

Plâtre

par **Daniel DALIGAND**

Président du CEN/TC 241 Plâtres et produits à base de plâtre
Secrétaire général du Syndicat national des industries du plâtre

1. Gypse et anhydrite	C 910 – 2
1.1 Gypse naturel.....	— 2
1.2 Anhydrite.....	— 2
1.3 Gypse de synthèse	— 2
2. Produits de déshydratation du gypse	— 3
3. Hydratation et prise	— 4
3.1 Prise	— 4
3.2 Variations de volume	— 5
3.3 Séchage.....	— 5
3.4 Temps de prise et durée d'emploi.....	— 6
4. Fabrication	— 6
4.1 À partir de gypse naturel	— 6
4.2 À partir de gypses de synthèse	— 7
4.3 Conception des plâtres dans l'industrie	— 8
4.4 Produits en plâtre	— 8
5. Variétés	— 9
5.1 Plâtres destinés au bâtiment	— 9
5.2 Plâtres à mouler pour l'art et l'industrie.....	— 11
5.3 Produits pour chapes autolissantes.....	— 11
6. Produits préfabriqués	— 11
6.1 Carreaux	— 11
6.2 Plaques	— 12
6.3 Techniques particulières	— 12
6.4 Produits préfabriqués pour plafond.....	— 13
7. Propriétés	— 13
7.1 Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie.....	— 13
7.2 Humidité des locaux.....	— 13
7.3 Isolation acoustique	— 14
7.4 Correction acoustique	— 14
7.5 Résistance au feu.....	— 15
7.6 Plâtre et environnement	— 15
Pour en savoir plus	Doc. C 910

Connu depuis l'Antiquité, le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction.

Le plâtre a également des usages dans d'autres secteurs d'activité : brasserie, boulangerie, fabrication de moules pour vaisselle et sanitaires.

Le plâtre s'obtient par déshydratation du gypse – roche naturelle ou sous-produit de certaines industries – qui est un sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.

1. Gypse et anhydrite

Le sulfate de calcium se rencontre dans la nature principalement sous les deux formes suivantes :

- hydraté avec deux molécules d'eau par molécule de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : c'est le gypse ;
- anhydre (CaSO_4) : c'est l'anhydrite.

On peut également le rencontrer, dans certaines situations géologiques particulières, hydraté avec une fraction de molécule d'eau par molécule de sulfate de calcium : c'est la bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$), métastable dans les conditions normales et qu'on ne trouve qu'en faible quantité (moins de 1 % en masse) dans le gypse.

Le gypse et l'anhydrite existent également comme sous-produits de certaines industries chimiques ou comme produits de désulfuration des fumées qui peuvent être utilisés, au même titre que les sulfates de calcium naturels, pour la fabrication des plâtres et produits en plâtre.

1.1 Gypse naturel

Le gypse appartient à la famille des *évaaporites* qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Plusieurs théories s'affrontent cependant à propos des conditions qui ont permis le dépôt de bancs de gypse très pur d'épaisseur importante (pouvant atteindre 18 à 20 m). Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire (trias et jurassique) ou tertiaire (éocène et oligocène). Le gypse est présent en quantités relativement importantes dans la nature, mais inégalement réparties à la surface du globe.

Les principaux gisements français sont situés dans :

- le Bassin parisien (éocène) ;
- le Vaucluse (oligocène) ;
- les Alpes (trias) ;
- le Jura (trias) ;
- les Pyrénées et les Landes (trias) ;
- les Charentes (jurassique).

1.1.1 Formes cristallines

Le gypse cristallise dans le **système monoclinique**. À l'échelle moléculaire, il présente une **structure feuilletée** dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium.

Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature sont :

- sous forme macrocristallisée : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse lenticulaire, la rose des sables ;
- sous forme microcristallisée : l'albâtre, le gypse fibreux, le gypse saccharoïde, le gypse éolien.

Le gypse exploité dans l'industrie plâtrière est une roche microcristallisée à grains généralement fins (gypse saccharoïde). Il est rarement pur et se trouve mélangé à des impuretés en nombre et proportion variables d'une carrière à l'autre : argile, calcaire, silice, dolomie, anhydrite, etc. D'autres impuretés syncristallisées, présentes en quantités très faibles, colorent généralement les gypses naturels en rose, beige, gris, etc.

1.1.2 Caractéristiques physico-chimiques

Elles sont les suivantes :

- formule chimique : $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$;
- masse volumique : $2,31 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- système cristallin : monoclinique ;
- solubilité (en grammes de sulfate de calcium par kilogramme d'eau) :

- à 3 °C : 1,81,
- à 20 °C : 2,04,

- à 38 °C : 2,10 (solubilité maximale),
- à 100 °C : 1,69 ;

Nota : la solubilité du gypse est sensiblement plus forte dans l'eau salée (eau de mer par exemple).

— dureté (échelle de Mohs) : 1,5 à 2 suivant l'orientation de la face cristalline.

1.2 Anhydrite

L'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les formations gypseuses et salifères, ou dans certains gîtes métallifères.

On considère qu'elle s'est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet d'une pression importante lors de plissements géologiques.

En France, l'anhydrite naturelle, exploitée essentiellement en Lorraine, est destinée soit à la fabrication du ciment, soit à la fabrication d'un liant employé pour la confection de murs de sécurité dans les anciennes galeries de mines.

Des liants d'anhydrite naturelle ou chimique sont également fabriqués en Allemagne, en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et en France pour la réalisation de chapes de revêtements de sols.

L'anhydrite chimique est un sous-produit de la fabrication de l'acide fluorhydrique principalement et de l'acide phosphorique accessoirement.

1.3 Gypse de synthèse

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

- la fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) par attaque sulfurique du phosphate naturel ;
- la fabrication d'autres acides minéraux (acide borique : borogypse, acide fluorhydrique : fluorogypse) ou organiques : organogypses (acide citrique, tartrique, etc.) La fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2) conduit également à une production de gypse appelé titanogypse ;
- la désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux énanhydride sulfurique puis sa réaction avec de la chaux, provoquée dans le but d'éliminer le soufre des gaz de combustion des centrales thermiques, produit un gypse appelé désulfogypse (*FGD gypsum* en anglais, *REA Gips* en allemand).

Des quantités importantes de phosphogypse et de désulfogypse sont ainsi produites annuellement dans le monde.

Le développement de l'urbanisation de certaines régions et l'importance croissante des préoccupations d'environnement sont autant de contraintes pesant sur l'exploitation du gypse naturel. Dans les pays d'Europe occidentale, les gisements de gypse seront à terme soit inexploitable (par exemple en Île-de-France où une très faible partie des réserves de gypse existantes pourra être exploitée du fait de contraintes diverses), soit en voie d'épuisement. C'est une des raisons pour lesquelles l'utilisation de certains gypses de synthèse comme matière première pour la fabrication du plâtre s'avère une solution intéressante.

L'utilisation du **phosphogypse** dans l'industrie du plâtre a été tentée dans de nombreux pays dans les années 1960-1970 mais a dû être abandonnée progressivement pour des raisons économiques et parfois techniques. En effet, l'élimination nécessaire des impuretés provenant des phosphates naturels, présentes dans le phosphogypse et parfois sous forme syncristallisée, exige des épurations chimiques coûteuses. Par ailleurs, le phosphogypse se présente toujours sous forme humide (17,5 à 25 % d'eau par rapport à la masse du produit sec) et cela implique un traitement thermique plus important que celui du gypse naturel qui ne contient que quelques pour-cent en masse d'humidité.

Tableau 1 – Critères de qualité pour le gypse de désulfuration comme matière première

Paramètre	Formule chimique ou symbole	Unité	Critère de qualité
Humidité libre	H	% en masse	< 10
Sulfate de calcium dihydraté	CaSO ₄ · 2 H ₂ O	% en masse	> 95
Oxyde de magnésium soluble dans l'eau	MgO	% en masse	< 0,10
Oxyde de sodium	Na ₂ O	% en masse	< 0,06
Chlorure	Cl	% en masse	< 0,10
Dioxyde de soufre	SO ₂	% en masse	< 0,25
pH			5 à 9
Couleur		Ry	Blanc mais d'autres colorations sont admises en fonction de l'utilisation
Odeur			Neutre
Toxicité			Non toxique

Si l'utilisation du phosphogypse s'est révélée techniquement et économiquement inadaptée, il n'en est pas de même de celle du gypse de désulfuration des fumées de centrales thermiques, le **désulfogypse**. Toutefois, l'utilisation du désulfogypse présente encore certains inconvénients par rapport à l'utilisation de gypses naturels. En effet, il contient des impuretés qui le rendent, en général, impropre à la fabrication des plâtres pour enduits et surtout des plâtres à mouler. Ces impuretés entraînent aussi parfois une légère coloration du plâtre.

Par ailleurs, la fabrication du lait de chaux nécessaire à la fabrication du désulfogypse demande l'ouverture de carrières de calcaire. Ainsi, la fabrication du désulfogypse passe par l'exploitation de deux types de carrières, au lieu d'une seule dans le cas du gypse naturel.

La France dispose de peu de ressources en ce domaine, mais l'Allemagne, la Grande-Bretagne et d'autres pays européens sont en mesure de fournir des quantités importantes de désulfogypse.

L'industrie européenne du plâtre (Eurogypsum, association européenne des producteurs de gypse et fabricants de plâtre et produits en plâtre) et les sociétés productrices d'électricité ont défini un cahier des charges fixant les critères de pureté rendant les désulfogypses propres à l'emploi comme matière première (tableau 1). Elles ont demandé de les cataloguer comme sous-produits à usage industriel et non comme déchets.

D'ores et déjà, une partie importante du plâtre est produit en Europe (Allemagne, Benelux...), aux États-Unis et au Japon à partir de gypse de désulfuration et cette technique est amenée à se développer dans les années à venir.

2. Produits de déshydratation du gypse

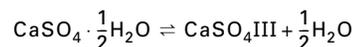
La fabrication du plâtre repose sur un principe relativement simple : l'élimination totale ou partielle de l'eau de constitution du gypse. Cependant, dans la pratique, cette opération a des implications complexes mettant en jeu des phénomènes de cristallisation difficiles à maîtriser.

Soumis à la chaleur, le gypse conduit à une série de produits partiellement hydratés ou anhydres. Aux environs de 100 °C, on obtient

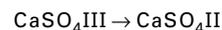
les semi-hydrates α ou β (selon que l'on opère respectivement sous pression de vapeur d'eau ou à l'air libre) suivant la réaction :



Vers 200 °C, on obtient l'anhydrite III ou anhydrite soluble (instable) qui se réhydrate très rapidement en semi-hydrate au contact de l'eau en phase vapeur :

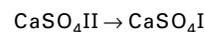


Vers 220 °C pour le semi-hydrate α , et 350 °C pour le β , l'anhydrite III se transforme en anhydrite II stable (surcuit) :



L'anhydrite II se réhydrate lentement au contact de l'eau liquide.

Vers 1 230 °C se produit à nouveau une réaction de transformation :



L'anhydrite I ne se réhydrate que très difficilement.

Au-delà de 1 250 °C, on obtient la décomposition de l'anhydrite I :



Le tableau 2 résume les caractéristiques des différentes phases de déshydratation du gypse.

Les différents produits de la déshydratation du gypse ayant une application industrielle dans la fabrication des plâtres sont : le semi-hydrate α , le semi-hydrate β et l'anhydrite II (anhydrite insoluble ou surcuit). En outre, l'anhydrite III (ou soluble) peut être présente en quantités variables.

Le **semi-hydrate** α est compact et cristallin. Sa solubilité dans l'eau est inférieure à celle du composé β . Il donne avec l'eau des mélanges fluides. Le **semi-hydrate** β est floconneux et présente des fissures écaillées. Sa solubilité dans l'eau est supérieure à celle du composé α . Il donne avec l'eau des mélanges plus épais. Il demande donc une plus forte quantité d'eau de gâchage et il a un temps de prise plus long. Le tableau 3 donne les propriétés caractéristiques de deux variétés usuelles de semi-hydrate.

Tableau 2 – Phases de déshydratation du gypse

Phase	CaSO ₄ · 2 H ₂ O	CaSO ₄ · 1/2 H ₂ O		CaSO ₄		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
Appellation	Gypse	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β	Anhydrite III ou anhydrite soluble	Anhydrite II ou anhydrite insoluble	Anhydrite I
Système cristallin	monoclinique	rhomboédrique		hexagonal	orthorhombique	cubique à faces centrées
Teneur en eau (% en masse)	20,92	6,20	6,20	0	0	0
Masse volumique (kg/m ³)	2,31 · 10 ³	2,76 · 10 ³	2,63 · 10 ³	2,58 · 10 ³	2,93 · 10 ³ à 2,97 · 10 ³	2,93 · 10 ³ à 3,0 · 10 ³
Masse molaire (g/mol)	172,20	145,15	145,15	136,10	136,10	136,10
Volume molaire (cm ³ /mol)	74,50	52,40	55,20	52,80	45,8 à 46,4	

Tableau 3 – Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate

Propriétés	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Masse volumique (kg/m ³)	2,76 · 10 ³	2,63 · 10 ³
Temps de prise (min)	15 à 20	25 à 35
Expansion (mm/m)	2,8	1,6
Résistance à la traction (1)(MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression (1) (MPa)	56	5,6
Solubilité dans l'eau à 20 °C (en g de CaSO ₄ pour 100 cm ³)	0,63	0,74

(1) à l'état sec

Toutes les formes intermédiaires existent entre les formes α et β. Les **conditions de formation** de l'une et l'autre de ces variétés sont les suivantes.

Le semi-hydrate α est produit par déshydratation en atmosphère de vapeur saturée (ou en solution saline au-dessus de 45 °C), c'est-à-dire une atmosphère dans laquelle le semi-hydrate a la possibilité de cristalliser sous forme compacte. C'est le procédé dit de *cuisson humide*.

Le semi-hydrate β est produit par déshydratation du gypse dans les marmites, fours rotatifs ou installations diverses. C'est le procédé dit de *cuisson à sec*, dans lequel les circonstances particulières de construction de certains matériels permettent également de produire une certaine proportion de semi-hydrates de formes intermédiaires.

Le semi-hydrate α est le constituant essentiel des plâtres à mouler de très haute qualité (plâtres dentaires en particulier).

Le semi-hydrate β entre dans la composition des plâtres pour enduits en proportions variables avec l'anhydrite soluble III et l'anhydrite insoluble II. Les plâtres à mouler et les plâtres pour pré-fabrication sont constitués uniquement de semi-hydrate β.

3. Hydratation et prise

3.1 Prise

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété, lorsqu'ils se trouvent au contact de l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives :

- reprise de l'eau pour reformer le dihydrate ;
- cristallisation (qui constitue la prise proprement dite) ;
- durcissement.

Temps de prise : temps qui s'écoule entre le début du gâchage et le durcissement du plâtre.

Début de prise : moment où le plâtre commence à cristalliser (le sillon tracé par une lame de couteau dans une galette de plâtre ne se referme plus).

Fin de prise : moment où la pâte de plâtre n'est plus utilisable, le plâtre achève son durcissement (un pouce fermement appliqué sur la surface ne laisse plus de trace).

De nombreux travaux ont été effectués en vue d'éclairer ces aspects du problème. Ils ont été l'occasion d'abondantes controverses, notamment entre les partisans de la théorie de la cristallisation et ceux de la théorie colloïdale.

On admet que la phase du **durcissement** traduit un phénomène mécanique lié à la cristallisation du sulfate de calcium formé et qu'il atteint une valeur d'autant plus élevée que la cohésion interne des cristaux et leur adhérence mutuelle sont plus fortes.

La phase de **début de prise** a davantage été discutée. Mais, reprenant une constatation selon laquelle le semi-hydrate donne des solutions sursaturées d'où le sulfate dihydraté se dépose, Le Châtelier a développé une théorie de la cristallisation à laquelle se sont, en définitive, ralliés la plupart des chercheurs.

Pour l'essentiel, cette théorie distingue trois phases successives : une phase chimique d'hydratation, une phase physique de cristallisation et une phase mécanique de durcissement.

Elle explique la cristallisation du dihydrate suivant le processus de cristallisation commun à tous les sels au contact de l'eau : par une dissolution préalable du sel assurant aux ions une mobilité qui leur permet de se déposer selon un ordre géométrique rigoureusement déterminé.

Dans le cas de la pâte de plâtre, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre tout le semi-hydrate qu'elle contient, mais comme la fraction passée en solution saturée donne du dihydrate moins soluble, qui se trouve dès sa formation en solution sursaturée, ce dihydrate se dépose en rendant possible la dissolution d'une nouvelle fraction de semi-hydrate, et ainsi de suite.

De nombreuses recherches et divers travaux [1][2][3][4] faisant appel à des moyens modernes (rayons X, microscopies électronique et optique, technique des atomes marqués) semblent bien établir définitivement cette explication du phénomène de la prise par la théorie de la cristallisation.

Celle-ci, du reste, fait l'objet de certaines tentatives d'interprétation mathématique embrassant les phénomènes de dissolution et de cristallisation et se traduisant par des formules prenant en compte différents paramètres caractéristiques du semi-hydrate de départ, du dihydrate final, de la concentration initiale du semi-hydrate dans la pâte, et reliant la fraction de la masse transformée en dihydrate au temps nécessaire à cette transformation.

L'influence de la température sur le phénomène de la prise est encore controversée. Cependant, et tout au moins dans la limite de 80 °C, il semble bien que la température agisse sur la période initiale dite de nucléation, qui précède la précipitation des premiers cristaux de dihydrate, plutôt que sur la vitesse de prise proprement dite.

L'abaissement de la température tend alors à ralentir la dissolution du semi-hydrate ainsi que la diffusion des ions calcium et sulfate. Par contre, pour de nombreux plâtres, elle multiplie le nombre de points favorables à la nucléation et augmente la solubilité du semi-hydrate. En définitive, l'action de la température dépend de la prédominance de l'un ou de l'autre des facteurs précédents.

Dans la pratique courante, pour les températures comprises entre 0 et 80 °C, on observe que le temps de prise le plus court s'obtient avec des pâtes dont la température est voisine de 35 °C, et qu'il devient très long aux basses températures ainsi qu'au voisinage de 80 °C.

3.2 Variations de volume

Il est intéressant d'étudier les variations de volume qui accompagnent la prise et d'abord celles qui se rattachent à la phase initiale d'hydratation.

Si l'on considère le cas du semi-hydrate, la réaction d'hydratation donne, compte tenu des masses molaires et des masses volumiques des semi-hydrates et dihydrates (tableau 2), les volumes molaires suivants :

Semi-hydrate α (SH)	Eau	Dihydrate (DH)
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	+	$\frac{3}{2}\text{H}_2\text{O}$
	→	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
$\frac{145,15}{2,76} = 52,6 \text{ cm}^3/\text{mol}$	$\frac{3}{2} \times \frac{18}{1} = 27 \text{ cm}^3/\text{mol}$	$\frac{172,20}{2,31} = 74,5 \text{ cm}^3/\text{mol}$
solide	liquide	solide

Nota : les masses volumiques sont exprimées en g/cm³.

À partir de l'anhydrite II, on obtient respectivement 45,8 à 46,4 cm³/mol, 36 cm³/mol et 74,5 cm³/mol pour l'anhydrite II, les deux moles d'eau et le dihydrate.

Le volume absolu du nouveau solide résultant de la réaction des constituants initiaux est supérieur (de quelque 40 % pour le semi-hydrate et 60 % pour l'anhydrite) au volume du solide initial, mais il reste inférieur (de 7 ou 10 %) à la somme des volumes absolus des constituants.

Cela explique que le solide obtenu par hydratation du semi-hydrate soit notablement **poreux** . Cela est vrai, même si la pâte est gâchée avec l'exacte quantité d'eau nécessaire à l'hydratation (soit 36 g d'eau pour 145 g de semi-hydrate ou 27 g d'eau pour 136 g d'anhydrite) puisque le dihydrate résultant de l'hydratation occupe la totalité de l'espace qu'occupait au départ la pâte formée par le semi-hydrate ou l'anhydrite et l'eau. La différence représente le volume global occupé par les pores (environ 7 % du volume apparent du dihydrate dans le premier cas et 10 % dans le second cas).

Mais dans la réalité, le gâchage de la pâte exige, pour être possible, une quantité d'eau bien supérieure à celle qui correspond à la réaction chimique (2 à 3 fois dans des cas plutôt exceptionnels et couramment 4 à 5 fois, voire davantage). La porosité réelle qui en résulte peut atteindre une valeur très largement supérieure à la valeur théorique.

Après la phase initiale d'hydratation, il se produit bien, liée aux phases de cristallisation et de durcissement, une augmentation de volume du produit en voie de cristallisation du fait du développement des cristaux de dihydrate formés qui dilatent le squelette de la masse poreuse.

Mais ce gonflement est de quelque 0,2 à 1,5 % du volume apparent de la pâte, c'est-à-dire négligeable par rapport aux variations du volume absolu, et sans influence appréciable sur la porosité finale. Cette **porosité de constitution** est un important facteur parmi ceux qui rendent compte des **propriétés isolantes** du plâtre.

Par ailleurs, l'expérimentation montre la faible et brève contraction de la pâte qui accompagne la diminution des volumes apparents, dans les premières minutes, avant que l'épaississement ne s'y oppose. Cette contraction est vite annulée et dépassée par le gonflement plus important qui apparaît dès que l'hydratation atteint 5 à 10 %. Disparue avant le temps d'emploi du plâtre, la contraction est sans conséquence pratique.

Le gonflement d'hydratation dû à la croissance des cristaux est une caractéristique générale du plâtre favorable à l'adhérence, à la bonne tenue au retrait et au moulage.

Quand la pâte est baignée d'eau, la contraction ne se produit pas et le gonflement de la pâte apparaît dès le début de la prise.

Le gonflement est facile à observer. Relativement important et prolongé, il est un peu plus fort lorsque l'on opère sur une pâte baignée d'eau, cette eau freinant le tassement du solide. Le gonflement peut d'ailleurs varier sensiblement avec différents paramètres : conditions de gâchage, atmosphère de conservation, etc. Il augmente toujours avec la proportion de plâtre dans la pâte.

Le gonflement du semi-hydrate intervient rapidement, comme son hydratation, terminée dans les deux heures suivant le gâchage, alors que celui de l'anhydrite insoluble obtenu à température sensiblement plus élevée est encore négligeable au bout de 2 h et n'intervient que très lentement.

3.3 Séchage

Comme nous l'avons dit, le gâchage du plâtre exige en pratique, une quantité d'eau très supérieure à celle strictement nécessaire à l'hydratation. Le séchage s'effectue soit naturellement en laissant l'eau excédentaire s'éliminer d'elle-même, l'équilibre s'établissant entre le dihydrate obtenu et le milieu ambiant naturel, soit artificiellement en commandant et favorisant cette élimination par exposition de la masse à une ambiance artificielle contrôlée.

Dans les deux cas, il importe naturellement, pour que la prise puisse s'effectuer, que les conditions de séchage maintiennent à tout moment et en tout point du produit une quantité d'eau suffisante pour le bon développement de l'hydratation et, par conséquent, de la cristallisation et du durcissement.

Le déroulement et la croissance organisée de la cristallisation et, par suite, le bon durcissement exigent en outre que l'édifice cristallin en voie de formation ne soit pas détruit, c'est-à-dire que ce solide cristallin naissant soit abandonné librement à lui-même et ne soit pas soumis à agitation. C'est ce que traduit, dans le langage pratique courant, la règle selon laquelle une pâte de plâtre en cours de prise ne doit jamais être rebattue.

Il convient de signaler que le séchage s'accompagne d'un retrait extrêmement léger qui atteint tout au plus le dixième du gonflement d'hydratation. Le comportement du plâtre est donc très différent de celui des ciments dont le retrait de séchage est du même ordre de grandeur que le gonflement résultant de leur hydratation.

3.4 Temps de prise et durée d'emploi

Les temps de début et de fin de prise font l'objet de définitions normalisées et sont déterminés par différentes méthodes selon la consistance de la pâte de plâtre.

Dans la pratique, on définit également une durée d'emploi correspondant au temps pendant lequel la pâte de plâtre peut être utilisée. Ce temps est variable selon le procédé de mise en œuvre (application d'un enduit, coulage, moulage, etc.).

L'addition de certains produits minéraux ou organiques, agissant sur la solubilité des phases anhydres ou les vitesses de dissolution, permet d'intervenir sur les temps de prise et les durées d'emploi.

3.4.1 Accélérateurs

Dans le cas notamment de la préfabrication, il peut être nécessaire d'accélérer la prise du plâtre pour procéder à un démoulage plus rapide. On fait donc appel à des accélérateurs qui sont des produits minéraux formant des germes de cristallisation (gypse broyé par exemple) ou diminuant la solubilité du sulfate de calcium dihydraté (sulfates – sauf sulfate de fer–, acides sulfurique, chlorhydrique ou nitrique, chlorures, bromures et iodures alcalins, bichromate de potassium).

3.4.2 Retardateurs

Pour de nombreuses utilisations dans le bâtiment, l'art ou l'industrie, il est nécessaire de retarder la prise du plâtre pour permettre un travail plus facile. Plusieurs mécanismes peuvent être mis en jeu :

- diminution de la vitesse de dissolution des phases anhydres ;
- diminution de la solubilité des phases anhydres ;
- adsorption d'ions à la surface des cristaux de gypse en cours de croissance et incorporation de ces ions dans leur réseau ;
- formation de complexes limitant la diffusion vers les cristaux de gypse.

Les principaux retardateurs sont les phosphates alcalins et d'ammonium, les acides organiques et leurs sels solubles (par exemple l'acide citrique et les citrates), les protéines dégradées. En général, l'efficacité des sels d'acides organiques suit la séquence : $H^+ > K^+ > Ca^{2+}$.

3.4.3 Épaississeurs et rétenteurs d'eau

Les épaississeurs, en augmentant la consistance de la pâte de plâtre, permettent d'avancer le début d'emploi du plâtre. Un épaississeur bien connu est l'**amidon**.

Généralement, ces produits ont aussi un effet retardateur de prise limité ; associés à des retardateurs plus puissants, ils permettent d'utiliser la pâte dès la fin du gâchage et d'augmenter la durée d'emploi. Ils facilitent en outre la mise en œuvre. Épaississeurs et retardateurs ont permis le développement des plâtres modernes à long temps d'emploi et des plâtres projetés.

Certains épaississeurs sont également rétenteurs d'eau, c'est-à-dire qu'ils retiennent dans la pâte, en empêchant son évaporation ou son absorption par le support, une certaine quantité d'eau qui permet au plâtre de s'hydrater normalement durant la prise.

L'absence de rétenteur d'eau conduirait au grillage du plâtre simplement retardé appliqué sur son support.

Nota : le grillage correspond à un séchage sur le support sans cristallisation.

Parmi les produits épaississeurs, rétenteurs d'eau, citons les éthers cellulose employés depuis les années 1960 : méthylcellulose (MC), carboxyméthylcellulose (CMC), et les autres dérivés hydroxyéthylcellulose (HEC), hydroxypropylcellulose, etc.

L'action des éthers cellulose dépend de la masse molaire du produit, de la concentration, de la température. Ils sont employés seuls ou en mélange à très faible concentration, de l'ordre du millième de gramme par gramme.

4. Fabrication

4.1 À partir de gypse naturel

La fabrication du plâtre à partir du gypse naturel comporte trois étapes :

- l'extraction et la préparation du gypse ;
- la cuisson ;
- l'obtention des produits finis.

4.1.1 Extraction et préparation du gypse

L'extraction se pratique en carrières souterraines ou à ciel ouvert.

■ Extraction en galeries souterraines

Lorsque l'épaisseur des terres de recouvrement est importante (supérieure à 5 fois l'épaisseur de gypse) ou que la couche de gypse se trouve sous un site classé ou protégé, l'extraction se fait en galeries souterraines par la méthode des chambres et piliers abandonnés.

Selon les caractéristiques du gypse et des terrains encaissants, l'exploitant peut être amené à laisser en place une partie importante de la masse de gypse, c'est pourquoi cette technique est de moins en moins pratiquée.

■ Extraction à ciel ouvert

Ce mode d'exploitation permet l'enlèvement total du gypse mais présente des inconvénients en cas d'intempéries (difficulté d'accès, humidification du gypse).

■ Préparation du gypse

Avant d'être introduit dans les fours, le gypse subit un **concassage** et un **criblage** avec recyclage en fonction du procédé de cuisson. Le gypse peut éventuellement être séché dans des cylindres rotatifs avant d'être cuit. Des stocks sont constitués pour éviter de créer des discontinuités dans l'approvisionnement des fours.

4.1.2 Cuisson

Il existe de nombreux appareillages de cuisson que l'on classe habituellement suivant :

- le mode de cuisson : atmosphère sèche ou humide ;
- le type de four : fixe, rotatif ou autre.

■ En atmosphère sèche

Les gaz de combustion viennent en contact avec le gypse à traiter. Plusieurs types de fours sont utilisés.

- **Fours fixes** : four culé et four droit, analogue au four à chaux, ils sont abandonnés aujourd'hui.

- **Fours rotatifs** : il existe de très nombreux types de fours rotatifs constitués par des cylindres en tôle de 1 à 2,50 m de diamètre et de 10 à 30 m de long. Ils peuvent être ou non revêtus intérieurement, et sur une certaine longueur, de briques réfractaires (c'est le cas pour la fabrication du plâtre surcuit). Le four comporte à l'intérieur un système de pales permettant le brassage et le relevage de la matière. Les gaz peuvent suivre la marche du gypse ou au contraire suivre un chemin inverse. Ces fours permettent la fabrication, suivant les températures, soit du semi-hydrate (entre 110 et 180 °C), soit du plâtre surcuit anhydrite II (au-delà de 500 °C).

Les fours modernes sont automatisés et munis de **dépoussiéreurs** très efficaces (cyclones, filtres à manches, électrofiltres). Ils peuvent traiter de 5 à 30 t de gypse à l'heure suivant leurs caractéristiques et la variété de sulfate à obtenir.

- **Grilles de cuisson** : elles sont utilisées principalement en Allemagne.

■ En atmosphère humide

- **Fours à cuisson indirecte** : il existe également de très nombreux fours à cuisson indirecte, où le combustible ou les gaz ne sont pas en contact direct avec la matière. Parmi ceux-ci, mentionnons :

- les fours fixes du type four de boulanger (abandonnés) ;
- les fours autoclaves : chauffés à la vapeur sous pression de $2 \cdot 10^5$ à $12 \cdot 10^5$ Pa. On obtient des plâtres (semi-hydrate α) de très bonne qualité, très durs et utilisés comme plâtre de moulage ;
- les marmites : le gypse finement broyé est déversé dans une marmite en tôle fixe ou rotative placée au-dessus d'un foyer. La vapeur d'eau est évacuée par une cheminée. La marmite contient un agitateur vertical brassant continuellement le gypse (marmite fixe). La marmite peut également tourner et le gypse est alors homogénéisé par des palettes fixées à l'intérieur de la marmite. La vidange se fait par une trappe, la température peut atteindre 180 °C. Le produit obtenu est très homogène, mais cette cuisson ne permet pas une grande production ; le procédé est, de plus, assez onéreux. Les marmites américaines peuvent contenir jusqu'à 15 ou 20 t de gypse finement moulu. La cuisson, à 180 °C, dure 2 h environ et le fioul ou le gaz naturel sont souvent utilisés comme combustibles. Les marmites coniques anglaises à cuisson immergée, qui ont d'excellents rendements énergétiques, sont employées pour la production de semi-hydrate de préfabrication pour plaques de plâtre.

- **Fours rotatifs** : le gypse broyé finement est déversé dans un four rotatif fermé et chauffé extérieurement. Les fours les plus utilisés sont les fours Beau ou leurs variantes, véritables marmites allongées, tournantes, à chargement et vidange pratiquement automatiques (diamètre de l'ordre de 2 m, longueur de 8 à 10 m). Après cuisson, la moitié de la matière est déversée grâce à une inversion du sens de rotation du tube muni de releveurs intenses et l'on complète la charge avec du gypse froid à traiter qui peut ainsi se réchauffer rapidement. La température à l'intérieur est de 150 à 180 °C et le débit de ces fours de 4 à 8 t/h.

- **Autres types de fours** : il existe encore différents types de fours utilisés en Europe. Citons par exemple :

- les fours broyeurseuseurs utilisés pour la production du plâtre à préfabrication ;
- les fours à lit fluidisé ;

- les vis Holoflites (sorte de vis creuse sans fin parcourue par un fluide chauffant) ;
- les cuiseurs Flash.

Des recherches menées par les sociétés plâtrières se poursuivent en vue d'utiliser l'**énergie solaire** pour la cuisson du gypse. En l'état actuel de ces recherches, les rendements restent insuffisants pour une production industrielle.

En règle générale, dans les fours couramment utilisés, les consommations de fioul pour la cuisson sont de l'ordre de 25 à 35 kg/t pour le semi-hydrate et de 35 à 50 kg/t pour le surcuit (anhydrite).

4.1.3 Moutures, mélange, distribution

Autrefois, le gypse était cuit en morceaux assez gros qui renfermaient, à la fin du traitement, à la fois du semi-hydrate et de l'anhydrite. Les morceaux étaient ensuite broyés pour obtenir, en une seule opération, le plâtre de construction. Ce dernier s'obtient actuellement par mélange en proportions convenables de semi-hydrate et d'anhydrite.

La finesse des plâtres est un facteur important à considérer. Après la cuisson, la matière est broyée dans des appareils de types assez différents d'une plâtrière à l'autre.

Le plâtre peut ensuite être bluté, c'est-à-dire séparé en classes granulométriques différentes à l'aide de :

- bluteries rotatives ;
- prisme hexagonal creux incliné sur lequel est tendue une tôle métallique au travers de laquelle passe le plâtre ;
- tube cylindrique rotatif revêtu d'une toile métallique (*trommel*) ;
- tamis vibrants ;
- séparateurs à air.

Des ajouts de produits destinés à modifier les caractéristiques de la pâte de plâtre gâché ou les qualités finales de l'enduit sont alors effectués.

Le plâtre ainsi parvenu à l'état de poudre d'une granulométrie bien déterminée est entreposé dans des silos.

Il peut être expédié directement en vrac dans des camions conteneurs, ou mis en sacs kraft de 40 kg par des machines automatiques rapides (60 t à l'heure) et précises. Le chargement est effectué directement sur camion ou wagon à l'aide de transporteurs munis d'un tapis télescopique. Le plâtre stocké quelques jours parfait son homogénéisation et subit un **vieillessement** favorable à sa qualité.

4.1.4 Contrôles de fabrication

La marche des appareils de production est contrôlée en permanence et régulée par des cabines de télécommande. Au sortir des fours et avant la mise en silo, les caractéristiques chimiques et physiques du produit sont contrôlées 24 h sur 24. Ces contrôles portent notamment sur la granulométrie, les temps de prise et les résistances mécaniques en flexion et en compression. Les contrôles effectués varient selon la nature des plâtres fabriqués. Ils sont destinés à garantir, dans tous les cas, le respect des caractéristiques souhaitées par l'utilisateur.

4.2 À partir de gypses de synthèse

Le **gypse de désulfuration** constitue la principale matière première pour la fabrication de plâtres et produits en plâtre. Les phosphogypses sont en voie d'abandon en raison des problèmes techniques et économiques qu'ils posent et les autres variétés de gypse chimique (borogypse, titanogypse...) sont produits en quantité trop faible pour justifier un investissement relativement lourd.

Il existe une douzaine de **procédés de désulfuration** des gaz et fumées qui conduisent à des gypses utilisables par l'industrie plâtrière. Le gypse de désulfuration se présente sous la forme d'une boue qui doit être séchée puis agglomérée en morceaux de quelques millimètres. Le désulfogypse peut ensuite être traité comme un gypse naturel : déshydratation, broyage à la finesse désirée, etc.

4.3 Conception des plâtres dans l'industrie

Chaque qualité de plâtre a été conçue pour répondre à un besoin particulier. Cela a nécessité, dans un premier temps, la définition précise des caractéristiques à rechercher pour satisfaire ce besoin puis la recherche des moyens à mettre en œuvre. Ils sont à choisir dans un arsenal qu'ont su constituer au fil du temps l'exploitant et l'homme de laboratoire. D'une façon générale, il faut définir :

- le gypse le mieux adapté ;
- la composition du plâtre de base ;
- les procédés de cuisson et de broyage les plus aptes à produire le plâtre de base ;
- les ajouts, qualitativement et quantitativement ;
- le type de mélange, le conditionnement, etc.

Exemple : la fabrication d'un **plâtre à mouler** à hautes performances mécaniques demande l'utilisation du gypse le plus pur. Par contre, certains **plâtres à projeter** s'accommodent assez bien d'une pureté de l'ordre de 80 % en masse (le reste étant constitué d'impuretés naturelles de carrière : carbonates, silice, etc.).

Les plâtres destinés à réaliser des **enduits** sont très souvent constitués, en dehors des ajouts, d'un mélange de semi-hydrate et de surcuit qui s'appelle le **plâtre de base**. Le semi-hydrate, par son hydratation rapide, permet à l'enduit d'acquiescer des résistances à court terme. Par la suite, la lente hydratation du surcuit entraîne une cristallisation complémentaire qui vient renforcer la cohésion du réseau cristallin, compense le retrait dû au séchage et évite ainsi la formation de fissures. Dans ce plâtre de base, les proportions relatives de semi-hydrate et de surcuit peuvent varier de façon sensible selon la pureté du gypse d'origine, la réactivité des composants, le cahier des charges du produit.

Les différents procédés de cuisson et de broyage existant dans l'industrie du plâtre conduisent à des produits qui, s'ils ont l'appellation industrielle de semi-hydrate ou de surcuit, ont des réactivités très différentes.

Exemple : pour un **enduit**, l'utilisation d'un semi-hydrate de four Beau, plus stable dans le temps s'il est exempt d'incuit et d'anhydrite III, est souhaitable, alors que la **préfabrication** s'accommoderait mieux d'un semi-hydrate de four rotatif à feu direct, plus réactif.

De même, le circuit de broyage adéquat (broyeurs, cribles, séparateurs, etc.) est défini en tenant compte de la broyabilité du plâtre.

Le comportement d'un plâtre peut être façonné à la demande par l'incorporation d'ajouts minéraux et organiques qui ont chacun une action spécifique sur une caractéristique de ce comportement (temps de prise, viscosité, ouvrabilité, etc.). La connaissance des interactions entre ces ajouts et le plâtre, mais également des ajouts entre eux, est nécessaire. Elle est rendue complexe par la diversité des substances proposées par l'industrie chimique.

Enfin, la réunion des ajouts et du plâtre de base peut être réalisée directement, ou par l'intermédiaire d'un **prémélange**, avant ou après broyage, dans un mélangeur horizontal, vertical, continu ou discontinu, le choix étant guidé par la qualité souhaitée du produit, mais également par l'installation existante dans laquelle le produit est élaboré.

La conception d'un plâtre industriel nécessite que l'on fasse, à tous les niveaux, le bon choix. Les qualités du produit fini en dépendent, la première de ces qualités étant la **régularité des critères de comportement** à laquelle les utilisateurs sont de plus en plus sensibles.

4.4 Produits en plâtre

4.4.1 Carreaux

Nota : la description des carreaux de plâtre fait l'objet du paragraphe 6.1.

Le plâtre stocké en silos est amené et pesé au niveau du gâchoir pouvant contenir plusieurs centaines de kilogrammes de plâtre. L'eau de gâchage arrive au niveau de ce même gâchoir. Le gâchage du mélange eau + plâtre dure quelques dizaines de secondes. Il est coulé dans des moules mécaniques. Après une attente de quelques minutes pour permettre au plâtre de prendre, il est démoulé et mis sur un chariot transporteur pour introduction dans un séchoir, où se produit le séchage à l'air chaud pendant plusieurs dizaines d'heures. Les carreaux sont palettisés et mis éventuellement sous housse, avant stockage et livraison.

Le plâtre utilisé est le plâtre de préfabrication. Il présente des caractéristiques particulières : bonnes qualités de coulabilité et temps de prise courts. On utilise un semi-hydrate β pur pouvant contenir dans certains cas des pourcentages non négligeables d'anhydrite III (ou anhydrite soluble très réactive). Cela permet un démoulage plus rapide et une manutention plus facile. Pour accroître encore les vitesses de fabrication, on ajoute très souvent des accélérateurs de prise tels que du sulfate de potassium ou, plus souvent, du gypse ou des déchets de fabrication recyclés broyés finement. Afin d'acquiescer une bonne fluidité, on peut jouer sur la granulométrie (peu d'éléments ultrafins) ou ajouter des produits fluidifiants. Cela permet d'obtenir une bonne aptitude à la coulée sans augmenter la quantité d'eau de gâchage. En général, ces éléments ont un taux de gâchage de 80 parties d'eau pour 100 de plâtre. Pour les carreaux de haute dureté, on peut parvenir, grâce aux fluidifiants, à 60 parties d'eau pour 100 de plâtre.

Le plâtre, soutiré du silo et – le plus souvent – pesé, est versé sur la surface de l'eau contenue dans le gâchoir. Puis le mélange est brassé pendant quelques dizaines de secondes à l'aide d'hélices tournant à plusieurs centaines de tours par minute. De la durée du brassage et de l'énergie dissipée lors de celui-ci dépendent, dans une large mesure, la cinétique de prise du plâtre et sa fluidité. Les gâchoirs sont en général des récipients montés sur articulations, de telle manière que l'on puisse verser la gâchée dans les moules par simple basculement.

La technique du **moulage vertical** dans des moules à fond mobile (*moules à extrusion*), est la principale technique de fabrication utilisée aujourd'hui. La gâchée est versée dans un moule comportant une trentaine de compartiments verticaux à fond mobile. Lorsque le plâtre a « fait sa prise », les fonds des compartiments remontent, poussés par un vérin hydraulique, ce qui a pour effet d'« extruder » des carreaux dont le fini de surface est donné automatiquement grâce au poli spéculaire dit « poli miroir » des parois du moule réalisées en aciers spéciaux et traitées superficiellement par chromage dur.

On obtient directement par moulage les emboîtements sur trois côtés, le quatrième étant réalisé par profilage en cours de prise.

Cette technique permet de respecter des tolérances dimensionnelles de l'ordre du dixième de millimètre. Il en résulte une facilité de pose et une planéité parfaite de la cloison montée.

Le cycle de fabrication est d'environ de 7 à 10 min, soit une production d'environ trente carreaux toutes les 10 min (un carreau toutes les 20 s) pour une batterie de moules.

Après avoir été extrudés, ces carreaux sont saisis par une pince automatique qui les dépose sur des chariots montés sur rails. Ces chariots sont introduits dans des séchoirs qui ramènent l'humidité des carreaux à moins de 5 %. Il est nécessaire d'éliminer environ 30 kg d'eau par mètre carré de cloison (6 cm d'épaisseur). Sachant qu'une unité de fabrication permet de produire 1 000 à 2 000 m²/j, il faut évaporer de 30 000 à 60 000 kg d'eau quotidiennement.

Les principes communs à tous les **séchoirs industriels** existants sont les suivants :

- ils sont *continus* – du type tunnel avec avance automatique des chariots portant des carreaux ;
- un espace est laissé entre les carreaux avant introduction dans le séchoir afin de faciliter la *circulation de l'air* ;
- la chaleur est apportée par *l'air en mouvement*.

Le chauffage de l'air se fait soit par combustion directe du gaz (séchage dans les gaz de combustion), soit par échange sur des batteries chauffées par fluide caloporteur (séchoir classique comportant une chaudière indépendante fonctionnant en général au fioul). Le profil de température le long du séchoir est assez plat, dépassant rarement 100 °C. Le temps de séjour des carreaux dans un séchoir varie de 20 à 35 h suivant l'épaisseur du carreau.

Certains séchoirs ont la forme de tunnels de 40 à 60 m de long, une largeur de 5 à 8 m et une hauteur de 3 à 5 m. Les générateurs d'air chaud sont soit au-dessus, soit sur le côté. D'autres ont une forme en U avec entrée et sortie dans le même bâtiment, ce qui permet de diviser la longueur totale du séchoir, mais en doublant sa largeur.

Le séchoir est un élément essentiel dans la fabrication des carreaux puisque la dépense en énergie pour sécher un carreau représente 25 % de son prix de revient.

À la sortie du séchoir, les carreaux sont repris sur les chariots par des pinces automatiques et déposés sur des **tables de palettisation**. Cette opération consiste à disposer les carreaux sur des palettes dont les plus importantes mesurent 1,2 m × 1 m et peuvent supporter jusqu'à quatre-vingts carreaux de 7 cm d'épaisseur. Ensuite, ces carreaux sont soit cerclés, soit mis sous housse rétractable afin d'assurer d'une part la stabilité de ces piles de carreaux et, d'autre part, leur protection contre les intempéries dans le cas du houssage.

La colle [C 960] nécessaire au montage des cloisons en carreaux de plâtre est fabriquée dans des ateliers de mélange spécifique. Elle est composée de plâtre à mouler et d'adjuvants tels que rétenteur d'eau, colles, retardateur de prise, épaississant, agent anticryptogamique) et peut comporter parfois une charge inerte (carbonate...).

4.4.2 Plaques

Nota : la description des plaques de plâtre fait l'objet du paragraphe 6.2.

Les usines de plaques de plâtre disposent en général de leurs propres installations de fabrication en continu du plâtre nécessaire à la production des plaques.

Le plâtre est fabriqué suivant le procédé de broyage et calcination de gypse naturel ou d'origine chimique selon les usines. Il est mélangé aux différents ajouts solides, puis aux ajouts liquides et à l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte fluide qui est ensuite coulée entre deux feuilles de carton spécial. Deux bobines de carton sont déroulées en continu, l'une sous le mélangeur (carton de parement de couleur crème), l'autre au-dessus (carton de couleur grise). La pâte de plâtre est coulée sur la feuille de carton inférieure dont les bords ont été repliés. La feuille de carton supérieure vient refermer le moule ainsi constitué, ses bords sont collés sur les bords repliés de la feuille inférieure. L'ensemble est « laminé » par un cylindre ou une plaque de formage et transporté sur un tapis puis des rouleaux jusqu'au « couteau » ou « cisaille ». La longueur du tapis et sa vitesse de déroulement sont ajustées pour permettre au plâtre de prendre et d'être coupé à la longueur souhaitée, en bout de chaîne.

Les plaques sont ensuite retournées afin que le carton de parement ne souffre pas des transferts suivants, et distribuées sur les étages d'introduction dans le sécheur. Les plaques, humides à ce stade, sont séchées pendant 45 min environ, puis défournées. Elles sont recoupées à la longueur précise par des scies circulaires, assemblées deux à deux (pour les manutentions ultérieures sur chantier) puis par piles d'environ 40 à 90 plaques en fonction des épaisseurs et des utilisations, mises sur palettes et cerclées.

Exemple : caractéristiques d'une unité classique de fabrication de plaques de plâtre

Capacité annuelle de production : 20 millions de mètres.

Consommation annuelle de gypse : 200 000 t.

Consommation annuelle de carton : 10 000 t.

Vitesse de déroulement du tapis : 60 m/min.

Longueur de la chaîne : 350 m.

Certaines usines ont des vitesses allant jusqu'à 160 m/min et des longueurs de chaîne allant jusqu'à 500 m.

Température de séchage : 100 à 200 °C.

Longueur du sécheur : 100 m.

Deux paramètres sont d'une importance extrême et ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement :

- le *temps de prise du plâtre* qui, pour une chaîne d'une longueur donnée, conditionne la vitesse et par conséquent la capacité de production ;
- le *séchage* qui conditionne pour l'essentiel la qualité du produit fini.

Le problème à résoudre est celui de l'homogénéité du séchage malgré les différences d'épaisseur (bords amincis ou changement d'épaisseur de fabrication) ou le remplissage partiel du sécheur (début, fin de fabrication, incidents de fonctionnement en amont). La sanction d'un mauvais réglage est la mise au rebut de plaques dites « molles », parce que encore trop chargées en eau, qui ne supporteraient pas les opérations suivantes et en particulier les contraintes imposées au stockage, ou de plaques « brûlées » ou à « bords brûlés » qui, du fait d'une désolidarisation du carton et du plâtre, perdraient l'essentiel de leur résistance mécanique et poseraient des problèmes lors de la finition (peinture, carrelage...) des ouvrages réalisés avec ces plaques.

Les plaques mises au rebut sont traitées dans des ateliers de **recyclage**. Après broyage des plaques, le plâtre et le carton sont séparés. Le plâtre est réintroduit dans le circuit de fabrication, le carton est également utilisé pour refaire du carton ou comme fibres dans le plâtre.

5. Variétés

5.1 Plâtres destinés au bâtiment

5.1.1 Enduits intérieurs

On distingue trois familles de plâtres pour enduits intérieurs :

- pour enduits manuels (§ 5.1.1.1) ;
- pour projection mécanique (§ 5.1.1.2) ;
- pour enduits spéciaux appliqués soit manuellement, soit par projection mécanique (§ 5.1.1.3).

5.1.1.1 Enduits manuels

Ils sont destinés aux enduits intérieurs de murs et plafonds sans addition d'un autre liant ou d'un granulat. La norme EN 13279-1 distingue trois grandes familles :

- les plâtres *de construction* comportant plus de 50 % en masse de sulfate de calcium actif et moins de 5 % en masse de chaux ;

— les enduits à base de plâtre comportant moins de 50 % en masse de sulfate de calcium actif et moins de 5 % en masse de chaux ;

— les enduits *plâtre/chaux* comportant moins de 50 % en masse de sulfate de calcium actif et plus de 5 % en masse de chaux.

Pour tous ces plâtres, le temps de début de prise est supérieur à 20 min. Leurs propriétés mécaniques sont équivalentes : la résistance en flexion est supérieure ou égale à 1 N/mm², la résistance en compression est supérieure ou égale à 2 N/mm².

Les enduits intérieurs peuvent s'appliquer en une ou plusieurs couches.

5.1.1.2 Projection mécanique

Il existe sur le marché une gamme importante de plâtres à projeter : enduits intérieurs de murs et de plafonds, protections spéciales contre l'incendie, etc. La projection mécanique fait appel à des machines légères et de faible encombrement, de différents modèles, qui assurent en continu le gâchage du plâtre, le transport de la pâte par tuyau et la projection pneumatique sur le support. Seule la finition de l'enduit se fait généralement de façon manuelle.

L'approvisionnement des chantiers peut se faire en sacs ou en vrac, avec l'utilisation d'un silo de chantier et une alimentation en continu des machines. Le taux d'eau de gâchage (variable avec le type de plâtre et la nature du support) est indiqué par le fabricant dans la notice d'emploi. La quantité d'eau de gâchage nécessaire, réglée une fois pour toutes, est fournie automatiquement par la machine. On peut colorer les plâtres à projeter dans la masse en introduisant des colorants dans l'eau de gâchage. Le temps d'utilisation du plâtre est supérieur à 1h30 (temps de début de prise fixé à 50 min dans la norme EN 13279-1).

L'enduit projeté évite la plus grande partie des gravats et assure la propreté du chantier.

L'application sur le support ne nécessite qu'une seule couche aussi bien sur mur que sur plafond. Suivant l'épaisseur (qui peut atteindre plusieurs centimètres sans difficulté), la couche peut être réalisée en une ou plusieurs passes. L'enduit peut être laissé brut de projection, ayant ainsi un aspect décoratif. Il est généralement dressé à la règle et la finition intervient dans un délai (2 à 3 h) permettant l'organisation rationnelle du chantier.

Les enduits ainsi réalisés sont d'une qualité régulière et d'une finition parfaite. Leur temps de séchage est réduit (de l'ordre d'une semaine dans des conditions ambiantes normales). Leur dureté est variable selon le type de plâtre choisi ; certains plâtres THD (très haute dureté) peuvent être projetés mécaniquement.

5.1.1.3 Enduits spéciaux

Ce sont des produits mis au point pour répondre à l'évolution des techniques de construction et pour permettre la réalisation d'ouvrages de caractéristiques particulières.

■ Plâtres pour enduits de très haute dureté (THD)

Ces plâtres donnent par leur nature des enduits de très haute dureté et peuvent s'appliquer partout où une résistance élevée est recherchée ou imposée. Leur grande **résistance aux chocs** les destine plus particulièrement à un emploi dans les lieux soumis à des conditions de service très sévères : locaux publics (écoles, hôpitaux, cliniques, gares, etc.) ou logements (soubassements de pièces, halls, cages d'escaliers, etc.). Ils constituent un excellent support pour la **pose des revêtements céramiques**, admis par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), même dans les pièces humides.

■ Plâtres de surfacage

Ces plâtres, employés en faible épaisseur (de l'ordre de 1 à 3 mm), sont destinés à corriger les défauts des surfaces planes mais granitiques, et à la finition par lissage des parois bullées. Ils possèdent un très grand **pouvoir garnissant**.

■ Plâtres à briqueter

Ce sont des plâtres à granulométrie élevée et à prise rapide spécialement destinés au montage des cloisons en briques.

■ Plâtres allégés

Les plâtres allégés, qu'ils soient projetés ou à application manuelle, permettent d'obtenir des enduits dont les caractéristiques finales sont tout à fait excellentes. Dans les domaines de la protection contre l'incendie, de l'isolation thermique et de l'absorption phonique, les propriétés spécifiques au plâtre sont sensiblement améliorées du fait de l'adjonction d'un granulat léger.

Les enduits en plâtre allégé supportent sans dommage la plupart des efforts et contraintes auxquels sont parfois soumis les supports (plafond notamment). Sur le plan des performances mécaniques, les duretés et résistances donnent toute satisfaction.

Les **plâtres projetés allégés** s'emploient avec toutes les machines conçues pour la projection du plâtre classique, sans modification ni réglage particuliers. En ce qui concerne la mise en œuvre, les différentes phases de dressage, serrage, réglage, sont très nettement facilitées ; l'enduit donne une impression réelle de légèreté et de grande souplesse, rendant ainsi le travail du plâtrier plus aisé.

Les plâtres projetés allégés sont caractérisés en particulier par une faible masse volumique, inférieure à 800 kg/m³. Cela permet d'enduire avec une même masse de plâtre, à épaisseur égale, une surface plus importante qu'avec les plâtres projetés classiques.

Les **plâtres manuels allégés** possèdent les mêmes avantages de légèreté, de souplesse et de rendement que les projetés. Ils présentent également d'autres caractéristiques liées à leur mise en œuvre ; l'absence de temps mort (d'où un talochage immédiat) et une finition irréprochable sont les plus notables.

Certains plâtres allégés sont spécialement formulés pour assurer une fonction d'**absorption acoustique** (plâtres « acoustiques ») ou pour contribuer à l'**isolation thermique** des parois.

■ Plâtres à projeter pour protections spéciales contre l'incendie

Ce sont des produits destinés à protéger contre l'incendie certains éléments de construction tels que les poteaux et les poutres en acier, les éléments de structure en béton armé, notamment à surface lisse. Ils s'appliquent exclusivement par projection mécanique.

5.1.2 Plâtres pour préfabrication

Les plâtres pour préfabrication sont destinés à la fabrication d'éléments moulés et séchés en usine pour cloisons, plafonds et doublage. Ces plâtres sont presque toujours exclusivement constitués de semi-hydrates et se caractérisent par une bonne fluidité facilitant le coulage, un durcissement rapide et des performances mécaniques élevées.

Ils peuvent avoir une finesse plus ou moins poussée et une prise plus ou moins rapide selon les applications et les modes opératoires.

Ils se gâchent généralement dans un rapport eau/plâtre de l'ordre de 80 à 90 %.

C'est un caractère commun à tous ces plâtres, et qui est apprécié dans leurs diverses applications, de présenter, sous leur état de pâte plastique, une aptitude exceptionnelle à épouser dans leurs moindres détails les formes des modèles ou des moules au contact desquels ils ont été coulés, à reproduire tous les reliefs avec une extrême fidélité et à se prêter, au besoin, à des traitements de surface capables d'en multiplier les propriétés et les aspects.

5.1.3 Plâtres à mouler pour staff

Les plâtres pour staff se distinguent des plâtres de construction par leur destination (fabrication d'éléments de construction ou de

décoration) et par leur mise en œuvre (préfabriqués ou non). Ils sont essentiellement constitués de semi-hydrates.

Ils sont utilisés en usine ou sur chantier, pour fabriquer des plaques de plafond ou de doublage et des éléments entrant dans la décoration, l'ornementation, ou pour le moulage de maquettes et de statues.

La norme EN 13279-1 définit leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques particulières.

5.2 Plâtres à mouler pour l'art et l'industrie

Ce sont des plâtres constitués, en général, essentiellement de semi-hydrates préparés à partir de gypse sélectionné, selon des techniques particulièrement élaborées, et capables de manifester, avec toute la régularité industriellement requise, les plus hautes performances :

- résistances mécaniques très élevées ;
- état et dureté de surface exceptionnels ;
- porosité et pouvoirs d'absorption contrôlés et strictement adaptés ;
- variations dimensionnelles maîtrisées et rigoureusement régularisées.

Ces plâtres sont utilisés dans diverses industries comme moules de coulage, de calibrage ou matrices (tuileries, porcelainerie, industries des sanitaires, industries des matières plastiques et du jouet, fonderie d'art, etc.) et également en chirurgie dentaire.

5.3 Produits pour chapes autolissantes

Les produits destinés à la réalisation de chapes coulées à base de sulfate de calcium se présentent sous différentes formes : poudre destinée à être mélangée sur chantier avec un granulats, mortier sec prêt à l'emploi ou pâte gâchée prête à être coulée.

Nota : cette technique a été réintroduite en France puisque des « sols en plâtre » ont été retrouvés dans des villas romaines et dans certaines églises de l'Est. Elle est largement pratiquée en Allemagne et aux Pays-Bas.

Le produit constitué de sulfate de calcium (semi-hydrate ou anhydrite d'origine naturelle ou synthétique), d'adjuvants et de charges est gâché mécaniquement et coulé soit sur une feuille de désolidarisation (chape non adhérente), soit directement sur béton sain et sec, soit encore sur un primaire d'adhérence si la porosité du support est irrégulière. Après séchage, la chape est apte à recevoir différents types de revêtements de sol collés ou coulés.

6. Produits préfabriqués

6.1 Carreaux

6.1.1 Caractéristiques

Les carreaux de plâtre, éléments de petites dimensions, ont un module de trois ou quatre éléments par mètre carré. Ils sont pleins ou évidés (alvéoles verticales ou horizontales) ; leur épaisseur varie de 4 à 10 cm selon la fabrication (§ 4.4.1), les épaisseurs les plus courantes étant 5, 6 et 7 cm (tableau 4). Il existe des éléments d'épaisseur inférieure (25 mm) et d'épaisseur supérieure (jusqu'à 15 cm) pour certains emplois spécifiques. Les éléments d'épaisseur 4 et 5 cm sont employés en doublage, ceux de 5, 6, 7, 8 et 10 cm sont employés en cloison de distribution. Ils comportent des joints à emboîtement qui assurent la bonne mise en position des éléments.

La pose se fait à joints collés, au moyen d'une colle spéciale à base de plâtre agréée par le fabricant (§ 4.4.1).

Les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des carreaux d'épaisseur supérieure ou égale à 5 cm sont précisées dans la norme EN 12859. Les colles sont également normalisées (EN 12860). La mise en œuvre de ces éléments est régie par le DTU 25-31.

La norme EN 12859 distingue trois classes de densité :

- haute densité : $1\ 100 < \rho < 1\ 500\ \text{kg/m}^3$;
- densité moyenne : $800 < \rho < 1\ 100\ \text{kg/m}^3$;
- basse densité : $600 < \rho < 800\ \text{kg/m}^3$.

6.1.2 Carreaux spéciaux

Il existe des carreaux destinés à des utilisations particulières : carreaux légers et isolants, carreaux de haute densité, carreaux hydrofugés et hautement hydrofugés.

Les **carreaux légers et isolants** sont de deux types :

- incorporant une âme en matériau isolant (polystyrène expansé, extrudé ou laine de roche). Ils sont colorés en violet ;
- allégés dans la masse par des billes de polystyrène et colorés en beige.

Isolants et plus légers que les carreaux traditionnels, ils sont principalement destinés au doublage de murs ou à la séparation entre pièces habitées et pièces annexes.

Les **carreaux de haute densité**, colorés en rose, présentent une grande résistance aux chocs (dureté Shore $C > 80$ unités) et améliorent, du fait de leur densité plus élevée ($d = 1,2$), les performances de la cloison en matière d'isolation acoustique.

Tableau 4 – Caractéristiques des carreaux de plâtre standards

Épaisseur..... (cm)	4	5	6	7		8	10
				pleins	creux		
Dimensions..... (cm)	66 × 50	66 × 50	66 × 50	60 × 50	60 × 40	66 × 50	66 × 50 66 × 38 60 × 40
Masse surfacique moyenne..... (kg/m ²)	41	45 à 51	55 à 60	65 à 72	45 à 54	75 à 80	90 à 102
Nombre..... (par m ²)	3	3	3	3	3 ou 4	3	3 ou 4

Deux types de **carreaux résistant à l'humidité** sont disponibles sur le marché :

- les carreaux hydrofugés, colorés en bleu, sont destinés aux cloisons des pièces humides à usage individuel (logements, chambres d'hôtel...). Ils ont une reprise d'eau inférieure à 5 % après 2 h d'immersion totale ;

- les carreaux hautement hydrofugés, colorés en vert, sont destinés aux locaux à usage collectif, sous réserve de respect de certaines conditions d'hygrométrie (limitation de la durée des ruissellements d'eau, limites de température des locaux). Ils ont une reprise d'eau inférieure à 2,5 % après 2 h d'immersion totale. Leur utilisation fait l'objet d'avis techniques.

6.2 Plaques

La plaque de plâtre est aujourd'hui la principale forme d'utilisation du plâtre. Environ 2 000 millions de mètres carrés de plaques de plâtre aux États-Unis et plus de 500 millions de mètres carrés en Europe sont posés chaque année.

6.2.1 Caractéristiques

Les caractéristiques de la plaque de plâtre sont définies par la norme EN 520. Elle est composée d'un corps en plâtre coulé en usine entre deux feuilles de carton constituant à la fois son parement et son armature (§ 4.4.2).

Destinée, pour l'essentiel, à la réalisation de plafonds, cloisons et doublages, la plaque de plâtre se présente dans des dimensions permettant de couvrir en une fois la surface la plus grande possible, tout en étant néanmoins manipulable à la main. C'est pourquoi les dimensions les plus fréquentes sont 1,20 m pour la largeur, 2,50 m et plus pour la longueur, mais il existe des plaques de largeur 0,90 m et 0,60 m.

Aux plaques standards d'épaisseur courante (9,5 mm, 12,5 mm, 15 mm) se sont ajoutées les plaques de forte épaisseur (18 à 25 mm) pour certains systèmes de cloisons et les plaques de faible épaisseur (6 mm) pour la réalisation de surfaces courbes.

En fonction des performances d'ouvrage à atteindre dans les domaines de la résistance mécanique, de la résistance au feu, de l'isolation phonique, on choisira l'épaisseur, celle-ci pouvant varier de 9,5 à 25 mm.

Les bords longitudinaux des plaques présentent habituellement un aminci dont la vocation est de faciliter la dissimulation des joints par application d'un enduit armé d'une bande de papier spécial microperforé. Elles peuvent néanmoins présenter d'autres types de bords :

- droit, si l'épaisseur est identique sur toute la largeur des plaques ;
- biseauté, si le bord comporte un chanfrein incliné à 45 ° ;
- rond : associées à un enduit spécial, ces plaques permettent la finition sans bande de papier ;
- rond aminci : ces plaques permettent, selon les conditions, de réaliser au choix le joint avec ou sans bande.

6.2.2 Plaques spéciales

La souplesse d'utilisation de la plaque de plâtre standard permet de répondre à la plupart des performances requises. Néanmoins, des plaques spéciales ont été mises au point, qui permettent de résoudre les cas les plus particuliers.

L'utilisation de cartons spécialement traités, la constitution d'un corps de plaque adapté par action physique ou chimique permettent en effet la fabrication de ces plaques.

■ Haute dureté (HD)

Ces plaques sont conçues pour des applications spéciales où une plus grande résistance aux chocs est nécessaire. À des fins d'identification, ces plaques sont désignées par « type I ».

■ Spéciales feu

Ces plaques contiennent des fibres minérales et/ou d'autres additifs dans l'âme du plâtre pour améliorer la cohésion de l'âme à des températures élevées. À des fins d'identification, ces plaques sont désignées par « type F ».

■ Résistantes à l'humidité

La norme EN 520 définit trois niveaux de résistance à l'humidité H1, H2, H3 ayant des absorptions d'eau après 2 h d'immersion totale respectivement inférieures ou égales à 5 %, 10 % et 25 % en masse. En outre, l'absorption d'eau superficielle de ces plaques ne doit pas être supérieure à 160 g/m², que ce soit pour la face ou pour le dos.

■ Il existe encore d'autres types de plaques spéciales :

- plaques à reliefs décoratifs ;
- plaques usinées par rainurage pour réalisation d'angles et de surfaces courbes ;
- plaques pour protection contre les rayons X ;
- plaques sans carton superficiel, armées de fibres ou de mat de verre, permettant de réaliser des cloisons et plafonds à très haute performance de résistance au feu ;
- plaques sans carton armées de fibres de cellulose.

6.2.3 Produits dérivés

Certains de ces produits ont été conçus pour remplir des fonctions complémentaires à celles naturellement remplies par la plaque de plâtre (pare-vapeur, prédécoration, isolation thermique ou thermo-acoustique) ou à intégrer en amont certaines opérations qui étaient auparavant réalisées sur chantier : ces deux démarches tendent vers la notion de *composants industrialisés*.

■ Plaques pare-vapeur

Destinées soit à bloquer la migration de la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur afin d'éviter, par exemple, la condensation dans un isolant thermique, soit à fournir une paroi intérieure sèche dans le cas de gros œuvre non étanche ou de remontée d'eau par capillarité, les plaques sont revêtues d'un parement à très faible perméabilité (aluminium ou complexe aluminium-polyéthylène).

■ Doublages isolants

Utilisés pour l'isolation thermique ou thermo-acoustique des parois extérieures des constructions, les doublages isolants se présentent sous forme de complexes associant une ou deux plaques de plâtre à un isolant thermique (polystyrène expansé, polyuréthane, polyisocyanurate, etc.) ou thermo-acoustique (polystyrène dB, laines minérales).

On distingue le panneau de doublage de la cloison de doublage (sandwich) selon que l'isolant est revêtu d'une plaque de plâtre sur une face ou sur les deux.

Les caractéristiques thermiques de ces produits dépendent directement de celles de l'isolant choisi. Les valeurs à retenir sont indiquées dans le DTU Règles Th [5]. Par ailleurs, les isolants peuvent faire l'objet de certificats de l'ACERMI (Association pour la certification des matériaux isolants).

6.3 Techniques particulières

Les systèmes de **cloisons de grande hauteur**, de **cloisons à haute performance acoustique** et de **protection contre l'incendie** se sont développés dans les années 1990. En fonction du type de l'ossature métallique, du nombre et de l'épaisseur des plaques, il est possible de satisfaire des exigences spécifiques en matière d'isolation acoustique, de résistance au feu ou de réaliser des cloisons de très grande hauteur (plus de 10 m).

Tableau 5 – Caractéristiques thermiques du plâtre

Matériau ou application	Masse volumique sèche ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique utile λ (W . m ⁻¹ . K ⁻¹)	Capacité thermique massique c_p (J . kg ⁻¹ . K ⁻¹)	Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	
				sec	humide
Plâtre	600	0,18	1 000	10	4
Plâtre	900	0,30	1 000	10	4
Plâtre	1 200	0,43	1 000	10	4
Plâtre	1 500	0,56	1 000	10	4
Plaque de plâtre	900	0,25	1 000	10	4
Enduit isolant au plâtre	600	0,18	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 000	0,40	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 300	0,57	1 000	10	6
Plâtre et sable	1 600	0,80	1 000	10	6

Les **chapes de sol** sèches utilisent des dalles constituées de plusieurs épaisseurs de plaques de plâtre posées sur une forme d'égalisation en granules.

6.4 Produits préfabriqués pour plafond

Des éléments décoratifs et absorbants phoniques sont fabriqués pour l'exécution de plafonds à partir de plaques standards découpées, usinées et/ou perforées pour améliorer l'absorption acoustique et éventuellement revêtues de parements décoratifs.

Indépendamment de l'utilisation qui peut être faite en plafond des plaques de staff et des plaques de plâtre, il existe des éléments fabriqués spécialement pour l'exécution de plafonds : à joints généralement apparents, lisses ou à relief, décoratifs et absorbants phoniques.

Ces différents types d'éléments de plafond peuvent être utilisés soit en fixation directe sur ossature (clouage, vissage, etc.), soit sous forme de plafond suspendu.

7. Propriétés

7.1 Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie

Du fait de sa faible conductivité thermique λ , le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois [C 3 370]. Le tableau 5 donne les caractéristiques thermiques du plâtre indiquées dans les Règles Th [5].

Un enduit plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique. Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agréments légers qui ont des conductivités thermiques de l'ordre de 0,18 à 0,20 W . m⁻¹ . K⁻¹ sont particulièrement destinés à cet usage. En outre, du fait de sa forte inertie thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre élimine le phénomène de **paroi froide**.

Le plâtre permet de plus – en association avec des matériaux isolants minéraux ou de synthèse ayant des conductivités thermiques très faibles (0,03 à 0,04 W . m⁻¹ . K⁻¹), qui sont des matériaux spécifiques de l'isolation mais qui ne constituent pas comme lui des matériaux de construction – de réaliser des systèmes d'isolation efficaces.

Les éléments préfabriqués en plâtre sont couramment employés pour améliorer l'isolation thermique d'une paroi, seuls (par exemple contre-cloison en carreaux de plâtre) ou sous forme de complexes de doublage plâtre-isolant.

La résistance thermique utile des plaques de plâtre varie avec l'épaisseur (tableau 6) :

$$R = e/\lambda$$

avec R (m² . K . W⁻¹) résistance thermique utile,
 e (m) épaisseur.

Tableau 6 – Résistance thermique utile des plaques de plâtre (1) (2)

Épaisseur e (mm)	R (m ² . K . W ⁻¹)
9,5	0,04
12,5	0,05
15	0,06

(1) Les résistances thermiques utiles des complexes d'isolation plâtre-isolants sont indiquées dans les avis techniques qui les concernent.
(2) $\rho = 800$ à 900 kg/m³

7.2 Humidité des locaux

Le plâtre est un matériau poreux et, bien qu'il soit rarement laissé nu et qu'il soit le plus souvent recouvert de peinture, de papier ou de tissu, il doit très généralement être examiné comme tel du point de vue des échanges hygrométriques avec l'atmosphère ambiante, car, mis à part les peintures laquées des salles d'eau ou certains revêtements plastifiés, les couches minces de peinture ou de papier, comme les tissus, sont perméables.

Un certain nombre de données expérimentales et de mesures de laboratoire permettent de situer le rôle que le plâtre est capable de jouer en présence des variations d'humidité relative de son environnement, rôle qui peut contribuer à amortir lesdites variations au cours du temps. On sait par exemple qu'un ouvrage en plâtre exécuté avec un pourcentage d'eau de gâchage courant, abandonné à lui-même, perd progressivement son eau excédentaire, plus ou moins rapidement selon les conditions hygrothermiques de l'ambiance, pour parvenir à un état d'équilibre qui reste constant si ces conditions sont elles-mêmes constantes.

Ainsi, dans une atmosphère maintenue à 20 °C et à 85 % d'humidité relative, le plâtre perd la totalité de son eau non combinée, soit sensiblement 50 % de sa masse, en moins de 30 jours. Des mesures de laboratoire ont prouvé que ce résultat est identique à celui qui peut être obtenu par un traitement en étuve à 50 °C poursuivi jusqu'à masse constante. Ce séchage s'effectue d'ailleurs quelle que soit l'humidité relative de l'air ambiant et le plâtre continue à perdre son eau non combinée même lorsque l'humidité relative devient très élevée, de l'ordre de 95 %.

Il résulte encore d'essais de laboratoire que le plâtre séché, maintenu en milieu isotherme mais placé en ambiance saturée, reprend après un temps comparable à celui du séchage, une humidité d'environ 1 % en masse.

Des essais ont été effectués sur des plâtres préalablement séchés, puis maintenus à une humidité relative constante élevée (95 %) et soumis à des cycles de température de 12 °C d'amplitude (entre 12 et 24 °C) et de durée variable de 4, 6, 12 et 24 h. Les mesures faites, en pesée continue, établissent que le plâtre absorbe l'eau lorsque la quantité d'eau vapeur dans l'atmosphère augmente, c'est-à-dire quand la température croît. De plus, le plâtre perd sensiblement la masse d'eau absorbée dans le cas contraire ; la masse d'eau échangée entre le plâtre et l'atmosphère (qui augmente avec la durée du cycle) représente de 0,1 à 0,2 % de la masse du plâtre.

Le plâtre est donc capable de jouer un rôle important, même en tenant compte du fait que la vitesse des échanges dépend évidemment de la nature du plâtre, de sa compacité, de son taux de gâchage, de sa surface de contact avec l'ambiance, comme des conditions hygrométriques de celle-ci.

Bien entendu, le plâtre, par la contribution qu'il apporte par ailleurs à l'isolation thermique, favorise l'élimination des phénomènes de paroi froide. Mais il reste qu'en cas de condensation d'eau à sa surface, le plâtre est capable de l'absorber – et de s'opposer ainsi au ruissellement – pour la rejeter ensuite dès que les conditions hygrométriques s'y prêtent.

Le plâtre intervient comme un réel **amortisseur des variations hygrométriques** de l'ambiance dans laquelle il est utilisé.

7.3 Isolation acoustique

Le domaine de l'acoustique [C 3 362] est un domaine délicat. L'appréciation du rôle que le plâtre peut y jouer l'est donc tout autant. Il est possible, cependant, de dégager quelques données qui éclairent le sujet, étant du reste précisé qu'il ne sera nullement question ici de l'isolation aux bruits de chocs ou d'équipement qui relèvent de techniques particulières ; les considérations suivantes sont limitées aux bruits aériens. L'acoustique obéit naturellement à des lois théoriques, mais dans les applications qu'on en fait, au plan pratique, elle relève davantage de l'art que de la science par les soins qu'elle exige, par les précautions sans lesquelles en particulier la moindre faille, le moindre pont phonique risquent d'en anéantir les résultats puisqu'un tel pont suffit à permettre la transmission des vibrations des ambiances qu'il met en communication.

Par la **continuité des murs et cloisons** qu'ils apportent, les enduits manuels ou projetés assurent une isolation aux transmissions de bruits aériens et une garantie contre les ponts phoniques résultant de fissures, de la porosité des matériaux, etc.

Cette continuité des murs et des cloisons est également réalisée dans l'emploi des divers éléments préfabriqués de cloison à base de plâtre correctement mis en œuvre, avec lesquels l'intégralité des joints d'assemblage fait nécessairement l'objet d'un collage ou d'un masticage ininterrompu qui reconstitue la continuité de l'écran acoustique isolant les locaux adjacents.

Le plâtre, cependant, obéit aux lois générales de l'acoustique. Du point de vue théorique, la transmission directe de l'énergie sonore

par les parois est essentiellement régie par la **loi de masse** et par la **loi de fréquence**. La **transmission indirecte** par les éléments adjacents est plus difficile encore à saisir et à évaluer et il n'en est pas tenu compte dans les mesures de laboratoire ; dans la pratique, on admet qu'elle introduit une **chute d'isolation** de l'ordre de 5 à 7 dB(A).

Selon les lois de masse et de fréquence, l'isolation d'une paroi est fonction de sa masse propre et de la fréquence des sons. Pour une fréquence donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique croît proportionnellement au logarithme de la masse par mètre carré de la paroi. De même, pour une masse donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique est proportionnel au logarithme de la fréquence sonore. La loi de masse, cependant, ne tient pas compte de la fréquence critique de la paroi. Cette fréquence, fonction mathématique de la masse et de la rigidité de la paroi correspond, par un phénomène analogue à une résonance, à une perte d'isolement. Cette fréquence critique est d'autant plus gênante qu'elle se situe vers les fréquences plus élevées.

À l'égard de ces lois, le plâtre n'occupe pas une situation privilégiée puisque sa masse volumique relativement faible le défavorise plutôt, notamment vis-à-vis de la loi de masse. Mais il s'agit là de lois théoriques visant des éléments homogènes et l'on sait depuis longtemps réaliser des cloisons légères généralement constituées par un assemblage de matériaux différents auxquelles les lois de masse et de fréquence ne s'appliquent plus et qui sont tout à fait capables d'assurer une bonne isolation.

Les possibilités du plâtre trouvent aussi bien leur application dans la recherche de l'amélioration de l'isolation d'une paroi existante que dans la constitution de cloisons à hautes performances acoustiques.

Ainsi, dans le cas d'un mur ayant une certaine masse, le doublage au moyen d'un élément léger en plâtre peut apporter une amélioration considérable. D'une manière générale, on peut noter que l'isolation obtenue par doublage est d'autant meilleure que les deux parois ont des épaisseurs et des masses différentes et que la lame d'air qui les sépare assure une meilleure liaison élastique, notamment grâce à un remplissage avec un isolant.

Les éléments légers du type **plaques de parement en plâtre** permettent, par assemblage sur des ossatures métalliques, de constituer des cloisons à double paroi ayant des caractéristiques acoustiques élevées et s'adaptant même dans certains cas à la réalisation des cloisons séparatives de logements.

L'isolation acoustique des cloisons, des doublages et des plafonds repose sur la désolidarisation des deux parements de l'ouvrage. Ainsi est formé un système masse-ressort-masse. Le parement situé côté émission, par sa flexibilité, limite la transmission par rayonnement de l'énergie sonore. Le matelas d'air et/ou le matelas fibreux présentent un effet amortisseur absorbant une partie de l'énergie sonore qui lui est transmise. Le second parement, côté réception, ne retransmet, du fait de sa flexibilité, qu'une partie de l'énergie sonore qui lui est transmise. L'utilisation d'ossatures doubles désolidarisées améliore encore les performances acoustiques. Ce système constructif permet d'obtenir des performances supérieures à celles d'une paroi unique de masse équivalente. Selon la masse des parements et leur écartement, les performances possibles couvrent toute la gamme des exigences allant jusqu'à un indice d'affaiblissement acoustique pondéré de 69 dB(A) pour une cloison d'une épaisseur totale de 225 mm et d'une masse surfacique de 70 kg/m².

7.4 Correction acoustique

La transmission de l'énergie sonore se fait aussi, à l'intérieur d'un même local, par réflexion sur les différentes parois qui en limitent le volume. C'est le phénomène de la **réverbération** qui, selon les

conditions qui lui sont imposées par la géométrie et les matériaux du local, peut communiquer à ce dernier une acoustique plus ou moins satisfaisante.

Le plâtre, grâce à son aptitude au moulage, à la préfabrication comme à la constitution d'éléments décoratifs à reliefs, se prête à la réalisation de panneaux, de structures architecturales ou ornementales capables de supprimer ou d'atténuer les réverbérations gênantes des bruits ou des sons émis dans une pièce.

Le coefficient d'absorption phonique (coefficient de Sabine) d'une plaque de parement en plâtre de 12 mm, perforée et posée sur une couche de 18 mm de laine minérale, est de 0,74 alors que celui d'une couche de 50 mm de laine minérale est de 0,93. Cela montre qu'il est aisé de constituer des parois absorbant une fraction importante des sons et n'en renvoyant qu'une faible partie.

7.5 Résistance au feu

L'une des propriétés les plus caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu, qui a été reconnu et éprouvé de tout temps. Cette protection a pu autrefois être obtenue grâce à de larges garnissages de plâtre remplissant complètement les intervalles séparant les éléments de construction. Elle peut aussi consister en enduits projetés de plâtres spéciaux (spécial feu) ou en enduits traditionnels comportant, de préférence, une armature légère de solidarisation ancrée sur l'ouvrage.

Elle peut être réalisée par un enrobage fait au moyen d'éléments préfabriqués du type plaques de plâtre (avec ou sans carton superficiel) ou du type moulé, comme les carreaux de plâtre. Mais si cette protection par le plâtre, ancienne d'emploi, peut se présenter sous différentes formes, en s'adaptant aux modes de construction, elle repose toujours sur le même principe. L'excellent comportement du plâtre au feu résulte de plusieurs propriétés.

Le plâtre est **incombustible**. Il est classé A1 sans essai par décision de la Commission européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits appartenant aux classes à « aucune contribution à l'incendie » (anciennement M0 dans la réglementation française) lorsqu'il ne contient pas plus de 1 % en masse ou en volume de matière organique répartie de manière homogène.

Il est **mauvais conducteur de la chaleur**. Il a une conductivité thermique relativement faible pour un matériau de construction qui, de plus, prend ses valeurs minimales dans la zone des températures allant de 400 à 500 °C, la plus critique pour les éléments porteurs.

Il a surtout une propriété spécifique, intéressante pour la protection incendie, par le fait qu'il oppose une **action antagoniste au développement du feu**. En effet, sous l'action de la chaleur, le plâtre subit une transformation chimique résultant d'une réaction endothermique, réaction qui, en même temps qu'elle absorbe de la chaleur, et de ce fait en neutralise les effets destructeurs, libère de l'eau.

Le plâtre, après son application, après avoir pris, est un sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, c'est-à-dire qu'à l'état sec, il contient environ 20 % en masse d'eau chimiquement liée. Pour libérer cette eau, ce qui se produit en cas d'incendie, il faut rompre la liaison moléculaire et, pour cela, fournir sous forme de chaleur une énergie importante, environ 711 kJ par kilogramme de plâtre. Il faut ensuite vaporiser cette eau, et pour cela, dépenser encore une énergie d'environ 544 kJ pour 200 g d'eau contenus dans 1 kg de plâtre initial, soit en tout quelque 1 255 kJ par kilogramme de plâtre. Tant que toute l'eau n'est pas libérée et vaporisée, la température du plâtre reste, bien entendu, inférieure à 140 °C, température caractéristique du critère d'isolation I (anciennement coupe-feu) défini par la réglementation.

En outre, même après sa déshydratation, le plâtre continue à former une couche assurant à l'élément de construction qu'elle recouvre une isolation thermique notable du fait de sa faible conductivité thermique.

Enfin, sous l'action du feu, le plâtre ne donne naissance à **aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant**, aucune fumée, ni aucun produit de décomposition combustible ou susceptible d'activer la combustion.

7.6 Plâtre et environnement

7.6.1 Impact dans l'environnement

7.6.1.1 Fabrication

■ Poussières

Elles proviennent des phases de broyage et de cuisson : il s'agit de plâtre pulvérulent.

Les fours sont équipés de filtres qui limitent les émissions à des valeurs très faibles, inférieures aux seuils réglementaires de 40 à 60 mg/Nm³. L'efficacité du dépoussiérage est devenue courante aujourd'hui avec les électrofiltres ou les filtres à manche.

Nota : 1 Nm³ = 1 m³ dans les conditions normales de température (0 °C) et de pression (1,013.10⁵ Pa).

■ Gaz de combustion

Les gaz dont il est question pour la protection de l'environnement sont CO₂, CO, NO_x et SO₂. La première mesure adoptée par l'ensemble de l'industrie pour réduire les émissions de gaz a été d'utiliser du gaz naturel plutôt que du fioul, chaque fois qu'il était disponible et économique. Mais surtout, la remise en cause des fours de cuisson qui ont été soit arrêtés, soit entièrement modernisés, a permis d'améliorer la qualité de la combustion. Toutefois, des exigences sévères sont bien entendu applicables pour les gaz de combustion. Des valeurs limites d'émission sont ainsi fixées pour les poussières totales, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre et les composés organiques volatils.

■ Cas particulier du dioxyde de carbone

Les industriels du plâtre ont depuis longtemps le souci constant de la réduction des consommations énergétiques, et ce pour des raisons économiques. L'essentiel des améliorations sur leurs installations de production a déjà été réalisé. Les véritables gisements du progrès ne se situent plus maintenant au stade de la production mais dans la mise en œuvre de moyens nouveaux destinés à renforcer les réglementations thermiques dans la construction, en particulier sur le marché de la rénovation dans les pays où cette réglementation n'est pas généralisée ou insuffisamment appliquée.

L'industrie du plâtre concourt d'ailleurs pour une part très faible dans l'émission de CO₂, loin derrière les secteurs comme la chimie de base, l'acier, le papier ou le verre.

■ Autres effluents

Les effluents et autres émissions sont très limités dans une industrie du plâtre peu consommatrice d'énergie, et non génératrice de rejets de procédé (ni minéraux, ni eau).

7.6.1.2 Mise en décharge

■ Solubilité du sulfate de calcium

L'OMS (Organisation mondiale de la santé) fixe la teneur en sulfate dans l'eau potable à 250 mg d'ion SO₄²⁻ par litre mais précise que c'est l'un des anions les moins toxiques et qu'aucune considération de santé n'impose de valeur guide pour le sulfate. La limite de concentration dans l'eau potable n'est liée qu'à des **considérations organoleptiques** : goût salé conféré par le sulfate de sodium (le sulfate solubilisé, issu du plâtre, peut se recombinaison pour donner du sulfate de sodium), qui a un effet laxatif. Aucune toxicité de l'ion sulfate n'est signalée dans l'eau d'irrigation.

De nombreuses eaux minérales ont des teneurs en sulfate de calcium bien supérieures à ce seuil, proches de la saturation (1,5 g/L).

Il faut noter en particulier que la directive allemande « gravats de construction » du 1^{er} juin 1993 modifiant celle du 27 août 1992, n'impose plus de valeur limite à la teneur en sulfate dans les lixiviats des déchets de construction. Cette modification résulte d'une double observation :

- l'absence de pollution des nappes phréatiques due au stockage des déchets en plâtre ;
- le coût résultant de la limite prévue dans la version de 1992, et le préjudice que subiraient les déchets de construction.

■ Réactivité en milieu organique fermentescible

La formation de sulfure d'hydrogène H₂S nécessite l'existence simultanée des conditions suivantes :

- présence d'eau ;
- présence de matières organiques ;
- ions sulfates en solution ;
- absence d'air ;
- présence de bactéries anaérobies (*Desulfovibris*, *Desulfotomaculum*) ;
- pH de 4 à 9 ;
- température ambiante entre 30 et 38 °C.

Toutes ces conditions sont difficiles à réunir. Cependant, ces phénomènes conduisent à proscrire la mise en décharge des déchets de plâtre en mélange avec des déchets organiques (mélange avec des ordures ménagères en classe II).

7.6.2 Recyclage et traitement des déchets

7.6.2.1 Déchets de fabrication et de chantier

Les **déchets de fabrication** peuvent être :

- **recyclés** dans le gypse : la majorité des usines françaises de plâtre est équipée pour l'assurer ;
- utilisés en **remblayage des carrières**, principalement les carrières souterraines afin de mettre en sécurité les terrains après exploitation ;
- mis en **décharge**.

Les **déchets de chantier de construction**, constitués de chutes de coupe et de quelques produits endommagés, sont de même nature que les déchets de fabrication. Les procédés de traitement peuvent donc être les mêmes.

On estime à 5 % en moyenne les déchets par rapport aux quantités mises en œuvre. En fait, ce taux peut varier de 2 % à plus de 10 % en fonction des découpes nécessitées par le bâtiment. En prenant les résultats de la quantification FNB/ADEME, les quantités de plâtre contenues dans les déchets de construction (neuve et réhabilitation) rapportées au tonnage de produits plâtre mis en œuvre annuelle, donnent un taux de 2,8 %.

FNB : Fédération nationale du bâtiment, devenue Fédération française du bâtiment (FFB).

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

Le recyclage des **carreaux** de plâtre consiste à broyer les déchets, puis à les incorporer dans le gypse.

Le recyclage des **plaques** de plâtre nécessite, suivant les procédés et l'utilisation qui est faite du plâtre, soit une séparation du carton et du plâtre hydraté, séparation toujours imparfaite, soit un broyage fin de façon à réduire la dimension des morceaux de carton. De toute façon, le plâtre obtenu comportera toujours des fibres de carton et ne sera utilisé que pour la fabrication des plaques de plâtre.

Les déchets de **cloisons alvéolaires** peuvent être recyclés de la même façon, à condition de respecter une concentration maximale.

Les déchets de **doublage avec polystyrène expansé** (PSE) nécessitent une séparation des deux composants (coupe au fil chaud) ; le PSE est recyclé en totalité dans la production de PSE. La plaque rési-

duelle peut être recyclée dans le gypse, à condition de respecter une concentration maximale.

À condition d'être propres, c'est-à-dire exempts d'autres matériaux, les déchets de chantier peuvent être recyclés dans le gypse, comme les déchets de fabrication. Globalement, les ateliers de recyclage permettent de recycler 10 % de déchets par rapport au gypse. Les déchets de fabrication représentent environ 5 % de la production ; il reste donc une capacité disponible pour des déchets extérieurs. Globalement, ces usines pourraient absorber les déchets de construction.

Le recyclage de déchets de plaques dans le gypse met en œuvre des ateliers conséquents (investissement de l'ordre de 1 à 2 millions d'euros par usine) et un coût de fonctionnement non négligeable. Il est important de souligner qu'il n'existe en 2001 que huit usines de fabrication de plaques en France, n'assurant pas une couverture complète du pays, et cela pose le problème du coût du transport des déchets à recycler, lequel est de la responsabilité du « producteur » des déchets, c'est-à-dire de l'entreprise de construction.

7.6.2.2 Déchets de démolition

Les déchets de démolition sont généralement mélangés à d'autres produits (peinture, colles, revêtements, etc.) et ne peuvent pas être recyclés facilement. Le **tri sélectif** lors de la démolition permet éventuellement d'isoler des produits destinés au recyclage et des produits mis en centre de stockage. On constate des restrictions quant à l'acceptation de déchets de plâtre dans les décharges de classe II, pour incompatibilité avec les déchets organiques fermentescibles, mais aussi de classe III par crainte d'effets négatifs dus à la légère solubilité du matériau.

Le *Guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes* du ministère de l'Environnement [6] précise les conditions dans lesquelles les déchets de construction/démolition contenant du plâtre peuvent être stockés en décharges (stockage de classe III type H ou G pour les enduits plâtre, stockage de classe III type F pour les carreaux et plaques de plâtre, stockage de classe II pour les plaques de plâtre en mélange avec les ossatures, les doublages PSE, les plafonds sur lattis bois, le staff).

7.6.2.3 Autres voies de valorisation

La valorisation dans les **granulats de recyclage** serait *a priori* intéressante pour les gravats de démolition, du fait de la grande difficulté de séparer le plâtre des autres matériaux. Mais elle n'est pas possible à cause des réactions entre le plâtre et les autres constituants, notamment avec le ciment dans la production de béton : le sulfate de calcium se combine avec certains composants du ciment pour donner des sels appelés thaumasite et ettringite ; en présence d'eau, ces sels gonflent, ce qui peut entraîner des désordres importants dans les ouvrages.

La valorisation en **cimenterie** consiste en la substitution des déchets de produits en plâtre au gypse introduit dans la composition du ciment pour réguler la prise : cette voie exige un niveau de « propreté » important et n'est donc pas prometteuse.

Enfin, il existe quelques autres voies qui offrent des débouchés très limités : traitement des eaux, correction et amendement des sols, applications industrielles.

Le **remblayage de carrières**, en particulier des carrières souterraines de gypse, est envisageable dans les régions d'exploitation de gypse. Il ouvre un débouché quasiment naturel puisqu'il consiste à stocker dans une cavité un matériau chimiquement identique à celui qui a été extrait.

La **mise en décharge** et l'utilisation en **remodelage de terrains** peuvent être acceptables, sauf contexte particulier car, comme il a été dit précédemment, la quantité de plâtre présent dans les déchets de chantier est faible. Cette voie d'élimination est praticable dans tout le pays et peut s'avérer économiquement viable.