Contenu de la matière :

Chapitre 1. Classification des liants et aspects normatifs

Chapitre 2. Ciments ordinaires et composés
Fabrication, propriétés, normes et emplois

Chapitre 3. Chaux hydrauliques
Fabrication, propriétés, normes et emplois

Chapitre 4 Chaux aérienne
Fabrication, propriétés, normes et emplois

Chapitre 5 Plâtre
Fabrication, propriétés, normes et emplois

Chapitre I : Classification des liants et aspects normatifs

I.1. Introduction :

Un liant est un produit qui sert à agglomérer une masse solide, des particules solides sous forme de poudre ou de granulats Les liants rentrent dans la fabrication des bétons des mortiers et même des peintures, des colles, des mastics…etc. Si l'on fournit à un liant la quantité d'eau voulue, on déclenche des réactions chimiques exothermiques (dégagement de chaleur) dénommées hydratation. Remarquons tout d'abord que ces phénomènes se produisent entre un liquide, l'eau et un solide, le grain du liant. On comprend facilement que l'hydratation est d'autant plus rapide et plus complète que la surface des grains solides est grande (l'importance de la finesse du liant). On peut admettre que le siège des différentes réactions se trouve aux surfaces de contact entre le liquide et le solide. L'hydratation ne gagne que très lentement l'intérieur des grains de liant. Extérieurement, l'hydratation se manifeste par deux phénomènes principaux : La prise et le durcissement.

I.2. Classification des liants :

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles : les liants organiques et les liants minéraux ;

- Les liants minéraux sont généralement obtenus par traitement à haute température de matière minérale, et font prise en présence d'eau. Le carbone ne s'y rencontre que sous la forme oxydée de CO2 (carbonate).
- Les liants organiques sont synthétisés par des organismes vivants, ou par la science de l'homme, au départ de matière minérale ou de matière organique préexistante. Leur mode de prise est complexe, et le carbone s'y rencontre principalement sous la liaison ≡C−H.

I.2.1. Liants organiques :

Les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ; Les résines et surtout les polymères : Les huiles sont employées pour leur pouvoir siccatif : huile de lin, …etc.

I.2.2. Les liants minéraux :

Les liants minéraux sont des poudres des matériaux minéraux finement broyés qui mélangés avec de l'eau forment une pâte plastique qui fait prise puis durcit. Les principaux liants minéraux sont : les ciments, les chaux, les plâtres, les silicates solubles, le ciment magnésien et le ciment de Sorel.

On désigne sous le nom de liant minéraux des produits qui une fois additionnés d'eau donnent une masse plastique, facilement moulable et qui avec le temps forment une masse dure, compacte analogue à la roche naturelle.

Les liants minéraux ont un champ d'application très large, on les utilise pour la fabrication du mortier, du béton, du béton préfabriqué, …etc.

On classe ces liants minéraux en deux familles :

1) Les liants aériens : durcissement à l'air dû à une réaction de carbonatation : (Exemples : plâtre, chaux aérienne ou chaux grasse, liants magnésiens.) ;
2) Les liants hydrauliques : durcissement en milieux humides ou dans l'eau dû à une réaction d'hydratation de silicates ou d'aluminates : (Exemples : chaux hydraulique, ciment prompt, ciments Portland, laitiers…etc.)

I.3. Caractéristiques des liants :

Les liants se différent par la vitesse de prise et la résistance mécanique.

1- Prise du liant :

La prise du ciment est la transformation de l'état plastique en état solide. Le début de prise correspond au moment où la pate commence à perdre sa plasticité et à devenir raide. Cette opération prend fin lorsque la pate devient entierement solide. La phse suivante correspond au durcissement de leur vitesse de prise qui se prolonge pendant plusieurs mois.

En fonction de leur vitesse de prise, ils sont classées en trois catégories :

- Liants à prise rapide.
- Liants à prise demi-lente.
- Liants à prise lente.

NB : le temps de prise doit correspondre à la durée dont on dispose pour procéder au malaxage, au transport et à la mise en ouevre. Si la prise commence avant la mise en place la résistance chute.

2- Essais des liants :

Avant d'être livrés dans le commerce, les liants subissent des essais de différentes natures.

a) Essais chimiques :

- Analyse des composants.

b) Essais physiques :

- Finesse de mouture (jouant son rôle dans la qualité du liant).
- Densité apparente.
- Proportion d'eau de gâchage.
- Durée de prise (essai à l'aiguille Vicat).

c) Essais mécaniques :

- de compression (c'est le plus important), on soumet à l'écrasement des cubes de 4cm d'arête. Ils sont essayées sous presse hydraulique, les uns au bout de 7 jours, les autres au bout de 28 jours (résistance nominale), les résultats s'exprime en bars.

Le nombre porté sur les sacs du liant indique la résistance à l'écrasement au bout de 28 jours.

- de traction jusqu'à rupture de l'éprouvette.
- de flexion : peu important.
- d'adhérence.
- de résistance aux eaux agressives.

I.4. Aspect normatif des liants

A l'instar de toutes les branches d'activité, le secteur de la construction en Algérie est régi dans son aspect technique par une réglementation spécifique prise en charge organiquement par une Commission Technique Permanente (CTP) regroupant plusieurs organismes (Organismes de Contrôle Technique, Centres de Recherches, Bureaux d'Etudes, Institut de Normalisation, Administration Publique). Cette réglementation qui constitue une référence pour l'ensemble des acteurs de la construction, est composée de plusieurs types de documents

- -Les Documents Techniques Réglementaires (DTR).
- -Les normes Algériennes (Normes NA),
- -Les différents guides et recommandations.

Certains textes réglementaires d'origine étrangère, définis par l'administration publique dans le circulaire du 15 août 1989 relative à l'application des règlements techniques et normes de construction, demeurent par ailleurs en vigueur.

Le système algérien de normalisation est régi par les textes législatifs et réglementaires suivants :

- La loi n° 89-23 du 19 décembre 1989 relative à la normalisation,
- Le décret exécutif n°90-132 du 15 mai 1990 relatif à réorganisation et au fonctionnement des Comités Techniques.
- Lois 04-04 relative à la normalisation

Le recueil établi par l'organisme national de contrôle technique de la construction (CTC centre), édition mars 2011, regroupe les différents Documents Techniques Réglementaires (DTR), Normes algériennes (NA) et les Documents Techniques étrangers adoptés en Algérie.

La mise à jour de la liste des normes et DTR est effectuée par :

- L'édition d'un nouveau document si les changements intervenus à des normes ou DTR contenus sont nombreux.
- En cas de modifications minimes, des addenda datées, numéroté et précis seront diffusés. Ils doivent être annexés à la présente liste à l'endroit réservé à cet effet (pli annexé en avant dernière page).

Toute édition ou mise à jour est accompagnée d'une notification précisant les éventuels changements dès la publication du document par l'organisme éditeur

A partir du recueil cité précédemment on peut citer les normes qui concernes les liants minéraux suivants :

a) Les normes qui concernent les liants hydrauliques :

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
1	**NA 523**	2007	- Liants hydrauliques - Techniques des essais - Sable normal et mortier normal	**EN 1967**
2	**NA 5026**	2009	- Liants hydrauliques - Vérification de la qualité des livraisons - Emballage et marquage	**NF P 15-300**
3	**NA 5044**	2005	- Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X	**EN 196-2**
4	**NA 5275**	2008	- Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Méthode d'essai de détermination de la résistance à la traction directe des mélanges traités aux liants hydrauliques	**EN 13286-40**
5	**NA 5276**	2008	- Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydraulique - Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélange traités aux liants hydrauliques	**EN 13286-42**

b) Les normes qui concernent les ciments :

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
1	**NA 228**	1992	- Ciments - Appareil de Vicat et moule tronconique	**NF P 15-473**
2	**NA 229**	1989	- Ciments - Détermination de la consistance normale	**NE 2-1-003**
3	**NA 230**	2010	- Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité	**……..**
4	**NA 231**	2006	- Ciments -Méthodes d'essais des ciments : Détermination de la finesse	**EN 196-6**
5	**NA 232**	1992	- Ciments - Détermination de l'expansion à chaud et à	**EN 196-3**

			froid	
6	**NA 234**	2007	- Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques	**NF P15-471**
7	**NA 254**	2006	- Méthodes d'essais des ciments - Méthodes de prélèvement et d'échantillonnage du ciment	**EN 196-7**
8	**NA 441**	1990	- Ciments - Essai de fissurabilité	**----------**
9	**NA 442**	2006	- Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants	**EN 196-1**
10	**NA 443**	2005	- Ciment pour travaux dans les milieux fortement agressifs	**NF P 15-319**
11	**NA 1952**	1990	- Méthodes d'essais des ciments - Essais de pouzzolanicité des ciments pouzzolaniques	**NF P15-475**
12	**NA 5029**	1997	- Liants hydrauliques - Ciments à maçonner	**NF P 15-307**
13	**NA 5030**	1997	- Liants hydrauliques - Ciment de laitier à la chaux	**NF P 15-306**
14	**NA 5031**	2009	- Liants hydrauliques - Ciment prompt naturel	**NF P 15-314**
15	**NA 5032**	2007	- Liants hydrauliques - Ciments Alumineux fondu	**NF P 15-315**
16	**NA 5033**	2002	- Liants hydrauliques - Ciments pour travaux dans les milieux moyennement agressifs	**NF P 15-317**
17	**NA 5035**	2007	- Liants hydraulique – Emploi du ciment alumineux fondu en éléments de structure.	**NFP15-316**
18	**NA 5039**	2009	- Liants hydrauliques - Guide d'utilisation des ciments	**FD P15-010**
19	**NA 5040**	2005	- Ciment - Evaluation de la conformité	**EN 196-2**
20	**NA 5041**	2009	- Méthodes d'essais des ciments- détermination quantitative des constituants	**NF P 15-474**
21	**NA 5042**	2007	- Ciment- conditions générales des essais chimiques	**NF P 15-472**
22	**NA 5061**	2006	- Méthodes d'essais des ciments : chaleur d'hydratation - Méthode semi- adiabatique	**EN 196-9**
23	**NA 5097**	2006	- Méthode d'essai des ciments : chaleur d'hydratation : méthode par d'dissolution	**----------**

c) Les normes qui concernent les adjuvants :

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
1	**NA 774**	2006	- Adjuvants pour bétons, mortier et coulis définition, exigence, conformité	**EN 934-2**
2	**NA 815**	2005	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Bétons de référence pour adjuvants.	**NF P 18-351**
3	**NA 818**	1990	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis : Détermination de la quantité d 'eau de gâchage des bétons et mortiers adjuvantés soumis aux essais d'efficacité à maniabilité constante 1ère éd.	**NF P18-352**
4	**NA 1940**	1992	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Ciment de référence 1992	**NF P 18-350**
5	**NA 1941**	1992	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Essais d'absorption capillaire	**EN 840-5**
6	**NA 1942**	1992	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Détermination des temps de prise sur mortier	**EN 480-2**
7	**NA 1944**	1992	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Reconnaissance chimique des adjuvants	**EN 380-6 EN 380-8**

8	**NA 1945**	1992	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Dosage des chlorures dans les adjuvants pour bétons	**EN 380-9 ET 10**
9	**NA 1946**	1992	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure de pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton	**NF P 18-353**
10	**NA 5000**	2008	- Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Coulis courant d'injection pour précontrainte - Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau	**NF P 18-358**
11	**NA 5005**	1995	- Adjuvants pour béton, mortiers et coulis - Coulis courants d'injection pour précontraint - Détermination de la fausse prise (essai de Tusschenbroeck)	**NF P 18-363**
12	**NA 5095**	2007	- Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Adjuvants pour coulis pour câbles de précontrainte - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage	**EN 934-4**
13	**NA 16001**	2006	- Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Echantillonnage, contrôle et évaluation de la conformité	**EN 934-6:2002 P 18-346**

d) Les normes qui concernent les plâtres :

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
1	**NA 524**	1992	- Plâtres - Conditions générales des essais	**ISO 3048**
2	**NA 525**	1992	- Plâtres - Détermination de la masse volumique du produit en poudre	**ISO 3049**
3	**NA 526**	1992	- Plâtres - Détermination des caractéristiques mécaniques	**ISO 3051**
4	**NA 527**	1992	- Plâtres - Détermination de la finesse de monture de produit en poudre	**ISO 3049**
5	**NA 528**	1992	- Plâtres - Détermination de la teneur en eau de cristallisation	**ISO 3052**
6	**NA 5073**	2006	- Plâtres et enduits à base de plâtre pour le bâtiment - Méthodes d'essai	**EN 13299-2**
7	**NA 5087**	2008	- Plâtres et enduits à base de plâtre pour le bâtiment - Définitions et spécifications	**……..**

e) Les normes qui concernent les chaux :

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
1	**NA 5011**	2006	- Chaux de construction - Définitions, spécifications et critères de conformité	**EN 459-1**
2	**NA 5012**	2006	- Chaux de construction - Méthodes d'essai	**EN 459-2**
3	**NA 5013**	2006	- Chaux de construction - Evaluation de la conformité	**EN 459-3**

f) Les normes qui concernent les produits spéciaux :

N°	Référence	Date	Intitulé	Equivalent
1	**NA 5028**	2008	- Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci. Caractères	**P 18-840**

			normalisés garantis.	
2	**NA 5034**	2009	- Produits spéciaux destinés aux réparations, collages, injections, calages, scellements, applicables aux constructions en béton hydraulique. Définitions, classification, conditionnement, marquage, conditions de réception.	**……..**
3	**NA 5050**	**2005**	- Produits spéciaux destines aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques destinés aux réparations de surface du béton durci. Essai de perméabilité aux liquide	**NF P18-855**
5	**NA 5051**	**2005**	- Produits spéciaux destines aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques destinés aux réparations de surface du béton durci. Essai de tenue aux rayonnements ultra-violets.	**NF P18-856**
6	**NA 5052**	**2005**	- Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits ou système de produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques destines aux réparations de surface du béton durci. Essai, après cycles de gel-dégel	**NF P18-857**
7	**NA 5053**	**2005**	- Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci. Essai d'adhérence par traction sur dalle support a surfacé	**NF P18-858**
8	**NA 5054**	**2006**	- Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques destinés aux applications superficielles sur béton durci. Essai d'adhérence par traction après cycles thermiques sur éprouvette à surface rugueuse.	**NF P18-859**
9	**NA 5055**	**2006**	- Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci. Essai de tenue aux chocs répétés sur éprouvette à surface rugueuse.	**NF P18-860**
10	**NA 5056**	**2006**	- Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci. Essai, après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse.	**NF P18-861**
11	**NA 5057**	**2007**	- Produits spéciaux destines aux constructions en béton hydraulique produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques destines aux réparations de surface du béton durci essai de permé	**NF P18-862**

Chapitre II. Ciments ordinaires et composés

II.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

II.2. L'histoire du ciment

Les Chinois et les Mayas élevaient des constructions avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau et d'un broyage.

Les Egyptiens utilisaient, en 2600 avant JC, un mélange de chaux, d'argile, de sable et d'eau pour sceller les pierres.

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de "pouzzolanique", qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux. En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexpliquée jusqu'aux travaux de Louis Vicat qui élabore en 1817 la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches.

Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. L'industrie du ciment était née.

Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspadin donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait la solidité de la pierre de cette région.

En France, en 1833, Pavin de Lafarge installe des fours à chaux au Teil et la première usine de ciment est créé par Dupont et Demarle à Boulogne sur Mer en 1848.

II.3. La fabrication des ciments courants :

Le constituant principal des ciments est le clinker (K), qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne 80 % / 20 %.

Le clinker, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland (CEM I). Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant par cobroyage au mélange d'autres constituants tels que les laitiers granulés de haut fourneau (S), les matériaux pouzzolaniques (Z ou Q), les cendres volantes (V ou W), les schistes calcinés (T), le calcaire (L ou LL), les fumées de silice(D).

II.3.1. Extraction et concassage :

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont transportés vers l'atelier de concassage et réduits dans en éléments d'une dimension maximale de 50mm. Ces concasseurs sont situés parfois sur les lieux même de l'extraction.

II.3.2. Préparation de la matière première :

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage et délayage, dans les proportions définies, en un mélange très fin le ''cru''. A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion : oxyde de fer, …

Le cru est préparé automatiquement sous forme de poudre (voie sèche) ou de pâte (voie semi-humide ou humide), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

II.3.2.1. Voie sèche :

La voie sèche est de très loin, la technique la plus utilisée aujourd'hui. La matière première est préparée sous forme de poudre. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des deux constituants essentiels du ciment par superposition de multiples couches.

A la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise.

Cette poudre "le cru", est une nouvelle fois homogénéisé par fluidisation, corrigée si nécessaire puis stockée en silo avant l'introduction au four.

L'homogénéisation et le stockage sont réalisés dans la même tour qui comporte à sa partie supérieure un silo d'homogénéisation dans lequel le cru est brassé par air comprimé, il est ensuite stocké dans le silo à la partie inférieure de la tour.

II.3.2.2. Autres techniques de préparation de la matière :

Les autres techniques de préparation sont moins employées. Elles consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide).

En voie humide, Les blocs sont déversés dans un bassin de délayage (alimenté d'eau), à l'intérieur duquel tourne une herse qui effrite et divise la matière. La pâte ainsi obtenue qui est encore grossière est ensuite broyée et envoyée dans des bassins de stockage pour y être homogénéisée mécaniquement.

II.3.3. Cuisson ou calcination :

Quelque soit la technique élaborée pour la préparation du cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties :

1) Un échangeur de chaleur comportant 4 à 5 cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progresse jusqu'à l'entrée du four.

   Elle se réchauffe au contact des gaz chauds sortant de ce four et se décarbonate en partie.

   Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination).

   La poudre est ainsi portée d'environ 80 à 1000 °C en un temps très court

2) Il s'agit dans la deuxième partie, d'un four horizontal cylindrique en tôle d'acier avec revêtement réfractaire intérieur de 60 à 150 mètres de long et de 4 à 5 mètres de diamètre, légèrement incliné et tournant à environ 1 tour /minute.

   Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (1450 °C).

   Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer), se combinent avec la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux.

La cuisson est une opération forte consommatrice d'énergie. La source de chaleur est apportée par une tuyère qui peut brûler différents combustibles : gaz naturel, fuel, charbon, coke de pétrole.

A la sortie du four, le clinker tombe sur des refroidisseurs à grille qui ramènent sa température à 70 °C ; ce choc thermique donne naissance à des granules de diamètres variant entre 1 et 10mm.

II.3.4. Broyage :

Le clinker est ensuite véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de régulariser la prise.

Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tel que le laitier de Haut-fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment.

Industriellement, il existe deux modes de broyage :

1) Le broyage en circuit ouvert où le clinker traverse trois compartiments contenant des agents broyants de tailles différentes
2) Le broyage à circuit fermé où le clinker traverse deux compartiments et à la sortie, le produit est envoyé dans un séparateur qui élimine les grains trop gros. Ces derniers sont recyclés.

Chacun des broyeurs, est alimenté par deux ou plusieurs doseurs qui permettent de régler les proportions de clinker, gypse et ajouts.

Les grains de ciment étant récupérés à la sortie du broyeur sont expédiés vers des silos de stockage. Ces silos sont cylindriques et de capacité pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes.

Le ciment qui est produit à un prix unitaire relativement bas, supporte mal, en coût, de longs transports. L'expédition s'effectue selon deux modes :

a) Le premier se fait en vrac, par bateaux, trains ou camions où l'extraction se fait sous le silo sur pont bascule par manches télescopiques.
b) Le second se fait en sacs palettisés par camions ; l'ensachage est effectué par des ensacheuses à plusieurs becs (jusqu'à 12 becs), qui assurent un débit de 100 tonnes par heure. Les sacs ainsi remplis sont envoyés vers un atelier de palettisation qui met sur palettes les sacs de ciment.

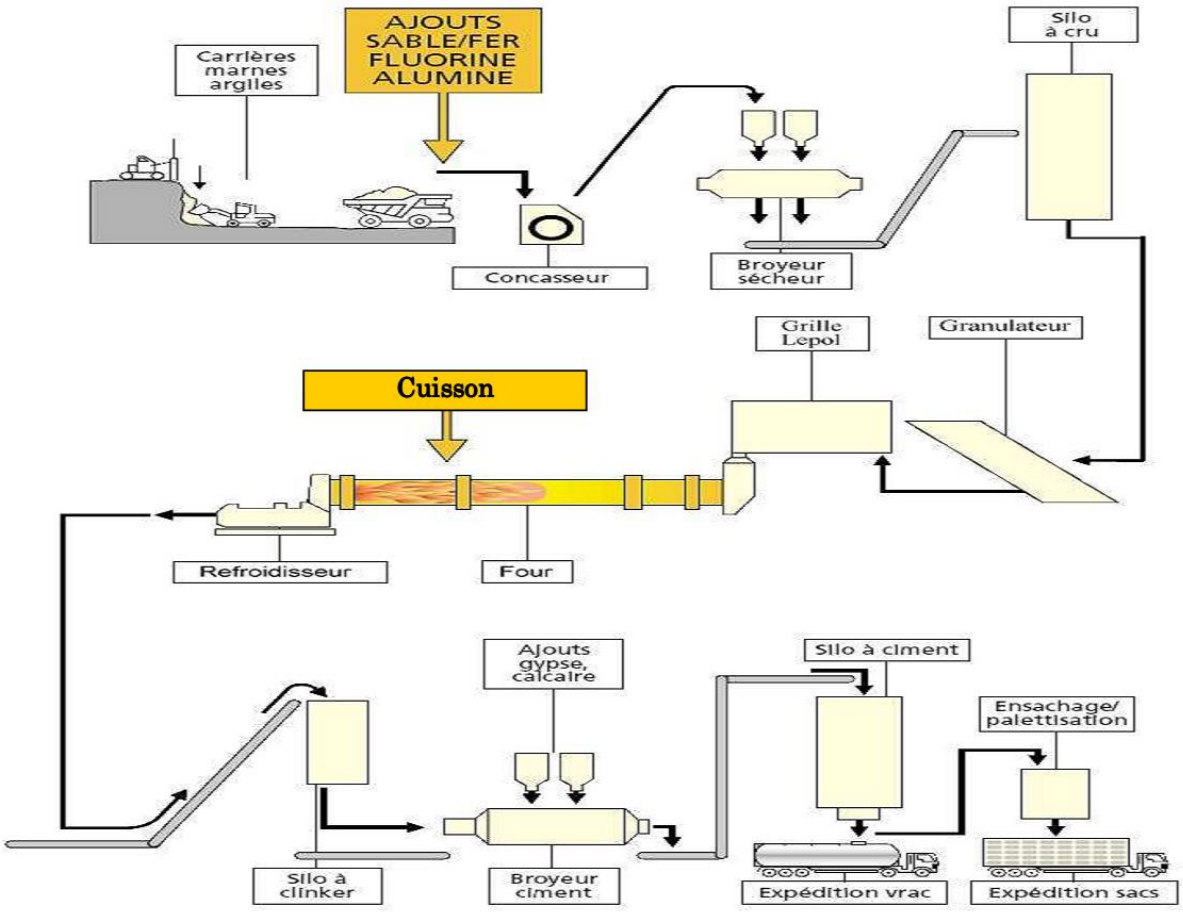

Figure II.1 : Schéma de la chaîne de fabrication du ciment portland

II.4. Le marquage CE et la norme NF EN 197-1 (ciments courants)

Depuis le 1er avril 2002, tous les ciments commercialisés dans l'union européenne doivent être titulaires du marquage obligatoire CE, exprimant leur conformité à la norme EN 197-1.

En France, la norme de référence est la norme NF EN 197-1 “Ciment - partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants”.

La norme NF EN 197-1 concerne les ciments les plus courants. D'autres normes existent concernant soit des propriétés particulières (prise mer : PM, résistance aux eaux sulfatées : ES,...) soit des ciments ayant des normes entièrement spécifiques : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel.
En France, les ciments courants bénéficient d'un marquage CE et d'une marque NF qui atteste:

- Pour le marquage CE, que les produits respectent les exigences essentielles européennes en matière de santé, sécurité et respect de l'environnement,
- Pour la marque NF associée au marquage CE, que les produits bénéficient de garanties complémentaires sur leur composition, leurs performances et leurs contrôles.

II.5. Les principales catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

II.5.1. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion de leurs constituants :

- CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation française).
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le Tableau II.2. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires).

Tableau.II.2 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

	Cim. Port-land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤ total ≤20% (fumée de silice ≤10%)	21%≤ total ≤35% (fumée de silice ≤10%)	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*			*	*	*	10% ≤ total ≤35% (fumée ≤10%)	36% ≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total ≤30%	31%≤ total ≤50%
Cendre siliceuses (V)	*			*	*	*				
Fumée de silice (D)	*			*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

II.5.1.1. Effet des ajouts sur le ciment

Les ajouts additionnés au clinker produisent différents effets sur ses propriétés, le tableau II.1 montre l'influence des ajouts les plus utilisés sur le ciment.

Tableau II.1 : Effet des différents ajouts sur le ciment

Constituant Ajouté	Effets
Laitier granulé de haut fourneau	• Diminue la réactivité à court terme. • Diminue les retraits. • Montée en résistance.
Pouzzolane naturelle	• Diminue la réactivité à court terme et ses effets. • Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
Pouzzolane calcinée	• Diminue la réactivité à court terme et ses effets. • Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
Cendre volante siliceuse	• Apporte une résistance complémentaire à long terme. • Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité. • Améliore l'ouvrabilité, teinte en noir le béton.
Cendre volante calcique	• Améliore l'ouvrabilité. • Teinte en noir le béton.
Schiste calciné	• Diminue la réactivité à court terme et ses effets. • Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
Calcaire broyé	• Accélère la cinétique d'hydratation à très court terme (2 à 7jours). • Complète le squelette granulaire.
Mélange de constituants	• Associe les effets des différents constituants. • Diminue le prix du ciment. • Couleur et propriétés variables

II.5.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur de la résistance normale du ciment à 28 jours (tableau II.3).

Pour chaque classe de résistance, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en N/mm^2 (1 N/mm^2 = 1 MPa = 10 daN/cm^2 =10bars).

Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée.

Les valeurs indiquées dans le tableau II.3 sont les résistances caractéristiques fixées pour les ciments titulaires du marquage CE complétées par les spécifications supplémentaires de la marque NF.

Tableau II.3 : Résistances caractéristiques des ciments CE+NF

Désignation de la classe	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	À 2 jours	À 7 jours	À 28 jours	
32,5 N	-	> 16	> 32,5	< 52,5
32,5 R	> 13,5	-		
42,5 N	> 12,5	-	> 42,5	<62,5
42,5 R	> 20	-		
52,5 N	> 20	-	> 52,5	-
52,5 R	> 30	-		

II.5.2.1. La classe vraie du ciment

La classe vraie du ciment σ'_c est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé. Le cimentier garantie une valeur minimale atteinte par au moins 95 % des échantillons (dénomination normalisée spécifiée sur le sac de ciment). La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le fabriquant est donnée dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

Exemple : la classe vraie du ciment CEM II/B-S 32.5 R est de 45 MPa.

II.6. Les caractéristiques du ciment portland

II.6.1. La prise (NA230, NF EN 196-3)

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire occuper par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.

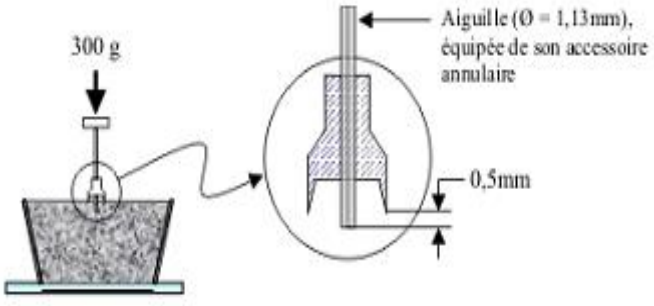

Figure.II.1 : Détermination du temps de début de prise par l'appareil de Vicat.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance (d = 6 mm ±3 mm) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure II.1).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

II.6.2. Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

II.6.3. La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NA231, EN196-6)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure II.2).

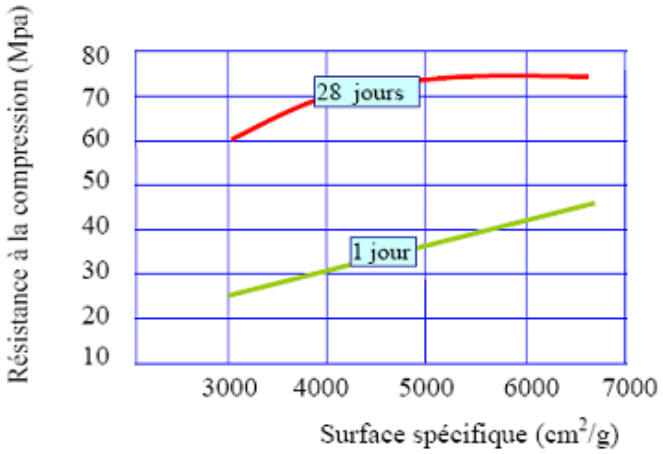

Figure II.2 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression.

II.6.4. Le Retrait (NA440, NF P15 433)

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives.

C'est le retrait qui cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton. En fait il existe plusieurs types de retrait :

- Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique.
- Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction « le principe de Le Chatelier » (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons.
- Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels :

- La nature du ciment.
- Le dosage en eau (figure II.3).
- La propreté des sables.
- La forme et la dimension des granulats.

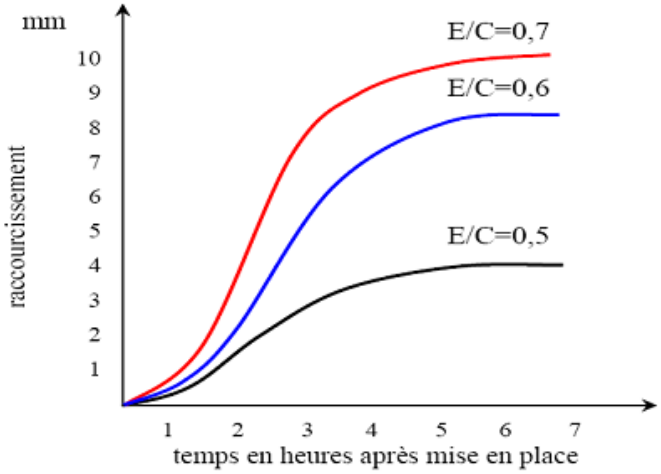

Figure II.3 : Influence de l'E/C sur le retrait plastique des mortiers.

II.6.5. Chaleur d'hydratation (EN196-9, NF P15-436)

La présente Norme européenne décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant. L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

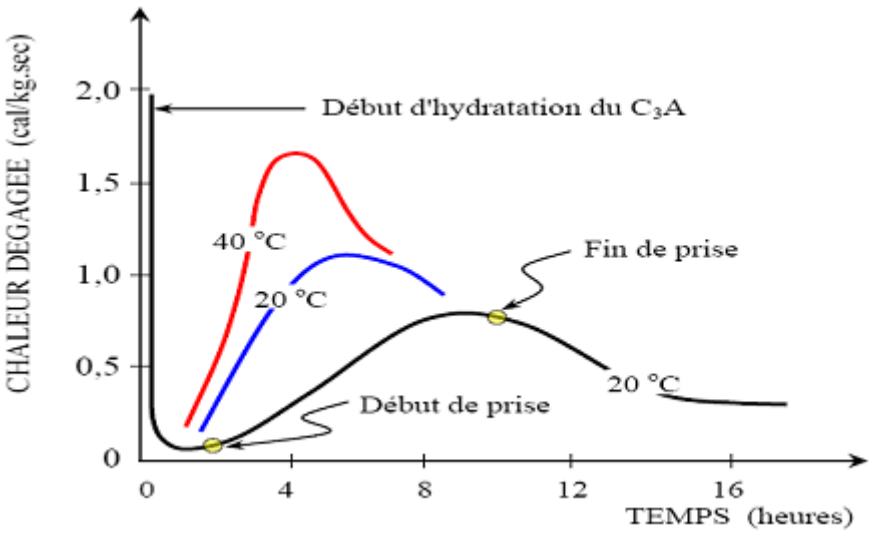

Figure II.4 : Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CPA.

II.6.6. Résistance à la compression (NA 234, EN 196-1)

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm^3. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa. Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

II.7. Utilisation des différents ciments

Les différents domaines d'utilisation de chaque type de ciment sont représentés sur le tableau II.5.

Tableau II.5 : Domaines d'utilisation des ciments.

Type de ciment	Domaine d'utilisation
Ciment Portland CEM I	Tous travaux en béton armé ou précontraint, coulés sur place ou en préfabriqués. Ils permettent un décoffrage et une mise en service rapide. Il représente 33 % de la consommation totale de ciment.
Ciment Portland composé CEM II	Bétons d'ouvrages courants en élévation, dallages, maçonneries, stabilisation des sols. Il représente 53 % de la consommation totale de ciment.

Ciment des hauts-fourneaux CEM III	Ouvrages situés en milieux agressifs, travaux souterrains, ouvrages pour eaux usées ou industrielles, travaux à la mer.
Ciment pouzzolanique CEM IV	Ayant une bonne résistance mécanique, mais sensible au froid, il est destiné en particulier a des travaux massifs en béton armé ou précontraint, aux travaux maritimes et aux ouvrages étanches.
Ciment au laitier et aux cendres CEM V	Ses propriétés sont proches de celles du ciment de haut fourneau mais il est plutôt utilisé dans les milieux moyennement agressifs

Chapitre III. Chaux hydrauliques

III.1. Historique de la chaux hydraulique

Il est apparu très tôt que des adjonctions permettaient d'améliorer la prise et la stabilité du mortier de chaux, en particulier de la rendre insensible à l'action de l'eau. L'enduit, assurant l'étanchéité des citernes construites à Jérusalem au 10ème siècle avant notre ère, est fait de la chaux hydraulique.

Dans l'île grecque de Santorin, on ajoutait au mélange chaux-sable une quantité de poudre volcanique qui conférait au mortier la propriété d'être stable à l'eau, et de durcir partiellement sans apport de gaz carbonique. Cette caractéristique appelée « hydraulicité », peut être obtenue au départ d'autres matériaux, notamment la brique ou la tuile pilée.

Les Romains ont pratiqué à grande échelle l'adjonction à la chaux d'argile cuite et surtout de pouzzolane. La plus grande stabilité à l'eau des matières ainsi obtenues est due à une réaction plus ou moins lente entre la chaux et la silice colloïdale et l'alumine contenues dans les produits mentionnés, avec formation d'hydrosilicates et d'hydro aluminates dont la nature est comparable à celle des produits qu'on obtient par hydratation des liants hydrauliques modernes.

La chaux hydraulique s'obtient à partir de roches calcaires contenant 10% à 20% d'impuretés argileuses (calcaires marneux).

III.2. Les chaux hydrauliques

Elles sont ainsi nommées parce qu'elles possèdent la propriété, très importante, de durcir non seulement à l´air et dans les lieux humides mais encore sous l´eau.

Les chaux hydrauliques s´obtiennent par cuisson entre 850 et 1100°C de calcaire avec impureté argileuse inferieur ou égale à 22 %

Les chaux obtenues sont d´autant plus hydraulique que la proportion d´argile est plus élevée.

L´argile étant un mélange des corps suivants :

- Silicate d´alumine hydraté
- Silice
- Oxyde ferrique

Tableau III.1 : Hydraulicité de la chaux selon le pourcentage d'argile.

Chaux	**Pourcentage d'Argile**
Faiblement hydraulique	5 à 8 %
Moyennement hydraulique	8 à 14 %
Hydraulique	14 à 19 %
Eminemment très hydraulique	19 à 22 %

III.3. L´indice d´hydraulicité

La proportion d'argile dans la pierre avant calcination conditionne les caractéristiques de la chaux hydraulique. Plus d'argile = plus d'hydraulicité = plus de résistance. Cette règle exprimée par Vicat fut la première façon de prévoir l'hydraulicité de la chaux à partir des caractéristiques de la pierre.

On évalue aujourd'hui le pourcentage de silice combinable, mesure plus précise que le taux de silice totale de Vicat.
Calcul de l'indice d'hydraulicité " i " de Vicat :
i = Poids d'argile / Poids de calcaire.
i = (Silicium SiO_2 + Alumine Al_2O_3 + Fe_2O_3) / CaO + MgO
i = Poids des constituants acides / Poids des constituants basiques.
Cet indice ***i*** permet de classer les chaux de la chaux aérienne (argile = 0 %) à la chaux la plus hydraulique contenant 20% d'argile.

- Chaux grasse : argile = 0%
- Chaux maigre : argile < 3%
- Chaux faiblement hydraulique : 8% < argile < 15% (prise en 2 à 4 semaines)
- Chaux moyennement hydraulique : 15% < argile < 19% (prise en 2 à 15 jours)
- Chaux éminemment hydraulique : 19% < argile < 22 (prise en 2 jours)

III.4. Fabrication des chaux

1. Extraction
2. Concassage des pierres de chaux provenant des carrières.
3. Triage : élimination des graviers, terres et morceaux défectueux.
4. Cuisson dans des fours.

5. Extinction soit par immersion (on plonge la chaux dans l'eau quelque secondes), soit par arrosage léger de manière que toute la masse soit mouillée et on laisse ainsi la chaux jusqu´à l´extinction totale (on étale la pierre en couches de 15 à 20 cm, on l'arrose ensuite).
6. Broyage (transformation du produit en poudre)

La chaux hydraulique en poudre est jaune claire avec des nuances grisâtres. Elle est plus claire que les ciments.

III.5. Emploie de la chaux hydraulique

Les chaux sont utilisées pour les carrelages, les enduits, les ouvrages peu délicats pour lesquels ne sont pas recherchées de hautes résistances : murs de clôtures, habitations à un ou deux étages, etc...

III.6. Classification des chaux hydrauliques

Les chaux hydrauliques sont classées selon la masse volumique ou la densité.

On distingue :

III.6.1. Chaux légère

- Densité apparente inférieur à 600 kg/m^3 ;
- Indice d´hydraulicité inférieur à 0,3
- La résistance à la compression après 28 jours inférieur à 3 MPa

III.6.2. Chaux lourde

Elle possède 3 classes suivant la résistance, la densité apparente.

Résistance à 28 jours	**Densité apparente**
3	600 à 750
6	≥ 750
10	≥ 900

Chapitre IV. Chaux aérienne

IV.1. Historique de la chaux aérienne

La chaux est apparue dans le courant du 2ème millénaire avant notre ère. Elle est obtenue par la cuisson entre 850°C et 1000°C de roche calcaire pure ou de coquillages marins. Il est intéressant de noter que le verbe « calciner », qui signifie brûler à haute température a précisément pour origine étymologique le terme latin « calx, calcis » désignant la chaux.

La chaux « vive » obtenue par « calcination » est « éteinte » par adjonction d'eau, et fournit «La chaux hydratée » ou « La chaux aérienne ». La chaux hydratée ne peut faire prise qu'au contact de l'air, en réagissant avec le gaz carbonique ambiant (d'où son nom de « chaux aérienne »).

En un premier temps, la chaux sert surtout à la confection d'enduit. Elle entre avec le plâtre et la poudre de marbre, dans la composition des stucs, que les architectes grecs utilisaient dès le 7ème siècle avant J.-C. pour couvrir l'aspect rude des murs construits en pierre calcaire ou en tuf. Ces murs étaient montés en blocs de pierre ajustés sans mortier, ou en pierres ébauchées, liées par un mortier fait de terre et d'argile.

Ce sont les Romains qui, dès le 2ème siècle avant notre ère, vont développer l'usage du mortier de chaux et répandre la technique dans toutes les régions de l'empire. Ils ont systématisé l'usage du mortier pour assurer les joints des appareils de brique ou de pierre. La technique est toujours en usage aujourd'hui.

IV.2. Définition

On appelle ainsi « chaux aérienne » parce qu'elles ne peuvent durcir qu'à l'air par une carbonatation, les chaux aériennes durcissent en réagissant avec le CO_2 de l'air : c'est un processus lent et progressif.

Le mortier obtenu à partir de la chaux aérienne est employé uniquement dans la maçonnerie de faible épaisseur.

IV.3. Fabrication

Les chaux aériennes sont obtenues par calcination du calcaire vers 850°C dans des fours verticaux ou des fours à tambours (Figure IV.1)

Selon la pureté du calcaire (CaCO3), on obtient de la ***chaux grasse*** ($CaCO_3$ pratiquement pur) ou des ***chaux maigres*** (calcaire contenant moins de 5 % d'argile). La réaction générale est la suivante :

$$CaCO_3 + 42{,}5\ \text{cal} \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$$

Le calcaire est introduit dans le four sous la forme de bloc de granulométrie (100 à 200 mm) afin d'obtenir une bonne circulation des gaz chauds autour des blocs. A la fin de la cuisson, on obtient des blocs de chaux vive.

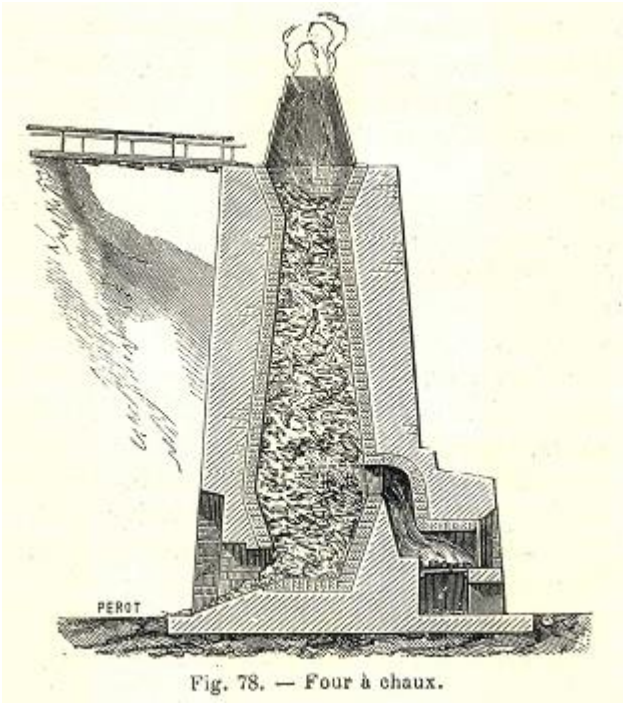

Fig. 78. — Four à chaux.

Four à chaux ancien (avec enfournement du calcaire et du combustible)

Four à chaux sur le site (2008)

Figure IV.1 : Fours à chaux

La masse volumique apparente de toutes les pierres utilisées industriellement pour la fabrication de chaux se caractérise par une densité inférieure à celle de la calcite (Tableau IV.1). Les pierres présentent en effet une porosité pouvant atteindre 30 %.

Tableau IV.1 : calcination du calcaire et obtention de la chaux vive.

Caractéristique	**CaCO3**	**→ CaO**	**+ CO2**
Poids moléculaire	100,09	56,08	44,01
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.5 - 2,7	1.4 -1.9	
Masse volumique réelle (g/cm^3)	2,71	3,33	
Porosité (%)	0 - 40	40- 60	

Si la chaux est destinée à être utilisée comme chaux vive, elle est broyée aux dimensions souhaitées. Si la chaux est destinée à être utilisée comme chaux éteinte $Ca(OH)_2$, les blocs de chaux vive sont aspergés d'eau ou immergés dans un bac rempli d'eau. Si on veut obtenir une poudre sèche, on adapte la quantité d'eau pulvérisée sur la chaux vive.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15{,}5\ cal$$

La réaction d'extinction est fortement exothermique et a pour effet de pulvériser les blocs en une poudre fine (dimension moyenne des grains : 5µm). Il y a lieu de prendre des précautions pour que la chaux éteinte ne se recarbonate pas en contact avec le CO_2 de l'air. Elle doit être emballée hermétiquement ou maintenue sous eau (lait de chaux).

L'hydratation de la chaux vive en chaux hydratée s'accompagne d'un foisonnement important

IV.4. Chaux aériennes grasses et maigres

Les chaux aériennes grasses sont des chaux aériennes obtenues au départ de calcaires quasi purs, tandis que les chaux aériennes maigres sont obtenues au départ de calcaires qui peuvent contenir jusqu'à 5 % d'argile.

IV.5. Modes de réaction

Les liants à base de chaux aériennes réagissent à température ambiante avec le CO2 de l'air pour reformer le $CaCO_3$. Cette réaction est lente, et lorsque l'épaisseur du mortier ou du béton est très épaisse, le temps pour durcir l'élément à cœur peut prendre des dizaines d'années ou des siècles (diffusion du CO_2). Lorsque le liant est utilisé comme revêtement en couche mince, la réaction est suffisamment rapide pour obtenir rapidement une bonne cohésion et une bonne adhésion au support.

IV.6. Propriétés principales

- Le refus au tamis de 800µ est nul et le refus au tamis de 80µ doit être inférieure à 10%.
- La finesse globale doit se situer dans l'intervalle de 8.000 à 20.000 cm^2 /g.
- La masse volumique apparente varie de 500 à 700 kg/m^3 et la masse volumique absolue varie de 2200 à 2500 kg/m^3.
- La chaux vive est très avide d'eau, elle s'éteint en s'hydratant avec un fort dégagement de chaleur (absorbe pour 1kg de chaux, 3 litres d'eau). Cette propriété est utilisée pour assécher et traiter les sols très imprégnés d'eau.
- La chaux éteinte durcit en fixant le gaz carbonique de l'air pour redonner du carbonate de calcium.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

- La chaux aérienne présente un indice de clarté proche de 100 (indice qui varie de 0 à 100). Ce qui permet de révéler la coloration de l'agrégat.
- La chaux aérienne résiste bien au feu. Sa résistance réfractaire varie entre 1800 à 2000 °C.

- La chaux aérienne prend lentement. Le temps de début de prise est de 600 minutes (10 heures)
- La solubilité est faible (1 à 1,5 g/l), ce qui permet de fabriquer des laits de chaux.
- La chaux grasse est fortement basique, ce qui permet de neutraliser les acides du sol ou les eaux usées (produit bactéricide).
- La chaux grasse constitue un bon isolant à la fois phonique et thermique.
- L'eau de gâchage pour l'obtention d'une pâte de chaux est de 8 à 15%.
- La chaux aérienne fait l'objet d'une normalisation. La norme française ancienne NFP 15 510 désignait la chaux aérienne éteinte pour le bâtiment par CAEB. Une nouvelle désignation apparaît CL (calcique Lime, NFP 15 311).

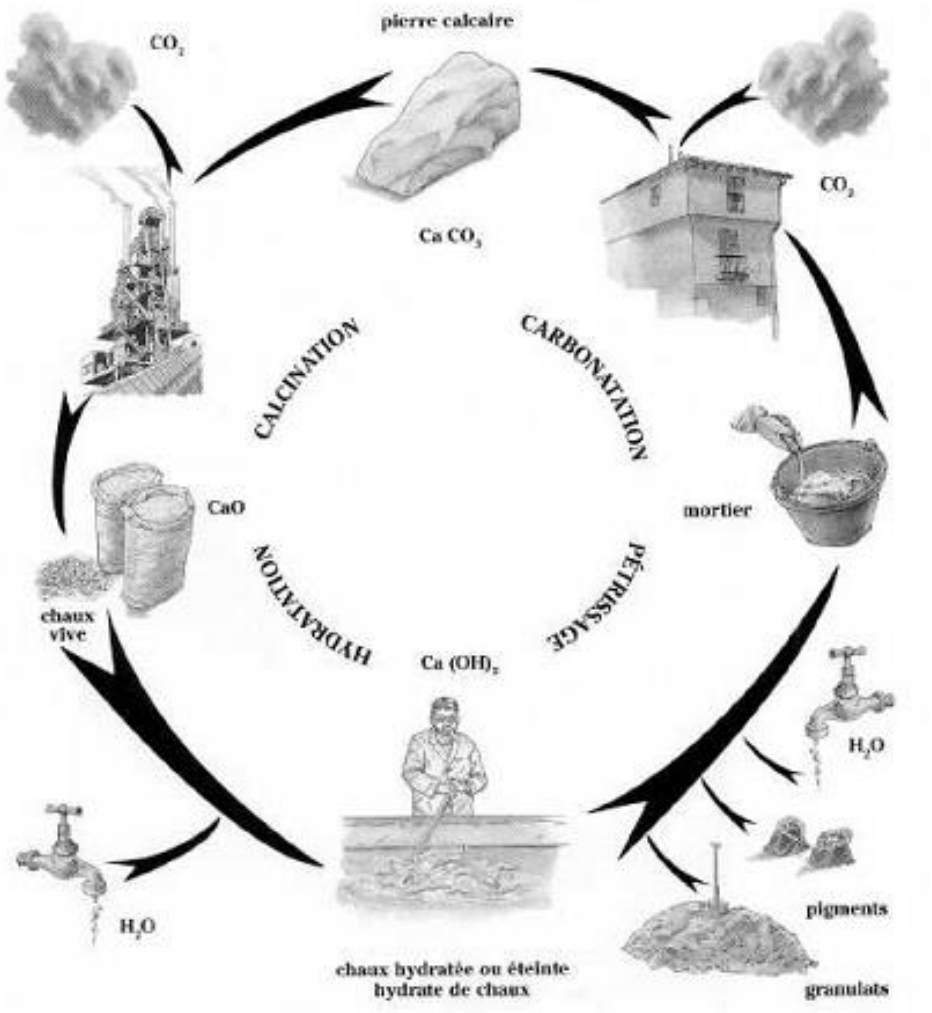

Figure IV.2 : Cycle de la Chaux grasse

IV.7. Utilisation dans le bâtiment

Les chaux aériennes trouvent leurs applications les plus anciennes dans le bâtiment dans la préparation de mortiers et de badigeons

IV.7.1. Enduits

Ont principalement deux fonctions : protection et esthétique.

Les mortiers de chaux présentent une grande élasticité, ce qui permet d'éviter les fissures de retrait et faïençage.

Les mortiers de chaux, une fois durcis, ont la propriété d'être imperméable à l'eau tout en étant perméable à l'air. On dit que le mur respire.

Le durcissement des enduits à base de chaux est lent ; par conséquent, il est déconseillé de les utiliser à l'extérieur par période hivernale. Aussi, il faut protéger l'enduits frais contre le soleil et les vents violents.

L'association de la chaux aérienne et du ciment constitue un liant privilégié pour les enduits (mortier bâtard).

Le mortier à la chaux respecte la couleur du sable. Il permet de retrouver l'aspect d'origine des constructions anciennes et des monuments historiques.

La couleur finale de l'enduit réalisé avec de la chaux dépend essentiellement du sable utilisé. On peut, quand de besoin y ajouter des oxydes métalliques en poudre pour accentuer la coloration en s'assurant de le doser parfaitement et de bien le mélanger.

Le temps de séchage à observer entre chaque couche peut varier entre un à plusieurs jours selon les conditions climatiques et de mise en œuvre.

La couche de finition peut être talochée, jetée à la truelle, projetée à la machine... Mais en général, il est recommandé de la gratter ou de la brosser, quelques heures à quelques jours après application.

IV.7.2. Mortiers de pose et de jointement

La force de liaison d'un mortier de pose est plus importante que sa résistance à la compression. Les mortiers de chaux qui développent cette adhérence grâce à leur plasticité, sont ainsi bien adaptées à cet emploi. Ils sont de surcroît peu perméables à l'eau et peu fissurables. Ils ne provoquent pas d'efflorescences.

Les mortiers de chaux constituent de très bons mortiers de jointement de maçonneries en pierres tendres, en béton cellulaire ou en briques. Ils sont également très utilisés dans les travaux de bâtiments anciens.

IV.7.3. Badigeons

Sont obtenus en mettant la chaux éteinte en suspension dans l'eau à raison de 40 litres d'eau par sac de 25 kg.

Ils sont réalisés à deux ou trois couches.

Les badigeons sont réalisés sur des supports enduits, lissés, frottés ou décoratifs, pour donner un aspect uniforme aux couleurs et aux matériaux.

Ils peuvent avoir un effet curatif de bouchage sur des enduits microfissurés ou faïencés, et rattraper des défauts d'aspect

IV.7.4. Matériaux de construction

La chaux intervient aussi dans la fabrication de matériaux de construction :

Les briques silico calcaires, sont fabriquées avec un mélange de chaux et de sable siliceux, compacté et étuvé. Ce matériau est très utilisé en Allemagne et en Russie. Deux grande usines sont installées en Algérie.

Les Bétons cellulaires, matériaux légers et isolants. Sont fabriqués à base de sable siliceux et de chaux dans lequel on provoque la formation de bulles de gaz, souvent par action de la chaux sur l'aluminium en poudre.

IV.7.5. Autres utilisations

La protection des bois : Les poutres en bois (non peintes) peuvent recevoir un lait de chaux vive. Si on incorpore de l'huile de lin chaude au moment de l'extinction on réalise une "huile chaulée", peinture adaptée à la protection et la décoration des bois.

La désinfection : Les étables étaient régulièrement désinfectées à la chaux vive. Fortement basique elle tue les micro-organismes.

La stabilisation des terres : 20 à 40 Kg de chaux vive mélangée à une tonne de terre argileuse provoque un accroissement très important de la résistance du sol par floculation des argiles.

Chapitre V. Plâtre

V.1. Généralités

Le mot plâtre désigne à la fois le matériau de structure solide et la poudre qui permet de l'obtenir. Cette poudre (sulphate de calcium hémihydraté, $CaSO_4,½H_2O$) s'obtient en déshydratant du gypse (sulphate de calcium dihydraté, $CaSO_4,2H_2O$). C'est la réhydratation de l'hémihydrate en gypse (après mélange de la poudre avec de l'eau) qui permet la constitution d'un matériau solide.

V.2. Le gypse

Le gypse est le matériau de base de la fabrication industrielle des plâtres. Il existe deux grandes catégories de gypses :

V.2.1. Les gypses naturels

Le gypse qui se trouve dans la nature est sous forme d'une roche compacte. C'est une roche sédimentaire provenant de l'évaporation intense, en milieu lagunaire, d'une eau riche en sulfate de calcium dissout. Formé il y a 65 millions d'années, il est extrait dans des carrières à ciel ouvert ou souterraines. Les gypses naturels de grande pureté permettent d'obtenir des plâtres de qualité. Les principales impuretés des gypses sont la calcite, la silice et la dolomie.

V.2.2. Les gypses de synthèse

Diverses industries (chimiques, centrales thermiques, traitement des fumées…) produisent du gypse comme sous-produit. Ce gypse (désulfogypse, phosphogypse...), qui concentre les impuretés du minerai de base, pose souvent des problèmes de stockage et de préservation de l'environnement. Après purification, une utilisation comme matière première pour fabriquer du plâtre peut être envisagée, en particulier dans certains pays dépourvus de gypse naturel (Belgique, Pays-Bas, Japon…).

V.3. Fabrication du plâtre à partir de gypse naturel

La fabrication du plâtre à partir du gypse naturel passe par trois étapes :

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

V.3.1. Extraction et préparation du gypse

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

V.3.1.1. 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.

V.3.1.2. 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)

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.

V.3.2. Concassage-calibrage

Le concassage a pour but de réduire le gypse extrait de la carrière en produits plus fins. Généralement, après un concassage, il ne subsiste plus de blocs dont la dimension est supérieure à 100mm. Ce gypse devient donc transportable sur des bandes par exemple, et peut être envoyé en usine pour le traitement ultérieur.

V.3.3. Cuisson

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

- La cuisson en voie sèche (destinée pour la fabrication du plâtre béta β) ;
- La cuisson en voie humide (destinée pour la fabrication du plâtre alpha α).

Tableau V.1 : Propriétés caractéristiques des deux variétés usuelles de semi-hydrate (plâtres).

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 (MPa)	6,5	1,3
Résistance à la compression (MPa)	56	5,6

V.3.4. L'obtention des produits finis

Après la cuisson, les pierres sont broyées. Sur le site industriel, on dénombre des mélangeurs. On ajoute des adjuvants. Ces derniers donneront au matériau une cinétique particulière, une expansion spécifique, une fluidité contrôlée et autres caractéristiques précises. Cela permet de corriger le produit et de l'améliorer jusqu'à ce qu'il colle parfaitement au cahier des charges du client.

En amont (à l'extraction), l'humidité et la pureté du gypse font l'objet de contrôles périodiques (laboratoire). Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité plâtres mis en vente.

V.4. Variétés de plâtre

Les principaux Variétés de plâtre sont les suivants :

- Enduits traditionnels pour le bâtiment, certains étant de haute dureté plus des enduits spéciaux ;
- Plâtres de surfaçage, de ragréage de sol, obtenus à haute température, plâtre à briqueter ;
- Plâtre pour éléments préfabriqués, panneaux, carreaux de cloison et de plafond, d'isolation ou décoration, carreaux porteurs ;
- Liants de montage ou de finition ;
- Plâtres à mouler pour arts ou pour l'industrie, par exemple les moules de coulage pour plastique, porcelaine, sanitaires ;
- Plâtres médicaux pour dentisterie ou chirurgie.

V.5. Propriétés du plâtre

V.5.1. Isolation thermique

Du fait de sa faible conductivité thermique, le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois. Un enduit plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique. Les plâtres spécieux qui incorporent des charges d'agrégats légers qui ont des conductivités thermiques spécifiques sont particulièrement destinés à cet usage.

Le plâtre permet de plus - en association avec des matériaux isolants minéraux ou de synthèse ayant des conductivités thermiques très faibles, 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.

V.5.2. Humidité et régulation de l'hygrométrie

Le plâtre est un matériau poreux et, bien qu'il soit rarement laissé nu et qu'il soit 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.

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.

V.5.3. Isolation acoustique

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.

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.

V.5.4. 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.

V.5.5. 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

V.6. Recommandations

- Le plâtre se dissout dans l'eau, il ne peut donc jamais être employé ni à l'extérieur ni en des lieux humides.

- Le plâtre ne peut jamais être mélangé au ciment, car il se forme des cristaux nuisibles au mortier qui se désagrège à cause de l’augmentation du volume.
- Il faut toujours ajouter du plâtre à l’eau et non le contraire afin d'éviter la formation de grumeaux.
- Le plâtre corrode le fer non protégé.