres composants du mélange de production

Le mélange argileux de production sera réalisé principalement à partir de l’argile d’une ou de plusieurs carrières de façon à obtenir la plasticité requise. À ce mélange, on pourra rajouter différents additifs.

1.9.1 Dégraissants

On ajoutera éventuellement des dégraissants, qui sont essentiellement du sable de composition et de granulométrie contrôlées (de 0,1 à 1 mm), exempt de calcaire. On peut aussi rajouter de la « chamotte », poudre de briques déjà cuites, des cendres volantes de centrales thermiques alimentées au charbon, des laitiers granulés de hauts fourneaux, des éléments contenant du carbone résiduel tels que le mâchefer,...

L’ajout de dégraissant (jusqu’à 30 %) permet de diminuer l’humidité de mise en forme, de réduire les retraits, et de faciliter le séchage. Par contre, la plasticité est plus faible, ainsi que les propriétés mécaniques en sec et en cuit.

1.9.2 Porosants

Pour la fabrication de certaines briques, on désire, à la fois, faire des économies d’énergie non renouvelable, en utilisant de l’énergie organique, et augmenter la porosité des briques, et ainsi diminuer leur densité et leur conductibilité thermique. On peut donc rajouter différents éléments combustibles et déchets organiques : déchets de bois, sciures, écorces, paille, déchets de polystyrène expansé, résidus de papeterie...

Par exemple, un mélange argileux fournit un produit cuit de densité 1 700 kg/m³. L’addition de 15 % de sciure de bois permet de diminuer la densité après cuisson à 1 500 kg/m³.

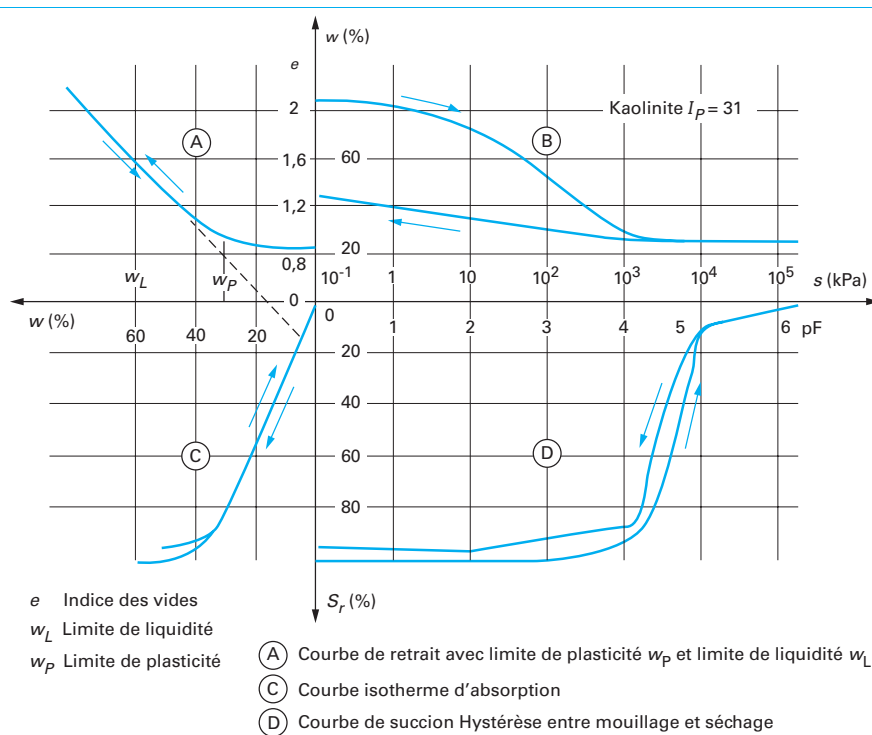


Figure 8 – Caractéristiques hydriques d'un kaolin (indice de plasticité 31)

Tableau 5 – Quelques exemples de composition de mélanges argileux

Mélange	A	B	C	D	E	
Origine	Bourgogne	Marseille	Schiste (Lyon)	Sud de Paris	Lœss (Alsace)	Limites courantes
Produit	Tuile	Tuile	Boisseau	Brique apparente perforée	Brique perforée	%
Perte au feu (en %)	7	15	11	8	16	3/18
SiO ₂ (en %)	61,5	42,6	51,5	58,9	50,9	35/80
Al ₂ O ₃ (en %)	18,7	17,5	20,7	24	7,3	8/30
TiO ₂ (en %)	0,9	0,7	1	1,3	0,5	0,3/2
Fe ₂ O ₃ (en %)	8	6	6,2	5,4	2,9	2/10
CaO (en %)	1	12	5	0,7	17	0,5/18
MgO (en %)	1	2,6	1,9	0,4	2,6	0/5
Na ₂ O (en %)	0,4	0,4	0,7	0,1	0,9	0,1/1,5
K ₂ O (en %)	2	2,5	2,1	0,9	0,9	0,1/4,5
S (en %)						0/0,5
F (en %)						0/0,15
Carbone organique						0,1/2
Minéralogie	Illite, Mica, Quartz	Illite, Calcaire, Quartz	Illite, Quartz	Kaolinite, Quartz	Calcaire, Illite	
Humidité de façonnage (en %)	25	26	25	27	20	
Porosité après cuisson à 950 °C (%)	4,6	18,5	18,6	12	32,4	

L'addition de porosants est limitée, d'abord par la difficulté de la mise en forme du mélange, et la faible résistance mécanique après cuisson de briques trop poreuses. Par ailleurs, la combustion du mélange dans le four devient difficile à contrôler quand la puissance spécifique de combustion du mélange devient trop élevée.

Enfin, des émissions organiques polluantes et odorantes peuvent aussi se produire dans les fumées qui devront alors être traitées.

1.9.3 Autres ajouts spéciaux

On rajoute parfois d'autres additifs pour modifier la couleur ou améliorer les propriétés :

- colorants (MnO_2 , TiO_2 ,...). Des doses de MnO_2 (2 à 3 % dans des argiles ferrugineuses), permettent l'obtention de produits présentant une belle couleur brune ; l'oxyde de titane (concentration 2 %) permet d'obtenir avec certaines argiles des produits de couleur orangée ;
- carbonate de baryum, qui limite les efflorescences quand le mélange contient des sulfates ;
- calcaire finement broyé pour la couleur, la porosité et les propriétés mécaniques ;
- additifs pour une meilleure plasticité (lignosulfonate de sodium,...).

1.10 Influence des composants principaux

Sur le tableau 6, on indique l'origine des composants chimiques et leur influence sur les propriétés de la terre cuite.

Un des grands éléments de différenciation est donc la présence ou non de calcaire dans le mélange. Sans calcaire, le tesson est bien rouge et on parle d'argile ferrugineuse. Avec du calcaire, le tesson devient jaune. On parle d'argile calcaire.

2. Fabrication

La fabrication de pièces de terre cuite (figure 9) comprend différents étapes :

- l'extraction des matières premières ;
- la préparation du mélange de production ;
- le façonnage ;
- le séchage ;
- la cuisson ;
- l'emballage.

qui vont maintenant être discutées plus en détail.

2.1 Extraction des matières premières

On a vu que les mélanges de production étaient obtenus par un mélange d'argiles de différentes carrières, de sable et d'autres ajouts. Les argiles se présentent comme des mottes plus ou moins déformables. L'été, les blocs peuvent être durs et cassants avec des sols fissurés. L'automne, les mottes sont plastiques et collantes, les fissures ont disparu. Les argiles, à l'état pur, sont blanches, mais les couleurs des sols argileux sont variées (vert, brun, violet, jaune,...) selon la présence de matières organiques et de sels minéraux.

2.1.1 Gisements

Les gisements d'argiles ont pu se constituer à l'emplacement de la roche mère (argile primaire). Ils ont pu être transportés par le vent ou l'eau, loin de leur lieu d'origine (argile secondaire). Souvent l'argile, entraînée par les rivières, s'est déposée dans un lac

Tableau 6 – Influence des éléments chimiques du mélange argileux

Éléments	Origine et actions
Carbone	<ul style="list-style-type: none"> • Provient des matières organiques du sol • Peut être introduit par les porosants • Réduit l'énergie à fournir pour la cuisson • Produit une perte au feu • Favorise le cœur noir
Silice	<ul style="list-style-type: none"> • Provient de l'argile et du quartz des dégraissants • Élément principal du mélange
Alumine	<ul style="list-style-type: none"> • Lié aux argiles • Indique un taux de kaolinite important • Montre une bonne plasticité
Oxydes et hydroxydes de fer	<ul style="list-style-type: none"> • Donnent la couleur rougeâtre après cuisson • Agissent comme un fondant grésant
Chaux CaO et Magnésie MgO	<ul style="list-style-type: none"> • Proviennent de l'argile et du calcaire • CaO provient du calcaire selon la réaction $\text{CO}_3\text{Ca} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ • Pâlisent la couleur : du rouge, le tesson passe au jaune • Améliorent les propriétés mécaniques • Forte perte au feu • Forte porosité fine • Possibilité de grains de chaux résiduels
Oxydes alcalins K_2O et Na_2O	<ul style="list-style-type: none"> • Viennent des argiles et des dégraissants • Fondent à basse température • Agissent comme un fondant grésant
Sulfates (gypse, anhydrite) et sulfures (pyrite, marcassite)	<ul style="list-style-type: none"> • Provoquent du SO_2 dans les fumées et des efflorescences dans les produits

d'eau douce. Parfois, elle a été entraînée par les fleuves et a floculé au contact de l'eau saumâtre des embouchures. Un gisement géologiquement ancien a pu être restructuré par la suite et apparaître en flanc de colline.

Les argiles utilisées en France pour la fabrication de produits de terre cuite se trouvent pratiquement à tous les étages géologiques, terrains primaires exceptés.

Au sommet du quaternaire, on trouve l'importante formation de loess, qui est une argile siliceuse et calcaire présentant peu de plasticité. Ces argiles, accumulées à l'époque glaciaire, sont très répandues en Alsace.

Dans certaines régions, la couche supérieure du loess a été décalcifiée et a donné naissance à une argile très siliceuse, peu plastique, pratiquement exempte de calcaire, appelée « lehm », très utilisée dans le nord de la France, la Normandie et la région parisienne.

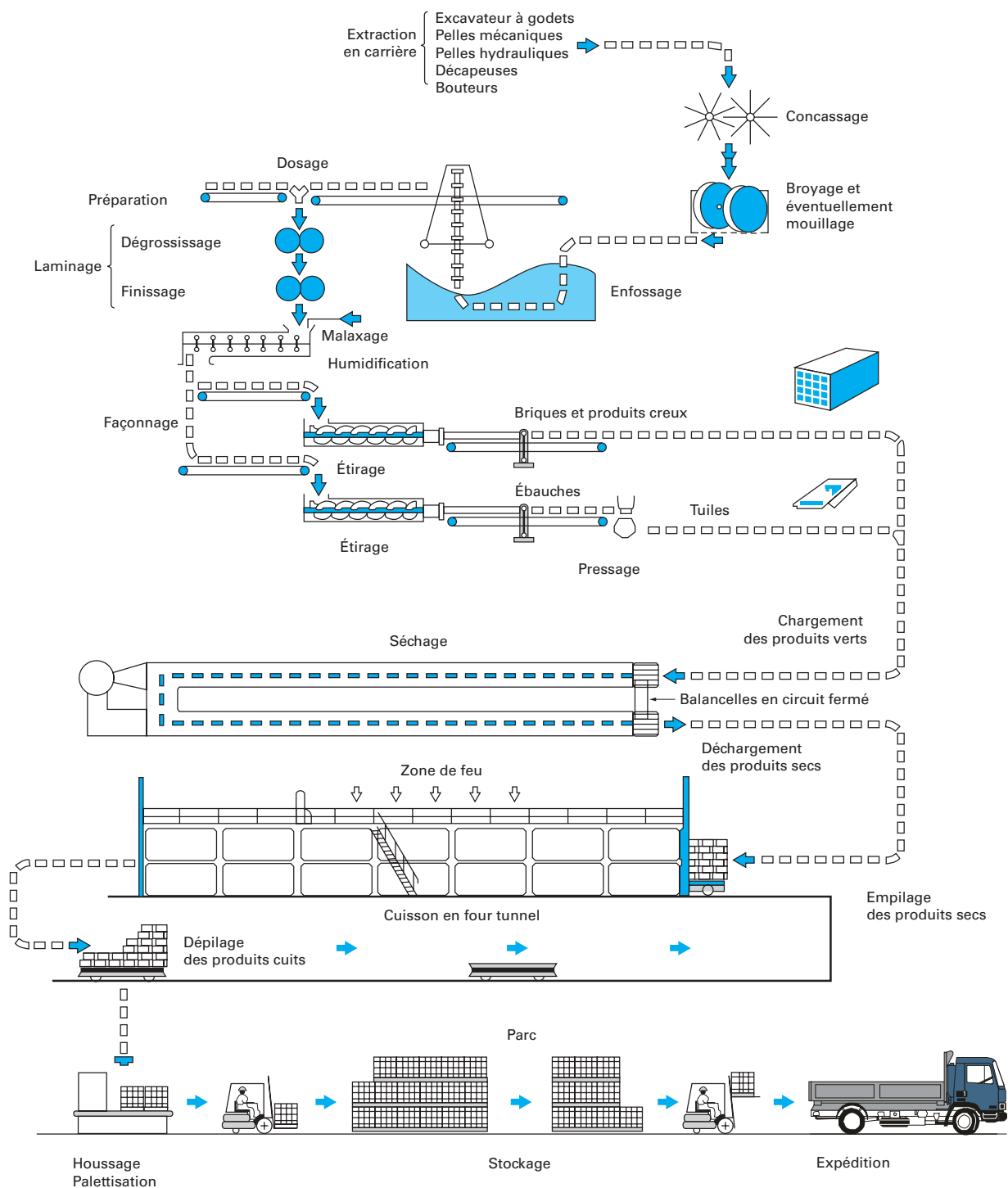


Figure 9 – Schéma des étapes de production de la terre cuite (source CTMNC)

2.1.2 Extraction

Après l'enlèvement de la découverte (encore appelée « stérile ») à l'aide de buteurs, de pelles mécaniques ou de décapeuses, l'extraction a lieu à ciel ouvert, les hauteurs de front de taille variant de un mètre à vingt mètres environ.

L'extraction elle-même se fait souvent à la pelle mécanique. On emploie aussi des excavateurs, des défonceuses, des décapeuses, des buteurs, des chargeuses, etc.

La matière première extraite est généralement acheminée à l'usine par camions.

La carrière est souvent exploitée par campagne annuelle. L'été, on extrait toute la quantité nécessaire à la production annuelle, on forme un tas annuel qui sera repris journalièrement pour la production. Cela permet d'extraire dans de bonnes conditions climatiques, en limitant les impacts sur l'environnement. La création du tas en couches horizontales et sa reprise par pelletage vertical en permet un premier mélange.

Pour des questions de prix de revient, il ne peut être question de faire venir les matières premières de trop loin, l'incidence des frais de transport devenant prohibitive. La plupart des tuileries et briqueteries travaillent avec des carrières proches de l'usine (quelques kilomètres). De façon à améliorer les caractéristiques des mélanges et les qualités des produits cuits, certaines usines font des ajouts limités d'argiles d'appoint de haute qualité provenant parfois de gisements éloignés (jusqu'à 300 km de l'usine).

Les carrières sont considérées en France comme des installations classées pour la protection de l'environnement et des mesures de protection sont imposées par la réglementation : il faut limiter le bruit, la formation de poussière, contrôler les rejets des eaux de carrière, ne pas salir les routes alentour, limiter l'entrée dans la carrière, l'exploiter au fur et à mesure, et suivre un plan de remise en état. Ces exigences sont décrites dans l'autorisation préfectorale d'ouverture de carrière.

2.2 Préparation de la pâte

La préparation de la pâte a plusieurs objectifs :

- éliminer les impuretés ;
- émietter les argiles ;
- former, homogénéiser et humidifier les mélanges.

Pour préparer le mélange, on peut travailler à sec ou en phase humide plastique, selon la teneur en humidité de l'argile dans la carrière.

2.2.1 Préparation sèche

Dans les pays secs (Espagne, Maghreb,...), l'argile peut être extraite assez sèche (humidité de l'argile < 10 %). Le tas d'argile, extrait l'été, est stocké dans un hangar pour éviter la pluie de l'hiver. L'argile est d'abord concassée ; les pierres et autres impuretés sont éliminées. L'argile est alors broyée à sec dans des moulins à marteaux, à boulets, ou dans des broyeurs pendulaires.

Dans un broyeur pendulaire, plusieurs pendules rotatifs, entraînés par la force centrifuge, écrasent l'argile entre le galet tournant du bout des pendules et la carcasse du broyeur. L'argile s'effrite sous les chocs et des grandes diminutions de taille sont possibles en une étape. On obtient facilement une granulométrie assez grossière (1 à 3 mm). Si on le recherche, des poudres fines peuvent aussi être obtenues en augmentant le temps de moulage par recirculation. Le moulage très fin (< 300 µm) permet d'obtenir une grande qualité de peau des produits, de supprimer tout risque de grains de chaux, et d'améliorer les propriétés mécaniques.

Pour les tuiles, les bénéfices techniques du procédé font que la préparation sèche est parfois utilisée avec des argiles initiales assez humides, ce qui nécessite son séchage préalable.

Après broyage et mélange à sec, le mélange argileux est humidifié et stocké avant sa mise en forme.

En règle générale, les argiles demandent d'autant plus d'eau pour leur façonnage qu'elles sont plus plastiques. Ainsi, les argiles peu plastiques demandent environ 15 à 20 % d'eau (par rapport à la masse sèche), et les argiles très plastiques 20 à 30 %.

2.2.2 Préparation semi-humide

Quand l'argile est extraite humide à la carrière (10 à 30 %), elle subit une préparation semi-humide à l'état plastique. Dans cet état, l'argile se déforme plastiquement, mais de fortes réductions en une étape ne sont plus possibles. Après concassage et épierage, la préparation comprend trois étapes successives :

- broyage initial dans un broyeur à meules verticales ;
- broyage grossier dans un broyeur dégrossisseur à cylindres (laminoir) ;
- broyage fin dans un broyeur finisseur à cylindres.

Sur les figures 10 et 11 on voit un schéma de ces deux types de broyeur.

À la fin de la préparation semi-humide, l'écartement entre les cylindres peut être de 0,8 mm pour les tuiles, et de 1,5 mm pour les briques. Pour une production donnée, les cylindres devront tourner à plus grande vitesse quand leur écartement est plus petit.

2.2.3 Enfossage

Cette opération consiste à stocker pendant plusieurs jours, ou semaines (généralement 2 à 4), l'argile ayant déjà subi un début de préparation, et contenant une partie de son eau de façonnage. Par décomposition des matières organiques, il se développe des acides organiques qui améliorent la plasticité.

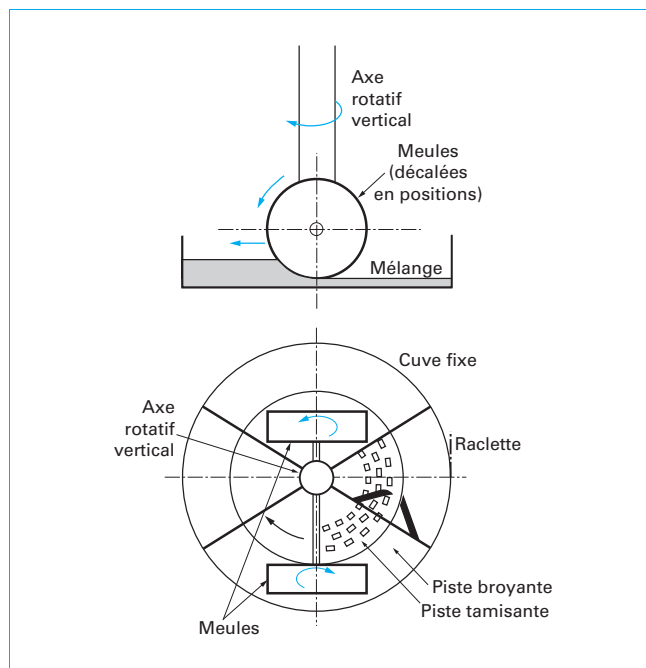


Figure 10 – Broyeur à meules verticales (source CTMNC)

2.2.4 Mouillage et désaération

La fin de la préparation consiste d'abord à ajuster le niveau d'humidité dans la pâte. La constance de la concentration en eau est très importante pour obtenir des propriétés plastiques reproductibles dans le temps. Quand la concentration en humidité est élevée, la mise en forme est facilitée, par contre le séchage est plus difficile et long.

Le réglage se fait souvent en rajoutant de l'eau liquide dans un mélangeur mouilleur à deux axes parallèles, juste avant la mouleuse. Cependant, on peut aussi ajouter de la vapeur sous pression (de 2 à 7 bars). On peut de la sorte extruder des pâtes à des températures de 60 à 90 °C, ce qui améliore considérablement la plasticité et facilite le séchage quand il se fait en ligne.

De même, on désaère le mélange de production en le passant sous vide.

La désaération, avant le passage dans la mouleuse, a pour but de supprimer les bulles d'air, d'améliorer ainsi la plasticité en supprimant le feuilleteage, et de donner une plus grande cohésion à la pâte.

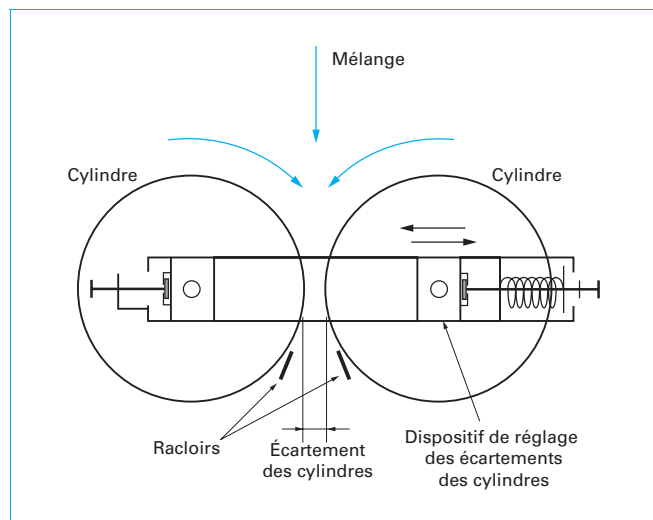


Figure 11 – Broyeur à cylindres (source CTMNC)

Quels que soient les produits fabriqués, le rôle de la préparation est important. Un dosage irrégulier du mélange risque de donner des produits de caractéristiques variables. Une mauvaise homogénéisation de la pâte et de son humidité peut provoquer des fissures au cours du séchage. Une élimination insuffisante de certaines impuretés risque de favoriser des amorces de fissures ou l'apparition d'éclatements sur les produits cuits (éclatements de grains de chaux).

2.3 Façonnage

Le façonnage a deux rôles :

- **donner à la pâte une cohésion suffisante.** La cohésion initiée par la préparation de la pâte, sa désaération, son mouillage additionnel, est parachevée grâce à une intensification de la compression de la pâte ;
- **donner à l'argile la forme désirée.** Les produits creux sont obtenus par le passage du mélange argileux au travers d'une filière ; certaines tuiles sont pressées et les briques dites « moulées main » sont réalisées par moulage « *soft mud* ».

2.3.1 Extrudeuse (mouleuse)

Un schéma d'une extrudeuse (appelée aussi « mouleuse » dans la profession) est montré à la figure 12. Après le dernier mouillage, l'argile est propulsée à l'aide d'hélices, ou de pales, à travers une grille dans la chambre à vide où s'opère la désaération. On retrouve les étapes de préparation décrites précédemment (désaération et mouillage). Les morceaux d'argile sont repris par la grande hélice rotative, comprimés à nouveau, mis sous forte pression, poussés vers la bouche de l'extrudeuse et extrudés à travers la filière. Le tout est actionné par des moteurs électriques au moyen de transmissions.

L'argile se déplace le long de la vis comme un boulon dont l'orientation est fixe sur une tige filetée en rotation. En pratique, il y a des reflux : l'extrudeuse n'est donc pas une machine volumétrique – son rendement volumétrique n'est que de 30 à 60 %.

Sur le tableau 7, on trouve des données caractéristiques sur des extrudeuses typiques pour terre cuite en extrusion semi dure.

L'emploi de plus fortes pressions (jusqu'à 50 bars) permet de travailler avec des mélanges moins plastiques et plus secs, mais les consommations énergétiques et l'usure sont plus importantes. Selon l'humidité du mélange, on extrude donc « dur » (humidité < 15 % avec des argiles peu plastiques, fortes pressions et pièces simples), ou on extrude « semi-dur » (humidité de 15 à 30 %), ce qui est le plus courant en Europe.

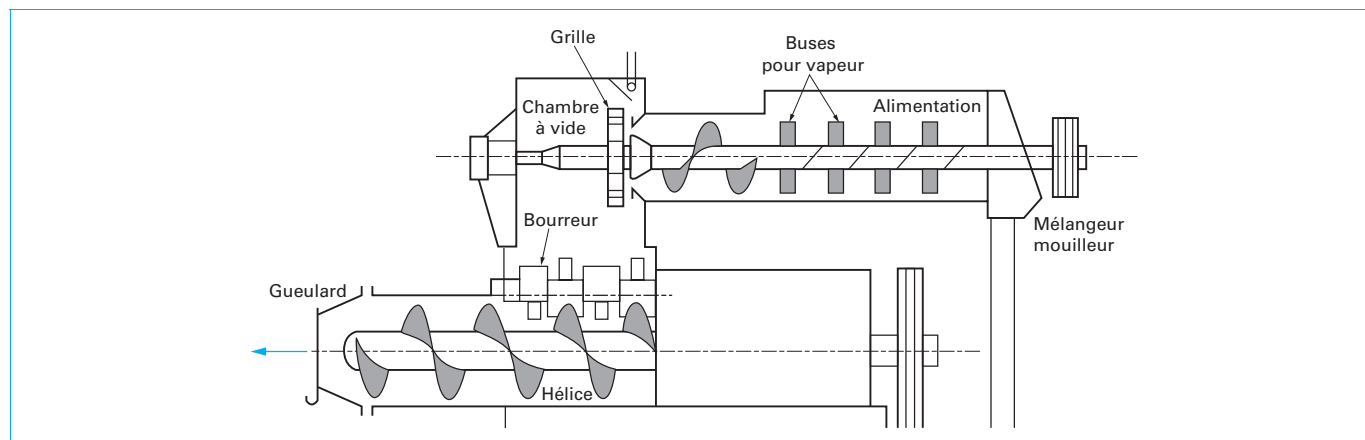


Figure 12 – Schéma d'une extrudeuse (source CTMNC)

Tableau 7 – Caractéristiques d’extrudeuses typiques, extrusion « semi-dure »			
Caractéristiques	Tuiles	Briques perforées	Briques perforées, grande production
Diamètre d’hélice (en mm)	400	650	800
Pression maximale (en bar)	20	35	35
Production (en tonnes/h)	33	80	100
Puissance (en kW)	105	310	500

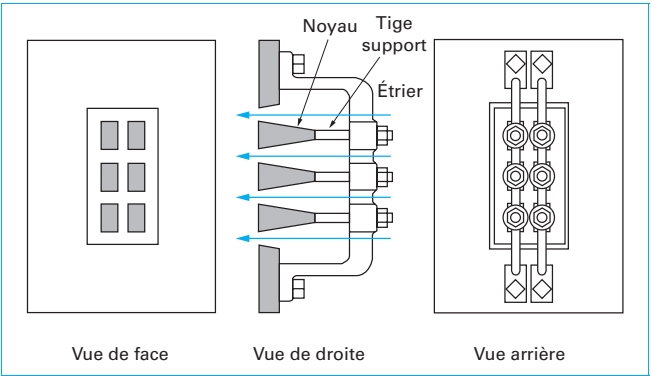


Figure 13 – Schéma de filière de briques creuses à 6 perforations (source CTMNC)

2.3.2 Filière

La filière est la pièce à l’extrémité de l’extrudeuse à travers laquelle la pâte d’argile est poussée et qui donne au produit sa forme définitive. Sur la figure 13, on montre un schéma de filière pour produits creux. Les perforations sont réalisées par des noyaux fixés sur des tiges à des étriers transversaux internes. Le flux d’argile tourne autour de ces étriers et tiges et se ressoude derrière, avant la filière.

Si la filière d’une brique à 6 perforations, avec ses 6 noyaux, est assez simple, les filières pour briques thermiques comprenant plus d’une centaine de perforations deviennent très complexes.

Pour éviter des déformations et l’apparition de fissures aux stades ultérieurs de la fabrication, tous les filets d’argile doivent sortir de la filière à la même vitesse. Ce réglage, qui s’appelle l’« équilibrage », constitue une opération délicate conditionnant la qualité des produits. Elle est réalisée grâce à des freins de filière, petits inserts qui peuvent être introduits plus ou moins profondément dans la filière pour freiner localement le flux du mélange argileux. La filière, avec ses noyaux, doit être assez rigide pour ne pas se déformer sous la pression. Elle a une durée de vie limitée ; les noyaux s’usent et les parois de la brique grossissent avec le temps jusqu’à leur changement.

2.3.3 Presse à tuiles

Si les tuiles canal et les tuiles plates sont réalisées par extrusion, les tuiles à emboîtements sont réalisées à partir d’une ébauche extrudée appelée « galette », qui est repressée dans une presse. Il y a deux options :

- le pressage en **pâte molle** à l’aide de moules en plâtre ou en caoutchouc ;
- le pressage en **pâte dure** à l’aide de moules métalliques.

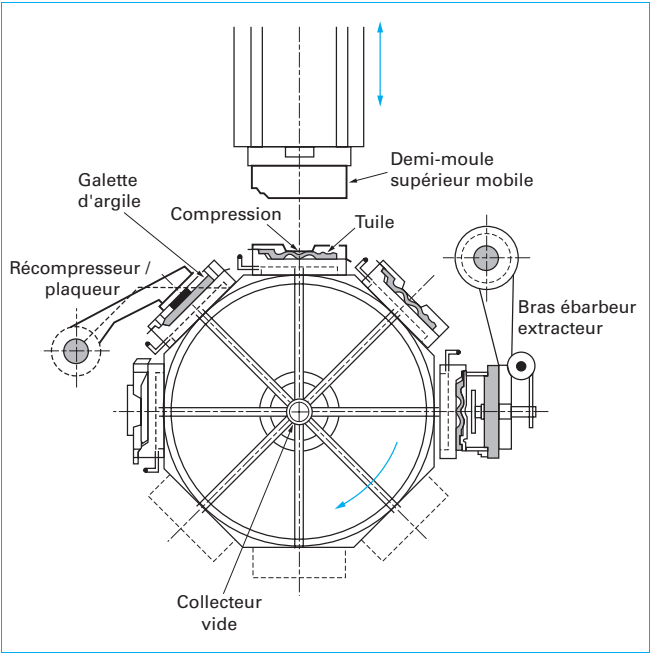


Figure 14 – Schéma d’une presse « revolver » (source CTMNC)

Tableau 8 – Comparaison de caractéristiques typiques de presses à tuiles		
Caractéristiques	Électro-mécanique	Hydraulique
Taille du moule (en mm)	766 x 400	1 900 x 600
Nombre de moules supérieurs	1	3
Nombre de moules inférieurs	1 x 8	4 x 6
Nombre de tuiles par pressage	1	4
Nombre de pressages à la minute	5-18	20
Capacité de production (tuiles/h)	300-1 000	4 800
Charge maximale (en kN)	800	2 000
Puissance (en kW)	11	44

Les presses le plus couramment utilisées sont des presses électromécaniques dites « **revolver** ».

Elles comportent un tambour généralement hexagonal (ou octogonal) rotatif, dont chaque face reçoit un demi-moule inférieur, tandis que le demi-moule supérieur est porté par un plateau qui s’abaisse lorsqu’une des faces du tambour est en position horizontale. À la première position, la galette d’argile est plaquée contre le moule. À la position suivante, la tuile est pressée. Plus tard, elle est ébarbée, démoulée et extraite du moule.

Sur les grosses presses, plusieurs moules sont fixés sur chaque face de façon à produire plusieurs tuiles à la fois. Il existe aussi des presses hydrauliques pour les plus grandes charges. On a comparé au tableau 8 les caractéristiques d’une presse électromécanique rustique et d’une presse hydraulique sophistiquée.

Tableau 9 – Comparaison des différents moules à tuiles

Matières	Aspect de surface de la tuile	Mode de pressage	Démoulage de la tuile	Humidité de l'argile (en %)	Durabilité	Commentaires
Plâtre	Très bonne	Moule ouvert	Facile	20 à 30	1 000 à 3 000 tuiles (typiquement)	Nécessité d'un atelier de fabrication des moules
Acier	Moyenne	Moule fermé possible	Difficile Nécessité d'huile de démoulage, de contre pression d'air, de décharge électrique	15 à 25	Très durable	Usinage coûteux des moules
Plastique avec feuille caoutchouc	Moyenne	Moule ouvert	Facile avec contre pression	20 à 30	Durable	

On travaille en moule ouvert (galette nettement plus grosse que la tuile, le moule s'arrête en position, fortes bavures), ou en moule fermé (galette de même volume que la brique, pas ou peu de bavures).

2.3.4 Moules

Les moules sont des pièces de forme complexe qui vont donner la forme et l'aspect de la tuile. Ils sont coûteux à réaliser. Suivant les tuiles (formes, aspect de surface recherché, importance des séries,...), on utilise des moules de plâtre, d'acier ou en plastique, protégés par une feuille de caoutchouc. Ces différents moules sont comparés sur le tableau 9.

2.3.5 Machines de fabrication de briques moulées main « soft mud »

Ces machines simulent le procédé ancien de fabrication des briques pleines apparentes. D'où le nom des briques « moulées main ». Des boules d'argile très humides sont projetées dans un moule, précédemment aspergé de sable, puis elles sont démoulées. Des effets esthétiques de structure sont ainsi obtenus.

2.4 Séchage

Les produits ont été façonnés avec une teneur en eau de 15 à 30 % (% par rapport au poids sec). Avant de les cuire, il est nécessaire d'éliminer la plus grande partie de cette eau par séchage. Après leur passage dans le séchoir, ces derniers ne conservent plus que 1 à 2 % d'eau résiduelle.

Il s'agit d'une phase délicate de la fabrication si l'on veut obtenir des produits de qualité. Les principaux problèmes technologiques posés par le séchage sont discutés, ainsi que les séchoirs utilisés.

2.4.1 Problèmes technologiques posés par l'opération

■ Retrait de séchage

Au cours du séchage, les particules élémentaires, primitivement dispersées dans l'eau, tendent à se rapprocher (figure 15a) et à s'imbriquer, ce qui entraîne un retrait, puis une consolidation ou prise de cohésion. Lorsque les particules sont au contact les unes des autres (figure 15b), il reste de l'eau, entre elles, qui continue à s'évacuer, alors qu'il ne se produit plus de retrait dans la pièce (figures 15c et 15d).

• On voit donc que **le séchage s'effectue en deux phases** : la première dans laquelle le départ d'eau s'accompagne de retrait, et la seconde pour laquelle il ne provoque pratiquement pas de variations dimensionnelles. Cela correspond à la courbe de Bigot (figure 7).

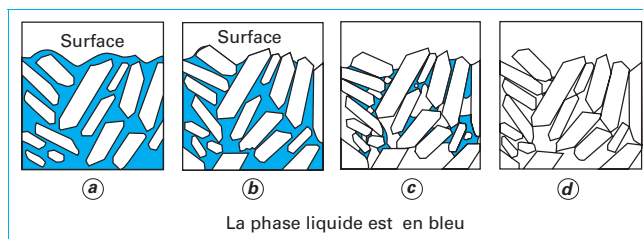


Figure 15 – Structure du mélange argileux au cours du séchage (source CTMNC)

• Dans la **première phase**, l'eau se déplace dans un milieu saturé et les faces extérieures de la pièce d'argile sont recouvertes d'eau liquide. La vitesse d'évaporation est élevée, constante, et ne dépend que des conditions extérieures de séchage (voir figure 16, zone AB). Le déplacement de l'eau dans l'argile est rapide. Vers la fin de cette phase, il se crée cependant des gradients de concentration entre la surface et l'intérieur, ce qui entraîne des retraits différentiels et des contraintes localisées pouvant entraîner des déformations, des fissurations et des pertes des propriétés mécaniques.

• Dans la **deuxième phase**, le départ de l'eau n'est plus compensé par un retrait, mais par l'entrée d'air dans la pièce qui n'est plus saturée. La surface extérieure devient sèche et le transport de l'humidité se fait par capillarité, puis par diffusion en phase vapeur (zone BC), phénomènes qui sont plus lents.

Pour un séchage efficace et rapide, il est donc nécessaire de varier les conditions de séchage au cours du cycle, ce qui impose l'abandon du séchage naturel et l'emploi du séchage artificiel en atmosphère contrôlée.

• De façon habituelle, on trouve souvent **trois périodes dans un cycle industriel de séchage** :

- **première période**, on cherche simplement à augmenter la température de la pièce d'argile. À haute température, la viscosité de l'eau est plus faible, les transports peuvent être accélérés, et les gradients de concentration diminués. On chauffe donc la pièce dans une atmosphère assez humide. On est cependant limité par la condensation qui peut se produire quand on introduit une pièce froide dans une atmosphère chaude et humide ;
- **deuxième période**, on va introduire de l'air plus sec tout en s'efforçant de ne pas provoquer une couche extérieure sèche. On conserve ce réglage jusqu'à la fin du retrait. La vitesse limite de séchage est celle qui permet d'évacuer l'eau assez rapidement sans que les faces externes ne sèchent trop rapidement ;

– **troisième période**, il n'y a plus de risque de fissuration et on peut accélérer le séchage en montant la température et en baissant l'humidité de l'air de séchage.

L'air utilisé au début du séchage a souvent une température de 35 à 50 °C avec une humidité relative de 75 à 90 %, et l'air utilisé en fin de séchage a une température de 70 à 160 °C, avec une faible humidité relative.

• **En pratique**, on réalise un épuisement rationnel : l'air chaud et sec est envoyé sur les produits en fin de séchage, il se charge progressivement d'humidité, sa température s'abaisse et l'air humidifié est envoyé sur les produits en début de séchage. Une partie de l'air humide peut être réinjectée dans le séchoir, soit dans l'air chaud, soit en différents points du séchoir, c'est ce qu'on appelle le « recyclage ». Les vitesses de vent varient de 1 à 10 m/s.

Énergie consommée par l'opération de séchage

Le séchage est un grand consommateur d'énergie, d'autant plus qu'il est assez difficile de récupérer la chaleur de condensation de la vapeur. La chaleur d'évaporation théorique est d'environ 2 260 kJ/kg d'eau évaporée. Comme l'air d'entrée dans le séchoir est partiellement humide et que l'air de sortie n'est pas saturé, il faut plutôt compter sur une chaleur de séchage théorique de 3 100 kJ/kg d'eau évacuée. On utilise les diagrammes d'air humide, comme celui de Mollier, pour calculer les énergies théoriques de séchage.

Exemple

Dans la pratique, pour des séchoirs bien réglés il faut compter une consommation variant de 3 500 à 4 000 kJ/kg d'eau évacuée.

Si on calcule en kJ/kg d'argile, la consommation est environ quatre à cinq fois moindre, selon l'humidité de façonnage de l'argile. Pour le séchage d'un kilo de produits cuits, les consommations thermiques sont de l'ordre de 650 à 1 000 kJ/kg_{cuit} et les consommations électriques de 0,006 à 0,013 kWh/kg_{cuit}.

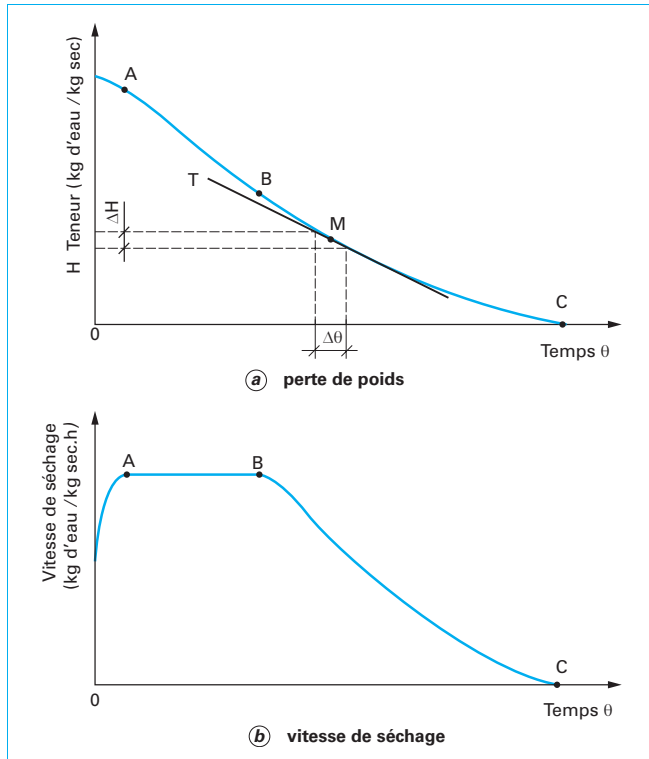


Figure 16 – Courbes de séchage (conditions constantes)

L'apport calorifique nécessaire au séchoir est fourni pour une part, par la récupération d'air chaud sur les fours (air préchauffé dans la zone de refroidissement du four) et, pour le complément, par des foyers directs, des générateurs d'air chaud ou des chaudières.

2.4.2 Différents types de séchoir

Depuis que le séchage naturel sous des hangars (séchoir hâlette) a été abandonné, car trop lent et peu reproductible, le séchage est effectué en atmosphère artificielle ventilée et contrôlée. La durée de l'opération est très variable (de 1 à 72 h) et dépend de l'argile, du type de produits fabriqués et du séchoir. Les longues durées de séchage sont imposées par :

- les parois très épaisses ;
- les formes complexes ;
- le séchage de plusieurs produits différents dans le même séchoir ;
- l'utilisation d'argile très humide et/ou présentant de forts retraits.

On distingue deux groupes de séchoirs :

– **séchoirs statiques discontinus ou séchoirs à chambres** (figure 17) (temps de séchage de 12 à 72 h). Les produits à sécher sont introduits dans une chambre dans laquelle on va réaliser le cycle de séchage. Un certain nombre de chambres fonctionnent en parallèle pour assurer la production et ne pas trop intervenir sur le réglage du four qui fournit une grande partie de l'énergie. Ces équipements sont très flexibles, mais les coûts de manipulation des produits et les efficacités énergétiques plus faibles induisent généralement un prix de revient plus élevé ;

– **séchoirs à circulation continue** des produits (temps de séchage de 1 à 48 h). Les produits circulent dans le séchoir et vont passer par les différents stades de séchage, à différents endroits du séchoir. Ces séchoirs sont plus automatisés, plus économiques, mais moins flexibles. Ils peuvent être classés en trois catégories :

– **séchoirs-tunnels traditionnels** (figure 18) (sèchent entre 12 et 48 h) qui ont une ventilation longitudinale ou transversale. Les pièces sont empilées sur des wagons poussés dans le séchoir qui se déplacent lentement entre les différentes zones du séchoir, souvent sur plusieurs voies parallèles,

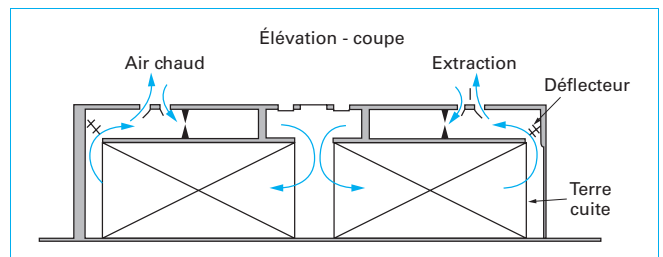


Figure 17 – Séchoir à chambres (élévation-coupe)

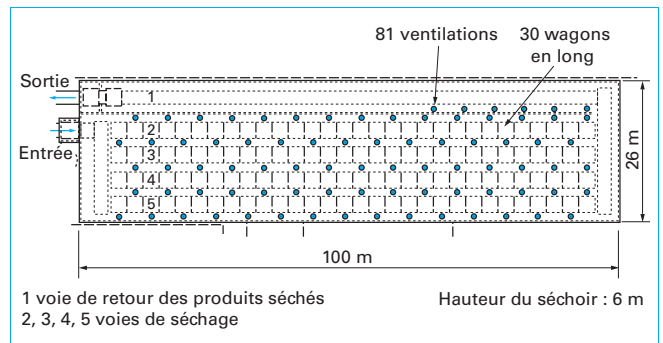


Figure 18 – Vue de dessus d'un séchoir tunnel traditionnel à quatre voies parallèles de séchage et une voie de retour (source CTMNC)

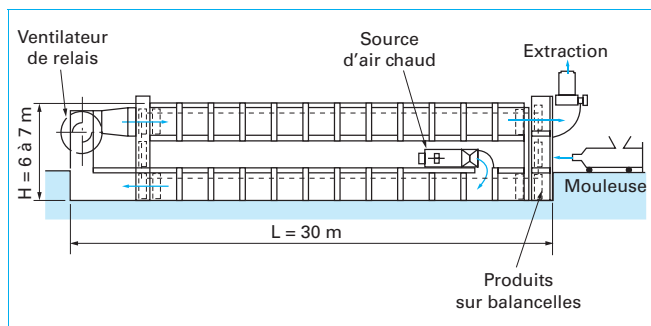


Figure 19 – Vue de côté d'un séchoir semi rapide à balancelles

– **séchoirs semi-rapides**, qui sèchent en 3 à 12 h : il n'y a plus d'empilement des produits, chacun étant exposés à l'air séchant. Par exemple, les produits sont placés individuellement sur des balancelles qui se déplacent dans le séchoir en sens inverse de l'air (figure 19),

– **séchoirs rapides**, qui sèchent en 1 à 3 h. Ici on s'efforce en plus de contrôler de façon très fine les flux d'air au niveau de l'argile, par exemple flux perpendiculaire à la surface des tuiles ou flux vertical traversant les briques à multiples perforations verticales.

Les tonnages séchés par ces appareils varient de 1 à 30 t à l'heure, suivant les types.

2.5 Cuisson

À la sortie du séchoir, il est nécessaire de cuire les produits pour leur permettre d'acquies résistance mécanique, stabilité, résistance aux intempéries, etc. On les soumet alors à une cuisson à des températures élevées (850 à 1 150 °C environ).

La cuisson doit être conduite de façon à obtenir des produits de caractéristiques fonctionnelles satisfaisantes et aussi régulières que possible. Il s'agit de mélanger intimement les combustibles et l'air de combustion à la sortie des brûleurs, de diluer ce mélange dans un excès d'air important pour ramener la température des flammes à la température de cuisson désirable et, enfin, de soumettre tous les produits de l'empilage aux mêmes flux thermiques.

2.5.1 Action de la chaleur

La chaleur provoque des modifications du mélange argileux : déshydratations, décompositions et recombinaisons qui modifient les propriétés : masse volumique, porosité, dureté, dimensions,... comme indiqué dans le tableau 10.

La cuisson provoque donc un frittage par formation locale d'une phase liquide, les phases à bas point de fusion formant le ciment de la matrice. Après cuisson, on obtient une structure solide, partiellement poreuse. La porosité est principalement ouverte, de 20 à 40 % pour les briques de structure, et plus faible pour les tuiles et les briques apparentes.

La composition cristallographique comprend des résidus des phases du mélange argileux initial (quartz, feldspaths), et de nouvelles phases (mullite, quartz, phase amorphe, aluminosilicate de calcium pour les argiles calcaires).

2.5.2 Fours

Si quelques fabrications artisanales utilisent des fours intermittents et, si quelques usines sont encore dotées de fours continus à feu mobile (four Hoffmann), l'essentiel de la production française est assuré par des fours continus à feu fixe, encore appelés « fours-tunnels ».

Tableau 10 – Principales réactions durant la cuisson

Gamme de températures	Actions sur les argiles	Actions sur les autres composants
< 200 °C	Dégagement de l'eau résiduelle d'interposition, de l'eau adsorbée et de l'eau zéolotique des smectites	
200 °C à 450 °C		Oxydation des matières organiques Les hydroxydes de fer se transforment en oxydes
400 °C à 680 °C	Départ de l'eau de constitution, destruction des argiles, constitution de méta kaolin	Le quartz change de forme cristallographique à 570 °C
750 à 850 °C		Décomposition du calcaire des argiles calcaires, dégagement de CO ₂ et apparition de la chaux Oxydation des sulfures en sulfates
> 800 °C	Début de grésage des eutectiques à bas points de fusion dans les systèmes Al ₂ O ₃ /SiO ₂ /Na ₂ O ou K ₂ O Formation de spinelle MgAlO ₄	Décomposition des fluorures, et des chlorures
1 050 °C à 1 200 °C	Fusion localisée progressive et frittage liquide, qui produit baisse de la porosité et retrait Formation de mullite Formation d'aluminosilicates de calcium dans les argiles calcaires	Décomposition de certains sulfates Disparition de la chaux

■ Fonctionnement du four tunnel

Dans ce type d'appareils, les produits sont empilés sur des wagonnets qui sont ensuite poussés à l'intérieur du tunnel où ils avancent pas à pas, progressivement, à chaque entrée d'un nouveau wagonnet. Le four est constitué par les deux parois latérales, la voûte du four, les deux portes d'entrée et de sortie ; la partie inférieure est constituée par la sole isolée des wagons (figure 20a).

Le combustible est le plus souvent injecté en voûte, quelquefois latéralement, dans des espaces ménagés dans les empilages. Pour améliorer les échanges, on emploie des forts débits d'air. L'air de combustion et les fumées circulent à contre-courant par rapport au sens de progression des wagons. L'air de combustion se réchauffe sur les produits en cours de refroidissement (figure 20a). Les fumées chaudes échauffent les produits en cours de préchauffage. Le four tunnel est donc un double échangeur de chaleur, de part et d'autre de la zone du palier de cuisson. L'homogénéisation des températures dans tous les points de la section de l'empilage est obtenue par des systèmes de brassage de l'air, des recyclages et l'emploi de brûleurs à grande vitesse de gaz.

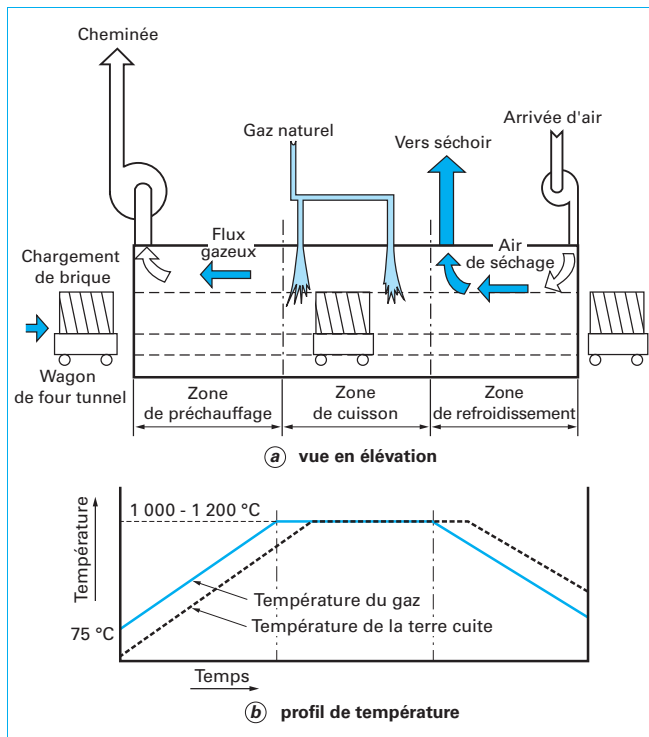


Figure 20 – Vue d'un four tunnel et profil de température (d'après [11])

À l'extraction des fumées, des échangeurs de chaleur récupèrent une partie des calories encore contenues dans les produits de combustion. L'air chaud obtenu est envoyé dans les séchoirs.

La durée totale du passage – donc la durée de cuisson – varie de 10 à 48 h selon le type de produit et les difficultés plus ou moins grandes que les matières premières présentent à la cuisson (figure 20b).

Des conditions typiques de fonctionnement de fours tunnels sont indiquées au tableau 11 [11].

Les fours-tunnels sont équipés de régulations automatiques, qui assurent une cuisson régulière, ainsi que d'une automatisation des mouvements des wagons (entrée et sortie). Ils constituent des appareils de cuisson très précis, dotés de nombreux moyens de réglage.

■ Construction du four tunnel et étanchéité

Le four peut être construit en maçonnerie, ce qui n'est pas très étanche. Pour améliorer l'étanchéité, et donc le rendement thermique, il comporte parfois une enceinte métallique extérieure (four *casing*). La pseudo sole n'est pas non plus très étanche. Pour limiter les fuites, l'étanchéité des soles de wagons avec les parois latérales est souvent assurée par des joints mobiles comme des sablières. Par ailleurs, il y a souvent des joints fibreux pressés entre les wagons. L'étanchéité est sensiblement améliorée.

On trouve aussi des fours « *hydrocasing* » où l'étanchéité, assurée par un bain d'eau, est complète. Chaque wagonnet est entouré d'une jupe qui trempe en permanence dans un bain d'eau qui stagne au fond du four sous les wagons.

Sur la figure 21, on voit une section d'un four tunnel casing avec des joints en sable et des brûleurs en voûte.

■ Empilage des produits

Sur les wagons, les produits sont accumulés dans des empilements suffisamment ouverts pour que le gaz chaud puisse les

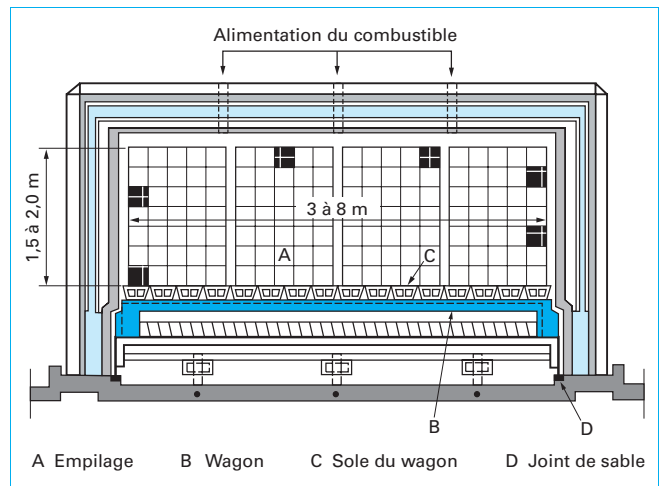


Figure 21 – Section d'un four tunnel

traverser. On a vu que le temps de séjour dépend beaucoup de la façon dont le produit peut être chauffé et refroidi. Les briques sont empilées de façon que l'air chaud les traverse effectivement.

Les tuiles ne sont plus généralement empilées les unes sur les autres. En effet, on veut une forte résistance au gel, pas de porosité ni de perméabilité importantes. Les températures de traitement sont donc généralement plus élevées, ainsi que le risque de déformation. On a donc développé des supports céramiques, appelés « gazettes », dans lesquelles on place les tuiles.

- On distingue d'abord l'**empilement en U** où les tuiles sont placées verticalement sur la tranche dans des gazettes en forme de U. Les gazettes sont ensuite empilées dans le four et supportent les charges.

- Dans l'**empilement en H**, chaque tuile est horizontale, supportée individuellement par une gazette en forme de H. La précision géométrique est très bonne. Les échanges de chaleur sont facilités par l'ouverture de la charge. Par contre, ces gazettes sont coûteuses, ont une certaine durée de vie, emportent de l'énergie à la sortie du four, et sont complexes à manipuler.

■ Fours à rouleaux

Les fours à rouleaux, très utilisés en carreaux, ont été appliqués en terre cuite, principalement aux tuiles. Les tuiles sont transportées, en une seule couche, sur des rouleaux en SiC, menés par l'extérieur. Il n'y a pas de gazette et d'empilement. La cuisson est très rapide (2 à 8 heures).

Les économies d'énergie attendues ne sont malheureusement pas encore au rendez vous dans les premières lignes, car la densité d'enfournement est alors très faible (100 kg/m³).

2.5.3 Combustibles

Les combustibles les plus employés sont principalement le gaz naturel, puis le GPL et le fuel lourd n° 2 ordinaire ou à basse teneur en soufre. La répartition des différentes sources d'énergie thermique est donnée sur le tableau 12.

La crise énergétique a conduit certaines usines à substituer aux combustibles liquides et gazeux des combustibles solides : houille, coke de pétrole, tourbe et des composés organiques de récupération : sciure de bois, écorce, déchets de papeterie, etc.

Pour les briques, et comme il a déjà été précisé, les combustibles organiques sont souvent incluses au mélange argileux, de façon à obtenir, à la fois, énergie et porosité.

Tableau 11 – Conditions typiques d’opération de fours tunnels (d’après [11])

Caractéristiques	Unité	Briques apparentes	Briques à perforations verticales	Briques à perforations horizontales	Tuiles
Production	t/h	1-15	3-15	3-15	3-6
Longueur	m	35-160	60-120	60-120	80-140
Section	m ²	1,3-6,0	4-12	4-12	4-10
Densité d’enfournement	kg/m ³	650-1 500	350-500	250-750	200-400
Température de cuisson	°C	1 000-1 300	900-1 050	950-1 050	1 000-1 150
Energie (cuisson et séchage)	kJ/kg	1 600-3 000	1 000-2 500	1 000-2 500	1 600-3 500
Débit de fumée	m ³ /h	5 000-20 000	10 000-50 000	10 000-50 000	10 000-40 000
Température de fumée	°C	100-230	100-300	100-150	170-200

Tableau 12 – Répartition des combustibles (France 2006)

Type de combustible	Proportion (en %)
Gaz	93
GPL	2
Fuel lourd	5
Solides	< 1

2.5.4 Énergie de cuisson

Au tableau **13**, on donne le bilan thermique récent de fours allemands [12].

Des récupérateurs sont inclus dans le four. En principe, la plus grande partie de l’énergie nécessaire pour les séchoirs peut être rendue disponible par les fours.

2.5.5 Énergie totale

L’énergie totale (cuisson et séchage) varie selon les produits fabriqués, la nature des matières premières et l’équipement. Au tableau **14**, on donne des valeurs typiques pour différents produits dans divers pays.

La terre cuite consomme donc beaucoup d’énergie en production. Dans le prix de revient, l’énergie représente entre 25 et 40 % du total. Dans certains pays en développement, où l’investissement est plus limité et où la main d’œuvre est peu chère, elle peut même atteindre 50 % du prix de revient.

Par ailleurs, malgré l’emploi du gaz naturel, des grandes consommations d’énergie impliquent de fortes émissions de CO₂. Il est donc critique, pour cette industrie, d’économiser l’énergie et d’employer des énergies renouvelables au prix plus faible et non génératrices de gaz à effet de serre.

Il y a cependant possibilité d’amélioration puisque la plus grande partie de l’énergie est principalement échangée et non réellement consommée.

Tableau 13 – Bilan thermique de fours allemands (kJ/kg) (d’après [12])

Postes	Briques de structure	Proportions (en %)	Tuiles	Proportions (en %)
Apport combustible	1 294	74	2 154	103
Apport matériaux	447	26	– 64	– 3
Total apport	1 741	100	2 090	100
Pertes fumées	413	24	757	36
Pertes sortie four produit	223	13,9	251	12
Autres pertes	175	10	333	16
Total pertes	811	46	1 341	64
Disponible pour séchoir	930	54	749	36

2.5.6 Traitement après cuisson

Après cuisson, les produits sont triés à la sortie du four, puis soumis à différents traitements.

■ Engobage et émaillage

Parfois, on engobe ou on émaille les tuiles et les briques de parement sur la partie visible, ou sur la totalité de leur surface, pour leur donner des couleurs spéciales ou pour augmenter l’impermeabilité du produit.

L’engobe est une composition constituée d’argile, d’agents fluxants, d’agents liants organiques, de charge et de pigments (oxydes colorants).

Tableau 14 – Consommation énergétique totale des usines					
Consommation énergétique	Pays	Unité	Briques de structure	Briques apparentes	Tuiles
Gaz naturel	Autriche	kJ/kg	1 020-1 870	2 870	1 970-2 930
Électricité	Autriche	kJ/kg	80-220	270	230-410
Énergie totale	Espagne	kJ/kg	1 500-2 500	2 500-3 000	1 900-2 900
Énergie totale	Allemagne	kJ/kg	919-1 810	1 826-3 310	2 700-4 443

On applique souvent l’engobe sur la pièce après le séchage par pulvérisation dans une chambre de pulvérisation.

L’émail est un mélange similaire, avec plus d’agents fluxants et de charge, qui se transforme par frittage en une masse vitreuse. L’émail est souvent appliqué après une première cuisson.

■ Rectification

Certaines briques sont maintenant collées avec un joint mince. Il est donc nécessaire de les produire avec une hauteur très reproductible (par exemple +/- 0,3 mm). Une telle précision est difficilement obtenue directement en production et ces briques doivent être rectifiées à la bonne dimension. Les rectifieuses comprennent deux grands plateaux diamantés parallèles rotatifs entre lesquels passent les briques.

■ Autres traitements

Les briques de parement et les tuiles sont parfois traitées par un agent hydrophobe (ex. le siliconage ou la lanolinisation) qui modifie le comportement de leur surface lorsqu’on la mouille avec de l’eau.

3. Environnement et salubrité

La protection de l’environnement et la lutte contre les pollutions industrielles est devenue une préoccupation majeure des citoyens et les responsables politiques accordent maintenant une grande importance au développement durable. Le briquetier ou le tuilier ne traite que des éléments naturels. Cependant, l’implantation de grandes unités de production concentre les pollutions éventuelles, et il convient d’en étudier les impacts.

Les principales entrées, et émissions et déchets de la fabrication de la terre cuite sont schématisés sur la figure 22.

3.1 Émissions dans l’air

Les émissions gazeuses sont issues essentiellement de la cuisson des produits de terre cuite dans le four et proviennent du combustible et de composants des argiles [13]. La réglementation européenne et celles de ses différents pays imposent des limites d’émissions.

Sur le tableau 15, on indique par « polluant » les concentrations observées dans les fumées des usines françaises avant épuration, les limites acceptables de la réglementation, l’origine du polluant, les moyens technologiques et les niveaux qu’on peut obtenir avec la meilleure technologie, comme décrit dans le BREF de l’Union européenne [11].

Les émissions dans l’air varient de façon significative entre les usines, selon les argiles traitées, les ajouts et le process. Certaines émissions nécessitent l’emploi de système d’épuration des gaz : filtres à calcaire pour le gaz fluorhydrique HF et systèmes de post-combustions pour les fumées contenant des COV (composés organiques volatiles).

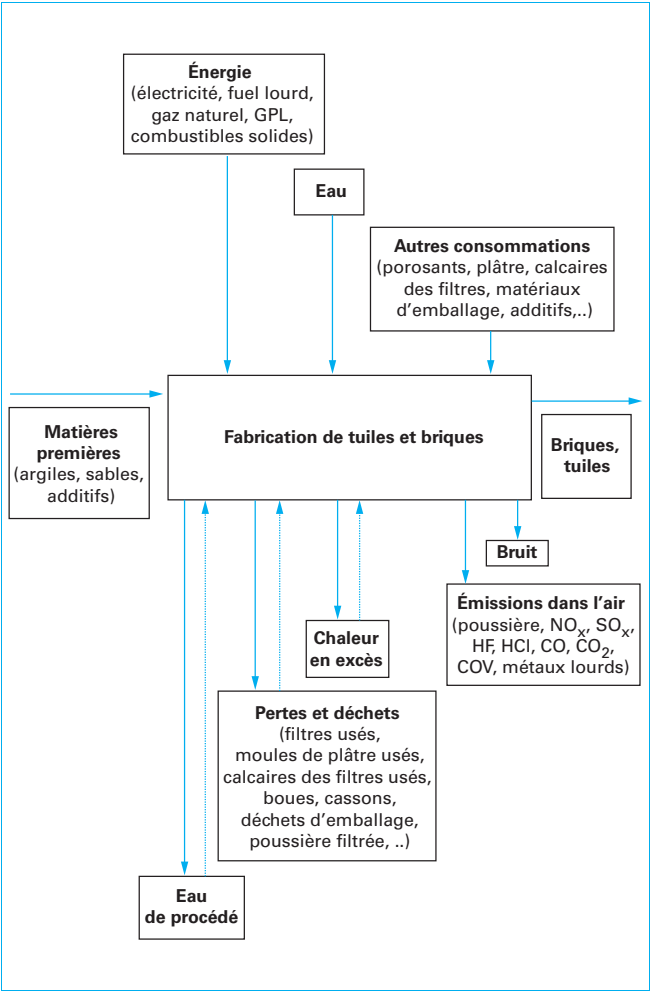


Figure 22 – Intrants et sortants de la fabrication de la terre cuite (source BREF [11])

La poussière est produite à l’extraction en carrière, et en usine : stockage d’argile, préparation du mélange, rectification des briques, nettoyage des wagons et manipulations des produits. Un certain nombre de précautions sont mises en œuvre :

- mouillage des stocks d’argile ;
- traitement des cheminements des engins ;
- nettoyage des roues des camions ;
- plantations de lignes d’arbre autour des carrières ;
- traitement des zones de stockage de produits finis ;
- propreté des installations de production.

Tableau 15 – Emissions gazeuses à la cheminée d’usines françaises (d’après [11])

Composant	Origine	Concentration dans la fumée non épurée (en mg/m ³)	Limites du BREF (en mg/m ³)	Technologie utilisée	Limite réglementaire française (1) (en mg/m ³)
HF	Fluorures dans argiles	1-130	1-10	Filtre à calcaire, injection de chaux	5
HCl	Chlorures dans argiles	0-30	1-30		50
SO ₂	Combustible soufré, sulfates et sulfures de l’argile	0-1 090	500 à 2 000	Emploi de fuel lourd épuré	300
NOx	Produits de combustion, contenu organique de l’argile	5-200	250	Bon contrôle de la combustion, T flamme < 1 200 °C	500
COVx	Contenu organique de l’argile, porosants, combustibles	50-250 (carbone total)	5-20	Post cracking des fumées	110
CH ₄	Fuite de gaz, mauvaise combustion			Bonne maintenance	
CO	Mauvaise combustion	0-1 200		Bonne combustion	100
Métaux lourds	Impuretés de l’argile				Cd, Hg, Th < 0,05 Pb < 1 ZnO ₂ , MnO ₂ < 10
Poussière	Produit de combustion	1-20	1-20	Séparateurs et filtres, bonne maintenance	40

(1) Pour des débits importants

Tableau 16 – Exemples de valeurs limites des rejets d’eau de briqueterie

Points à vérifier	Limites
pH	5,5-8,5
Température	< 30 °C
Matières en suspension totale (MEST)	< 35 mg/l
Demande chimique en oxygène (DCO)	< 125 mg/l
Demande biologique en oxygène en 5 jours (DBO5)	< 30 mg/l
Hydrocarbures totaux	< 10 mg/l
Métaux (totaux ou certains composés : Al, Fe,...)	divers
Azote Kjeldahl	< 30 mg/l
Indice phénol	< 0,3 mg/l
Cyanures	< 0,1 mg/l

Une autre émission importante est le gaz carbonique CO₂. Ce gaz provient de la décomposition des argiles calcaires et des gaz de combustion. En France, la production de CO₂ est de l’ordre de 200 kg/tonne de produit cuit. Pour les briques à perforations verticales, le BREF donne 150 kg/tonne. Comme il est souvent difficile d’agir sur l’argile extraite des carrières, la production de CO₂ ne pourra être limitée que par une baisse des consommations d’énergie fossile non renouvelable.

3.2 Émissions dans l’eau

La production de terre cuite nécessite beaucoup d’eau ; cette dernière est évaporée au séchage sans problème environnemental. En préparation semi-humide, la plupart de l’eau est fournie par l’argile humide de la carrière. À l’usine, les émissions d’eau sont limitées : eau de procédé (engobage, rectification de briques,...), eau d’échangeurs, eau de sas des fours hydrocassings, eau de nettoyage des machines, eau de pluie des parcs de stockage et des toitures. Une partie importante de ces rejets peut être réutilisée en production.

Les émissions d’eau à contrôler proviennent principalement des carrières. L’eau peut être chargée en argiles, en hydrocarbures, et être enrichie en sels minéraux. Les eaux de carrières sont souvent stockées dans des bacs de rétention et de décantation avant leur libération.

Les pays européens, dont la France, ont établi des limites pour les rejets d’eau, qui s’appliquent aussi aux carrières. Dans les Arrêtés d’autorisation des usines, on adapte la réglementation à la situation des briqueteries/tuilerie, et on y trouve souvent les limites reprises dans le tableau 16.

3.3 Déchets

Sur la figure 23, on voit le bilan matière typique d’une usine, avec les différentes pertes en cours de production. Elle utilise deux argiles provenant de deux carrières. Les pertes au formage et les produits cassés au séchage sont directement recyclés. Les pertes matières à la cuisson correspondent principalement à la décomposition du calcaire. Les casses à la cuisson sont utilisées pour réaliser les chemins de roulement de la carrière, ou sont transformées en chamotte et réutilisées en production.

Les autres déchets spécifiques peuvent comprendre le calcaire des filtres (réutilisé en cimenterie), les moules de plâtre des tuiles (souvent recyclés sur place), et des déchets moins spécifiques : déchets d’emballage, lubrifiants usagés, déchets de maintenance,...

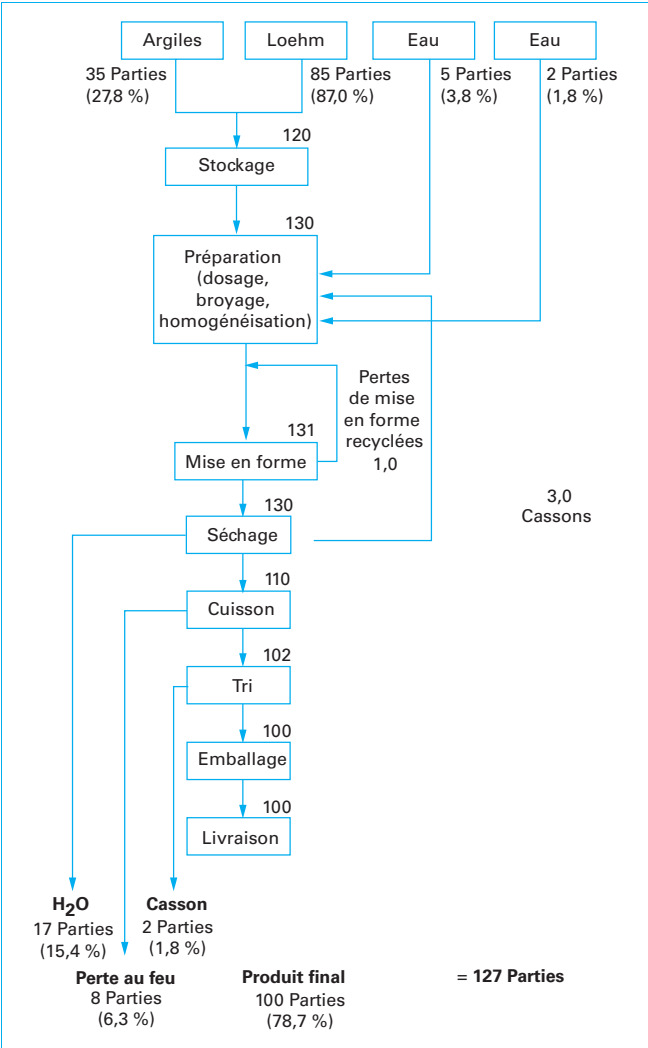


Figure 23 – Entrées et sorties « matière » de la fabrication de briques et tuiles (source BREF)

3.4 Salubrité

Les produits de terre cuite posent peu de problèmes de salubrité et de santé, à la fois, à la production et à l'utilisation sur le chantier de construction.

Le risque le plus important est lié aux poussières. On a vu qu'il y avait des limites réglementaires pour les concentrations de poussière dans les fumées du four. Il y a aussi des concentrations maximales pour les personnels exposés.

La poussière est dangereuse pour le travailleur, en particulier la poussière très fine (< 4,25 µm, dite « alvéolaire ») qui n'est pas arrêtée par la trachée et reste dans les alvéoles des poumons.

Dans la poussière de terre cuite, il y a de la silice cristallisée, en particulier du quartz. La fine poussière de quartz peut provoquer la silicose et des limites de concentration au poste de travail ont été établies dans les différents pays européens. Ces limites varient de 0,05 mg/Nm³ à 0,2 mg/Nm³ (en France, concentration moyenne de 0,1 mg/Nm³ mesurée sur un poste de 8 heures).

Ces niveaux peuvent être obtenus en maintenant propre l'usine, en utilisant des systèmes d'aspiration aux postes les plus préoccupants, en traitant les parcs et routes et en contrôlant les tas d'argile.

Les autres produits chimiques nécessitant une attention sont le carbonate de baryum, les fibres réfractaires, les réfractaires des isolations, et certains émaux et pigments.

4. Conclusions

La terre cuite a subi de nombreuses étapes dans son développement technique. Les méthodes de production actuelles sont très automatisées et capables de fournir un produit de grande qualité.

Les besoins environnementaux exigent maintenant que la production utilise moins d'énergie non renouvelable. Les fours et séchoirs ont déjà subi de grandes améliorations dans leur efficacité énergétique. Elle s'améliorera encore par une plus grande utilisation d'énergie non fossile.

L'article suivant [C 906] décrit les propriétés de la terre cuite et ses principaux produits.