

## **II.1 Définition :**

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (20000 - 30000) [23].

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque des modifications des propriétés du mélange, à l'état frais ou durci. Les adjuvants font l'objet de la norme NF EN 934[24], Partie 2 "Adjuvants pour béton, mortier et coulis. Définition - exigences - conformité - marquage et étiquetage."

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, des mortiers ou des coulis, à l'état frais ou durci. L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier en fonction de son dosage et des autres composants. Un adjuvant présente généralement une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont le plus souvent indépendantes de la fonction principale. L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non directement recherchés. Ainsi un adjuvant réducteur d'eau peut avoir une fonction secondaire de retardateur de prise.

Lors de la formulation d'un béton pour une application donnée, le couple ciment/adjuvant doit donc être optimisé pour éviter d'éventuels problèmes de rhéologie et de maniabilité. Certains couples ciment/adjuvant sont sensibles à des variations de dosage ou de température du béton. Dans le cas d'emploi de plusieurs adjuvants, il faut aussi vérifier la compatibilité des adjuvants entre eux. Il est donc indispensable, lors de l'utilisation d'un adjuvant, de s'assurer, par des essais préalables représentatifs des conditions de réalisation du chantier, de son efficacité et de vérifier l'étendue des effets secondaires [25].

Les adjuvants de béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement :

- les solubilités ;
- les vitesses de dissolution ;
- l'hydratation des divers constituants d'un liant Hydraulique.
- Agent anti-lessivage.
- Réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant.
- Inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air.



**Figure II.1 :** Adjuvants liquides [23]

De nos jours, il existe encore de nombreux problèmes inexplicables liés à l'action réductrice d'eau et à l'amélioration de la fluidité grâce à ces agents organiques. En effet, le développement de adjuvants a pendant longtemps été basé davantage sur des « essais erreurs » que sur une considération théorique [23].

### **II.1.2 Mode d'action :**

D'une manière générale, les adjuvants agissent en enrobant le grain de ciment pendant l'hydratation.

### **II.1.3 Fonctions :**

Les adjuvants possèdent une fonction principale et une fonction secondaire :

#### **II.1.3.1 Fonction Principale**

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale unique. Elle est caractérisée par la ou les modifications majeures qu'elle apporte aux propriétés du béton à l'état frais ou durci [23].

#### **II.1.3.2 Fonctions secondaires**

En plus de sa fonction principale, un adjuvant peut avoir une ou plusieurs fonctions secondaires (ex : plastifiant-retardataire, retardataire plastifiant-réducteur d'eau). Un adjuvant n'est pas palliatif. IL n'a ni pour effet ni pour mission de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage, d'une mauvaise composition ou d'une mise en œuvre défectueuse. «Ce n'est pas un produit miracle» [23].

### **II.1.4 Classification :**

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes :

- Les super plastifiants
- Les retardateurs
- Les accélérateurs
- Les hydrofuges

On peut également citer d'autres adjuvants tels que :

- Les produits de cure
- Les entraîneurs d'air
- Les ajouts cimentaires

a) Les super plastifiants :

Un super plastifiant est un adjuvant qui introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

L'addition du super plastifiant ne doit jamais se faire sur un béton sec (c'est-à-dire avant l'ajout de l'eau). Il sera absorbé par les agrégats et le sable d'où son inefficacité avec le ciment.

Le super plastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du béton (environ 75% de l'eau de gâchage) ou fractionné dans le cas d'un E/C très bas :

- ✓ 1/3 dans l'eau de gâchage
- ✓ 2/3 vers la fin du malaxage

Le temps optimal d'addition du super plastifiant dans le béton est 2 minutes après le mélange eau ciment- agrégats. A ce moment, le super plastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C3S et C2S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité [23].

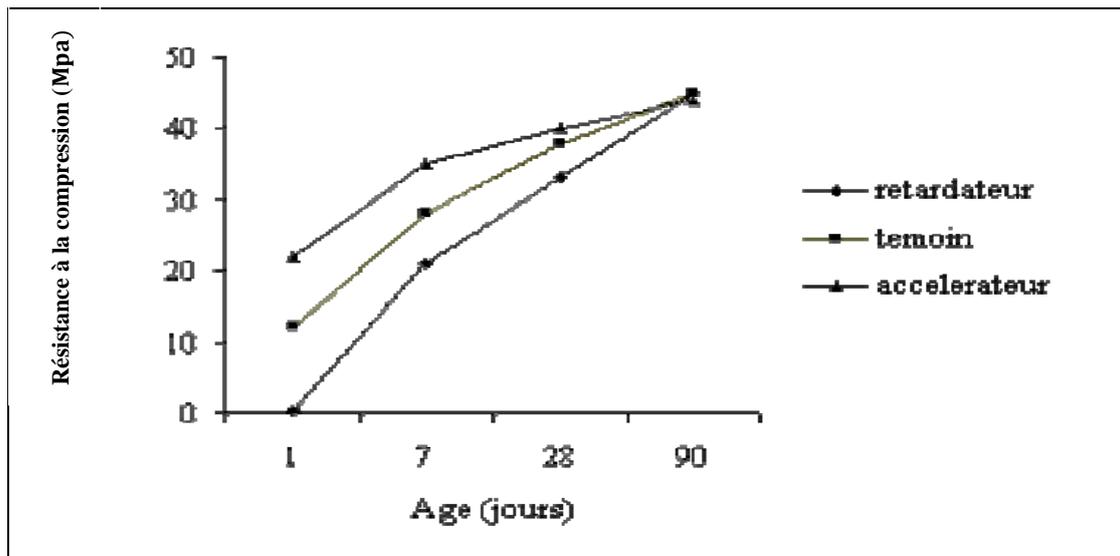
b) Les retardateurs : Les retardateurs peuvent agir en diminuant la vitesse d'hydratation de certains constituants anhydrides des ciments [23].

Les retardateurs sont utilisés :

- Par temps chaud ;
- En cas de transport du béton sur de longues distances ;
- En cas de bétonnage partiel (reprise de bétonnage).

c) Les accélérateurs : on distingue 2 sortes d'accélérateurs :

- Accélérateur de prise : C'est un adjuvant dont la fonction principale est d'accélérer le début et la fin de prise du ciment.



**Figure. II.2. :** Schéma de l'influence d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [23]

➤ Accélérateur de durcissement :

Ces adjuvants ont la fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales du béton. L'utilisation d'un super plastifiant haut réducteur d'eau permet d'obtenir des temps de prise rapides et un durcissement accéléré [23].

d) Les hydrofuges :

Ce sont des produits qui améliorent l'étanchéité des bétons et protègent de l'humidité, en arrêtant l'absorption capillaire. On distingue deux sortes d'hydrofuges :

➤ Ces produits peuvent se présenter sous forme de liquide ou poudre.

Ils sont introduits directement dans la bétonnière (pendant le malaxage) ou diluer dans l'eau de gâchage, s'il s'agit d'une poudre.

➤ Ces hydrofuges s'appliquent sur le béton durci directement : à la brosse, pinceau ou aussi pulvérisés [23].

e) Produit de cure :

La cure d'un béton a pour but de maintenir convenablement la teneur d'humidité et une température satisfaisante du béton durant une période définie. Une cure commence juste après la mise en place et la finition du béton afin que les propriétés souhaitées puissent se développer [23].

Ce ne sont pas à proprement parler des adjuvants, ce sont des produits de couverture que l'on pulvérise sur le béton frais pour empêcher l'évaporation de l'eau de gâchage. Les produits de cure sont des émulsions résineuses directes (c'est-à-dire où l'eau est le dispersant) qui se rompent instantanément lorsqu'on les applique sur le béton frais (en raison de la présence de la chaux).

Il se dépose une pellicule mince de résine qui ne doit pas être absolument incolore pour que la partie déjà couverte soit visible, mais qui ne doit pas être teintée d'une couleur trop sombre pour ne pas absorber les rayons solaires. Il existe un certain nombre de produits dont l'efficacité est variable.

Il est essentiel que le produit soit appliqué sans tarder sur le béton frais, un retard d'une heure ou deux pouvant sensiblement diminuer l'efficacité (surtout par temps chaud et ensoleillé) car celle-ci se manifeste et est nécessaire surtout au début.

Ce sont d'ailleurs les débuts de la protection (les sept premiers jours) qui sont les plus importants pour le béton [11].

f) Les entraîneurs d'air :

Leur rôle est de créer dans le béton des bulles d'air microscopiques, le diamètre de ces bulles varie entre 10 et 200µm. Ces adjuvants sont surtout utilisés pour améliorer la tenue du béton durci au gel et au cycle gel-dégel. Mais il est important de souligner que l'addition d'un entraîneur d'air dans le béton, diminue les résistances mécaniques de béton. Le pourcentage d'air occlus dans le béton ne doit pas dépasser 6%. L'adjuvant est introduit directement dans la bétonnière pendant le malaxage du béton [23].

g) Antigels et antigélifs : Il ne faut pas confondre antigels et antigélifs :

Les premiers évitent le gel du béton frais ; par gonflement, il en détruit la compacité et stoppe la prise du ciment que l'on a intérêt par suite à accélérer en même temps qu'il convient de réduire le dosage en eau ; dans la pratique on utilise un accélérateur avec un plastifiant ou fluidifiant et éventuellement un entraîneur d'air ou un produit unique réunissant les deux ou trois fonctions précédentes.

Les seconds, les antigélifs évitent que le béton, une fois durci, se désagrège progressivement dans le temps par suite de gels successifs ; les entraîneurs d'air sont les meilleurs adjuvants antigélifs mais une bonne compacité et l'homogénéité du béton restent les conditions essentielles de la non-géllivité [11].

**II.1.5 Quelques utilisations des principaux adjuvants :****Tableau II.1** : Utilisations des adjuvants [23]

<b>ADJUVANTS</b>	<b>UTILISATION</b>
<b>Accélérateur</b>	Décoffrage rapide ; Temps froid ; Préfabrication ; Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer, Réparations rapides, pistes d'aérodromes, routes, scellements.
<b>Retardateur</b>	Temps chaud ; Injection à grande profondeur ; Voile d'étanchéité ; Transport de béton sur grande distance ; Reprise de bétonnage - confection de béton avec granulats apparents ; Parois moulées dans le sol.
<b>Plastifiant</b>	Transports pneumatiques du béton (béton pompé) ; Béton coulé sous l'eau ; Béton maigre ; Sables manquant de fines ; Béton très ferrailé ; Injection.
<b>Antigel</b>	Bétonnage jusqu'à 10° C (temps très froid) sous réserve de précautions particulières.
<b>Hydrofuge</b>	Mortiers d'enduit, Enduit et chapes d'étanchéité pour cuvelage - Citernes - Réservoirs- Piscines - Galeries - Tunnels - Travaux souterrains (murs de cave, fondations) et maritimes. Toitures, terrasses.
<b>Fluidifiant</b>	Nécessite d'une bonne ouvrabilité ; Préfabrication ; Bétons à haute Résistance.
<b>Entraîneurs d'air antigelifs</b>	Routes, barrage, ponts –travaux maritimes. Ouvrages exposés au gel, à l'action des eaux agressives.

**II.1.6 Laitiers :**

Les laitiers de haut fourneau sont des matériaux à hydraulicité latente valorisés dans les ciments ou dans les bétons. En France, la production totale de laitier de haut fourneau est estimée à 2,8 Mt en 2011, 75% de ces laitiers sont valorisés dans les ciments et liants hydrauliques routiers en tant que laitier vitrifié, 14% de ces laitiers sont valorisés dans les granulats en tant que laitier cristallisé, 9% de ces laitiers sont valorisés dans le domaine des

bétons prêts à l'emploi, dans les bétons préfabriqués ou dans d'autres domaines. En 2011 seulement 2% de la production annuelle a été stockée.

Les laitiers de silicomanganèse (jusqu'à 10% de teneur en manganèse) sont issus de l'industrie des alliages ferromanganèse et silicomanganèse [26].

#### **II.1.6.1 Présentation des procédés sidérurgiques métallurgiques :**

##### a) Acier :

L'acier est un alliage à base de fer comportant un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse). Il est utilisé dans tous les domaines du quotidien, aussi bien dans la construction que dans les secteurs automobile ou du packaging (boîtes de conserves, canettes...). Compte tenu du besoin en propriétés très diverses, il existe plus de 3000 nuances d'aciers répertoriées. L'acier peut s'élaborer suivant deux processus : la filière « fonte », où du minerai de fer et de coke sont combinés pour produire de la fonte, qui sera ensuite transformée en acier dans un convertisseur, et la filière « électrique » où des aciers et des ferrailles de récupération sont fondus dans un four électrique, puis remis à nuances. Dans le cadre de cette mémoire, nous nous intéresserons aux laitiers issus de la filière « fonte » d'où sont issus les laitiers de haut fourneau « LHF » et les laitiers de convertisseur « LD (ou Lac) ».

##### b) Alliage silicomanganèse :

L'alliage silicomanganèse est un alliage silicium-manganèse avec des teneurs en manganèse allant jusqu'à 70% ; la teneur en silicium varie de 16 à 30% ; les autres éléments d'alliage sont le fer et le carbone. Le manganèse est principalement utilisé comme ajout dans les étapes finales de production d'aciers ou d'alliages afin de leur apporter des propriétés particulières (augmentation de la dureté, de la résistance, utilisation en tant qu'agent désoxydant). L'oxyde de manganèse est utilisé dans le domaine des cellules de batteries et comme agent désinfectant dans la médecine ou la chimie (permanganate de potassium). L'alliage silicomanganèse est aujourd'hui exclusivement produit par réduction carbothermique dans un four à arc électrique de type SAF (Submerged Arc Furnace). Nous nous intéresserons au laitier issu de cette filière de production de silicomanganèse [26].

#### **II.1.6.2 Origine des laitiers :**

Lors de la fabrication d'acier ou d'alliage silicium-manganèse, il se forme des coproduits tels que les laitiers. Chaque laitier peut être considéré comme un produit unique car il résulte du type d'acier ou de l'alliage que l'on a voulu fabriquer.

Pendant la fabrication de l'acier par haut fourneau et convertisseur, on obtient deux types de laitiers :

Les laitiers de haut fourneau et les laitiers d'aciérie de conversion. Pour la fabrication d'alliages silicomanganèse par voie électrique, on obtient le laitier de silicomanganèse. En sidérurgie, les laitiers purifient l'acier en absorbant les impuretés issues des minerais de fer. Dans cette partie, nous définirons l'origine de ces laitiers dans les différents procédés métallurgiques en reprenant les filières présentées précédemment.

#### A. Le laitier de haut fourneau :

Pour fabriquer de l'acier industriel, le minerai de fer aggloméré est chargé dans la partie supérieure du haut fourneau en couches alternées avec du coke, un combustible puissant proche du carbone pur fabriqué à partir de charbon. On insuffle de l'air chaud et du charbon pulvérisé dans le bas du haut fourneau à une température proche de 1200°C. Ceci provoque la combustion du coke qui entraîne la fusion du minerai, ainsi que la formation d'un gaz réducteur qui transforme les oxydes de fer du minerai en métal, formant ainsi du CO et du CO<sub>2</sub>. On recueille alors la fonte liquide à 1500°C (environ 96% Fe et 4% C) et le laitier dans le bas du haut fourneau.

Les constituants non-métalliques et/ou non absorbés par la fonte et non gazeux constituent le laitier de haut fourneau, qui est à l'état liquide. Il surnage car sa densité d'environ  $\gamma$ , est inférieure à celle de la fonte qui est de 7. La séparation de la fonte et du laitier se fait par un dispositif de siphonage. On parle de laitiers de fraîche production lorsqu'ils entrent, dès leur élaboration, dans la filière de valorisation par opposition aux laitiers de stock ou de crassiers, qui sont issus de productions non valorisées constituées au fil des décennies. On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

-Le laitier de haut fourneau est cristallisé lorsqu'il est dirigé par une rigole vers des fosses où il refroidit et se cristallise lentement à l'air sous forme de roche dure. Après le début de la solidification, ce laitier est arrosé afin d'en abaisser la température puis fragmenté, concassé et criblé.

-Le laitier de haut fourneau est dit vitrifié, ou granulé, s'il est dirigé vers un dispositif dans lequel il subit une trempe (arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression). L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément de fines particules d'un produit vitreux désordonné.

Il possède ainsi une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement (Divet L, 2006) [33]. Lors de son hydratation, le laitier évoluera sous une forme cristalline stable pouvant être mise à profit pour les formulations de ciments ou de bétons.

On distingue deux types de laitiers vitrifiés :

-Le laitier vitrifié granulé, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps.

-Le laitier vitrifié bouleté soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression.

Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules.

#### B. Le laitier de convertisseur :

La fonte liquide obtenue dans le haut fourneau est versée sur un lit de ferrailles dans un convertisseur. On y insuffle de l'oxygène pour brûler la plus grande partie du carbone et oxyder les impuretés contenues dans la fonte. Ces réactions sont favorisées par l'action combinée du brassage du bain par le jet d'oxygène et de la température (température du bain supérieure à 1650°C en fin d'élaboration).

#### C. Le laitier de silicomanganèse :

La production de silicomanganèse est intégrée dans la fabrication de ferromanganèse où le laitier provenant de la production de ferromanganèse est réutilisé dans la production de silicomanganèse grâce à ce processus, de forts rendements en affinage de manganèse sont atteints [26].

### **II.1.6.3 Propriétés générales des laitiers de l'étude :**

#### **II.1.6.3.1 Le laitier de haut fourneau :**

##### ➤ Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques :

Les principaux composants chimiques de ce type de laitier sont la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie qui représentent 95 à 97% de la composition totale du laitier. Le Tableau II-2 nous montre les constituants majeurs sous forme d'oxydes et les teneurs pouvant

être rencontrés dans ce type de laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est stable dans une même usine, mais peut varier entre usines [26].

**Tableau II.2 :** Echelle de composition chimique des laitiers de haut fourneau [26]

Constituant	Teneur en %
CaO	35-48
SiO <sub>2</sub>	32-41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	09-18
MgO	01-09
MnO	0,4-0,7
Fe	0,2-03
S	0,4-1,5

Des traces de TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> sont également détectées dans ce type de laitier. Le laitier de haut fourneau cristallisé est typiquement gris et poreux. Mais le laitier de haut fourneau vitrifié se présente sous forme d'un sable de couleur claire. L'origine des deux types de laitiers est la même, la différence entre ces deux matériaux réside seulement dans leurs microstructures et minéralogie.

La vitrification des laitiers leur confère des propriétés hydrauliques. Pour être réactif, le laitier doit être vitreux : un laitier de haut fourneau granulé doit avoir au minimum deux tiers de sa masse en laitier vitreux [27] et 28] mais compte généralement plus de 90% de phase vitreuse. Le laitier se présente sous la forme d'un liquide surfondu qui conserve, du fait de la trempe, une énergie de cristallisation non dissipée qui lui permet d'être hydraulique. L'hydraulicité du laitier doit être stimulée par un activant basique pour être efficace rapidement (le laitier seul mélangé à l'eau durcit mais la cinétique de développement des résistances mécaniques est très lente), alors que celle du ciment Portland intervient par simple addition d'eau. Cette prise hydraulique, exothermique, se produit de façon très progressive et permet la formation de produits d'hydratation solides qui constituent la prise et le durcissement du laitier et s'accompagne d'un développement progressif des résistances mécaniques.

➤ Applications, valorisation :

Le laitier de haut fourneau cristallisé peut être valorisé en tant que granulats pour bétons ou enrobés bitumineux suivant les normes européennes pour les granulats ([29], [30], [16]).

Il peut également être employé comme matière première pour la laine de roche.

Le laitier de haut fourneau vitrifié moulu, est principalement valorisé comme addition pour liants hydrauliques conforme à la norme [28] ou dans la fabrication de bétons, mortiers ou coulis selon la norme [31]. Le laitier de haut fourneau granulé est également utilisé dans la production de ciment courant de type CEM III (jusqu'à 95% de laitier de haut fourneau) selon la norme [32]. Le laitier vitrifié peut être valorisé comme addition minérale selon la norme [27] pour une application d'assise de chaussées. Il est utilisé aussi comme sable ou encore dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice.

#### **II.1.6.3.2 Hydratation du laitier de haut fourneau :**

De nombreuses études sur l'hydratation du laitier de haut fourneau ont déjà été menées et ont permis de proposer des mécanismes d'hydratation et différents modes d'activation, qui seront décrits dans cette partie.

##### ➤ Réactivité hydraulique du laitier :

Il faut tenir compte de plusieurs paramètres pour pouvoir évaluer la réactivité du laitier de haut fourneau. La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie (jusqu'à 15%), mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse (Divet L, 2006)[33]. Les calculs d'indices de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides. Pour une bonne activité hydraulique.

D'un point de vue granulométrique, plus le laitier n'est fin, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées. En effet la surface de contact entre les phases vitreuses du laitier, l'agent activateur et l'eau se trouve augmentée. Un des critères les plus importants reste la connaissance de la minéralogie du laitier. En effet, la détermination du taux de vitrification est très importante car sa structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin. L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides.

L'hydraulicité du laitier dépend donc de sa teneur en verre ainsi que de sa structure. De nos jours, la teneur en verre des laitiers de haut fourneau utilisés comme constituants des ciments dépasse largement 90% de la masse initiale, mais on pense que de faibles proportions de

matériaux cristallins peuvent avoir un effet bénéfique sur l'hydraulicité (Demoulian, 2003) [34].

D'autres facteurs influent sur l'activité d'un laitier de haut fourneau et sur son hydratation. On peut citer la concentration en ions alcalins dans le milieu et la température durant les premières phases du processus d'hydratation (Van Rompaey, 2006) [35].

➤ Processus d'hydratation :

Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour développer une cinétique d'hydratation satisfaisant l'objectif recherché (performances conformes aux ciments [32], d'un agent d'addition appelé activant. Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier (Divet et al, 2006) [33].

Le processus d'hydratation peut être vu comme une répétition de cycles dissolution – concentration – précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à hydratation maximum des grains de laitier (quand les grains de laitier ne sont plus accessibles par la solution alcalinisée). Cette hydratation est responsable de la prise et le durcissement du laitier vitrifié. L'hydratation débute par la dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution, qualifiée d'hydroxylique par Van Rompaey [Van Rompaey, 2006] [35] aboutit à une solution basique concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés. La dissolution n'est possible que lorsque le pH du milieu dépasse une valeur de l'ordre de 12, Ph fixé par l'équilibre de dissolution – précipitation de l'hydroxyde de calcium ( $\text{pH} = 12,5 - 12,6$ ). Cette précipitation fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. Les cristaux formés peuvent apparaître sur les grains de laitier ou sur les granulats. Il y a dans un premier temps une augmentation du frottement interne du squelette, puis formation de ponts cristallins qui se rejoignent en formant un maillage qui entoure les granulats, constituant un ensemble cohérent. La fixation du maillage sur les granulats, qui dépend de leur état de surface, est facilitée sur les surfaces rugueuses et anfractueuses (pourvues de cavités profondes et sinueuses). Ensuite, la précipitation des hydrates formés et leur arrangement cristallin conduisent à un développement des résistances mécaniques dans le temps, au fur et à mesure que se poursuit le phénomène. Les grains de laitiers étant plus lisses que les grains de clinker, les hydrates ont

plus de mal à se développer sur ces grains et le développement des résistances mécaniques se trouve plus lent pour des ciments au laitier par rapport à des ciments Portland.

Il est important de prendre en compte l'activateur dans la réaction d'hydratation. En effet, la quantité et le choix de l'activant influent sur le gain de résistance et la nature des hydrates formés. Van Rompaey[35] prétend que les réactions d'hydratation du laitier de haut fourneau forment des silicates de calcium hydratés ( $C_xS_yH_z$ ), des aluminates de calcium hydratés ( $C_4AH_{13}$ ) ainsi que des sulfo-aluminates de calcium hydratés ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) et de l'étrangéité ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ). (Van Rompaey, 2006) [35].

#### **II.1.6.3.3 Propriétés des ciments au laitier de haut fourneau :**

L'ajout de laitier de haut fourneau dans des mortiers ou bétons modifie ses propriétés, et donc permet d'améliorer certains aspects du comportement du matériau, mais il peut aussi réduire la cinétique de développement des résistances. Ainsi, les résistances mécaniques au jeune âge (2 jours par exemple) des ciments au laitier sont en général inférieures aux ciments Portland, mais au-delà de 28 jours, la pente des courbes de résistance est plus forte que celle des ciments Portland et les résistances mécaniques obtenues à long terme peuvent être supérieures (Alexandre et al, 1998) [36]. Ce niveau faible des résistances au jeune âge peut être un inconvénient dans le cas de constructions minces. Par ailleurs, les ciments au laitier de haut fourneau présentent une faible chaleur d'hydratation (Alexandre et al, 1998) [36]. Cette propriété est intéressante car elle permet de réduire le risque de fissuration lors du retrait thermique et améliore par ce biais la durabilité vis-à-vis des agents agressifs. Les bétons au laitier offrent une imperméabilité croissante avec la teneur en laitier. La pâte de ciment au laitier développe plus de C-S-H microporeux et une porosité capillaire plus faible qu'une pâte de ciment Portland classique. En effet, on observe une diminution du nombre de pores et de ses rayons moyens (Alexandre et al, 1998) [36]. Les bétons aux laitiers ont une résistance élevée à la diffusion des chlorures ainsi qu'une meilleure résistance aux milieux agressifs (eau de mer...) car ils présentent moins de portlandite qu'un ciment Portland. L'eau de mer agit sur la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ) et la dissout ce qui en augmente ainsi la porosité et diminue les résistances mécaniques. Par contre, les bétons au laitier sont plus sensibles à la carbonatation accélérée par rapport à des bétons à base de ciment Portland.

#### **II.1.6.3.4 Caractéristiques environnementales :**

D'après l'association américaine « Slag Cement », les pays valorisant jusqu'à 80% du laitier de haut fourneau en remplaçant le ciment Portland par l'introduction de laitier dans le

béton permet de réduire jusqu'à 59% les émissions de CO<sub>2</sub> et de 42% l'énergie intrinsèque nécessaire à la fabrication de bétons et de leurs éléments constitutifs (Worldsteel, 2010) [37]. Ces réductions concernent seulement les bétons au laitier par rapport aux bétons classiques.

La valorisation des laitiers de haut fourneau ne fait pas pour l'instant l'objet de réglementation nationale en matière de protection de l'environnement. Cette situation découle en partie de la longue expérience concernant l'utilisation de ces laitiers en technique routière sous la forme de liant hydraulique routier, utilisation qui n'a pas, à ce jour, révélé d'impact préjudiciable sur les eaux souterraines (Ofrir, 2006) [38].

### **II.7 Conclusion :**

Les adjuvants sont devenus le quatrième ingrédient du béton, qui viennent s'ajouter aux trois constituants fondamentaux : le ciment portland, l'eau, les agrégats. La liste complète de leurs avantages est impressionnante, tant pour le producteur que pour l'utilisateur de béton. Toutefois, ces avantages sont subordonnés à la bonne utilisation, à la connaissance des effets secondaires et d'autres risques. Un adjuvant ne peut pas compenser pour un matériau de qualité inférieure, ou un travail mal exécuté.

Aujourd'hui, les normes sur le béton régissent l'emploi et le rôle de ces agents, qui sont devenus partie intégrante de la technologie et de la pratique du béton.

Le laitier de haut fourneau moulu est un matériau amorphe, riche en oxydes de calcium, de silicium et d'aluminium. Ce laitier présente un caractère dit hydraulique latent car sa cinétique d'hydratation est lente dans l'eau pure et augmente significativement en présence d'un agent activateur basique tel que la potasse, la chaux, et le ciment portland, voire le laitier de convertisseur. Cette caractéristique fait du laitier de haut fourneau un matériau valorisable dans le domaine de la formulation de liants hydrauliques pour la fabrication de bétons ou de mortiers à condition d'ajouter un activateur.