

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil

Université de Sherbrooke

Thèse de Master en Génie Civil

# Etude technico-économique du verre dans le béton

Chakib SALIK

Sous la direction de M. Abderrahim Bali Professeur

Et M. Ablam ZIDOL Docteur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (16/06/2016)

## Composition du Jury :

Président	Mme. Ratiba KETTAB,	Professeur	ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Abderrahim BALI,	Professeur	ENP
Examineur	M. Remdane BOUTMEUR,	Docteur	ENP
Examineur	Mme. Nadjia BAUCHE,	Docteur	ENP

ENP 2016

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو إعطاء الجانب الاقتصادي لاستخدام مسحوق الزجاج في الخرسانة. والواقع أن استخدام مسحوق الزجاج المجروش لتحل محل الكلنكر لديه وسيلة واعدة لاسترداد وإعادة تدوير النفايات

وبالإضافة إلى توفير منفذ للزجاج المعاد تدويره، كل طن من مسحوق الزجاج محل طن من الاسمنت، وتجنب قدر الأبحاث التي أجريت غازات الدفيئة لتحقيق التنمية المستدامة تبين أن من حيث الأداء، ولموسة مع مسحوق الزجاج يقارن ايجابيا مع الخرسانة التقليدية

استخدام مسحوق الزجاج، ينبع مباشرة من إعادة تدوير الزجاج، وهو ما يفتح الباب أمام صناعة جديدة هي في منطق الاقتصاد الأخضر.

**الكلمات المفتاحية:** مسحوق الزجاج، الخرسانة، الكلنكر، تدوير الزجاج، الاسمنت، غازات الدفيئة، الخرسانة التقليدية، صناعة، الاقتصاد الأخضر.

## Abstract

The aim of this work is to give an economic aspect to the use of the glass powder in concrete. Indeed the use of crushed glass powder to replace the clinker has a promising way to recover and recycle waste.

In addition to providing an outlet for recycled glass, each tone of glass powder replaces a tone of cement, avoiding as much GHG. Research conducted in the sustainable development show that in terms of performance, the concrete with glass powder is favorably compared to conventional concrete.

The use of glass powder stems directly from the recycling of glass, which opens the door to a new industry that is in the logic of the green economy.

**Key Word :** glass powder, concrete, glass powder, clinker, recycling, cement, GHG, conventional concrete, industry, green economy.

## Résumé

Le but de ce travail est de donner un aspect économique à l'utilisation de la poudre de verre dans le béton. En effet l'utilisation de la poudre de verre broyé au remplacement du clinker présente une voie prometteuse pour valoriser et recycler les déchets.

En plus d'offrir un débouché au verre recyclé, chaque tonne de poudre de verre remplace une tonne de ciment, évitant autant de GES, Les recherches menées quant au développement durable démontrent qu'en termes de performance, le béton avec poudre de verre se compare avantageusement au béton conventionnel.

L'utilisation de la poudre de verre, découle directement du recyclage du verre, ce qui ouvre la porte à une nouvelle industrie qui s'inscrit dans la logique de l'économie verte.

**Mots clés :** poudre de verre, béton, clinker, recyclage, ciment, GES, béton conventionnel, industrie, l'économie verte.

## Remerciements

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'Ecole Nationale Polytechnique, en collaboration avec le Département de Génie Civil à l'Université de Sherbrooke au Canada.

Tout d'abord, Je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, Abderrahim Bali et Ablam Zidol. Ainsi que le professeur Arezki Tagnit-Hamou. Je tiens à leur exprimer ma reconnaissance pour leurs conseils et le soutien qu'ils m'ont accordés durant ce travail. Leur patience, leur disponibilité et leur grande compétence m'ont aidé à surmonter les obstacles lors de la construction de mon projet. Messieurs, j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec vous.

Mes remerciements s'adressent également à Mme.R.Kettab, M.R.Boutemour, Mme.N.Baouch, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à tout les enseignants du département Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique qui sans eux nous n'aurions jamais atteint ce niveau.

Maman, papa, merci pour tout. J'espère que vous êtes tout simplement fiers de moi, et je vous dédie ce travail. Merci à toute ma famille et à mes amis sur qui je peux toujours compter.

Je finirai par ces quelques mots de Françoise Dolto : « Tout groupe humain prend sa richesse dans la communication, l'entraide et la solidarité visant à un but commun : l'épanouissement de chacun dans le respect des différences ».

# Table des matières

Liste des figures .....	
INTRODUCTION GENERALE .....	6
CHAPITRE 1 – PROBLEMES ECOLOGIQUES DU CIMENT .....	7
1.1. Émissions atmosphériques .....	7
1.2. Origine et transformation des polluants .....	8
1.2.1. Composés gazeux .....	8
1.2.2. Les poussières .....	8
1.2.3. Composés organiques totaux (COT) .....	10
1.2.4. Chlorure d'hydrogène et fluorure d'hydrogène (HCl et HF) .....	10
1.2.5. Ammoniac (NH <sub>3</sub> ) .....	10
1.2.6. Autres polluants organiques .....	10
1.3. Les effets des polluants sur la santé .....	11
1.3.1. Les polluants gazeux .....	11
1.3.2. Les poussières .....	11
1.4. Les effets des polluants sur le cadre bâti .....	12
1.5. Les effets des polluants sur l'environnement .....	13
1.6. Effets des Odeurs .....	14
1.7. L'impact du bruit sur la santé .....	14
1.8. Conclusion .....	15
<i>Bibliographie</i> .....	15
CHAPITRE 2 – L'UTILISATION DU VERRE .....	17
2.1. Utilisation de la poudre de verre .....	17
2.2. Rhéologie des bétons avec le verre .....	18
2.2.1. L'angularité et la densité des particules .....	18
2.2.2. La dimension des particules .....	20
2.3. Réaction pouzzolanique de la poudre de verre .....	21
2.4. Recyclage du verre .....	22
2.4.1. Origines du verre recyclé .....	22
2.4.2. Qualité requise traitement du calcin brut .....	23
2.5. Le verre en substitution du ciment .....	24
<i>Bibliographie</i> .....	38
CHAPITRE 3 – LA POUDRE DE VERRE UNE ECONOMIE VERTE .....	40

3.1. Economie verte.....	40
3.1.1. L'approche par les impacts.....	40
3.1.2 L'approche par la finalité économique.....	41
3.2. Économie verte, éco-activités, emplois verts.....	42
3.3. Le recyclage du verre et l'économie verte .....	43
<i>Bibliographie</i> .....	44
CONCLUSION GENERALE .....	45

## Liste des figures

<b>Figure 2.1</b> Effet de la poudre de verre sur l'affaissement [TAHA et coll., 2008a].....	19
<b>Figure 2.2</b> Effet de la poudre sur l'étalement relatif des pâtes par rapport au .....	20
<b>Figure 2.3</b> Effet de la poudre sur le degré d'hydratation des pâtes [SCHWARZ et coll., 2007].....	21
<b>Figure 2.4</b> Porosité capillaire en fonction du taux de substitution [SCHWARZ et coll., 2007].....	27
<b>Figure 2.5</b> Evolution de la conductivité de la solution des pores capillaires en fonction du taux de substitution par la poudre de verre [SCHWARZ et coll., 2007] .....	27
<b>Figure 2.6</b> Résistance à la compression des mortiers incorporant poudre de verre [SHAYAN et coll., 2004].....	28
<b>Figure 2.7</b> Activité pouzzolanique de la poudre de verre [SHI et coll., 2005b].....	29
<b>Figure 2.8</b> Résistance à la compression des mélanges de béton de poudre de verre et fumée de silice comparée au témoin [SHAYAN et coll., 2004] .....	30
<b>Figure 2.9</b> Résistance à la compression des bétons étudiés [SHAYAN et coll., 2006].....	30
<b>Figure 2.10</b> Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression des bétons à 28 jours [TAHA et coll., 2008a].....	31
<b>Figure 2.11</b> Résistance à la compression des bétons E/L=0,42 [SCHWARZ et coll., 2007].....	26
<b>Figure 2.12</b> Résistance à la compression des bétons incorporant poudre de verre [SCHWARZ, 2008b]. .....	27
<b>Figure 2.13</b> Effet de la poudre de verre sur les résistances en traction et en flexion des bétons [TAHA et coll., 2008a].....	27
<b>Figure 2.14</b> Résistance en flexion sur des prismes de bétons à 130 jours [SHAYAN et coll., 2006]..	38
<b>Figure 2.15</b> Module d'élasticité dynamique sur des cylindres de bétons [SHAYAN et coll. 2006].....	33
<b>Figure 2.16</b> Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [SHAYAN et coll., 2004] .....	34
<b>Figure 2.17</b> Résistance à la réaction alcalis-granulat des bétons, 38 °C et 100 % HR [SHAYAN et coll., 2006].....	35
<b>Figure 2.18</b> Expansion due à la RAG à 23 °C [SHI et coll., 2005b].....	30
<b>Figure 2.19</b> Amélioration de la résistance au gel-dégel par la poudre de verre [TURGUT, 2008].....	36
<b>Figure 2.20</b> Pénétrabilité des ions chlorures [SHAYAN et coll., 2006].....	31
<b>Figure 2.21</b> Pénétrabilité des ions chlorures [SCHWARZ, 2008b].....	37
<b>Figure 2.22</b> Retrait de séchage sur des prismes de bétons [SHAYAN et coll., 2006].....	37

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est la deuxième substance la plus utilisée dans le monde après l'eau. Il se compose de 10 à 20% de ciment ajouté à de l'eau et des granulats. Le ciment est en effet au cœur de la structure du béton puisque c'est la « colle » qui lie les autres composantes entre elles. La recherche au niveau, impact environnemental, se concentre sur le ciment puisque ce constituant est responsable de la majeure partie des émissions de gaz à effets de serre liées à la production du béton.

La production d'une tonne de clinker engendre un dégagement de plus de 500 kg de CO<sub>2</sub>, c'est à dire environ 60 % des émissions totales liées à la fabrication du ciment. Enfin le clinker est pulvérisé avec du gypse pour donner du ciment (ciment Portland pour 98% de la production mondiale). Une tonne de ciment produit est l'équivalent de 860 kg de CO<sub>2</sub> dégagé et l'utilisation décombustible (pour chauffer à 1450°C) correspond à près de 40% de ces émissions.

Améliorer la performance du béton tout en réduisant l'empreinte écologique liée à sa production devient alors un enjeu important. L'utilisation des ajouts cimentaire en substitution d'une partie de ciment semble être une solution plus qu'acceptable. Utilisés judicieusement, les ajouts cimentaires peuvent aussi rehausser les propriétés à long terme du béton. En revanche, à forte concentration en ajouts, son utilisation pour des structures importantes doit être soigneusement étudiée.

L'ajout cimentaire révolutionnaire au Canada est la poudre de verre. La poudre de verre peut remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans le béton et pourrait permettre d'améliorer sensiblement sa qualité, en plus de réduire de 20 % ses émissions de GES et d'offrir un important débouché au verre recyclé. Grâce à cette innovation écologique, entièrement québécoise et issue d'une entreprise d'économie sociale, le béton pourrait devenir non seulement moins polluant, mais aussi plus résistant.

La production de la poudre de verre découle directement du recyclage du verre qui est devenu une industrie d'économie verte montante. Son chiffre d'affaires avait atteint 60 milliards d'euros dans l'Union à 27 en 2008, soit un doublement de l'activité en quatre ans. Le secteur fournit 500 000 emplois verts et leur nombre a augmenté de 11 % par an sur la précédente décennie. Mais il y a encore une belle marge de progression : le recyclage couvre 41 % de la consommation européenne pour le verre

# CHAPITRE 1 – PROBLEMES ECOLOGIQUES DU CIMENT

Le ciment est le matériau de base répondant à une utilisation homogène entrant dans les activités de réalisation et de construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil. Un matériau fondamental dans la construction mais dont la fabrication génère des émissions polluantes et nuisibles, si celles-ci se développent à proximité d'agglomérations habitables. De cette manière, elle constitue un risque urbain par la pollution qu'elle cause aussi bien pour la population que pour l'environnement.

Dans ce chapitre nous allons voir les différentes nuisances et types de polluants engendrés par sa production qui affectent la population ainsi que l'environnement à proximité des cimenteries.

## 1.1. Émissions atmosphériques

La fabrication du ciment est à l'origine de rejets de polluants dans l'air et d'émissions sonores. Chacune de ces opérations engendre des pollutions directes ou indirectes affectant les éléments de la nature. La cuisson du clinker est l'étape qui contribue le plus aux problèmes environnementaux associés à la fabrication du ciment, à savoir la consommation d'énergie et les émissions dans l'air. En fonction des procédés de production mis en œuvre, les cimenteries rejettent des émissions dans l'air et produisent des déchets. Dans de rares cas, des rejets dans l'eau sont possibles. Peuvent s'y ajouter des nuisances sonores et olfactives. Les principales substances polluantes émises dans l'atmosphère sont des poussières, des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre. S'y ajoutent des émissions d'oxydes de carbone, de dibenzo-p-dioxines et de dibenzofurannes polychlorés, de carbone organique total, de métaux, de chlorure d'hydrogène et de fluorure d'hydrogène. Le type et le volume des polluants atmosphériques dépendent de plusieurs paramètres, notamment des intrants (matières premières et combustibles utilisés) ainsi que du type de procédé mis en œuvre [CE, 2010].

D'après Stenger ; ces pollutions ne sont pas uniquement une agression contre l'environnement, mais peuvent être une source de gênes pour les riverains tout en constituant des sources de conflits potentielles. Cependant, cette panoplie de nuisances exige une étroite surveillance du fonctionnement des ateliers et la mise en œuvre de moyens capables de réduire les inconvénients, ainsi qu'une maintenance accomplie correctement. Il faut aussi remarquer que si la maîtrise des pollutions est assurée dans l'usine, le personnel employé travaillera dans de meilleures conditions, les qualités du produit et de la vie seront meilleures et l'environnement mieux respecté. [Stenger, 1998].



### 1.2. Origine et transformation des polluants

Les principales émissions de la fabrication du ciment sont les émissions atmosphériques des fours. Elles sont dues aux réactions physico-chimiques des matières premières et à la combustion des matériaux utilisés pour chauffer les fours. Les principaux constituants des gaz résiduels d'un four à ciment sont l'azote (issu de l'air comburant), le CO<sub>2</sub> (produit par la calcination du CaCO<sub>3</sub> et par la combustion), la vapeur d'eau (produite par la combustion et les matières premières) et l'excès d'oxygène. Dans tous les procédés, les matières solides progressent à contre-courant des gaz chauds de combustion. Cette circulation à contre-courant a un effet positif sur les émissions de polluants, car elle agit comme un lit fluidisé circulant intégré. De nombreux produits gazeux issus de la combustion ou de la transformation des matières premières en clinker sont absorbés par le flux de matières premières circulant à contre-courant ou se condensent. Ce pouvoir d'absorption des matières premières varie avec leur état physico-chimique qui lui-même dépend de leur position dans le four. Par exemple, la matière qui sort de l'étage de calcination contient beaucoup d'oxyde de calcium, ce qui lui donne une grande capacité d'adsorption de certains acides, comme le HCl, le HF et le SO<sub>2</sub>.

Il existe également des émissions de poussières canalisées provenant d'autres sources, comme les opérations de broyage et de manutention (matières premières, combustible solide et produit). Tous les stocks extérieurs de matières premières et de combustibles solides ainsi que tous les systèmes de transport des matériaux, y compris ceux servant à charger le ciment, constituent un risque potentiel d'émissions de poussières diffuses qui peuvent être importantes si elles ne sont pas prises en compte correctement du point de vue technique ; des problèmes de nuisance peuvent apparaître localement si elles ne sont pas réduites et maintenues à un niveau bas [CE, 2010 ; Khelifa, 2009].

#### 1.2.1. Composés gazeux

Les polluants contenus dans les gaz de combustion dépendent de la nature du combustible utilisé (charbon, fuel ou gaz naturel) et de la composition du minerai (qui peut contenir également du soufre). Les principaux polluants gazeux dans l'industrie du ciment sont le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le CO, et le CO<sub>2</sub>

#### 1.2.2. Les poussières

La pollution par les poussières représente la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. La granulométrie des poussières est un facteur important. Les poussières fines restent en suspension dans l'atmosphère alors que les plus grosses sont appelées à se déposer sur le sol à différentes distances de la source selon leur taille. [CE, 2010, pp. 60-64]

##### 1.2.2.1. Poussières canalisées

Traditionnellement, les émissions de poussières (PM), en particulier les rejets des cheminées des fours, ont toujours été l'une des préoccupations environnementales principales pour la fabrication de ciment. Les principales sources d'émissions de poussières sont le procédé de préparation du cru (stations de broyage des matières premières), les unités de broyage et de séchage, la cuisson du clinker (fours et refroidisseurs à clinker), la préparation du combustible

## Problèmes Ecologiques du Ciment

et l'unité de broyage du ciment (broyeurs à ciment). Que l'on utilise ou non des déchets, certains procédés secondaires d'une cimenterie sont également à l'origine d'émissions de poussières, par exemple :

- le stockage des matières premières et du ciment,
- les convoyeurs et tapis élévateurs des matières premières,
- le concassage des matières premières,

Les unités de broyage des matières premières, du ciment et du charbon, le stockage des combustibles (coke de pétrole, houille, lignite), et l'expédition du ciment (chargement). Dans tous ces procédés, des volumes importants de gaz circulent au travers de matériaux poussiéreux. Pendant le concassage, le broyage et l'expédition, une légère aspiration est maintenue au-dessus des équipements et ces sources de poussières sont normalement équipées de filtres à manches. La conception et la fiabilité des filtres électrostatiques et des filtres à manches modernes permettent d'abaisser les émissions de poussières à des niveaux négligeables, inférieurs à  $10 \text{ mg/Nm}^3$  (moyennes journalière).

### 1.2.2.2. Poussières fines $\text{PM}_{10}$ et $\text{PM}_{2,5}$

Les émissions de poussières de  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$  sont composées de fines particules d'une granulométrie inférieure à 10 et à 2,5 microns de diamètre respectivement qui peuvent se présenter sous forme solide ou d'aérosols. Ces types de poussières fines peuvent provenir d'une série de réactions physico-chimiques de différents gaz précurseurs, comme les oxydes d'azote, le soufre et l'ammoniac qui réagissent pour former du sulfate, du nitrate et des particules d'ammonium nocifs pour la santé. Dans l'industrie du ciment, ce sont les procédés de cuisson et de refroidissement qui produisent les  $\text{PM}_{10}$  ou  $\text{PM}_{2,5}$ , ou les deux, bien que les procédés secondaires puissent également être à l'origine de la formation de fines poussières. En utilisant des filtres électrostatiques, environ 90 % des particules de poussière sont inférieures à  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) et environ 50 % inférieures à  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ). Il est ainsi possible de réduire une grande partie des poussières fines en réduisant la concentration totale de poussières. Les usines équipées d'installations de dépoussiérage à haute efficacité n'émettent que relativement peu de poussières atmosphériques.

### 1.2.2.3. Poussières diffuses

Des émissions de poussières diffuses peuvent se produire au cours du stockage et du transport des matières premières et des combustibles solides, par exemple sur un lieu de stockage ouvert ou sur les convoyeurs de matières premières, ainsi qu'à la surface des routes à cause du transport. Les émissions qui se produisent lors du conditionnement et de l'expédition du clinker et du ciment peuvent aussi être importantes. Elles peuvent provoquer une augmentation locale du niveau des émissions de poussières alors que les rejets de poussières résultant de la mise en œuvre des procédés (en général, par des cheminées très élevées) peuvent affecter la qualité de l'air d'une zone beaucoup plus étendue. Les convoyeurs et les tapis élévateurs prennent la forme de systèmes clos si des matériaux poussiéreux sont susceptibles de libérer de la poussière. Les routes empruntées par les camions sont pavées et régulièrement nettoyées de manière à éviter les émissions de poussières diffuses. En outre, la

pulvérisation d'eau sur le site permet d'éviter ces émissions. Des systèmes de stockage fermés sont utilisés dans la mesure du possible.

### 1.2.3. Composés organiques totaux (COT)

La présence dans les réactions thermiques (combustion) de composés organiques volatils et de monoxyde de carbone est associée à une combustion incomplète. Dans les fours à ciment, les émissions seront faibles en régime normal stable en raison du type de four utilisé, du séjour prolongé des gaz dans le four, de la température élevée, de la nature de la flamme (2 000 °C) et de l'excès d'oxygène. C'est dans ces conditions que les composés organiques se décomposent et sont détruits avec un taux d'efficacité élevé (>99,9999 %). Les concentrations peuvent augmenter au démarrage ou dans des conditions anormales. Ceci peut se produire plus ou moins souvent, de une ou deux fois par semaine à une fois tous les deux ou trois mois. Des émissions de composés organiques volatils (COV) peuvent se produire aux premiers stades du procédé (préchauffeur, précalcinateur) quand la matière organique contenue dans le cru se volatilise au cours du chauffage de la charge. Les matières organiques se dégagent entre 400 et 600 °C. La teneur type en composés organiques volatils des gaz résiduels des fours à ciment est comprise entre 1 et 80 mg/Nm<sup>3</sup>, mesurée sous forme de COT. Cependant, les émissions peuvent dans de rares cas atteindre 120 mg/Nm<sup>3</sup> du fait des caractéristiques des matières premières. [CE, 2010]

### 1.2.4. Chlorure d'hydrogène et fluorure d'hydrogène (HCl et HF)

Les chlorures et les fluorures sont des constituants additionnels mineurs qui peuvent être introduits dans le four par le biais des différentes matières entrantes, telles que les matières premières ou les combustibles, ou les deux. Il convient de surveiller régulièrement ces substances. [CE, 2010]

### 1.2.5. Ammoniac (NH<sub>3</sub>)

Les matières premières libèrent du NH<sub>3</sub> dès les premières étapes du procédé. La teneur en NH<sub>3</sub> du gaz résiduel des fours à ciment peut atteindre 200 mg/Nm<sup>3</sup>. Les techniques de réduction peuvent également libérer du NH<sub>3</sub>, c'est notamment le cas de la SNCR (réduction sélective non catalytique) au cours de laquelle l'ammoniac inaltéré peut se dégager (fuite d'ammoniac). Il est essentiel de surveiller régulièrement les émissions de NH<sub>3</sub>. En outre, l'équipement des sites d'un épurateur de SO<sub>x</sub> qui neutralise l'ammoniac dans sa liqueur afin d'égaliser les pointes et les baisses peut s'avérer nécessaire. [CE, 2010]

### 1.2.6. Autres polluants organiques

Les chlorobenzènes, les PCB (polychlorobiphényles), y compris les congénères coplanaires et les chloronaphthalènes, sont autant d'autres polluants organiques produits lors de la fabrication du ciment. Il peut être nécessaire de mesurer de temps en temps ces substances en cas de régime de fonctionnement spécial. [CE, 2010; Azimi, 2004]

### 1.3. Les effets des polluants sur la santé

La partie du corps de l'être humain la plus touchée par les polluants rejetés par les cimenteries sont les poumons qui sont une vaste surface d'échange (75 m<sup>2</sup>) L'appareil respiratoire a une fonction essentielle, celles des échanges gazeux (apport d'oxygène et élimination de gaz carbonique). A cette fonction est associée la fonction d'épuration qui assure la bonne qualité de l'air qui arrive dans les alvéoles pulmonaires en éliminant les aéro-contaminants. L'appareil respiratoire peut être divisé en deux parties :

- les voies aériennes supérieures ou proximales : nez (poils, cornets), bouche, pharynx, larynx,
- les voies aériennes inférieures ou distales extra- puis intra-thoracique : trachée-artère, arbre bronchique ramifié, (bronches souches, bronches lobaires, bronches segmentaires, bronchioles), Alvéoles. [Bisson, 1990].

#### 1.3.1. Les polluants gazeux

Parmi les polluants gazeux cités au début du chapitre et qui peuvent être rejetés pour une raison ou une autre en ayant un impact sur la santé de manière significative sont les suivants :

**Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)** : C'est un gaz irritant qui affecte le système respiratoire. Le mélange acido-particulaire peut, selon les concentrations des différents polluants, déclencher des effets bronchospastiques chez l'asthmatique, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux, gêne respiratoire), altérer la fonction respiratoire chez l'enfant.

**Oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>)** : Perturbe la fonction respiratoire, en provoquant des troubles respiratoires chroniques, et à forte dose il peut engendrer des lésions. Il pénètre dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Il peut, dès 200 µg/m<sup>3</sup>, entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyper réactivité bronchique chez l'asthmatique et chez les enfants.

**Monoxyde de carbone (CO)** : Il perturbe le transport de l'oxygène dans le sang et peut provoquer des anémies, des vertiges, des migraines, comme il peut être mortel à forte dose.

#### 1.3.2. Les poussières

- **A court terme** : les poussières fines inférieures à 1 µ atteignent les alvéoles et peuvent pénétrer dans le sang. Elles peuvent transporter d'autres polluants qui y sont adsorbés (SO<sub>2</sub>, métaux lourds, hydrocarbures...). Elles sont associées aux hospitalisations et aux décès pour cause respiratoire et cardio-vasculaire.
- **A long terme** : ces polluants peuvent provoquer des maladies respiratoires telles :
  - ✓ asthme, bronchite, emphysème (poussières, SO<sub>2</sub>)
  - ✓ cancer des poumons (particule et NO<sub>2</sub>)

Leurs effets sur la santé dépendent de trois facteurs :

- Des niveaux de concentration auxquels est exposé l'organisme (exemple : milieu professionnel par rapport aux sites propres)
- De la durée d'exposition (le temps durant lequel on est exposé à ce niveau)
- De l'activité physique : l'effort physique s'accompagne d'une augmentation de la ventilation pulmonaire et donc de la quantité de polluants introduits dans l'organisme. [Aoudia, 2001].

### 1.4. Les effets des polluants sur le cadre bâti

L'accélération de la vitesse de dégradation de nombreux monuments au cours des dernières décennies a mis en évidence l'impact des polluants sur les matériaux. Les polluants primaires ou leurs polluants secondaires (ozone, dérivés acides) peuvent agir sur un grand nombre de matériaux (métaux, pierre, peintures, tissus, cuir, plastiques, caoutchouc, papier...), utilisés dans différentes fonctions (bâtiment, grands équipements, matériels mécaniques et électroniques, vêtements...).

Les polluants participent aussi à la corrosion des métaux, comme le cuivre, l'argent, le fer et l'aluminium. Le grès, le calcaire, la brique, le béton et le verre sont également vulnérables à certains ingrédients du smog, notamment l'ozone, le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote. Ces deux derniers éléments peuvent se transformer en acides corrosifs en présence d'humidité dans l'air.

La corrosion des matériaux de construction a fait l'objet du plus grand nombre d'études et notamment d'un Programme International Concerté dans le cadre de la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière. Les études ont permis de mettre en relation la corrosion de nombreux matériaux avec les concentrations de polluants dans l'air ambiant. Ces fonctions exposition-réponse ne constituent évidemment qu'un modèle simplifié de la réalité : les tests portent sur des matériaux-standards alors que des matériaux tels que la pierre présentent des qualités très variables suivant leur origine ; la vitesse de corrosion des matériaux sur site dépend de leur emplacement, plus ou moins exposé aux agents climatiques; les études n'ont jusqu'à présent porté que sur quelques polluants principaux... Outre la connaissance des fonctions exposition-réponse, une évaluation fine des effets de la pollution sur le parc de bâtiments d'un pays et sur sa gestion exige des études lourdes pour décrire le stock de matériaux constitutifs du parc et pour convertir les vitesses de corrosion des matériaux en fréquences de remplacement ou d'entretien et donc en coûts économiques. Une étude faite suivant une approche de ce type a conduit à évaluer le coût de l'impact "bâtiment" des émissions de dioxyde de soufre du trafic routier de la ville d'Oslo à 0,03 F/litre d'essence et 0,06 F/litre de gazole [Glomsrod, 1996].

A coté de la corrosion des matériaux, une autre forme d'impact de la pollution atmosphérique sur le cadre bâti est constituée par le phénomène de salissure de la surface des matériaux du fait des dépôts de particules. Les particules fines, et notamment les particules émises par les moteurs diesel, paraissent particulièrement efficaces de ce point de vue. La visibilité est la qualité de l'atmosphère qui permet de voir à une plus ou moins grande distance, mais aussi de voir plus ou moins bien des objets proches et d'en apprécier les détails de couleur ou de texture. La visibilité est considérée comme un élément de bien-être. La pollution

## Problèmes Ecologiques du Ciment

atmosphérique réduit la visibilité, par absorption et par diffraction de la lumière. L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire, qui donne à l'atmosphère une couleur brune. La diffraction, qui est le fait des particules fines, est fonction de la taille des particules ; elle est donc en relation avec l'humidité de l'atmosphère, la composition chimique des particules et leur processus de formation. L'observation d'un bâtiment ou d'une statue révèle l'ampleur de cette dégradation physique et esthétique, attribuée à la sulfatation et au dépôt et à l'accrochage de poussières noirâtres. Ainsi, sur une même façade, coexistent des zones sombres et des zones claires. Les premières, abritées de la pluie, sont couvertes de croûtes noires constituées par du gypse cimentant, entre autres particules, des cendres volantes et des suies. A l'inverse, les zones claires, frappées par la pluie ou parcourues par des ruissellements d'eau, offrent l'aspect d'un matériau nu, lavé ou même érodé: les particules déposées entre deux pluies ont été évacuées et le peu de gypse formé a été dissout.

La pollution des villes n'est pas un phénomène récent : les monuments en témoignent. Lorsque l'on brûle des combustibles (bois, charbon, fioul lourd ou léger, essence, kérosène, gaz naturel...) dans de mauvaises conditions de ventilation (moteur déréglés, conduit de chaudières et de poêles encrassés, feux de cheminées mal éteints, incendies...), des particules noirâtres sont produites qui se déposent et s'incrument dans les façades, provoquant ainsi leur noircissement.

### 1.5. Les effets des polluants sur l'environnement

La pollution de l'air constitue à la fois une atteinte à notre qualité de vie et à notre santé. Elle est aussi néfaste pour l'environnement et le climat (pluies acides, pollution photochimique, trou de la couche d'ozone, effet de serre...). Les effets des polluants se ressentent sur les écosystèmes mais aussi sur les bâtiments (corrosion, noircissement, encroûtement et altérations diverses)

Les dépôts de poussières le long des axes de circulation entraînent une multiplication des feuillaisons des arbres, et accentuent le stress d'implantation des jeunes pieds de rosiers qui s'accumulent difficilement, alors que les plantes âgées semblent bien s'adapter. Mais la pollution a un impact esthétique plus qu'économique: elle n'entraînera pas de changement fondamental dans la gestion des arbres urbains.

En revanche, les particules et les macromolécules présentent essentiellement un risque de contamination de la chaîne alimentaire. Les molécules organiques (composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), Dioxine, pesticides) et les métaux lourds se présentent souvent sous forme de particules, d'aérosols ou sont adsorbés sur d'autres particules (suie, diesel). Celles-ci se collent sur la cuticule cireuse des feuilles notamment, d'où certaines sont difficilement lavées. Aussi les végétaux exposés destinés à être consommés, c'est-à-dire les cultures maraîchères, fruitières et fourragères, présentent-ils le plus de risque de contamination pour l'homme et l'animal, les céréales étant relativement protégées dans leurs enveloppes. L'absorption à l'intérieur des parties aériennes du végétal est par contre limitée, comme celle par les racines d'autant plus que le sol constitue un filtre efficace [Ferfar, 2003].

## Problèmes Ecologiques du Ciment

Les poussières déposées sur les plantes les empêchent de respirer et peuvent causer leur mort progressive. A la longue, cela provoque la disparition de toutes les espèces végétales avoisinantes. Les différentes études de recherche ont montré que certains rejets chimiques comme le SO<sub>2</sub>, le fluor et le peroxy acétyl nitrate avaient des effets néfastes sur la végétation. Les plantes affectées sont aussi rendues plus sensibles aux infections cryptogamiques, ce qui entraîne avec le temps une réduction du rendement des cultures [Khelifa, 2009].

La pollution de l'air peut créer des troubles graves dans les mécanismes régulateurs des fonctions qui régissent la vie d'une plante (nutrition, croissance, reproduction...). Les polluants pénètrent dans les végétaux par les stomates et les lenticelles des feuilles, ou indirectement par le sol. L'obstruction des stomates, par les fines particules, provoque un lent dépérissement des végétaux. Les polluants non dotés d'un tel pouvoir de pénétration, y compris les impuretés solides en suspension dans l'air (cendre, suie, poussières) et insolubles dans l'eau, sont entraînés par la pluie ou la neige et se déposent sur la végétation et le sol.

Les poussières de ciment sont dans certains cas nocifs pour la végétation. On relève la présence de croûtes grisâtres sur les plantes situées autour des cimenteries, d'épaisseur variable selon l'importance des retombées. Les croûtes empêchent toute fonction métabolique des feuilles qui finira par la mort des plantes. [Belala & Debbih 2003]

### 1.6. Effets des Odeurs

Les émissions d'odeurs posent très rarement problème dans une installation bien conduite. Si les matières premières contiennent des composants combustibles (kérogènes) qui ne brûlent pas mais qui pyrolysent quand leur température s'élève dans le préchauffeur, des émissions d'hydrocarbures peuvent se produire. Ces rejets sont visibles au sommet de la cheminée sous forme d'un panache ou de fumée bleue et peuvent être à l'origine d'odeurs tout autour des cimenteries quand les conditions météorologiques sont défavorables. L'utilisation de combustibles ou de matières premières contenant du soufre, ou les deux, peut entraîner des dégagements d'odeurs (ce problème touche plutôt les fours verticaux).

En outre, les déchets utilisés comme matières premières ou combustibles peuvent être à l'origine d'émissions d'odeurs, notamment pendant les différentes étapes de transformation comme la préparation ou le stockage. L'utilisation d'ammoniac pour la réduction des NO<sub>x</sub> peut également causer des émissions d'odeurs pendant certaines étapes du procédé s'il n'est pas manipulé correctement. [CE, 2007]

### 1.7. L'impact du bruit sur la santé

Des émissions sonores sont produites tout au long du procédé de production du ciment, de la préparation et de la transformation des matières premières à l'expédition du produit final en passant par la cuisson du clinker, le procédé de production du ciment et le stockage. Les équipements lourds et les ventilateurs de grande puissance utilisés à différentes étapes du procédé de fabrication du ciment peuvent être des sources de bruit ou de vibrations, ou les deux, notamment :

- les goulottes et trémies,

## Problèmes Ecologiques du Ciment

- toutes opérations dans lesquelles la matière première, les combustibles, le clinker et le ciment sont cassés, concassés, broyés ou tamisés,
- les ventilateurs extracteurs,
- les soufflantes,
- la vibration des conduites.

Les cimenteries doivent se conformer aux normes de réductions imposées par la réglementation nationale et des relevés de bruit sont réalisés et analysés. L'industrie du ciment utilise des écrans antibruit naturels tels que les bâtiments administratifs, des murs, les arbres et les buissons pour réduire les émissions sonores. Lorsqu'une cimenterie est implantée dans une zone résidentielle, la construction de tout nouveau bâtiment est conditionnée à la réduction des émissions sonores. [CE, 2007]

Cependant, le bruit, ou plus précisément l'excès de bruit, constitue un préjudice à la qualité de vie et à la santé des personnes. Il s'est avéré que celui-ci a non seulement des effets sur les organes de l'audition, mais aussi sur l'organisme en général, et notamment avec des troubles du sommeil ou du comportement.

L'exposition au bruit s'accompagne d'hypertension artérielle chez les hommes, de troubles du sommeil, d'hospitalisation et arrêt de travail ainsi que des états anxieux et une augmentation de consommation de médicaments. [Berglund & Maschke]

### 1.8. Conclusion

Le ciment est un produit indispensable pour la construction et le développement de tous les pays mais dont la fabrication est un risque potentiel qui a un mauvais impact sur la santé et sur l'agriculture avoisinante si des mesures ne sont pas mises en œuvre pour une bonne protection. Les cimenteries ne sont pas appelées uniquement à améliorer la qualité de leurs ciments et à baisser leurs coûts, mais aussi à remédier aux problèmes de pollution causés par les rejets des gaz et des poussières qu'elles dégagent à tous les niveaux de la fabrication de leurs ciments. Concernant la localisation : la nocivité des cimenteries serait moindre si les usines étaient installées dans des régions à faibles densité humaines et sur des terres non agricoles.

Tout ces problèmes peuvent cela-dit être réduit en réduisant l'utilisation du ciment. Les substitutions au ciment ou communément appelés ajouts cimentaires tel que la poudre de verre permettent de réaliser des constructions résistantes et durables dans le temps tout en réduisant la quantité du ciment et par conséquent les problèmes liés à sa production.

### *Bibliographie*

**Aoudia M. T, (2001)**, « Les rejets atmosphériques dans le secteur de la production du ciment et leurs impacts sur l'environnement. Moyens d'évaluation et de contrôle ». Séminaire CETIM, du 28-30 Octobre, Hôtel Hilton d'Alger.

**Bastarache E, (2003)**, « Le chrome et ses composés : Substitutions de matériaux céramiques complexes. Smart Conseil », Québec, Canada. (<http://www.soreltracy.qc.ca/~edouardb/>)



## Problèmes Ecologiques du Ciment

**Bastarache E, (2003)**, « Manganèse et composés : Toxicologie. » Tracy, Québec, Canada. (<http://www.sorel-tracy.qc.ca/~edouardb/>)

**Belala A & Demmene Debbih W, (2003)**, « Pollution particulaire et métallique aéroportée dans la ville de Didouche Mourad », Mémoire de fin d'étude en écologie et environnement, Université Mentouri Constantine

**Berglund B & Maschke C, (2000)**, « Bruit et santé » : Organisation Mondiale de la Santé, Genève, 30p.

**Benyoucef K, (1992)**, « Mesure des retombées totales et humides à Blida ». Mémoire de fin d'étude de cycle d'ingénieur, Université Blida.

**Bisson J, (1990)**, « Pollution atmosphérique. Environnement » Canada. Ottawa.

**Bonnard N & al, (2000)**, « Cobalt et composés minéraux », INRS fiche toxicologique N° 128. (<http://www.inrs.fr/dossiers/fichtox/ft128.pdf>).

**Commission Européenne, (2010)**, « Document de référence sur les meilleures techniques disponibles Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie », Ministère de l'énergie et du développement durable et de la mer en France, Paris.

**Ferfar A, (2003)**, « étude des retombées atmosphériques autour de la cimenterie de Hamma Bouziane », Mémoire de fin d'étude en Ecologie et Environnement, Option : Pathologie des écosystèmes (Pollution), Université Mentouri de Constantine.

**Glomsrod S, & al, (1996)**, « Air pollution, impacts and values; corrosion costs of buildings, materials and cars in Norway », SFT, Oslo, 54p.

**Kadem. D.E.D, (2000)**, « Pollution des sols par les métaux lourds ». Mémoire magistère, option Ecologie. Université Mentouri Constantine (Algérie).

**Khelifa M. R. & al, (2009)**, « les cimenteries et l'environnement cas de la cimenterie de aintouta », 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, SBEIDCO October 12-14 Oran (Algérie).

**OMS, (1986)**, Directive de qualité pour l'eau de boisson. Volume 2, Critères d'hygiène et documentation à l'appui. Genève.

**Stenger, R, (1998)**, « Partie I : Polluants contenus dans les fumées » Colorado Springs, USA

## CHAPITRE 2 – L'UTILISATION DU VERRE

Après l'eau, le béton est le matériau le plus utilisé sur la planète. Améliorer la performance du béton tout en réduisant l'empreinte écologique liée à sa production devient alors un enjeu important.

Relevant ce défi, l'équipe du professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke a développé une innovation majeure pour l'utilisation de nanosilice dans la fabrication du béton de haute performance. Sa solution : remplacer la fumée de silice, un matériau peu accessible, par des nanopoudres de verre provenant de déchets recyclés disponibles localement et abondamment.

### 2.1. Utilisation de la poudre de verre

Le verre est un matériau naturel présent sur Terre sous forme d'obsidienne. Si cette roche volcanique vitreuse fut taillée en pointes de flèches dès la Préhistoire et les premiers verres artisanaux datent du troisième millénaire avant Jésus-Christ, ce n'est que début XXe que la mécanisation est apparue dans les processus de fabrication.

D'une durée de vie quasiment infinie et issu de matières premières naturelles, le verre est un matériau excellent pour l'environnement. Plus légers, les matériaux composites renforcés en fibres de verre permettent de limiter l'exploitation des ressources naturelles.

La poudre de verre est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré. Lorsqu'il est incorporé au béton en remplacement d'une portion de ciment, le verre ainsi réduit en poussière se lie avec les éléments de chaux en vertu de ses propriétés pouzzolaniques.

Le recours à cet ajout cimentaire comporte aussi son lot de bénéfices environnementaux. Non seulement parce qu'il affiche un contenu recyclé 100 % postconsommation, mais aussi parce qu'il s'accompagne d'une réduction des émissions de GES – en raison de la non-production du ciment qu'il remplace – et qu'il ne dégage pas de composés organiques volatils. Sans compter qu'il permet de développer des produits de couleur pâle dont l'indice de réflectance solaire élevé contribue à la réduction des îlots de chaleur urbains.

De nombreux avantages techniques sont par ailleurs attribués à l'utilisation de la poudre de verre dans la fabrication du béton. Notamment sa perméabilité supérieure, qui en ferait un excellent matériau pour les routes où l'on épand du sel, par exemple. Le verre recyclé confère également au béton une résistance à la compression beaucoup plus élevée.

Du mur antibruit à la piste de course, le béton écologique composé de poudre de verre pourrait bien façonner les villes tout en offrant une deuxième vie au verre.

Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recyclé plusieurs fois. Cependant, il est nécessaire que le verre provenant de la collecte sélective soit préalablement séparé en fonction de la couleur pour être transformé en calcin pour de nouveau être utilisé dans la fabrication de

poudre de verre. La plupart du temps, le verre récolté est un produit mixte et sa réutilisation peut devenir difficile. Dans ce cas-ci, il est employé pour d'autres applications (abrasif routier, laine de verre, filtrations municipales...) ou stocké en décharge.

Des travaux ont montré que l'utilisation du verre dans les bétons semble être une piste prometteuse pour un recyclage massif:

- En subissant un léger concassage, le verre peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût mais peut entraîner une réaction néfaste pour la structure. Qualifiée de "cancer des bétons", la réaction alcali-silice (RAS) est le résultat de la réaction de la silice amorphe d'un granulats avec les ions hydroxydes et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction.

- Un broyage prononcé laisse envisager une utilisation en tant que liant. Dans ce cas-ci, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant des composés dotés de propriétés liantes: c'est la réaction pouzzolanique.

En considérant la pathologie qu'entraînent les granulats de verre, il est vraisemblable que la valorisation du verre ne soit possible qu'à travers un broyage accentué.

## 2.2. Rhéologie des bétons avec le verre

Tels que mentionnés dans l'introduction, quelques éléments permettent de croire que le verre et le béton seraient une union intéressante d'un point de vue environnemental. Cette idée chemine depuis longtemps dans les universités, d'ailleurs, les premières recherches pour incorporer le verre au béton datent des années 1960 (Shi et Zheng 2007). L'approche initiale pour unir ces deux matériaux est, bien évidemment la moins dispendieuse en terme de coût de concassage, c'est-à-dire d'utiliser le verre comme granulats fin ou grossier. Depuis quelques années, les propositions convergent vers un usage du verre comme remplacement cimentaire. La section suivante présente quelques pistes et observations tirées d'études passées sur la maniabilité.

### 2.2.1. L'angularité et la densité des particules

Lorsque le granulats fin est partiellement remplacé par du verre broyé, il semble que l'ouvrabilité du béton ou du mortier diminue conjointement avec l'augmentation du taux de remplacement par le verre. Topcu et Canbaz (2004) ont vérifié l'ouvrabilité de bétons dont les granulats naturels étaient remplacés par du verre broyé de dimension 4-16 mm. Ces essais ont permis de conclure que l'affaissement diminuait parallèlement à l'augmentation de la proportion de verre. Ils proposent comme explication l'angularité des granulats de verres qui nuit à l'affaissement du béton. Paradoxalement, ils indiquent aussi que malgré la perte d'affaissement, l'ouvrabilité des bétons n'est pas affectée par le remplacement des granulats par du verre broyé, et ce, même avec une proportion aussi haute que 60%. Ismail et Al-

Hashmi (2009) observent également une perte d'affaissement avec un remplacement massique de 20% du sable naturel par du verre. Tous ces auteurs remarquent une ouvrabilité satisfaisante malgré une baisse d'affaissement.

À l'opposé, Park, Lee et coll. (2004) sont d'opinion que la forme des particules affecte sévèrement l'ouvrabilité et l'affaissement. Selon leurs recherches, un remplacement de 30% à 70% des granulats fins réduirait l'affaissement de 20% à 44% (13 cm d'affaissement versus 8 cm pour un remplacement de 70%). Ils avancent que, non seulement, l'angularité des particules serait un obstacle à la fluidité, mais également qu'un remplacement massique du sable par du verre induit un plus gros volume de granulats (la densité du sable de verre est de l'ordre de 1,5) donc une plus grande surface de contact entre la pâte et les granulats. Étant donné l'augmentation de pâte nécessaire pour « envelopper » les granulats de verre, une plus faible quantité de pâte resterait pour fluidifier le mélange et permettre l'affaissement.

Les recherches de Castro et de Brito (2012) mènent à une conclusion allant dans la même direction. Le verre grossièrement broyé (avec une surface de contact moindre) affecterait moins la fluidité que du verre finement broyé (avec une plus grande surface de contact). Ainsi, la substitution de granulats grossiers par du verre broyé ne semble pas influencer la quantité d'eau à rajouter pour obtenir une même valeur d'affaissement. Par contre, pour le remplacement de granulats fins, la demande en eau augmente. Ainsi, pour une maniabilité égale, le mélange contrôlé possède un rapport E/C de 0,55 et le mélange avec 45% de granulats fins de verre à un rapport E/C de 0,58. Cette étude conclut que la substitution des granulats fins par le verre broyé influence significativement à la baisse l'ouvrabilité des mélanges et davantage d'eau doit être ajoutée pour des affaissements équivalents. Corinaldesi, Gnappi et coll. (2005), qui ont travaillé avec des mortiers dont le sable est partiellement substitué par du verre broyé très finement (36 à 100  $\mu\text{m}$ ), présentent la même conclusion. Le mortier de référence a un rapport E/C de 0,56 et, pour une ouvrabilité équivalente, le mélange avec un taux de substitution de 30% a un rapport E/C de 0,67, alors que le mélange avec un taux de substitution de 70% a un rapport E/C de 1,0.

De manière générale, l'affaissement est considéré comme un indice de la maniabilité d'un béton et l'ouvrabilité est commentée en fonction du résultat de la valeur obtenue. Il serait prudent de reconnaître que dans les études précédemment mentionnées, l'affaissement et l'ouvrabilité ne sont pas corrélés d'aussi près qu'à l'habitude par les observations des chercheurs. Puisque c'est l'application concrète de béton à des fins de construction qui est l'intérêt fondamental et que l'affaissement n'est vraisemblablement pas l'essai le plus significatif, Polley, Cramer et coll. (1998) ont mis en œuvre un programme plus robuste pour se prononcer sur l'ouvrabilité des mélanges avec verre comme granulats fins et ont réalisé une étude avec des ouvriers dans une situation de chantier. Les ouvriers rapportent quelques particularités, comme celle de devoir ajouter davantage d'eau pour obtenir un affaissement équivalent à un béton sans verre, et celle de rajouter de l'eau sur la surface pour augmenter le volume de pâte et permettre la finition. Il semblerait donc que le verre affecte significativement l'ouvrabilité et l'angularité des particules serait le paramètre le plus influent selon cet auteur.

Pour appuyer l'impression de tous ces auteurs, Cassar et Camilleri (2012) ont conduit une étude sur le verre imposé (c'est à dire en utilisant des particules de verre dont la géométrie est beaucoup moins angulaire). Ils concluent que, dans ce cas, l'usage du verre n'a aucune influence sur l'affaissement. À la lumière du travail effectué par un bon nombre de chercheurs, il est intéressant de constater que l'angularité des particules peut influencer de manière notable l'ouvrabilité d'un béton. Ainsi, dans le cas des mélanges de béton comprenant du verre, des études d'ouvrabilité seraient toujours recommandables en amont des travaux en chantier afin d'éviter les surprises.

### 2.2.2. La dimension des particules

Même si quelques études démontrent que l'angularité des particules de verre affecte à la baisse et significativement la maniabilité d'un mélange à béton, d'autres études démontrent que l'effet du verre sur la rhéologie n'est pas simple et dépend certainement de plusieurs paramètres. Plusieurs études rapportent que le béton est plus fluide lorsque le verre est utilisé comme remplacement cimentaire. Par exemple, Matos et Sousa-Coutinho (2012) ont travaillé sur des mortiers avec des remplacements cimentaires comme la fumée de silice et la poudre de verre. Dans leur essai, le mélange contrôlé a un étalement de 200mm et les mélanges expérimentaux donnent les résultats suivants : le mélange avec 10% de fumée de silice a un étalement de 198 mm, celui avec 10% de poudre de verre, 204 mm et celui avec 20% de poudre de verre donne un étalement de 206 mm. Il conclut donc que le verre fluidifie les mortiers et que son influence est l'opposé de celle de la fumée de silice. De plus, l'impact sur la rhéologie est plus prononcé dans le cas du verre que dans le cas de la fumée de silice. Matos et Sousa-Coutinho observent au MEB une grande angularité des particules et indique que la finesse mesurée au laser est similaire à celle du ciment. Il semblerait donc que la fluidité des mélanges soit augmentée par le verre broyé finement. Kara, Korjakins et coll. (2012) ont d'ailleurs exploité cette idée en comparant différentes poudres de verre en fonction de leur temps de broyage (le broyage supplémentaire suppose des particules plus fines). Ainsi, pour un béton avec un taux de remplacement cimentaire de 20% et pour des poudres de verre avec un broyage supplémentaire de 0, 30 et 90 minutes respectivement, les affaissements obtenus seraient de 100 mm, 110 mm et 130 mm respectivement. La conclusion évidente est que plus le verre est broyé longtemps (ou finement), plus la fluidité du béton est élevée.

Schwarz, DuBois et coll. (2007) poursuivent en avançant que la finesse de la poudre de verre a un effet bénéfique, mais ils constatent également, sans surprise, que le taux de remplacement joue un rôle majeur. Dans leur étude, l'ouvrabilité de la pâte augmente en fonction du taux de remplacement. Selon eux, l'absorption négligeable du verre serait en cause, car plus d'eau serait disponible pour contribuer à la fluidité et à la plasticité de la pâte, on parlerait ainsi d'un rapport eau disponible/ciment plus élevé. La faible absorption l'emporterait donc sur l'angularité des particules et l'augmentation du volume de pâte en termes d'influence sur la rhéologie.

À première vue, certaines études semblent contradictoires. En revanche, une réflexion plus approfondie indique que le dénominateur commun se situe au niveau de la pâte disponible et de sa consistance. Le verre broyé finement peut rendre la pâte plus fluide en rendant

disponible une plus grande quantité d'eau comparativement au ciment; l'ouvrabilité du béton serait, par conséquent, améliorée. Lorsque le verre est broyé plus grossièrement, la faible absorption est encore présente pour fluidifier, mais l'effet se manifeste faiblement, car un autre phénomène prend le contrôle de la rhéologie. En effet, lors d'un remplacement massique des granulats par du verre, le volume et la surface de granulat de verre est plus important ce qui augmente la quantité de pâte requise pour envelopper les granulats. Par conséquent, un plus gros volume de pâte est requis pour envelopper les granulats et un plus faible volume reste pour fluidifier le mélange, d'où l'effet opposé sur l'ouvrabilité. Il est à noter que les observations décrites dans cette section offrent des indices de nature empirique sur le comportement rhéologique des bétons avec verre.

### 2.3. Réaction pouzzolanique de la poudre de verre

Le verre incorporé dans le béton peut manifester plusieurs types de comportements, essentiellement en fonction de sa granularité. En effet une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordre, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique.

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans une matrice cimentaire désigne la combinaison en présence d'eau, de la silice amorphe du verre avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment.

[Shayan et al. (2004)], ont remarqué que la poudre de verre de finesse Blaine relativement élevée de 800 m<sup>2</sup>/kg développe des réactions pouzzolanique importantes dans le mortier et pourrait remplacer jusqu'à 30 % de ciment dans quelques mélanges de béton.

D'autres études conduites par [Shi et al. (2005b)] portant sur des poudres de verre de différentes finesses variant de 264 à 582 m<sup>2</sup>/kg, ont montré que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre est d'autant plus importante que sa finesse est élevée. Ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes.

Par toutes les études établies sur la réaction pouzzolanique du verre on dégage les conditions suivantes :

- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique, plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique.
- A jeun âge la résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leurs teneurs en poudre de verre augmentent.
- L'activité pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leurs couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable.

L'utilisation simultanée du verre et d'un ajout cimentaire notamment la fumée de silice, la cendre volante ou encore le métakaolin en remplacement d'une fraction du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes. Ainsi l'utilisation du verre serait plus intéressante que son emploi individuel.

La réaction pouzzolanique de la poudre semble être fortement affectée par le dosage en eau du béton. En effet, les effets d'amélioration des propriétés du béton résultant de l'activité pouzzolanique du verre sont nettement plus perceptibles dans les bétons ayant des rapports E/L élevés que dans ceux ayant E/L faibles [Aladdine, 2009; Zidol, 2009].

### 2.4. Recyclage du verre

De tout temps, les verriers ont recyclé leurs rebuts de fabrication dans les fours. Cette pratique assurait non seulement des économies de matières premières mais elle apportait aussi une amélioration sensible des mécanismes de fusion de la composition vitrifiable. Les quantités introduites, appelées de nos jours calcin interne, restaient modestes, de l'ordre de 10 % en poids de la composition vitrifiable. À partir des années 70, une organisation originale entre les collectivités locales, les verriers et les traiteurs de verre, s'est mise en place pour collecter, à grande échelle le verre usagé (ou verre ménager) auprès des particuliers. Ce système fonctionne très bien et a permis d'accroître, de façon importante et régulière, le taux de recyclage du verre usagé dans les fours jusqu'à des valeurs proches de 90 %, par exemple, sur certains fours bouteilles en verre coloré. Ainsi ce verre usagé, appelé calcin externe, est devenu progressivement une véritable matière première avec des exigences de qualité élevées pour permettre d'élaborer un verre de qualité identique à celui obtenu avec des matières premières conventionnelles. Aujourd'hui, cette pratique continue à progresser dans le cadre des impératifs du développement durable: on considère désormais le recyclage comme un outil stratégique pour l'industrie du verre car il va permettre de faire face aux contraintes environnementales, en particulier sur les émissions de gaz à effet de serre, qui touchent cette industrie.

#### 2.4.1. Origines du verre recyclé

On distingue deux sources de verre usagé destiné, après traitement, au recyclage dans les fours de verrerie:

- le verre ménager issu des collectes sélectives (container verre) et des collectes multimatériaux (poubelle verte) ; cette source représente 85 % du verre recyclé et se caractérise par une composition chimique assez homogène et stable, pour une région donnée, puisqu'il s'agit du mélange de tous les emballages en verre consommés sur un territoire bien défini; par contre ce verre est très pollué par des contaminants minéraux (cailloux, poteries, porcelaine...) et par des contaminants organiques (bois, papiers, plastiques, résidus alimentaires...).
- le verre industriel issu d'activités industrielles utilisant du verre plat ou du verre creux et produisant ponctuellement des rebuts importants, comme les brasseurs ou les entreprises de découpe et de façonnage de verre plat et de verres spéciaux; ce gisement représente 15 % du verre recyclé, reconnu pour être de bonne qualité car peu contaminé mais de composition chimique variable.

### 2.4.2. Qualité requise traitement du calcin brut

Le verre ainsi collecté doit subir un traitement afin d'éliminer les polluants néfastes pour la qualité des futurs produits fabriqués ou nocifs pour le fonctionnement et la durée de vie des fours. Ce sont:

- les contaminants minéraux infusibles, cailloux, porcelaines, céramiques, qui, au-dessus d'une taille de quelques centimètres ne peuvent être digérés par le four et vont se retrouver dans le produit fini; ces contaminants sont opaques et pourront être détectés optiquement
- les métaux magnétiques pouvant générer dans le verre des traînées colorées et des inclusions solides et gazeuses (bouillons); ils seront magnétiquement séparés du verre par passage sur bande transporteuse équipée d'un aimant permanent puissant
- les métaux non magnétiques, comme l'aluminium provenant des capsules et des systèmes de bouchage, susceptibles de réagir avec la silice en formant des billes de silicium, cassantes et dangereuses ; ces polluants seront triés par des détecteurs à courant de Foucault.
- les matériaux organiques solubles (résidus alimentaires) et insolubles (étiquettes papier, particules de carton, de plastique...) : ces contaminants sont des puissants réducteurs par leur teneur élevée en carbone, et donc capables au cours de leur décomposition au sein du mélange vitrifiable de modifier le caractère oxydoréduction du bain de verre; cette modification aura alors des conséquences dommageables sur la couleur du verre élaboré et sa transmission dans l'infrarouge. L'élimination de ces contaminants organiques se fera par maturation / lavage pour les résidus alimentaires solubles et par tri manuel et soufflage / aspiration pour les déchets solides
- les vitrocéramiques: ce sont des verres spéciaux utilisés pour la fabrication d'objets culinaires, très résistants à la chaleur et gardant une viscosité élevée aux températures de travail du verre sodocalcique, d'où des perturbations sérieuses sur son processus de formage; ces contaminants sont très difficiles à détecter et à trier. Des machines nouvelles de tri par couleur pour extraire le verre blanc du verre coloré sont en cours de développement et pourront aussi, par des réglages spécifiques, éliminer ces vitrocéramiques grâce à leur faible couleur jaune orangé caractéristique.

Tous ces traitements sont désormais assurés par des sociétés spécialisés, compétentes (appelées traiteurs de calcin) utilisant des techniques classiques de tri (tri manuel, broyage, criblage, tamisage, soufflage, séparation magnétique... mais aussi des technologies nouvelles de détection optoélectronique et de traitement informatique.



## 2.5. Le verre en substitution du ciment

SHAY AN et coll. (2006) ont mené des études sur une dizaine de mélanges de bétons de rapport E/L=0,49, dont trois incorporant 20 et 30 % de la poudre de verre en substitution partielle du ciment et désignés respectivement par Mix1, Mix3 et Mix4 retiennent particulièrement notre attention. Les surfaces spécifiques Blaine des matériaux utilisés sont de 350 m<sup>2</sup>/kg et 800 m<sup>2</sup>/kg respectivement pour le ciment et la poudre de verre. Les résultats de l'affaissement obtenus montrent que la poudre réduit l'ouvrabilité des mélanges. Ceci serait lié à sa surface spécifique très élevée, plus que le double de celle du ciment utilisé. Ces résultats confirment ceux obtenus sur les poudres finement broyées [GALLIAS et coll., 2000, YAMAMOTO et coll., 2007].

TAHA et coll., 2008a ont étudié plusieurs mélanges de béton dont M1 et M4 sont respectivement les mélanges témoin et avec 20 % de poudre de verre en remplacement de ciment. Les bétons ont un rapport E/L=0,38 et un dosage en liant de 440 kg/m<sup>3</sup>. Le diamètre moyen (d<sub>50</sub>) des particules de la poudre de verre utilisée est inférieur à 45 µm. Les mélanges M4-1 et M4-2 sont des mélanges dont le liant est uniquement du ciment mais incorporant respectivement 50 % et 100 % de sable de verre recyclé en remplacement de granulat. Quant aux mélanges M4-1 et M4-2, ils contiennent 20 % de poudre de verre en substitution du ciment et respectivement 50 % et 100 % de sable de verre en remplacement de granulats. Les résultats de l'affaissement (figure 2.1) montrent que le mélange avec 20% de poudre (M4) a le même affaissement que le témoin (M1). Ceci pourra signifier que cette poudre a peu d'influence sur l'affaissement. Mais le remplacement partiel ou total des granulats fins par le sable de verre dans le mélange témoin M1, diminue son affaissement. Par contre dans le mélange avec 20% de poudre de verre M4, l'incorporation de 50 % de sable de verre augmente l'affaissement tandis que l'incorporation de 100 % de sable de verre le diminue. Cette tendance est liée à la texture dure des particules de sable de verre, qui favorise le ressassement excessif et la ségrégation [TAHA et coll. 2008a].

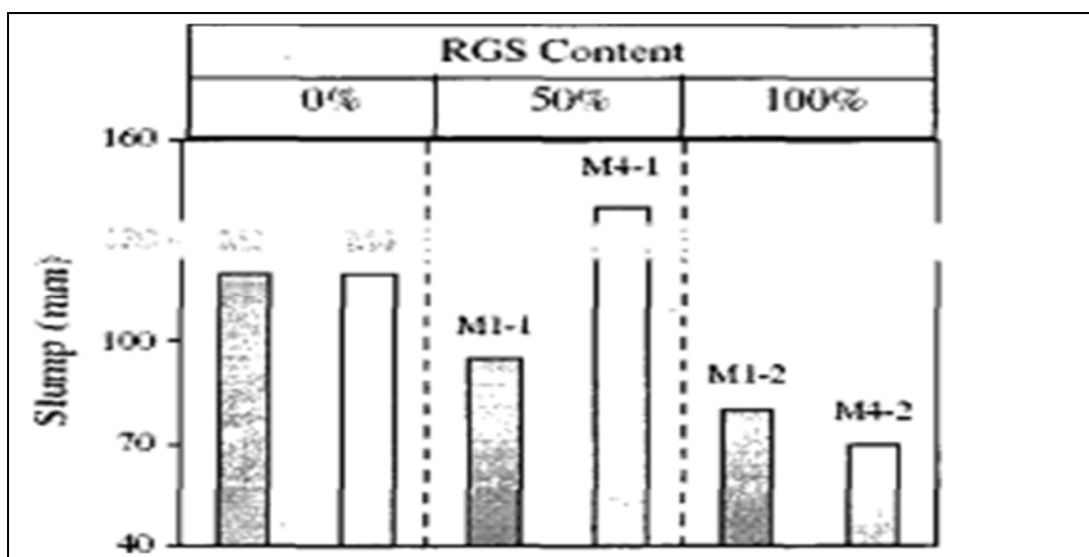
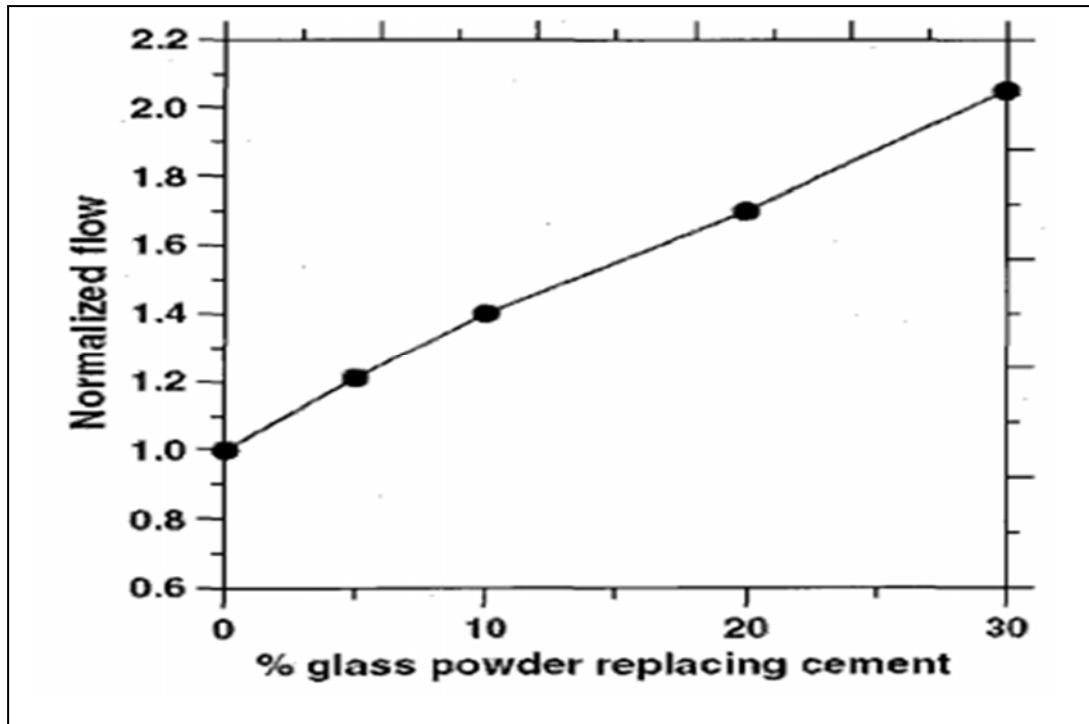


Figure 2.1 Effet de la poudre de verre sur l'affaissement [TAHA et coll., 2008a]

SCHWARZ et coll. (2007) ont trouvé de leur côté une augmentation de l'étalement des pâtes lorsque le taux de substitution par la poudre de verre de finesse Blaine de 262 m /kg augmente. En effet, ils ont exprimé l'étalement relatif par le rapport des étalements des mélanges de poudre de verre sur celui du témoin. Les résultats sont donnés sur la figure 2.2. Les travaux de SCHWARZ et coll., 2008b, ont révélé que la poudre de verre augmente l'affaissement du béton et diminue la teneur en air par rapport au témoin pour un rapport E/L = 0,40.



**Figure 2.2** Effet de la poudre sur l'étalement relatif des pâtes par rapport au Témoin [SCHWARZ et coll., 2007]

Les travaux de SCHWARZ et coll. (2007, 2008a et 2008b) ont montré que la poudre de verre améliore le degré d'hydratation du ciment Portland, diminue la porosité du béton et réduit l'interconnectivité des pores. La poudre de verre améliore l'hydratation des grains de ciment. Cette amélioration est d'autant plus importante que le taux de substitution par la poudre augmente. En effet l'amélioration du degré d'hydratation du ciment par la poudre est due à une augmentation du rapport E/C effectif. Sur la figure 2.3,  $\alpha_{act}$  représente le degré d'hydratation des particules actives. Par la figure 2.4, on remarque que la porosité capillaire à 2 jours diminue en fonction du taux de substitution mais augmente à 14 jours. L'augmentation du rapport E/C effectif favorise la dispersion des grains des liants qui occasionne la porosité élevée. Cette porosité élevée est à l'origine des faibles résistances observées dans ces mélanges de poudre de verre au jeune âge.

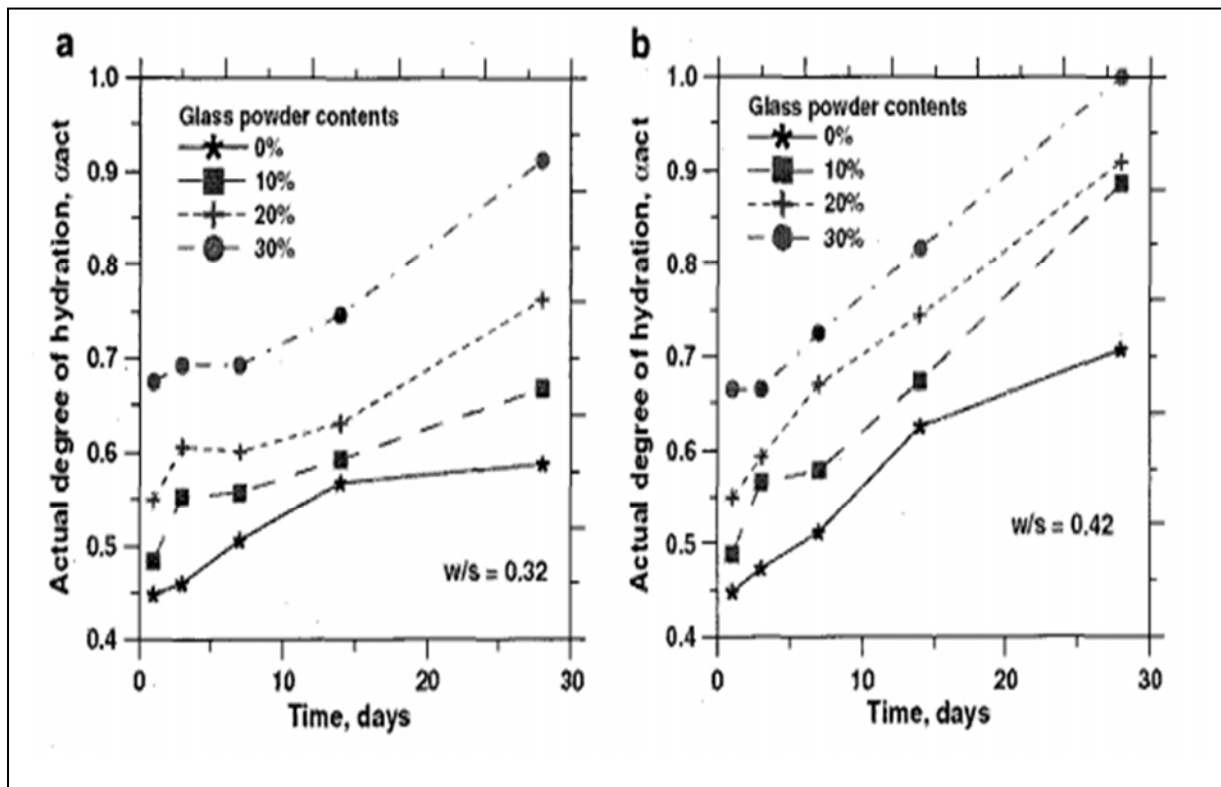
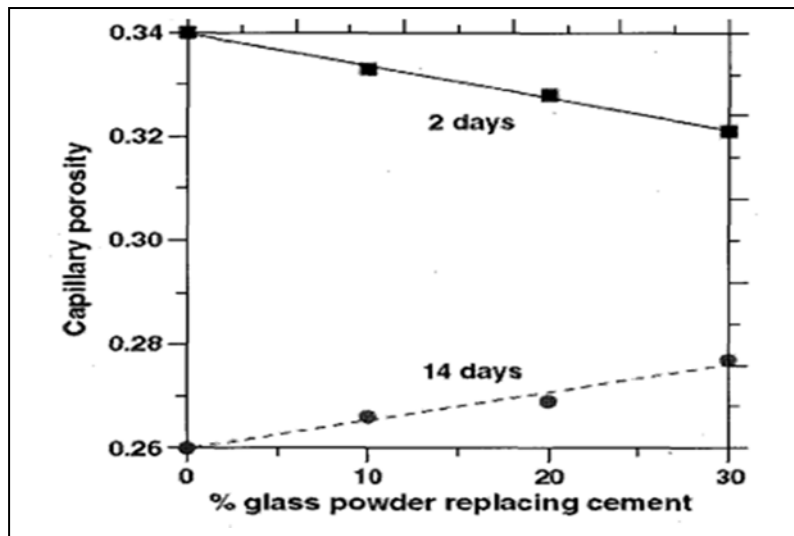
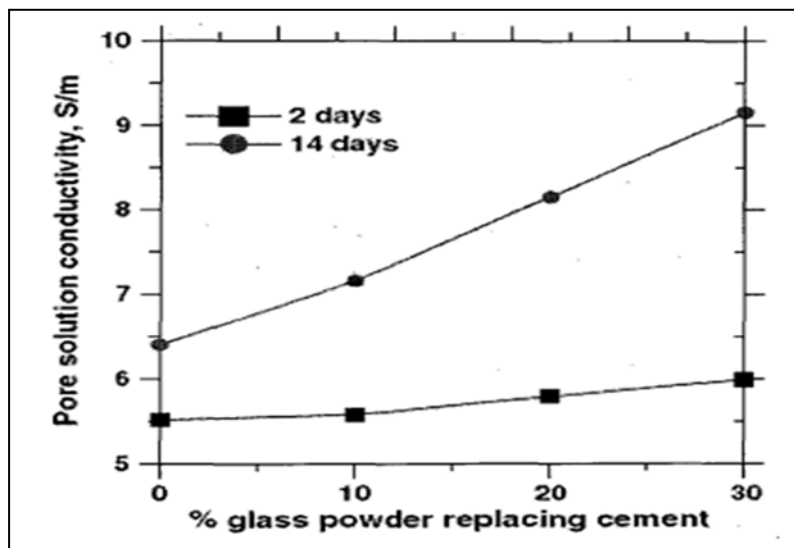


Figure 2.3 Effet de la poudre sur le degré d'hydratation des pâtes [SCHWARZ et coll., 2007]



**Figure 2.4** Porosité capillaire en fonction du taux de substitution [SCHWARZ et coll., 2007]

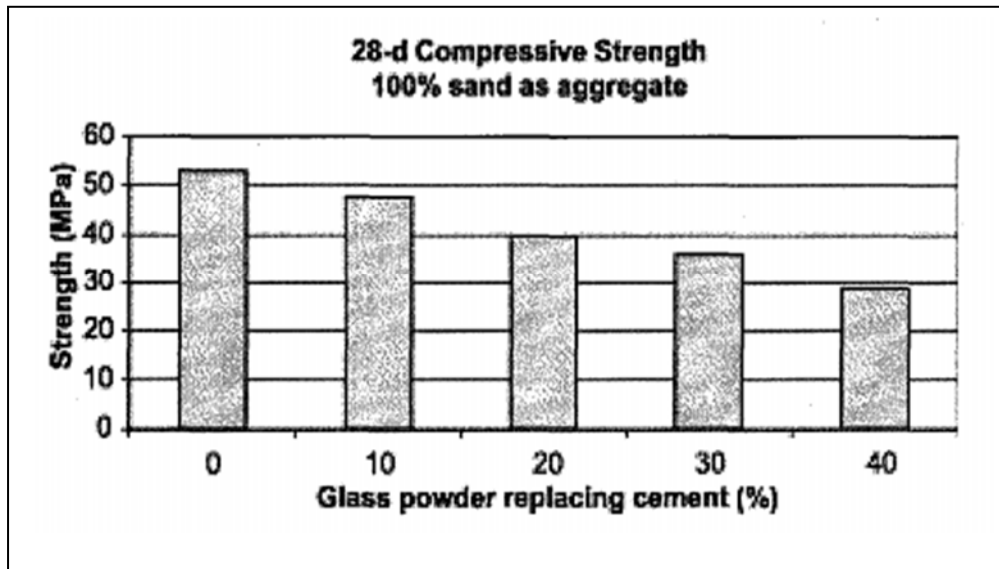


**Figure 2.5** Evolution de la conductivité de la solution des pores capillaires en fonction du taux de substitution par la poudre de verre [SCHWARZ et coll., 2007]

L'incorporation de la poudre de verre entraîne une réduction de l'interconnectivité des pores plus ou moins proportionnelle au taux de substitution par la poudre [SCHWARZ et coll., 2007]. La réduction de la connectivité des pores est liée à l'augmentation de la tortuosité des pores due à leur remplissage par des produits d'hydratation et aussi par des fines particules de verre non hydratées.

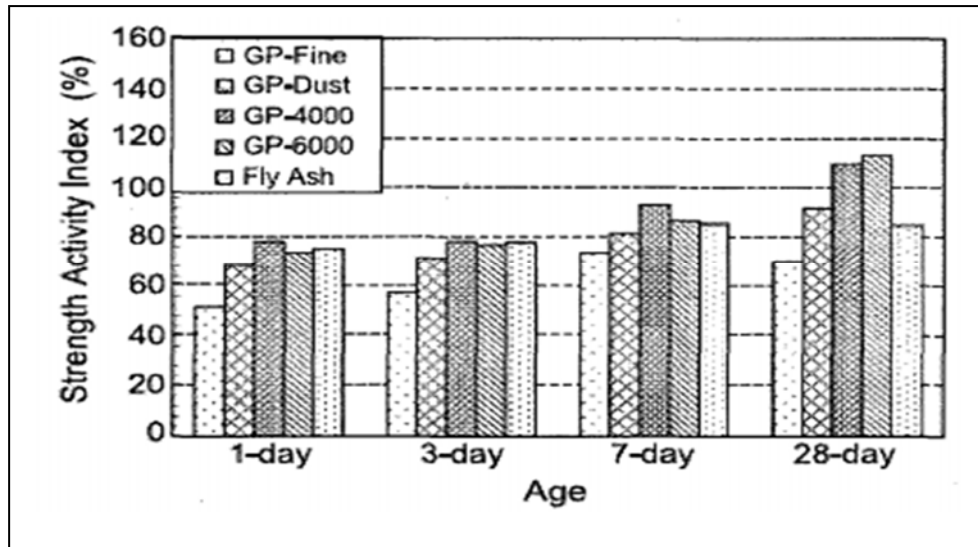
SHAY AN et coll. (2004), ont remarqué que la poudre de verre de finesse Blaine de 800 m<sup>2</sup>/kg développe des réactions pouzzolanique importantes dans le mortier et pourrait remplacer jusqu'à 30 % de ciment dans quelques mélanges de béton. Ils ont étudié l'effet de

l'incorporation de la poudre de verre par substitution partielle du ciment portland sur les résistances à la compression des cubes de mortiers. Leurs résultats sont illustrés par la figure 2.6. Cette figure montre une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre augmente. Les indices de Pouzzolanité à 28 jours respectifs des mélanges avec 10 %, 20 %, 30 % et 40 % de poudre de verre sont d'environ 92 %, 77 %, 71 % et 58 %.



**Figure 2.6** Résistance à la compression des mortiers incorporant poudre de verre [SHAYAN et coll., 2004]

D'autres études de SHI et coll. (2005b) ont porté sur des poudres de verre de différentes finesses variant de 264 à 582 m<sup>2</sup>/kg. Les surfaces spécifiques de Blaine des poudres de verre GP- dust, GP-4000 et GP-6000 sont respectivement 264m<sup>2</sup>/kg, 467 m<sup>2</sup>/kg et 582 m<sup>2</sup>/kg et celui du ciment est de 383m<sup>2</sup>/kg. Les résultats montrent que la réaction pouzzolanique est d'autant plus importante que la finesse est élevée. Ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes. Les résultats de résistances à la compression sur les cubes de mortier, illustrés par la figure 2.7, ont indiqué que la température de murissement a une grande influence sur la poudre de verre que sur les cendres volantes.



**Figure 2.7** Activité pouzzolanique de la poudre de verre [SHI et coll., 2005b]

Les figures 2.8 et 2.9 montrent que les résistances à la compression diminuent lorsque le taux de substitution par la poudre augmente. Ces résistances sont inférieures au témoin à 28 jours mais assez similaires au témoin à 91 jours. La faible résistance à jeune âge pourrait être liée à la faible teneur en ciment qui occasionne une légère augmentation du rapport E/C effectif [SHAYAN et coll. 2004 et 2006]. SHAYAN et coll. (2006) déclarent aussi que le développement de résistance à la compression est lent jusqu'à 28 jours d'âge, mais à l'âge de 404 jours tous les mélanges développent des résistances de 55 MPa en moyenne, dépassant celle du témoin de 40 MPa. Ils ont rapporté à travers les résultats issus de leurs différents mélanges étudiés que la poudre de verre peut être incorporée aux taux de 20 et 30 % en remplacement du ciment dans les bétons de 40 MPa sans effets négatifs sur ses propriétés.

De même, TAHA et coll. (2008) et SCHWARZ et coll. (2007 et 2008b) avaient aussi remarqué de faible résistance à 28 jours dans des mélanges incorporant la poudre de verre. Ces résistances à 28 jours sont d'autant plus faibles que le taux de substitution par la poudre augmente. Des résultats de leurs travaux illustrant l'effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression sont montrés sur les figures 2.10 à 2.12.

Sur la figure 2.9 les mélanges incorporant seulement la poudre de verre en substitution partielle du ciment sont désignés par Mix1, Mix3 et Mix4 avec respectivement 0 %, 20 % et 30 %. Quant à la figure 2.10, M1 est le mélange témoin contenant 100 % de ciment et M4 le mélange contenant 20 % de poudre de verre en remplacement de ciment. Les mélanges de la figure 2.12 sont confectionnés avec deux rapports E/L. En effet, le rapport E/L des mélanges témoin, 10GP, 10FA est de 0,40 tandis qu'il est réduit à 0,36 pour les mélanges 10GPR et 10FAR

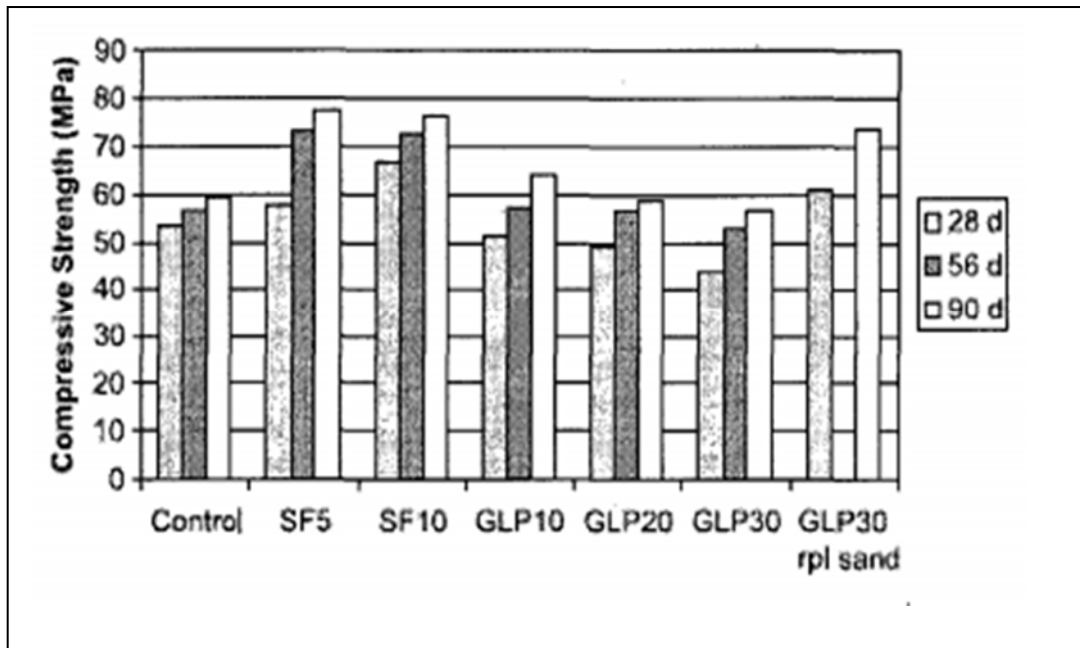


Figure 2.8 Resistance à la compression des mélanges de béton de poudre de verre et fumée de silice comparée au témoin [SHAYAN et coll., 2004]

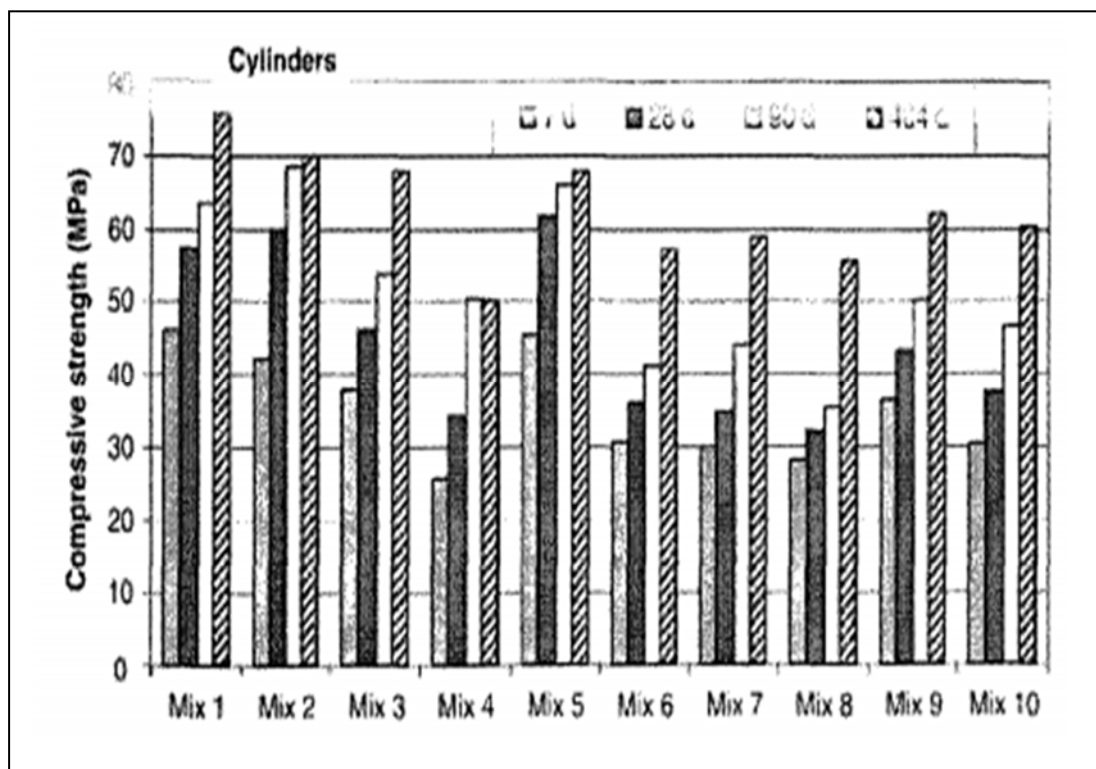


Figure 2.9 Resistance a la compression des bétons étudiés [SHAYAN et coll., 2006]

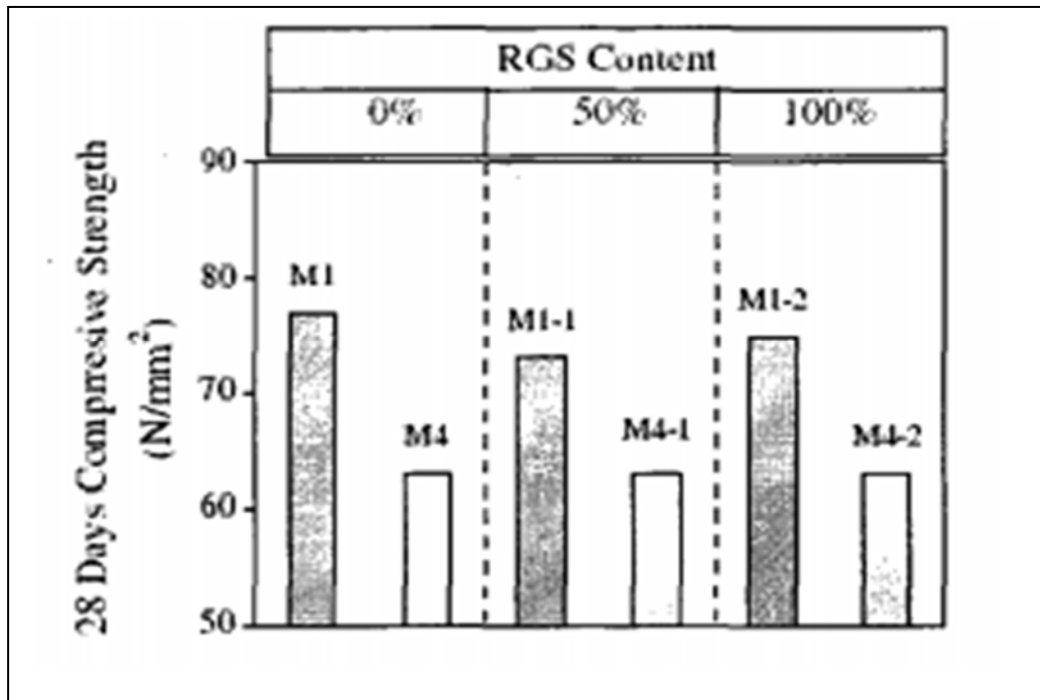


Figure 2.10 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression des bétons à 28 jours [TAHA et coll., 2008a]

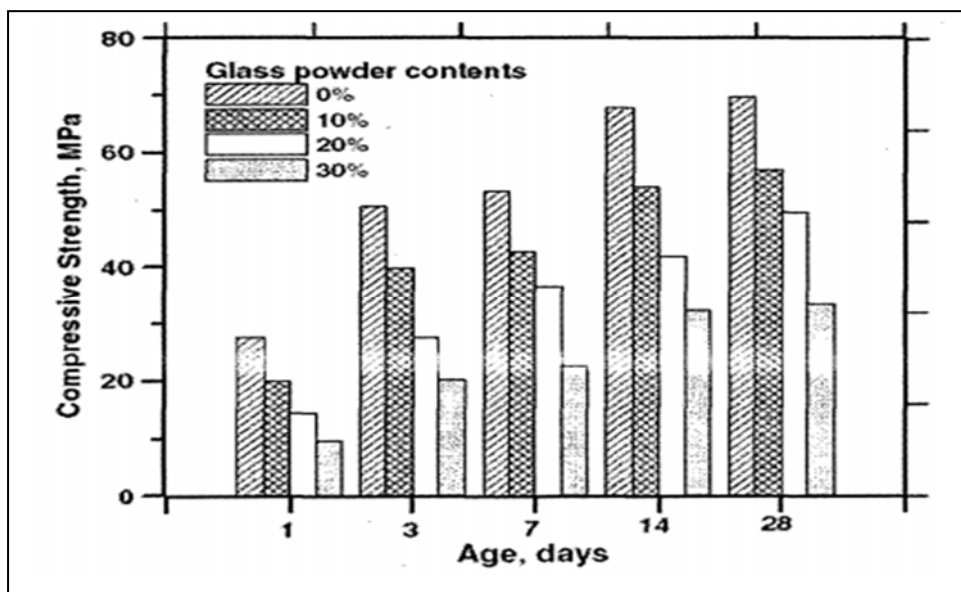
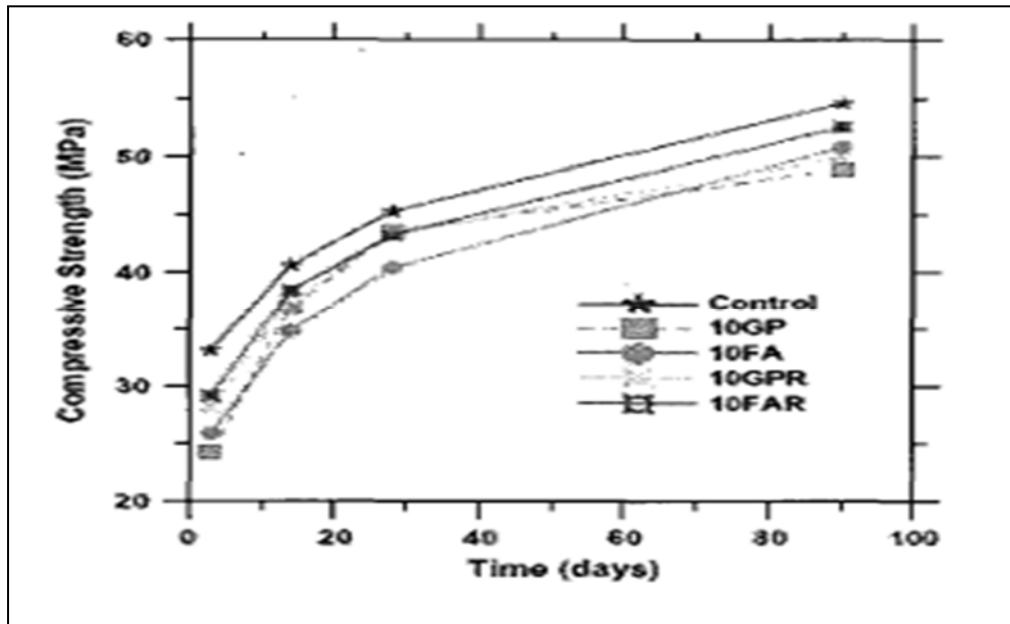


Figure 2.11 Résistance à la compression des bétons E/L=0,42 [SCHARWZ et coll., 2007]

Les résistances en traction et en flexion évaluées par TAHA et coll. (2008a) sur des mélanges incorporant 20 % de poudre de verre sont similaires à celles du témoin. Par contre SHAY AN et coll. (2006) ont observé une légère réduction des résistances en traction et flexion à 130

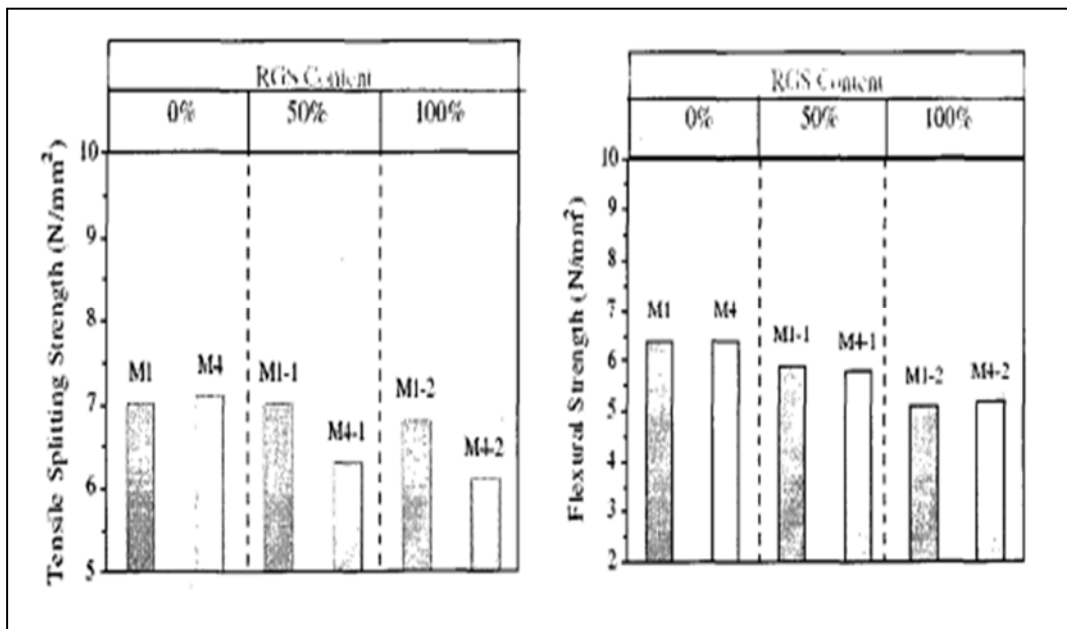


jours en fonction du taux de substitution par la poudre. Cette différence de tendance observée par ces chercheurs pourrait être liée aux finesses des poudres étudiées et au rapport E/L.



**Figure 2.12** Résistance à la compression des bétons incorporant poudre de verre [SCHWARZ, 2008b].

Puisque TAHA et coll. (2008a) ont utilisé une poudre de diamètre moyen inférieur à  $45 \mu\text{m}$  dans des mélanges avec  $E/L = 0,38$ , alors que SHAYAN et coll (2006) ont utilisé une poudre de verre de finesse Blaine  $800\text{m}^2/\text{kg}$  dans des mélanges de  $E/L = 0,49$ .



**Figure 2.13** Effet de la poudre de verre sur les résistances en traction et en flexion des bétons [TAHA et coll., 2008a]

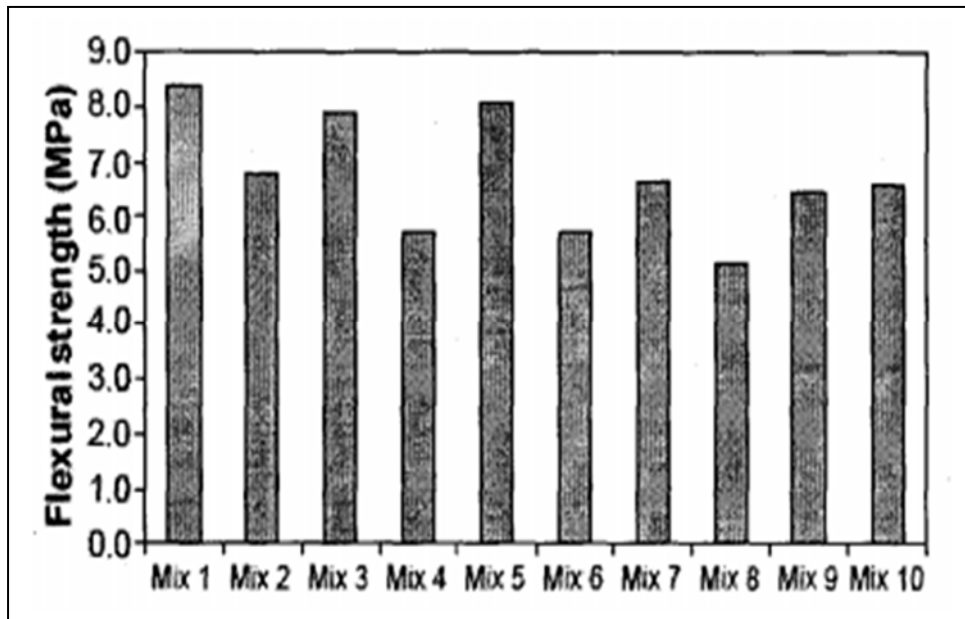


Figure 2.14 Resistance en flexion sur des prismes de bétons a 130 jours [SHAYAN et coll., 2006]

Les modules d'élasticité des mélanges contenant la poudre de verre déterminés par SHAYAN et coll. (2006) diminuent en fonction du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre.

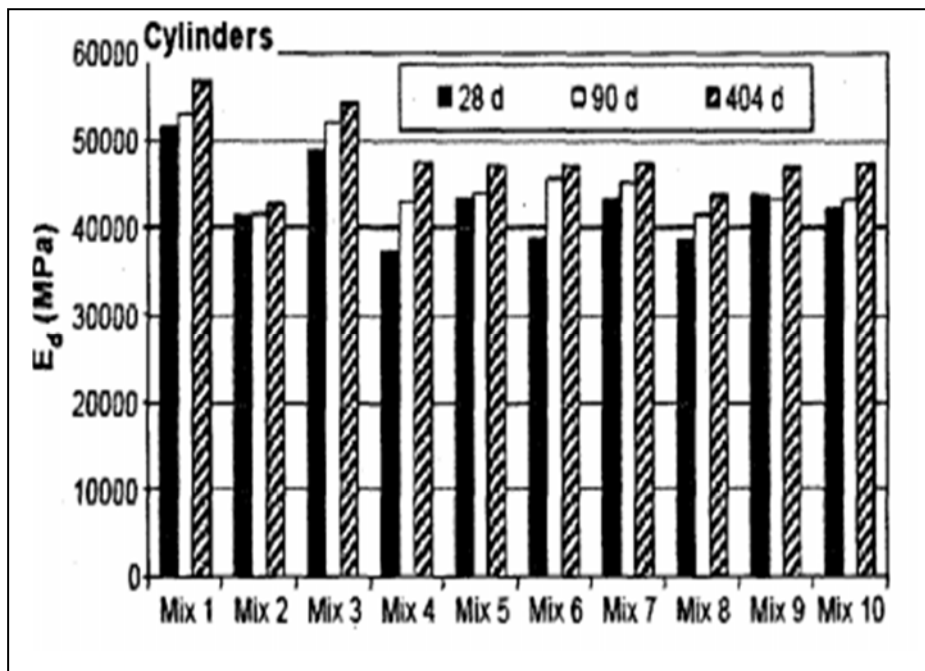


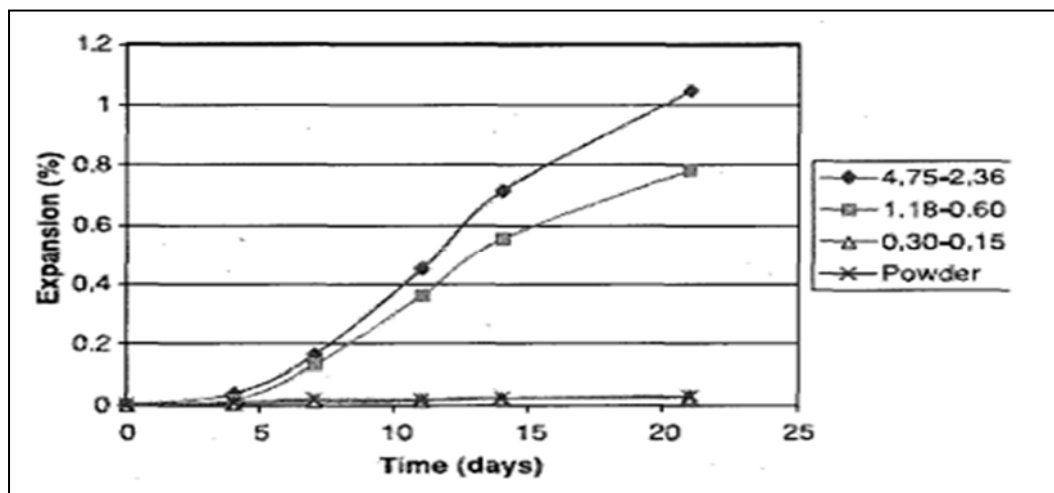
Figure 2.15 Module d'élasticité dynamique sur des cylindres de bétons [SHAYAN et coll. 2006]

La forte teneur en silice du verre laisse prévoir qu'il peut développer d'importante réaction alcali-silice lorsqu'il est utilisé comme substituant partiel des granulats dans le béton. Par contre lorsqu'il est broyé et utilisé comme ajout cimentaire, cette propriété est utilisée à

l'avantage pour développer d'important effet pouzzolanique suite à la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite.

Les résultats des travaux conduits par SHAY AN et coll. (2004) ont montré que le verre utilisé comme granulat fin est susceptible d'être nuisible à la durabilité du béton en favorisant la réaction alcali-silice. Le verre utilisé comme poudre peut ralentir la réaction alcali-silice des granulats de verre comme le montre la figure 2.16 [SHAYAN, et coll., 2004]. D'autres études menées par SHAYAN et coll. (2006), dont les résultats sur la RAG sont présentés par la figure 2.17, montrent également la réduction de l'expansion due à RAG par la poudre de verre.

SHI et coll. (2005a) avaient observé que les bétons légers autoplaçants avec un sable réactif et incorporant la poudre de verre développent une bonne résistance à la réaction alcali-granulat. Les résultats des travaux de SHI et coll. (2005b), illustrés par la figure 2.18, montrent aussi une réduction de l'expansion due à la réaction alcali-granulat dans les mélanges incorporant la poudre de verre, bien qu'il ne soit pas aussi efficace que celle des cendres volantes de même taux de remplacement.



**Figure 2.16** Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [SHAYAN et coll., 2004]

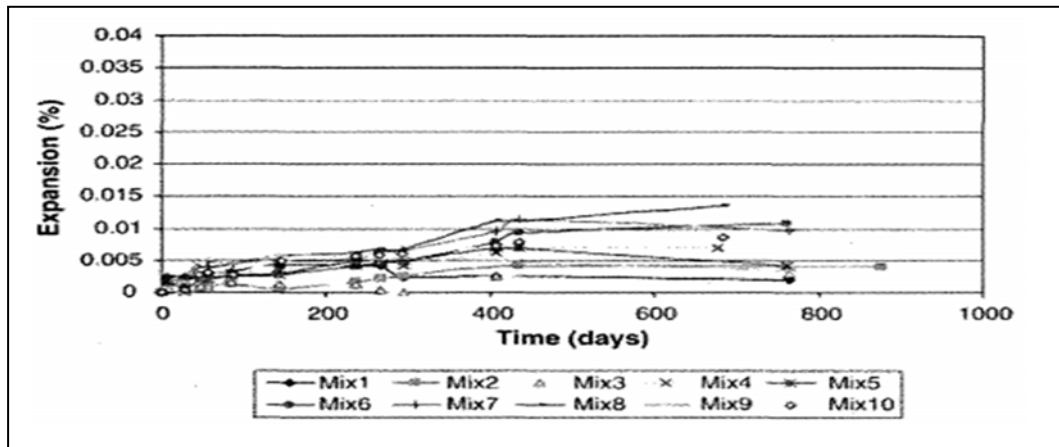


Figure 2.17 Résistance à la réaction alcalis-granulat des bétons, 38 °C et 100 % HR [SHAYAN et coll., 2006]

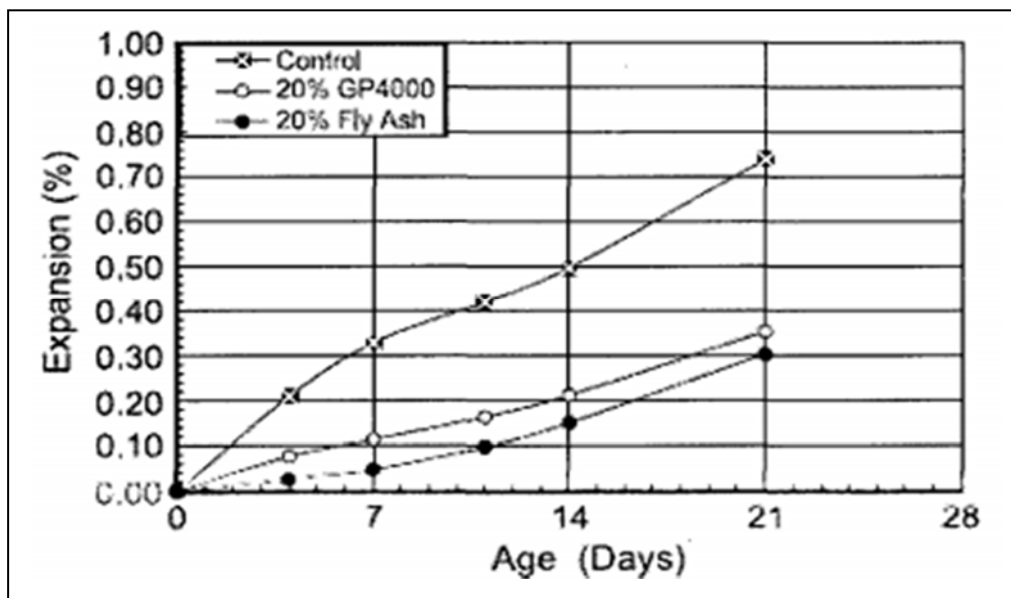
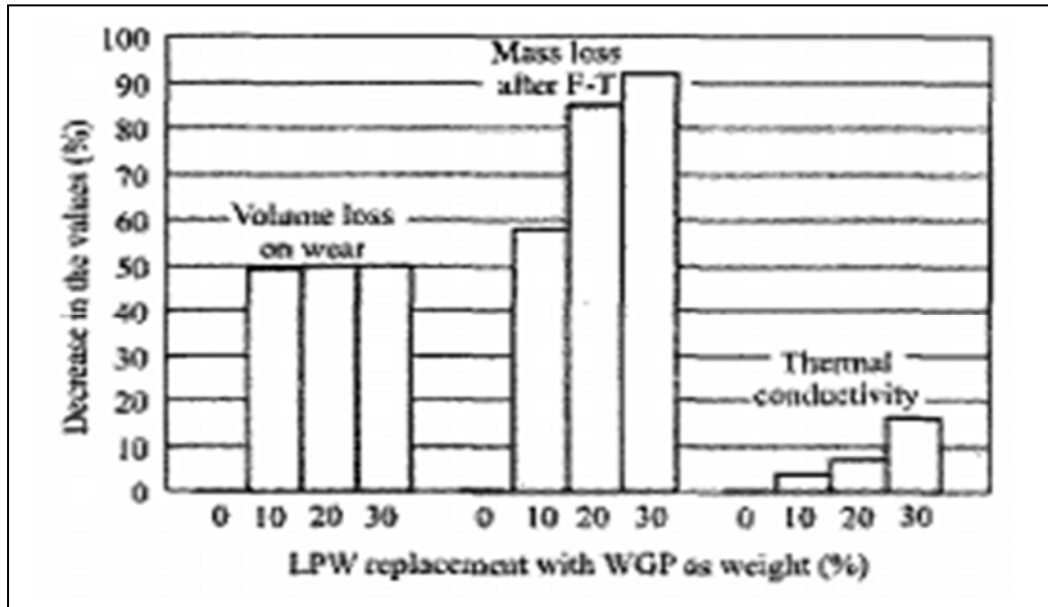


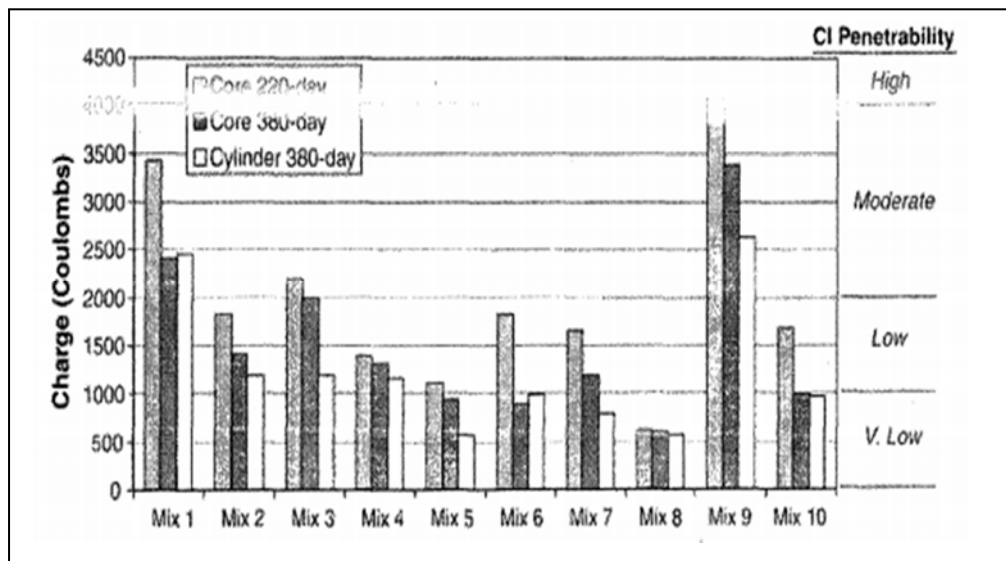
Figure 2.18 Expansion due à la RAG a 23 °C [SHI et coll., 2005b]

D'autres essais menés par SHI et coll. (2005a) sur des bétons légers autoplaçants incorporant la poudre de verre montrent qu'ils développent une bonne résistance au gel et dégel. De même les travaux de TURGUT (2008), dont les résultats sont illustrés par la figure 2.19, montrent que la poudre améliore la résistance au gel-dégel. La figure 2.19 illustre la réduction de la perte de masse par la poudre de verre durant les cycles de gel-dégel. On remarque que la réduction de la perte de masse augmente avec le taux de substitution par la poudre qui est de 0, 10, 20 et 30%.



**Figure 2.19** Amélioration de la résistance au gel-dégel par la poudre de verre [TURGUT, 2008]

De plus la poudre de verre réduit significativement la pénétrabilité aux ions chlore. Elle contribue par conséquent à l'amélioration de la durabilité des bétons. Les mélanges incorporant la poudre de verre ont une bonne résistance à la pénétrabilité aux ions chlore, réduisant ainsi les risques de corrosion d'armatures du béton. Ces résultats sont observés par SHAYAN et coll. (2006) comme l'indique la figure 2.20, et par SCHWARZ et coll. (2008b), illustré par la figure 2.21. Le mélange contenant de la poudre de verre est identifiée 10 GP sur cette figure.



**Figure 2.20** Pénétrabilité des ions chlorures [SHAYAN et coll., 2006]

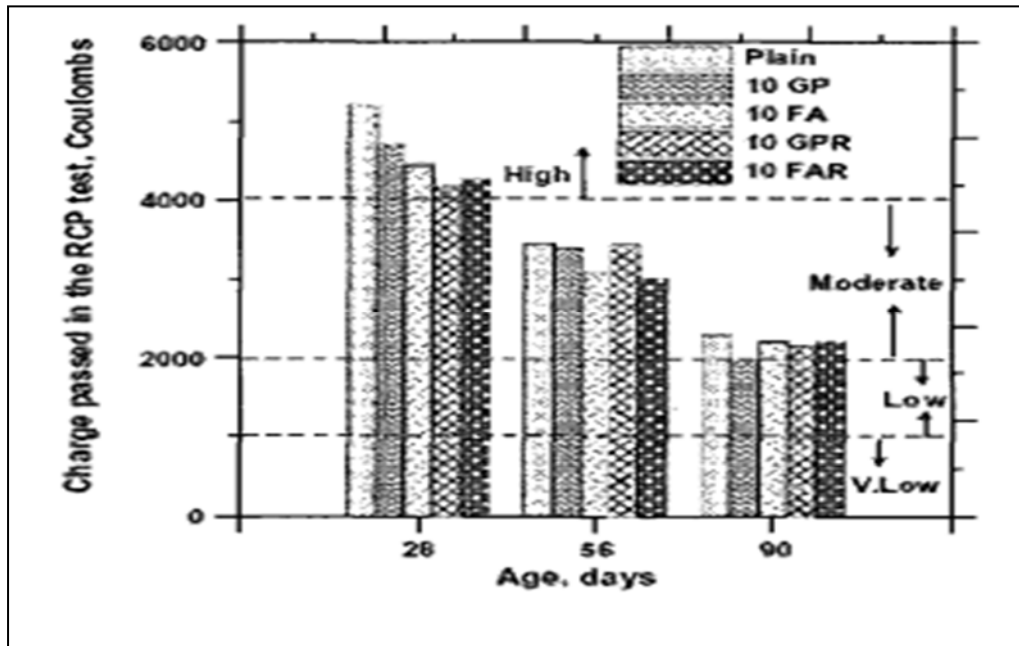


Figure 2.21 Pénétrabilité des ions chlorures [SCHWARZ, 2008b]

Le retrait de séchage du mélange avec 20 % de poudre de verre (Mix3) est du même ordre de grandeur ou légèrement inférieur à celui du témoin (Mix1), figure 2.22. Par contre le mélange avec 30 % de poudre de verre (Mix4) présente un retrait supérieur à celui du témoin. Ces mélanges présentent un retrait au séchage satisfaisant selon la norme Australienne AS 3600 qui limite le retrait de séchage des bétons à 0,075 % à 56 jours [SHAYAN et coll., 2006].

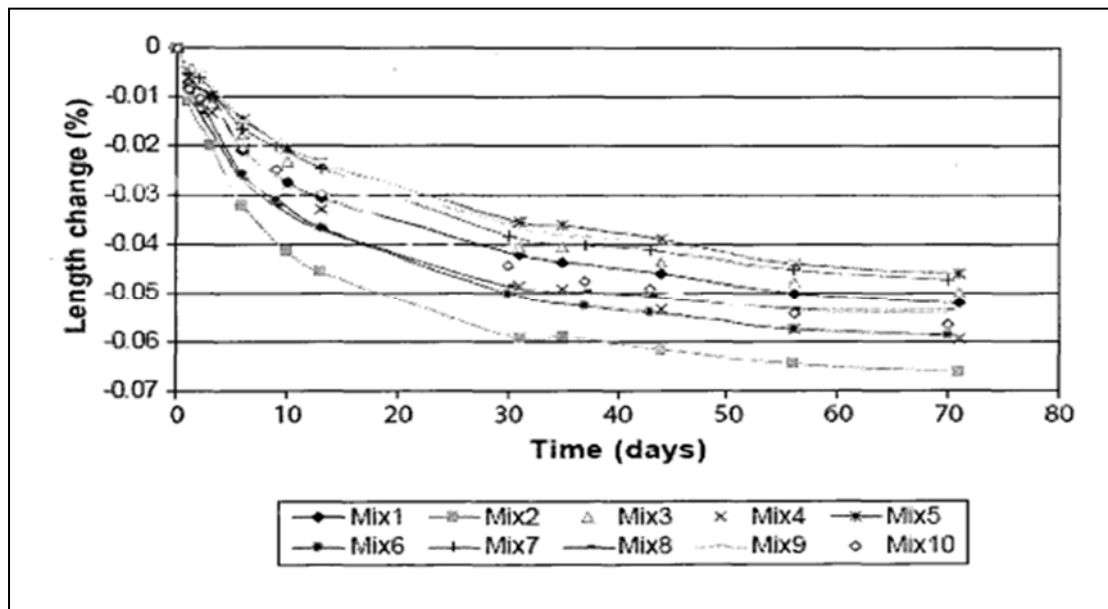


Figure 2.22 Retrait de séchage sur des prismes de bétons [SHAYAN et coll., 2006]

### *Bibliographie*

- ACI Committee 363-84 (1984).** State of the Art Report on High Strength Concrete. In Anonyme, Detroit, MI, Detroit, MI, American Concrete Institute.
- Aitcin, P.C., Sarkar, S.L. et Laplante, P. (1990).** Long-term characteristics of a very high strength concrete. *Concrete International: Design and Construction*, vol. 12, n° 1, p. 40-44.
- Al-Amoudi, O.S.B. (1994).** Performance of plain and blended cements in high chlorides environments. In Anonyme, (p. 539-555), Nice, France, 23 mai.
- Beaupre, D. (1994).** Rheology of High Performance Shotcrete. These de Doctorat Ph.D, University of British Columbia, University of British Columbia, CANADA, 249 p.
- Bouzoubaa, N., Zhang, M.H. et Malhotra, V.M. (2001).** Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 10, p. 1393- 1402.
- Cur, R. (s.d).** **Fly ash as addition to concrete.** Center for Civil Engineering Research and Codes edition, Gouda, The Netherlands, 144, p. 99.
- Dubovoy, V.S., Gebler, S.H., Klieger, P. et Whiting, D.A. (1986).** Effects of ground granulated blast-furnace slags on some properties of pastes, mortars, and concretes. In Anonyme, *Blended Cements*. {p. 29-48}, Philadelphia, PA, USA, ASTM.
- Eberhart, J.P. (1997).** Analyse structurale et chimique des materiaux. Dunod, Paris
- Fares, G. (2008).** Nouveau Systeme Cimentaire: cas de la fritte de verre. These de doctorat, Universite de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, 289 p
- Gallias, J.L., Kara-Ali, R. et Bigas, J.P. (2000).** Effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 10, p. 1543-1549.
- Helmuth, R.A. (1982).** Short-term R&D Opportunities. In Anonyme, *Workshop Proceedings: Research and Development Needs for Use of Fly Ash in Cement and Concrete*.(p. 4-26), Palo Alto, Calif, USA, EPR.
- Irdon, G.M. (1983).** The effect of slag cement in concrete. *NRMCA*, n° 167, p. 10.
- Jonquieres, A. Pycnometre a helium. *Specification Techniques* edition, Universite de Nancy.
- Laldji, S. et Tagnit-hamou, A. (2003).** Etude de /utilisation de la CAISifrit dans les betons. Universite de sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Rapport de recherche,
- Manai, K. (1995).** Etude De L'effet D'ajouts Chimiques Et Mineraux Sur La Maniabilite, La Stabilite Et Les Performances Des Betons Autonivelants. S.I., (Collection Theses canadiennes).
- Poon, C.S., Shui, Z.H. et Lam, L. (2004).** Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. p. 461-468.

**Shi, Y., Matsui, I. et Feng, N. (2006).** A Investigation on the influence of vitreous slag powders on rheological properties of fresh concrete. *Key Engineering Materials*, vol. 302-303, p. 223-229.

**Turgut, P. (2008).** Limestone dust and glass powder wastes as new brick material. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 41 , n° 5, p. SOSSIS.

**Xiaofeng, C , Shanglong, G., Darwin, D. et McCabe, S.L. (1992).** Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar, and concrete. *ACI Materials Journal (American Concrete Institute)*, vol. 89, n° 4, p. 375-387.

**Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M. et Sakai, G. (1993).** Mix proportions for highly workable concrete. In Anonyme, *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000: Economic and Durable Construction through Excellence* (p. 579), Sep 7-9 1993. London, Engl, Publ by E. & F.N. Spon

**Zielinska, E. (1972).** The influence of carbonate calcium on the hydration process in some Portland cement constituents. *Prace Instytutu Technologii i Organizacji Produkcji Budowlanej*, vol. 3



## **CHAPITRE 3 – LA POUDRE DE VERRE UNE ECONOMIE VERTE**

Il est nécessaire de préciser au préalable la notion d'environnement en économie : la théorie considère que l'environnement est un ensemble de ressources naturelles, un « capital environnemental » qui, comme d'autres formes de capital (humain, matériel, technologique), constitue un facteur contribuant à la production de richesses, à la croissance économique, et au bien-être des agents économiques. Il possède des caractéristiques économiques particulières.

La crise financière et économique a largement occulté les questions environnementales en mettant au premier plan le besoin de restaurer les conditions de la croissance et la soutenabilité des finances publiques. Les politiques de soutien aux secteurs environnementaux sont néanmoins apparues à court terme comme un instrument de sortie de crise, par un « Green new deal » soutenant des filières industrielles « vertes » jugées innovantes. Selon Robins et al. (2009), 15 % des sommes affectées aux plans de relance adoptés début 2009 ont été consacrées à des investissements verts, tels que le recyclage du verre en poudre de verre et l'utiliser dans la production du béton en substitution du ciment.

### **3.1. Economie verte**

Pour définir le caractère plus ou moins « vert » d'une activité, deux approches sont envisageables : l'une par les impacts, l'autre par la finalité économique.

#### **3.1.1. L'approche par les impacts**

En fonction de son impact sur l'environnement une activité est qualifiée de « verte » en référence à une activité équivalente qui exerce une pression plus grande sur l'environnement (plus polluante ou plus consommatrice de ressources naturelles). C'est donc une notion relative, compte tenu d'un état donné des connaissances technologiques, des prix de production des différentes activités et des normes de consommation. Les produits dits « verts » sont le plus souvent des substituts dont l'usage et la mise au rebut sont moins polluants que les produits conventionnels à une date donnée. Analyser les interactions entre économie et environnement suppose cependant de préciser ce que l'on entend par « environnement ». Ce dernier peut être défini comme les actifs qui ne sont pas produits par les activités humaines, tels que l'air, l'eau, les forêts, la biodiversité, les roches, la faune, la flore, etc. L'activité économique vient affecter ces différents composants, soit en rejetant des polluants dans l'air, l'eau et les sols, soit en produisant des déchets, du bruit, de l'atteinte à la biodiversité, soit en prélevant des ressources rares ou en danger. Selon les critères environnementaux retenus, certaines activités peuvent être considérées ou non comme « vertes ». Par exemple, l'utilisation d'ampoules à basse consommation permet de réduire la consommation d'électricité liée à l'éclairage, mais la production de telles ampoules utilise des composés chimiques toxiques et polluants et mobilise des ressources rares. De même, l'industrie nucléaire permet de produire de l'énergie en émettant au total moins de CO<sub>2</sub> que les centrales

## La poudre de verre une économie verte

utilisant du gaz naturel ou du charbon. Mais elle utilise de l'uranium, ressource naturelle rare et non renouvelable, la gestion des déchets dangereux qu'elle produit est complexe et engage les générations futures, et les risques industriels potentiels sont importants. Il existe aussi de fortes externalités temporelles et géographiques. Si l'horizon retenu pour évaluer l'impact environnemental est court alors que la pollution est persistante, alors l'effet global sera sous-évalué. Par exemple, les chlorofluorocarbures (CFC), responsables pour une bonne part de la destruction de la couche d'ozone, se dégradent très progressivement et peuvent séjourner dans l'atmosphère plusieurs centaines d'années. En outre, ne considérer que les impacts locaux d'une activité peut conduire à négliger des impacts globaux : la pollution d'un fleuve ne s'arrête pas aux frontières du pays dont elle provient. Or, deux pays victimes de la même manière d'une pollution peuvent ne pas la considérer de manière similaire ; la préférence pour la préservation de l'environnement est une notion relative qui varie en fonction de la dotation en ressources naturelles du pays et de son niveau de développement. Ainsi, dans un pays développé, la gestion de l'eau consistera essentiellement en l'assainissement alors que pour un pays en voie de développement, il s'agira de l'adduction, du forage ou de l'accès à l'eau potable tout simplement.

### 3.1.2 L'approche par la finalité économique

Selon la seconde approche, une activité sera dite « verte » si elle consiste à produire des biens ou services dont la finalité est la protection de l'environnement. Néanmoins, une activité dont la finalité est environnementale peut avoir un effet induit négatif sur l'environnement. Réciproquement, une activité dont la finalité première n'est pas la protection de l'environnement peut exercer une pression très faible sur l'environnement du point de vue du prélèvement de matières, de la production de déchets, ou des rejets dans l'eau ou l'air. À titre d'illustration, les activités de recherche et développement en efficacité énergétique sont doublement « vertes » à l'aune de ces critères : leur finalité est la protection de l'environnement et elles exercent une pression relativement faible sur l'environnement.

Cette notion repose sur une prise en compte des impacts sur l'environnement et se définit en opposition à la croissance « brune/grise », qui désigne implicitement le régime actuel de croissance. Contrairement au terme de « croissance », elle ne repose néanmoins pas sur un concept économique clairement établi. Dans son acception la plus stricte, une croissance verte désigne une croissance moins carbonée, c'est-à-dire un régime de croissance moins intensif en énergies fossiles et émettant des niveaux de gaz à effet de serre conformes aux recommandations du GIEC pour contenir le réchauffement climatique. Dans une définition plus souple, la croissance verte désigne un modèle de croissance permettant l'augmentation du produit national mais plus sobre en matières premières, produisant moins de déchets et de rejets dans l'environnement. L'enjeu est de parvenir à intégrer les contraintes environnementales sans pour autant que les surcoûts occasionnés empêchent ou réduisent la croissance économique. L'OCDE retient qu'« une politique de croissance verte consiste à favoriser la croissance économique et le développement tout en veillant à ce que les actifs naturels continuent de fournir les ressources et les services environnementaux sur lesquels repose notre bien-être. Pour ce faire, elle doit catalyser l'investissement et l'innovation qui étayeront une croissance durable et créeront de nouvelles opportunités économiques. (« Vers

## La poudre de verre une économie verte

une croissance verte» , mai 2011). La « croissance verte » qui s'appuie sur l'environnement et l'économie est un volet d'une notion plus générale, le développement durable.

Une autre notion, la Responsabilité Sociale et Environnementale (RSE), est la déclinaison microéconomique du concept plutôt macroéconomique de développement durable. La RSE est un concept dont le point de départ est une vision élargie de l'entreprise et de ses responsabilités, non seulement auprès de ses actionnaires et de ses clients, mais aussi de l'ensemble des parties prenantes (salariés, fournisseurs, société au sens large). À la performance économique se rajouterait une volonté de prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux de l'activité de l'entreprise et de les intégrer à ses stratégies commerciales. Le concept s'est élargi aux organisations publiques : on parle en ce cas de Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO).

La RSE induit la prise en compte de deux problèmes : comment l'entreprise définit-elle sa responsabilité et comment la met-elle en œuvre ? Le terme responsabilité peut en effet faire référence à deux visions distinctes : la RSE comme une obligation contraignante, ce qui implique une sanction en cas de non respect, ou bien la RSE comme un engagement volontaire envers les parties prenantes [Capron et Quairel-Lanoizelée, 2007]. Dans la pratique, même si des labels et normes (par exemple la norme ISO 26000 pour la RSO) les encadrent, les démarches RSE sont laissées le plus souvent à l'appréciation des entreprises.

### 3.2. Économie verte, éco-activités, emplois verts

Un dernier ensemble de termes du débat regroupe des notions qui sont le plus souvent utilisées afin de quantifier la part du « vert » dans l'activité économique. On retient ici les termes suivants : économie verte, éco-activités, emplois verts. Le secteur « vert » couvre l'ensemble des éco-activités : il est défini en fonction de la finalité de l'activité et non de son impact sur l'environnement. La définition statistique retenue par Eurostat et par l'OCDE permet un suivi statistique coordonné et homogène entre pays : les éco-activités désignent l'ensemble des activités qui produisent des biens ou services ayant pour finalité la protection de l'environnement ou la gestion des ressources naturelles. Dans ce cadre, les emplois verts, ou environnementaux, sont les emplois générés par les éco-activités. Ces dernières sont principalement des activités préventives ou curatives appliquées à la préservation de l'environnement au sens classique du terme (eau, air, sol, déchets y compris la récupération, le bruit...). Il s'agit donc pour la plupart d'activités traditionnelles répondant à des besoins essentiels qui préexistaient à la définition du périmètre « éco-activités » et aux préoccupations récentes liées à l'épuisement des ressources naturelles et à la protection de l'environnement. Quant à lui, le terme d'économie verte évoque des modes de production respectueux de l'environnement, qui utiliseraient moins ou mieux les ressources naturelles et exerceraient moins d'impacts négatifs sur l'environnement. Néanmoins, dans la pratique, cette définition n'est pas arrêtée définitivement. L'Organisation internationale du travail (OIT) a proposé une définition théorique qui inclut dans l'économie verte, à la fois les emplois dont la finalité est la protection de l'environnement, mais aussi ceux qui exercent une pression faible sur l'environnement, et ceux qui exercent une pression forte mais qui fournissent des secteurs verts ; entrent par exemple dans le périmètre de l'économie verte la production d'aciers

## La poudre de verre une économie verte

utilisés pour la construction d'éoliennes. Ainsi selon l'OIT, un emploi est vert « quand il contribue à réduire la consommation d'énergie et l'utilisation des matières premières, à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, à limiter les déchets et la pollution et à protéger les écosystèmes ». Dans ce cadre, le concept d'économie verte est étendu à celui d'une économie décarbonnée, moins émettrice de CO<sub>2</sub> et économe en matières premières. Cette approche se concentre sur les impacts de l'activité économique sur l'environnement selon deux dimensions : la pollution et la gestion des ressources naturelles limitées. Elle se rapproche en cela de la notion de croissance verte. Le périmètre statistique retenu par la France pour l'économie verte recouvre le « noyau dur » des éco-activités et y adjoint les activités produisant des biens et services dits favorables à la protection de l'environnement qui, même s'ils n'ont pas pour finalité la protection de l'environnement, sont plus respectueux que les autres produits rendant le même service. Parallèlement à cette démarche sectorielle, une approche plus transversale est utilisée en cherchant à cerner les métiers.

### 3.3. Le recyclage du verre et l'économie verte

D'un point de vue écologique, le recyclage du verre réduit le CO<sub>2</sub>, économise les matières premières et l'énergie. Pour la production du verre, les matières premières vierges peuvent être remplacées par du verre recyclé (ou calcin). Ainsi, on parvient à une réduction notable de CO<sub>2</sub> pour différentes raisons :

- Il faut moins d'énergie pour faire fondre du verre recyclé que pour faire fondre des matières premières et les transformer en verre.
- L'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> issues de l'extraction et du transport de matières premières sont économisées (1 kg de calcin utilisé remplace 1,2 kg de matières premières vierges).
- Recycler le verre réduit aussi la pollution associée de l'air de 20 % et la pollution de l'eau de 50 %.
- Le coût carbone du transport du calcin est, en moyenne, moins élevé que celui du transport des matières premières.

D'un point de vue économique, le recyclage, la réutilisation et la réduction des déchets présentent des opportunités de développement pour les collectivités locales. Les services de collecte du verre et les centres de recyclage créent et maintiennent 10 fois plus d'emplois que la mise en décharge ou l'incinération. Fabriquer du verre à partir de verre recyclé est également moins cher, des économies dont peut bénéficier le consommateur. La communication de l'ensemble des acteurs autour de l'intérêt du recyclage est clé pour mobiliser les consommateurs autour de cet enjeu majeur de société. En 2008, 7 millions de tonnes de verre ont été mises sur le marché mais n'ont pas été recyclées. Il est de la plus haute importance d'améliorer les circuits de recyclage et de financer des systèmes adaptés dans l'Union européenne. Enfin, dans le cas où le verre n'est pas recyclé mais mis en décharge, il n'est pas dangereux pour l'environnement puisqu'il est inerte et ne peut contaminer les sols.

### *Bibliographie*

**Aghion P., Howitt P.**, L'économie de la croissance, Economica, 2010.

**Ast D., Margontier S.**, « Les professions de l'économie verte : typologie et caractéristiques », Dares Analyses n° 018, mars 2012.

**Bontems P., Rotillon G.**, L'économie de l'environnement, La découverte, Repères, 2003.

**Bovar O, Demotes-Mainard M., Dormoy C., Gasnier L., Marcus V., Panier I., Tregouët B.**, « Les indicateurs du développement durable », Insee Références L'économie française, édition 2008.

**Dobson A.**, « Environment sustainabilities: An analysis and a typology », Environmental Politics, 5, 401-428, 1996.

**Eurostat.** « The environmental goods and services sector », Data collection handbook, 2009.

**Harribey J.-M.**, Le développement durable est-il soutenable ?, Séminaire de l'OFCE, 2002.

**Hartwick J.M.**, « Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources », American Economic Review, vol. 67, n° 5, 1977. Lenglard F., Lesieur C., Pasquier J.-L., « Les émissions de CO2 du circuit économique en France », Insee Références L'économie française, édition 2010.

**Observatoire des métiers liés à la croissance verte**, « Activités, emplois et métiers liés à la croissance verte : périmètre et résultats », Études & documents n° 43, 2011. OCDE, Monitoring progress towards green growth. OCDE indicators. Draft report, 2011.

**Pierce D., Barbier E. B.**, « Blueprint for a Sustainable Economy », Earthscan Publications, London, 2000. Robins N., Clover R., Singh C., « A climate for recovery. The colour of stimulus goes green », HSBC Global Research, 2009.

**Rotillon G.**, L'économie des ressources naturelles, La découverte, Repères, 2005. Stiglitz J., « Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths », Review of Economic Studies, Edinburgh, Longman Group Limited, vol. 41, 1974.

Stiglitz J., Sen A. et Fitoussi J.-P., Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social, Éditions Odile Jacob, 2009.

**SOeS**, « Les éco-activités au niveau européen, une méthodologie partagée, des singularités dans la collecte des données », Études & documents n° 30, 2010.

**SOeS**, « Les éco-activités et l'emploi environnemental en 2010 : premiers résultats », Chiffres et statistiques n° 301, mars 2012.

**Vivien F.-D.**, « Les modèles économiques de soutenabilité et le changement climatique », les Économistes peuvent-ils sauver la planète ? Regards croisés sur l'économie, La découverte, 200

## CONCLUSION GENERALE

Les conséquences sanitaires et environnementales du ciment sont encore considérables et beaucoup d'efforts sont encore à faire en matière de réduction et de prévention, notamment dans les pays en développement. La transformation du verre en poudre de verre, puis en ajout cimentaire, contribue à abaisser le bilan GES des infrastructures et à augmenter leur rentabilité économique du fait d'une durée de vie plus longue et de besoins moindres en entretien.

Le procédé novateur repose sur la transformation du verre recyclé en fine poudre. En plus d'être un matériau alternatif plus écologique, les dimensions nanométriques de cette poudre améliorent les propriétés du béton. En effet, les nanosphères contenues dans la poudre de verre densifient le béton, le rendant encore plus résistant et moins perméable.

Issu de matériaux recyclés et offrant une performance inégalée, ce matériau cimentaire est promis à un bel avenir quand on sait qu'il se produit plus de 4 milliards de mètres cubes de béton par an dans le monde.

Recycler nos propres déchets pour fabriquer un matériau cimentaire plus vert et d'une résistance exceptionnelle est certainement à l'avantage des producteurs de béton et de la planète.

Cela dit même si le verre peut être recyclé indéfiniment, tous les types de verre ne sont pas recyclables :

- Peuvent être recyclés : tous les pots, bocaux et bouteilles en verre transparent, vert et ambre
- Ne peuvent pas être recyclés : le cristal ou le verre trempé, y compris les bols, les plats et le verre résistant au four. En effet, la température de fusion du verre trempé est plus élevée que celle des bouteilles, pots et bocaux.

Si le verre trempé est mélangé à d'autre type de verre, le matériau produit sera trop fragile pour être utilisé. Il en va de même pour d'autres types de verre non recyclables : les ampoules, les fenêtres.

Les activités de l'économie verte se définissent à partir de la production des biens et services verts, ce qui est à 100% le cas de l'utilisation de la poudre de verre. En 2009, les activités de l'économie verte représentaient 959 500 emplois, soit 4 % de l'emploi intérieur total de l'UE. Les emplois dans les éco-activités comptent pour un peu moins de la moitié de cet ensemble, l'autre moitié étant en lien avec la production de biens et services adaptés à la protection de l'environnement ou à la gestion des ressources naturelles.