

DEPARTEMENT MINES ET GEOLOGIES – 1^{ère} ANNEE MI

MATIÈRE : VALORISATION ET RECYCLAGE DES MATERIAUX (VRM)

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX

Responsable de la matière: Pr. MOUSSACEB

Introduction

Le développement des activités industrielles s'est accompagné d'une nouvelle problématique, enjeu majeur pour le XXI^{ème} siècle : **la protection de l'environnement.**

Citons par exemple la pollution industrielle ou agricole des cours d'eau et des nappes phréatiques. Les enjeux sont multiples : **sanitaires, politiques, énergétiques et financiers.**

Une des facettes importantes en vue de la protection de l'environnement, est liée à la pollution, et donc à la **limitation** et la **surveillance des rejets générés** par les activités humaines : rejets **liquides, gazeux ou solides.**

De tout temps, l'homme s'est **débarrassé de ses déchets** en les abandonnant. D'ailleurs, la définition d'un déchet donnée par le législateur est « tout bien meuble **abandonné** ou que son détenteur destine à l'abandon »

La production de déchets augmentant, les risques pour l'environnement liés à leur entrepôt se sont développés. Les déchets sont classés en plusieurs catégories, les **déchets banals, dangereux ou ultimes**. Le but est que, à terme, seuls les déchets ultimes, qui sont « des déchets résultant ou non du **traitement des déchets**, qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les **conditions techniques et économiques du moment**, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux pourront être acceptés en décharge.

Le traitement de ces déchets est appelé **stabilisation**. « Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été **réduites** et quand sa tenue mécanique a été **améliorée** ». La **solidification** vise à donner aux déchets une structure physique. **L'encapsulation** (ou enrobage ou fixation physique) permet d'enfermer les polluants dans une "gangue étanche". La **fixation chimique** consiste en l'immobilisation des polluants au sein d'édifices par liaisons chimiques. Les procédés actuels existants peuvent être de deux natures : à chaud, telle la **vitrification**, ou à froid, **liants minéraux ou organiques**.

Les déchets de démolition sont une sous catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent les déchets de **construction**, de **réhabilitation** et de **démolition**.

La démolition des **ouvrages en béton** et l'industrie des **matériaux de construction** sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le **stockage** de tels déchets solides dans des dépôts favorise **la pollution de l'environnement** et puisque les **réserves en granulats** vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour **valoriser** ces produits et les **réutiliser** de nouveau **comme granulats dans les bétons et les mortiers**.

Le **béton recyclé** est simplement du vieux béton broyé pour produire des **granulats**. Il peut être utilisé comme seule source de remplacement partiel des granulats dans du béton neuf. **Le béton fabriqué avec des **granulats provenant du recyclage**, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et résistance.** La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton. **Le mortier fabriqué avec des sables provenant de déchets de briques, présente généralement de bonnes résistances, à l'action du séchage et aux eaux usées.**

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

I. INTRODUCTION

En sciences des matériaux, il est possible de classer les matériaux de base en trois catégories (Les métaux, Les polymères et Les céramiques), mais dans la construction, il est devenu courant de distinguer les matériaux selon les domaines d'emploi et les caractéristiques principales: les matériaux de construction et les matériaux de protection.

Les matériaux de construction sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des forces importantes: Pierres, Terres cuites, Bois, Béton, Métaux, etc.

Les matériaux de protection sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et protéger les matériaux de construction principaux: Enduits, Peintures, Bitumes, etc.

Les propriétés principales des matériaux de construction peuvent être généralement divisées en plusieurs groupes telles que:

1. **Propriétés physiques:** (la dimension; la densité; la masse volumique de différentes conditions; la porosité; l'humidité etc..),
2. **Propriétés mécaniques:** (la résistance en compression, en traction, en torsion etc..)
3. **Propriétés chimiques:** (l'alcalinité, l'acide etc..)
4. **Propriétés physico-chimiques:** (l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement etc..)
5. **Propriétés thermiques:** (la dilatation, la résistance et comportement au feu, etc..)

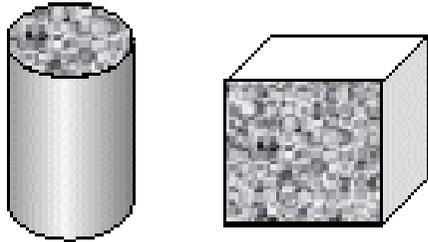
I.1. LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

I.1.1. La masse volumique apparente

Définition: C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, notée γ_0 et exprimée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

Détermination: Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique apparente des matériaux de construction selon leur dimension et leur dispersion:

a) **Pour les matériaux solides** : les roches naturelles, le béton, le bois ..., on peut faire des échantillons de forme géométrique (cubique, cylindrique, ..).



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

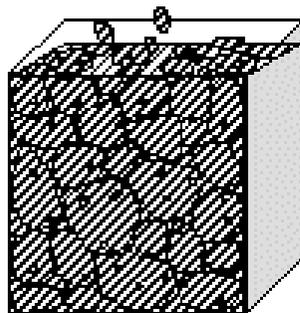
γ_{ap} – Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

b) **Pour les matériaux incohérents** (ensemble de grains – sable ou gravier).

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un **réceptif standard** (de volume connu).



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

γ_{ap} – Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

I.1.2. La masse volumique absolue (γ)

Définition: C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée ρ et exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou T/m³).

Détermination: Si les matériaux étudiés sont poreux, on doit les concasser et les broyer jusqu'à ce que la dimension des grains de matériaux (l'échantillon) devienne inférieure à 0,2 mm. Ceci afin d'éliminer les pores et les vides existants dans les matériaux. Ensuite, on verse l'échantillon dans un récipient, qui contient de l'eau pour pouvoir déterminer la masse volumique absolue (Voir la figure 1.3.1)

D'abord on va remplir le voluménomètre d'eau (N1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le voluménomètre et le niveau de l'eau va augmenter (N2). **La différence entre le niveau N1 et N2 est le volume absolu de l'échantillon.** La masse volumique absolue **peut se calculer:**

$$\gamma = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$$

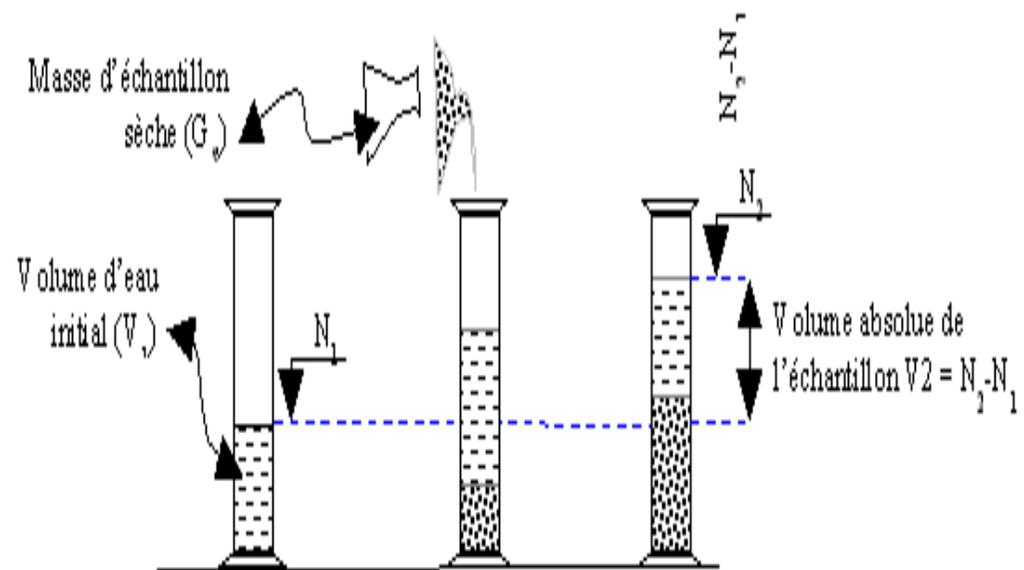
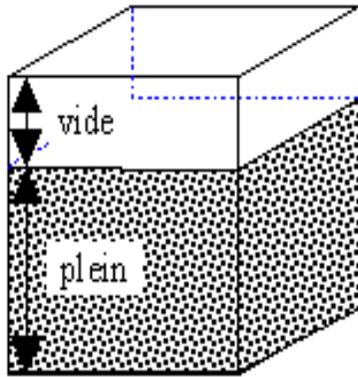


Fig 1.3.1: Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau

I.1.3. La porosité et compacité (les granulats)

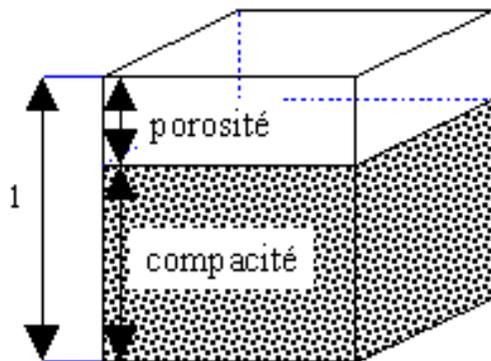
Porosité: La porosité est le rapport du volume vide au volume total.



$$p = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}}$$

Fig 1.2: Volume quelconque

Compacité: La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent.



$$p = \frac{\text{volume plein}}{\text{volume total}}$$

Fig 1.3: Volume initiale

Porosité et compacité: La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%. En effet:

$$p + c = \frac{\text{volume de Vide}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total}}{\text{volume total}} = 1$$

Si l'on connaît la masse volumique Δ et la masse spécifique γ_0 d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

$$c = \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} \cdot \frac{M}{M} = \frac{M/V_{\text{apparent}}}{M/V_{\text{absolu}}}$$

d'où $c = \frac{\Delta}{\gamma}$ ou, exprimée en %,

$$c\% = 100 \frac{\Delta}{\gamma}$$

$$p\% = 100 \left(1 - \frac{\Delta}{\gamma}\right)$$

I.1.4. L'humidité

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience. En général l'humidité est notée W et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante:

$$W = \frac{G_h - G_s}{G_s} \cdot 100\%$$

Où: G_s – est la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

G_h – est la masse humide d'échantillon.

On distingue trois grandes catégories d'eau:

1. **L'eau absorbée**: qui se trouve dans le vide entre les particules de matière solide;
2. **L'eau adsorbée**: qui se trouve à la surface des particules solides; Plus les particules sont petites, plus cette eau joue un rôle important. La première couche moléculaire est orientée et présente des propriétés voisines de celles de l'état solide;
3. **L'eau chimiquement liée**: qui fait partie des particules solides.

I.1.5 L'absorption de l'eau

A 20,5 °C et à la pression atmosphérique l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels du matériau. Si la porosité du matériau est importante, l'absorption de l'eau est plus grande, mais l'absorption est toujours inférieure à la porosité du matériau. On peut déterminer le degré d'absorption de deux manières:

a) L'absorption calculée suivant la masse du volume apparent d'échantillon notée H_v (%)

$$H_v = \frac{G_{ab} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

Où: G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

b) L'absorption calculée suivant la masse de l'échantillon notée H_p (%)

$$H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \cdot \%$$

où

G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

I.1.6. Degré de Saturation (Teneur en eau)

Un des plus importants facteurs influençant la résistance est le degré de saturation. On a remarqué que les matériaux absorbants de l'eau, ont une résistance certainement diminuée. C'est pourquoi on doit déterminer le degré de saturation de matériaux.

Lorsque tous les vides d'un corps sont remplis d'eau, on dit qu'il est saturé. Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide. Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel. En se transformant en gel, l'eau augmente de 9% en volume environ.

Le degré de saturation est l'absorption maximale de matériaux sous les conditions de pression et de température. Il y a deux moyens pour réaliser la saturation dans les échantillons de matériaux: l'immersion des échantillons dans l'eau bouillante et à la saturation en pression d'air .

Pour déterminer le degré de saturation en pression d'air, on a la démarche suivante:

Immerger les échantillons dans l'eau ; Donner la pression de base de 20 mm Hg jusqu'au moment où on peut éliminer toutes les bulles d'air ; Ensuite on fait baisser la pression de base de 20 mm Hg à la pression atmosphérique. À ce moment là, presque tout le vide est rempli d'eau et dans ce cas-là on dit que les échantillons sont saturés.

Le degré de saturation peut se calculer par la formule suivante:

$$BH = \frac{G_{sat} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

où

BH – est le degré de saturation (%)

G_{sat} – est la masse d'échantillon au moment de saturation.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

Mais de toutes façons, on ne peut pas remplir entièrement les vides de l'échantillon d'eau, c'est pourquoi il est obligatoire de présenter cette valeur en une autre solution: "coefficient de saturation", notée CBH et exprimée en %. Ce coefficient peut être calculé avec la formule suivante:

$$C_{sat} = \frac{BH}{\gamma} \cdot \%$$

où: γ – est le degré de porosité.

BH – est le degré de saturation.

Pour connaître la diminution de la **résistance de matériaux** en présence d'eau, on utilise **l'indice molle**:

$$K_m = \frac{R_{BH}}{R_k} \cdot \%$$

où: K_m – Indice molle

R_{BH} – Résistance d'échantillon au moment de saturation..

R_k – Résistance d'échantillon sec.

I.2. Les propriétés mécaniques I.2.1. La résistance

Tableau 1.1 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression

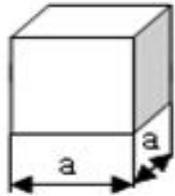
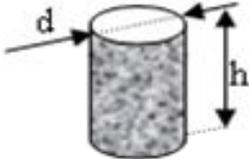
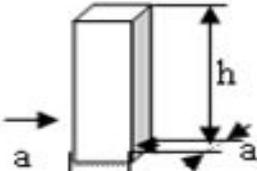
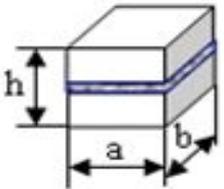
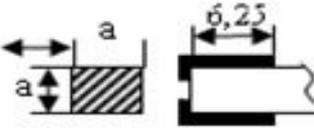
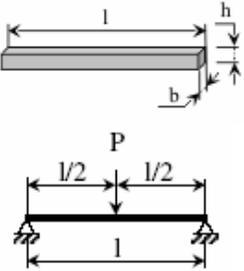
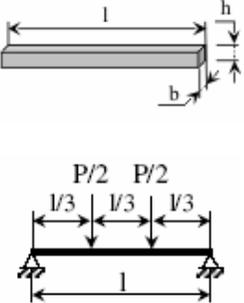
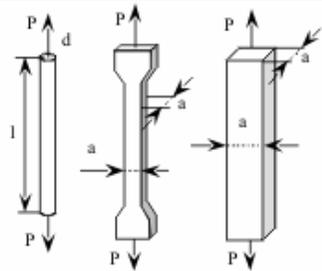
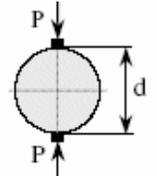
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm ²

Tableau 3.2.2 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la flexion

Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15
Prismatique		$R_{pl} = \frac{4l}{bh^2}$	Béton Bois	15x15x60 2x2x30
Essai de résistance en traction pure				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 d ₀ =1; l ₀ =5; l?10
Cylindrique		$R_{tf} = \frac{P}{\pi dl}$	Béton	d=15; l=30 d=16; l=32

II. LES CIMENTS

Le **ciment** est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de **silicates et d'aluminates de calcium** porté à 1450 – 1550 °C, température de **fusion**.

Le ciment usuel est aussi appelé **liant hydraulique**, car il a la propriété de **s'hydrater** et de **durcir** en présence **d'eau** et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un **solide pratiquement insoluble dans l'eau**. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains **composés minéraux**, notamment des **silicates et des aluminates de calcium**.

L'expression de «**pâte de ciment durcissant**» sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

II.1. PRINCIPE DE FABRICATION CIMENT PORTLAND

La fabrication de ciment se réduit schématiquement **aux trois opérations** suivantes: **préparation du cru**, **cuisson**, et **broyage et conditionnement**

Il existe **4 méthodes** de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

1. Fabrication du ciment par **voie humide** (la plus ancienne).
- 2. Fabrication du ciment par **voie semi-humide** (en partant de la voie humide).
- 3. Fabrication du ciment par **voie sèche** (la plus utilisée).
- 4. Fabrication du ciment par **voie semi-sèche** (en partant de la voie sèche).

La composition de base des ciments actuels est un mélange de **silicates et d'aluminates de calcium** résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des **roches calcaires**, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par **des argiles**. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de **calcaire, argile ou marne** et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier **$\text{MgO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O} \dots \text{etc.}$**

Le **principe** de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont **extraits des carrières**, puis **concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C)** dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le **clinker**.

Un mélange **d'argile et de calcaire** est chauffé. Au début, on provoque le départ de **l'eau de mouillage**, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage **liée**. A partir de **700°C** commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO_3).

Le mélange est porté à **1450-1550 °C**, température de **fusion**. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: un partie de **CaO** est retenu par **Al₂O₃ (C₃A)** et **Fe₂O₃ (C₄AF)** en formant une masse liquide. SiO₂ et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique (**C₂S**) dont une partie se transforme en silicate tricalcique (**C₃S**) dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

II.1.1. Fabrication par voie sèche

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de **calcaire (CaCO₃)** environ de **80%** et **d'argile (SiO₂ –Al₂O₃)** environ de **20%**. Selon **l'origine des matières premières**, ce mélange peut être corrigé par apport de **bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis**. Après avoir **finement broyé**, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au **four**, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- 1. Un four vertical fixe, **préchauffeur** (cyclones échangeurs de chaleur).
- 2. Un four **rotatif**.

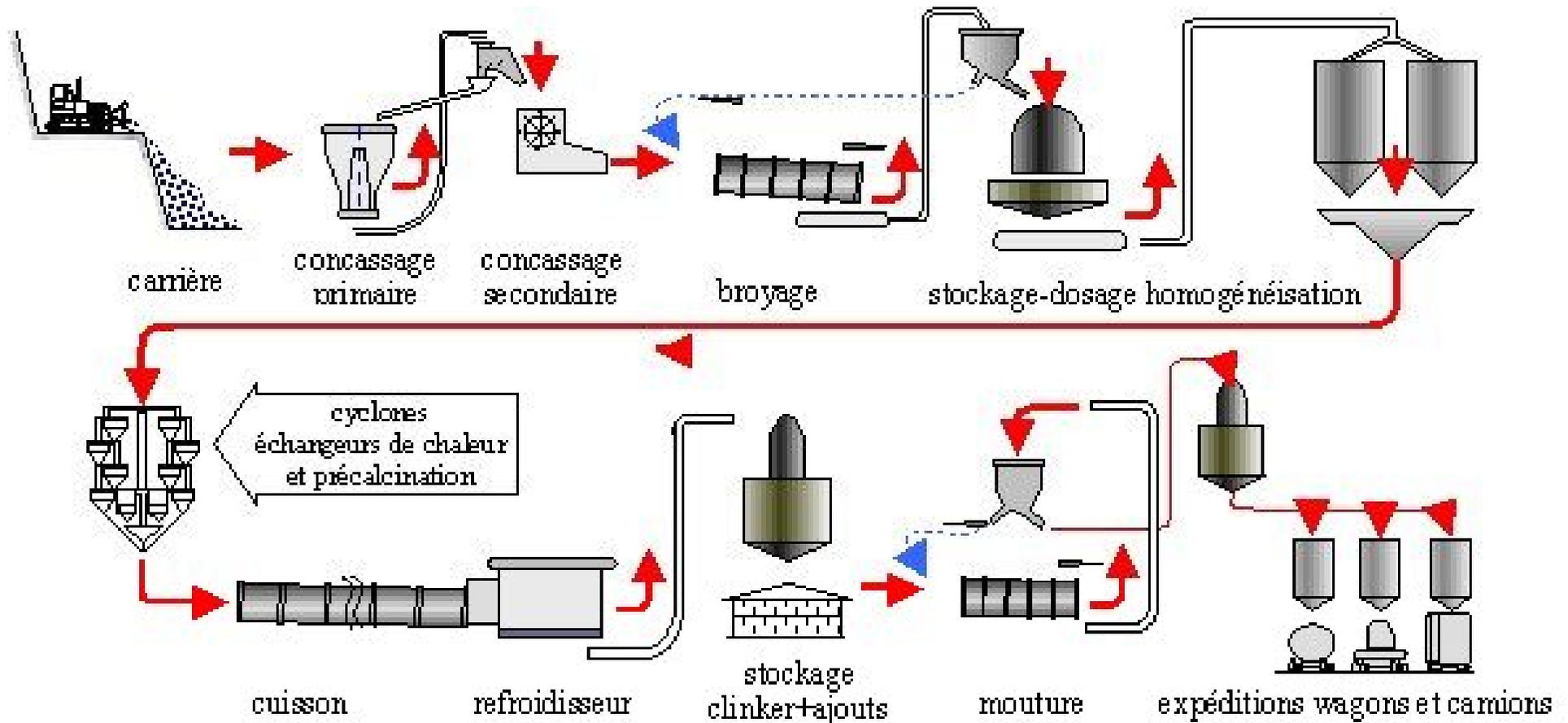
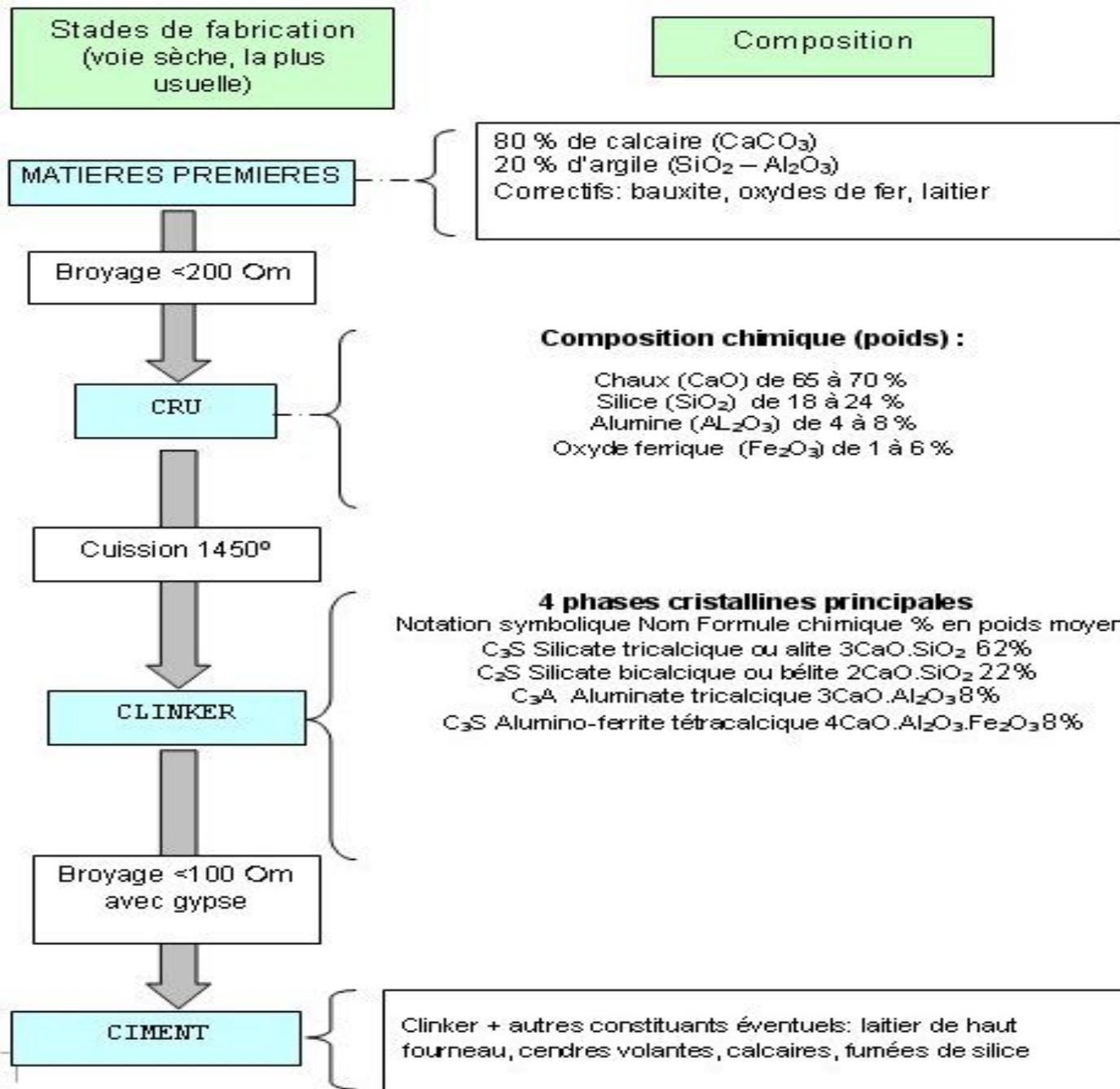


Figure 1. Fabrication du ciment

Les **gaz réchauffent** la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à **800 °C** environ et perd donc son gaz carbonique (**CO₂**) et son **eau**. La poudre pénètre ensuite dans un **four rotatif** analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.



Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche

II.2. CONSTITUANTS PRINCIPAUX ET ADDITIONS

II.2.1. Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

1. Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker).
- 2. Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker).
- 3. L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker).
4. L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)
 $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des **alcalis (Na_2O , K_2O)**, de **la magnésie (MgO)**, **diverses traces de métaux**. La teneur en alcalis et magnésie doit rester **faible**, car ces matières peuvent influencer défavorablement la **stabilité du ciment durci**.

II.2.2. Les autres constituants des ciment

Le ciment portland est composé de **clinker** moulu auquel on ajoute une quantité de **gypse**, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les **autres constituants associés au clinker** grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Les **constituants** les plus utilisés sont:

1. Calcaires: Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.

2. Laitier granulé de haut fourneau: Le laitier est un sous-produit de l'industrie **métallurgique** ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines **scories fondues** provenant de la **fusion du minerai de fer dans un haut fourneau**.

3. Cendres volantes (V ou W): Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du **dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques**. On distingue:

- * Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- * Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

4. Schistes calcinés: Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

5. Fumée de silice: Les fumées de silices sont un sous-produit de **l'industrie du silicium et de ses alliages**. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.

6. Fillers: Ce sont des “constituants secondaires” des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des **matières minérales, naturelles ou artificielles** qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

II.3. LES PRINCIPALES CATÉGORIES DE CIMENT

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

II.3.1. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de **clinker** et des constituants **secondaires** sont classés en fonction de leur **composition**, en **cinq types** principaux par les normes **NF P15-301 et ENV 197-1**. Ils sont notés **CEM** et numérotés de **1 à 5** en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

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

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 2.2. 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 2.2: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

	Cim. Portland	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%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total ≤35% (fumée ≤10%)	36% ≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total	31%≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*			*	*
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*	*	*	*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (I)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

II.3.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 2.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau 2.3: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours P 15-433 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (min)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.			
32,5		(17,5)	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	/90	≤ 10
32,5 R	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	$\leq 52,5$	$\leq 1\ 000$	/90	≤ 10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	$\leq 62,5$	$\leq 1\ 000$	/60	≤ 10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤ 10
52,5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤ 10