

**Collège des Sciences et Technologies pour l'Energie et
l'Environnement – STEE**

Campus de la côte Basque

Licence Physique - Chimie

ETUDE DE L'INFLUENCE DES NANOMATERIAUX SUR LES PROPRIETES DE MORTIERS

COUSIN Pierre

Stage effectué du 03/04/2018 au 03/06/2018

Laboratoire SIAME, Allée du parc Montaury, Anglet (64)

Sous la direction scientifique de Mme. PERLOT



« Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité du Laboratoire d'accueil »

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. ABADIE pour m'avoir accepté au sein de son laboratoire SIAME ainsi que ma tutrice de stage Mme. PERLOT pour son aide et ses précieux conseils tout au long de mon stage.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire SIAME qui m'a bien accueilli et mis en confiance dès le début de mes travaux.

Je remercie aussi tous mes collègues de Licence, Baptiste PASSICOT, Benoît BELLON et Quentin BOURCEREAUX pour toute la motivation apportée durant ces deux mois.

Pour finir, un grand merci à la doctorante Amaia Mantanza Corro pour m'avoir permis de travailler avec elle et ainsi de m'avoir permis d'exploiter certains de ses résultats de sa thèse afin d'enrichir mon rapport.

Table des matières

Liste des figures	5
Liste des tableaux	5
Introduction.....	7
Présentation du Laboratoire SIAME	8
Partie 1 : Le béton, sa durabilité et l'influence de l'environnement marin sur ses propriétés	9
1) Généralités sur le matériau béton	9
1.1) Le ciment et l'eau	9
1.1.1) Le ciment	10
1.1.2) Hydratation du ciment	11
1.2.1) Dimensions des granulats.....	13
1.2) Les adjuvants	14
2) Notion de durabilité	15
3) Action de l'eau de mer sur le béton	16
3.1) La corrosion des armatures par les ions chlorures.....	17
3.2) Limiter la diffusion des ions chlorures ou d'autres agents agressifs.....	18
4) Introduction aux nanomatériaux	18
4.1) Les nanomatériaux dans le béton.....	19
4.2) Les nanomatériaux utilisés	19
4.1.1) Les nanotubes de carbone.....	19
4.1.2) La nano silice.....	20
4.1.3) Les nano fibres de carbone.....	21
4.3) Effets des nanomatériaux sur le béton.....	22
Partie 2 : Etude expérimentale.....	23
1) Elaboration de nos échantillons	23
2) Tests réalisés	24
2.1) Les essais mécaniques	24
2.1.1) Résistance à la flexion.....	24
2.1.2) Résistance à la compression.....	26
2.2) Absorption capillaire	27
3) Conclusion de mes essais	29
Conclusion	30
Bibliographie.....	31
Annexes	32

Liste des figures

Figure 1 : fabrication du clinker (Lafarge)	10
Figure 2 : Schéma représentant l'hydratation du ciment	11
Figure 3 : Photographie exposant les dégâts dus à l'environnement marin.....	16
Figure 4 : Diagramme potentiel pH du fer [Pourbaix, 1963].....	17
Figure 5 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures [Baron et Ollivier, 1992]	18
Figure 6 : Structure des CNT	19
Figure 7 : Microscopie électronique de nano silice.....	20
Figure 8 : Graphique représentant les résultats d'essais mécaniques sur béton avec nano silice (a) test compression, (b) test flexion.....	21
Figure 9 : microscopie électronique de CNF	21
Figure 10 : Machine utilisée pour les essais de résistance à la flexion	24
Figure 11 : Graphique représentant la résistance à la flexion à 7,28,91 jours.....	25
Figure 12 : : Machine utilisée pour les essais de résistance à la compression.....	26
Figure 13 : Photo de l'expérience absorption capillaire.....	28
Figure 14 : Graphique représentant l'absorption capillaire à 7 jours	28
Figure 15 : Graphique représentant l'absorption capillaire à 28 jours	29

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau représentant l'ensemble des réactions d'hydratation	12
Tableau 2 : Tableau représentatif des classes granulaires.....	13
Tableau 3 : Tableau représentant les choix d'adjuvants.....	14

Introduction

A l'heure actuelle, le béton est le deuxième matériau le plus utilisé sur la planète après l'eau. Il est présent dans deux tiers des habitations dans le monde et dans une multitude d'ouvrages de génie civil. Les matériaux cimentaires possèdent de nombreux avantages pour leur utilisation notamment le fait qu'ils développent une importante résistance mécanique.

Dans le cas d'édifice de génie civil tel que la construction de digues, le béton est le plus souvent utilisé du fait de sa résistance mécanique. Cependant, il est aussi important de se soucier de son comportement physico-chimique pour ainsi limiter les facteurs de corrosion du béton. Il est donc primordial de déterminer une recette dite « idéale » pour la fabrication du béton et de connaître l'impact de l'environnement marin sur sa durabilité. Cette durabilité est définie comme le maintien des propriétés de l'ouvrage dans le temps pour un environnement et des sollicitations données.

Ainsi du 3 Avril 2018 au 1 Juin 2018, j'ai effectué mon stage au sein du laboratoire du SIAME (Sciences pour l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Electrique)

Au cours de ce stage j'ai donc pu intégrer l'équipe géo matériaux et structures et ainsi m'intéresser à l'influence des nanomatériaux sur les propriétés de mortiers.

Dans un premier temps, après une brève présentation du laboratoire SIAME, je donnerai une définition du matériau béton, de ses différentes propriétés et de l'impact de l'environnement marin sur celui-ci. Seront ensuite détaillées les différentes expérimentations réalisées, afin d'établir la composition idéale du béton avec des nanomatériaux.

Présentation du Laboratoire SIAME

Le **laboratoire des Sciences pour l'ingénieur Appliquées à la Mécanique et au Génie Electrique** (SIAME) est né en 2009 de la fusion de plusieurs unités de recherche de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour : le Laboratoire de Génie Electrique (LGE), le Laboratoire de Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier (LaSAGeC) et une partie du Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LATEP).

Le SIAME est membre de la fédération de recherche CNRS IPRA (Institut Pluridisciplinaire de Recherche Appliquée) et une partie de ses effectifs est également membre de la fédération MIRA (Milieux et Ressources Aquatiques). De plus, le laboratoire possède des liens avec cinq départements d'enseignements :

- L'ISA BTP (Ecole d'ingénieur en génie civil)
- Le département Génie Thermique et Energie de l'IUT des Pays de l'Adour
- L'UFR sciences et techniques de Pau
- Le département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Bayonne
- L'ENSGTI (Ecole d'ingénieurs en procédés énergétique)

Le Laboratoire SIAME, dirigé par M. ABADIE, est constitué de quatre équipes, installées donc sur le campus d'Anglet et sur le campus de Pau :

- L'équipe **Géomatériaux et Structures**, dirigée par Mme. PERLOT, est composée de quatre enseignants chercheurs ainsi que de sept doctorants.
Cette équipe a pour but de développer des recherches innovantes dans le domaine de la construction en se concentrant sur les énergies renouvelables pour contribuer à une transition énergétique nécessaire.
- L'équipe **Ecoulement et Energétiques**, dirigée par Éric SCHALL, est composée de sept enseignants chercheurs ainsi que de trois doctorants.
Cette équipe a pour but de modéliser et de simuler numériquement des écoulements et leurs transferts de chaleur ou de matière. Elle est aussi spécialisée dans l'étude des écoulements complexes.
- L'équipe **Interactions Vague Structure**, dirigée par M. ABADIE, est composée huit enseignants chercheurs ainsi que de huit doctorants.
Cette équipe a pour but de développer des recherches sur les vagues et leurs impacts au sens large sur les infrastructures côtières.
- L'équipe **Génie Electrique**, dirigée par M. PECASTAING, est composé de huit enseignants chercheurs ainsi que de huit doctorants.
Elle est structurée autour de deux axes scientifiques liés aux compétences de chacun, un premier axe « **Génération et procédés haute tension** » et un second « **Modélisation, caractérisation et optimisation multi-physiques** ».

C'est donc dans l'équipe **Géomatériaux et Structures**, dirigée par Mme. PERLOT que s'inscrit l'étude de l'influence des nanomatériaux sur les propriétés de mortiers.

Partie 1 : Le béton, sa durabilité et l'influence de l'environnement marin sur ses propriétés

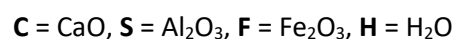
1) Généralités sur le matériau béton

Cette étude porte sur le béton : je vais ainsi faire une brève présentation de ce matériau et de son processus de fabrication.

Le béton est le résultat d'un mélange de ciment, de granulats et d'eau. Ce sont ainsi les trois ingrédients indispensables à la mise en œuvre de ce matériau. Ensemble, ils forment une masse que l'on peut mouler et compacter avec facilité. Cette caractéristique plastique, disparaît petit à petit au bout de quelques heures et notre masse prend et acquiert l'aspect, le comportement et les propriétés d'un corps solide de consistance compacte, similaire à une roche.

On peut également y ajouter ce que l'on appelle des adjuvants (comme des plastifiants, des accélérateurs de prise, des antigels, des nanomatériaux...) pour ainsi en améliorer l'ouvrabilité à l'état frais et renforcer aussi ses propriétés mécaniques.

Dans la suite du rapport, la nomenclature suivante sera adoptée pour nommer les différents oxydes du béton (notation cimentaire) :



1.1) Le ciment et l'eau

Le ciment est le composant fondamental du béton, puisqu'il conditionne de nombreux aspects élémentaires de ce matériau. Il est le facteur qui influence directement la résistance puisqu'elle est liée à la proportion d'eau et de ciment.

Le mélange de ciment et d'eau, est caractérisé par le rapport massique $\frac{EAU}{CIMENT}$ (E/C), forme avec des ajouts éventuels (plastifiant...), de la pâte de ciment. Ce rapport influence ainsi la résistance et donc la durabilité du matériau béton.

De plus, cette pâte constitue le liant du béton : elle va faire prise et durcir grâce au processus d'hydratation (que j'expliquerai dans la partie 1.1.2) de ses constituants.

Une fois durci, la pâte de ciment peut représenter de 25 à 40% du volume et 15 à 30% de la masse du béton [Baroghel-Bouny, 1994].

Cependant, l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment peut avoir un effet négatif si elle est ajoutée en excès.

En effet, lors du départ de l'eau par séchage du béton une fois mis en place, on a la présence de vide dans le matériau durci, traduisant la porosité. Cela entraîne deux conséquences majeures, la première est la diminution des résistances mécaniques (Flexion, Compression) de notre béton et la seconde est la détérioration de leur durabilité, car les bétons plus poreux donc plus perméable seront plus accessibles à des agents extérieurs agressifs tel que les chlorures.

On cherche donc à diminuer la porosité du béton afin d'améliorer sa durabilité.

1.1.1) Le ciment

Le ciment est un mélange de 80% de calcaire (CaCO_3) et de 20% d'argile (SiO_2 , Al_2O_3) broyés et mélangés afin d'obtenir un mélange homogène que l'on appelle le « cru ».

Le cru est alors chauffé à 1450°C dans un four rotatif puis refroidi rapidement jusqu'à température ambiante pour obtenir le « clinker », et est ensuite stocké ou directement broyé.

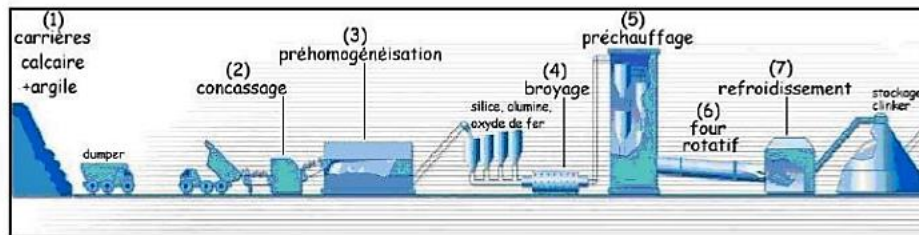


Figure 1 : fabrication du clinker (Lafarge)

Les quatre phases cristallines principales constitutives du clinker (plus de 90%) sont [Lafond, 2013] :

- 50 à 70% : le silicate tricalcique (alite) = C3S
- 5 à 20% : le silicate bicalcique (bélite) = C2S
- 2 à 12% : l'aluminate tricalcique (célite) = C3A
- 0 à 15% : l'alumino-ferrite tétracalcique = C4AF

A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de granules. Celui-ci est mélangé avec du sulfate de calcium ou gypse (environ 3%) afin de régulariser la prise lors de l'hydratation et ensuite broyé très finement (la taille d'un grain de ciment $< 100\ \mu\text{m}$).

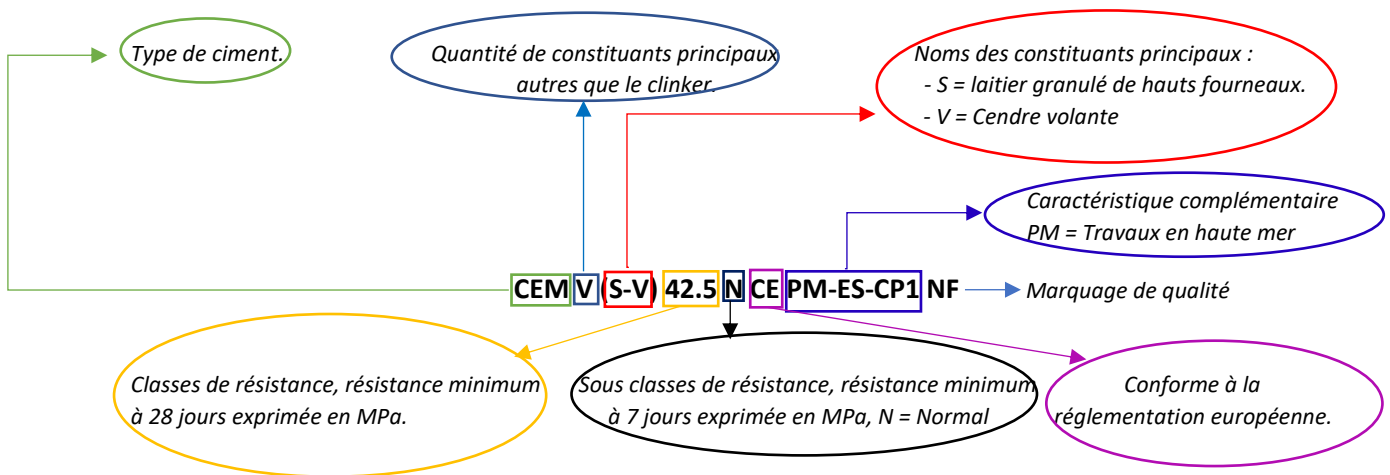
Un mélange composé de 97% de clinker et de 3% de gypse donne le ciment Portland. Cependant on peut aussi obtenir d'autres classes de ciment en ajoutant d'autres constituants (laitiers de haut fourneau, cendres volantes, pouzzolanes, fumées de silice...).

La norme EN 197-1 définit quatre classes de ciments composés :

- Classe II : CEM II, ciments Portland composés
- Classe III : CEM III, ciments de hauts fourneaux
- Classe IV : CEM IV, ciments pouzzolaniques
- Classe V : CEM V, ciments aux cendres et laitiers de hauts fourneaux

Selon la proportion des différents produits et ajouts, le ciment est classé dans différentes catégories. Il existe 27 types de ciment.

Pour sa thèse, Amaia a sélectionné le ciment suivant :



1.1.2) Hydratation du ciment

Les composants du ciment (C_3S , C_2S , ...), voir partie 1.1.1, forment en présence d'eau des hydrates qui précipitent pour former la structure du matériau. L'ensemble de ses réactions chimiques entre le ciment et l'eau est appelé hydratation.

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les composés du ciment réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

NB : Pour éviter des interactions chimiques non désirées on essaye d'utiliser l'eau la plus pure possible.

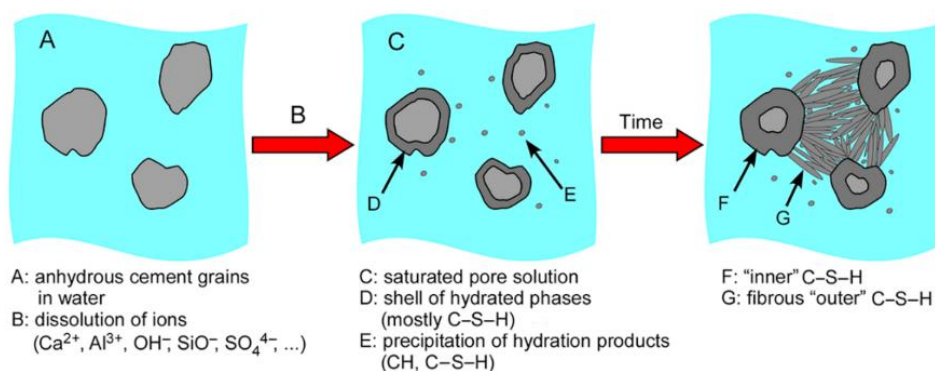


Figure 2 : Schéma représentant l'hydratation du ciment

Quand le ciment Portland entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique se produit (dégagement de chaleur). On distingue, en général, deux groupes de réactions, l'hydratation des aluminates et l'hydratation des silicates.

L'aluminate tricalcique (célite, C_3A) est l'une des phases la plus réactive dans le ciment, en effet elle réagit dans les premiers instants après l'ajout d'eau et réagit avec le gypse pour former des cristaux d'ettringite, qui contribue légèrement dans les premiers jours du béton à sa résistance mécanique.

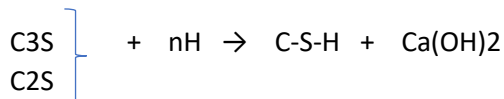
Au fur et à mesure, cette ettringite réagira par la suite avec la célite restante et formera les monosulfates.

En revanche, les silicates (C_3S , C_2S) réagissent de façon plus lente et forment des hydrates de silicates de calcium notées C-S-H ainsi que de la portlandite (hydroxyde de calcium) $Ca(OH)_2$.

D'après Lemarignier (Lemarignier, 1996), pour le ciment Portland (sans ajouts), ce sont les deux principaux hydrates formés (représentant de 75 à 95% de la pâte de ciment) :

- La portlandite (ou hydroxyde de calcium) : $Ca(OH)_2$ (de 20 à 25%)
- Les silicates de calcium hydratés : C-S-H (de 50 à 75%)

Selon la réaction :

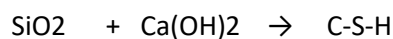


Ces deux hydrates, contribuent majoritairement à la résistance mécanique de notre béton.

Les C-S-H sont la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment hydratée, elle s'apparente à un gel. Ils possèdent une composition variable et sont de formule générale $CX-SY-HZ$ avec $0.6 < x/y < 2$ et $1 < z < 4$. En moyenne le rapport $C/S \approx 1,7$ (Souchu, 2009). Les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices entre les grains, ce qui donne sa solidité au ciment. Ils sont majoritairement amorphes.

La dissolution de la portlandite dans l'eau des pores (solution interstitielle) donne sa basicité au béton (pH entre 12,4 et 13,5) qui induit la passivation des armatures du béton armé (Baroghel-Bouny, 1994).

On observe ensuite, en particulier pour les ciments avec beaucoup d'ajouts, des réactions pouzzolaniques. Ces ajouts, composés majoritairement de silice vitreuse, réagissent sur le long terme avec la portlandite $Ca(OH)_2$, formée par l'hydratation des C_3S et C_2S , pour donner de nouveaux C-S-H :



Les C-S-H ainsi formés sont appelés C-S-H secondaires et sont plus riches en silice ($C/S \approx 1,1$) (De Larrard, 2002). La teneur en portlandite dans le béton en est diminuée.

Tableau 1 : Tableau représentant l'ensemble des réactions d'hydratation

Reactants	Hydration products
C_3S^a (tricalcium silicate) + water	C-S-H (calcium silicate hydrate), CH (calcium hydroxide)
C_2S (dicalcium silicate) + water	C-S-H (calcium silicate hydrate), CH (calcium hydroxide)
C_3A (tricalcium aluminate) + $C_6A_3H_{32}$ (gypsum) + water	$C_6A_3H_{32}$ (ettringite)
C_3A (tricalcium aluminate) + $C_6A_3H_{32}$ (ettringite) + water	$C_4A_3H_{12}$ (monosulfate)
C_4AF (tetracalcium aluminoferrite) + CH (calcium hydroxide) + water	C_6AFH_{12} (calcium aluminoferrite hydrate)

Les granulats entrant dans la composition des mortiers et bétons sont des grains minéraux appelés filiers, sables, gravillons, graves suivant leur dimension.

Ils sont ajoutés et ainsi liés à la pâte de ciment et forme une fois la pâte durci une roche artificielle compact aux propriétés mécaniques semblables voir améliorées.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sable et de gravier, en concassant des roches massives ou également par le recyclage de matériaux de démolitions. Ils peuvent être de différentes natures chimiques : calcaires, silico-calcaires, siliceux, argileux... (Carre, 2015).

Le choix de granulat pour la confection de béton est régi par deux normes :

- La norme XP P 18-545 définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles de granulats. Elle précise les critères de régularité et conformité et fournit les Fiches Techniques Produit.
- La norme NF EN 18620 définit pour chaque caractéristique physique ou mécanique spécifiant des granulats, des catégories de valeurs maximales.

1.2.1) Dimensions des granulats

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

Ils sont classés en fonction de leur granulométrie, c'est-à-dire selon leur distribution dimensionnelle des grains, exprimée par le rapport d/D avec d = dimension inférieure du granulat et D = dimension supérieure du granulat. Par exemple, un granulat dont très peu de grains passent au travers d'un tamis de 4mm (d), et dont la majorité passent au travers d'un tamis de 12 mm (D), est dénommé : « granulat 4/12 ».

Tableau 2 : Tableau représentatif des classes granulaires

Les granulats les plus utilisés		
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$d = 0$ et $D \leq 4$ mm
Graves	0/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Ballasts	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

1.2) Les adjuvants

Un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de leurs propriétés, à l'état frais ou durci.

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés, ils modifient en les améliorant, les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés (en faible proportion, environ < 5% du poids de ciment). Tous les adjuvants font l'objet de la norme de définition et des exigences NF EN 934-2 ainsi que d'une marque de qualité NF Adjuvants.

- Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton :

Les plastifiants : A teneur en eau égale, ils augmentent la maniabilité du béton.

Les plastifiants réducteurs d'eau : A même maniabilité, ils augmentent les résistances mécaniques.

Les superplastifiants : Ils provoquent un fort accroissement de la maniabilité du mélange.

- Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement :

Les accélérateurs de prise et de durcissement : Ils diminuent le temps de prise ou de durcissement du ciment.

Les retardateurs de prise : ils augmentent le temps de prise du ciment.

- Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton :

Les entraîneurs d'air : formation de microbulles uniformément réparties.

Les hydrofuges de masse : Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons.

Les rétenteurs d'eau : Ils régulent l'évaporation de l'eau et augmente l'homogénéité et la stabilité du mélange.

Les produits de cure : Ils protègent les bétons frais de la dessiccation.

Choix du type d'adjuvant en fonction de sa propriété								
PROPRIÉTÉ	ADJUVANTS	Réducteurs d'eau	Plastifiants	Superplastifiants	Accélérateurs de durcissement	Accélérateurs de prise	Retardateurs de prise	Entraîneurs d'air Hydrofuges de masses
Ouvrabilité		+	+				+	
Temps de prise					-	+		
Résistances court terme (3 jours)		+	+	+	+	-	-	
Résistances long terme (> 28 jours)		+	+		=	+	-	
Air occlus							+	
Résistance au gel du béton durci		+					+	
Compacité		+	+	+				
État de surface			+				+	
Perméabilité sous pression hydraulique			-					-

Tableau 3 : Tableau représentant les choix d'adjuvants

2) Notion de durabilité

Lorsqu'un ouvrage est construit, le béton doit faire face, au cours du temps, aux diverses agressions ou sollicitations de son environnement.

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers, esthétisme...) avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit pas à garantir la durée de vie de service de l'ouvrage. Dès sa conception, il faut appréhender l'ensemble des contraintes qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service et respecter les recommandations en vigueur.

On détermine alors la durée de vie de l'ouvrage qui correspond à la durée de service pour un fonctionnement normal et à une maintenance courante, sans entretien spécialisé et sans réparation importante.

Cependant, en fonction de son usage ou de sa localisation, un ouvrage subit des agressions du milieu extérieur et plusieurs phénomènes peuvent influencer sa durabilité (CIMBéton, 2008) :

- Les mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton avec la carbonatation et l'action des chlorures qui corrodent les armatures par oxydoréduction.

- L'action des eaux agressives avec par exemple la lixiviation (dissolution des hydrates dans l'eau acide qui pénètre par les pores) qui fragilisent la matrice cimentaire du béton.

- Les mécanismes de corrosion des armatures en acier dans le béton avec la carbonatation et l'action des chlorures qui corrodent les armatures par oxydoréduction.

Afin de prédire la durée de vie d'un ouvrage ou déterminer l'avancement de ses phénomènes, il existe des indicateurs de durabilité. Ce sont des paramètres qui apparaissent fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure. Ces paramètres doivent être facilement déterminables en laboratoire de façon fiable et reproductible.

Les principaux indicateurs de durabilité sont les suivants (AFGC, 2004) :

- Porosité accessible à l'eau
- Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure
- Perméabilité aux gaz
- Perméabilité à l'eau liquide
- Teneur en portlandite

La détermination des indicateurs de durabilité est donc indispensable pour connaître la durée pendant laquelle l'ouvrage est utilisable dans de bonnes conditions et sans risques pour les usagers. La prise en compte de la durabilité permet ainsi de valider et de justifier la rentabilité de l'investissement.

Par la suite nous chercherons donc à savoir quelles sont les influences du milieu marin sur le béton et comment résoudre les problèmes de durabilité des bétons constituant les ouvrages de nos littoraux.

3) Action de l'eau de mer sur le béton

Un béton exposé en site maritime peut être l'objet de plusieurs types d'agressions :

- Agressions mécaniques dues à l'action des vagues et des marées, abrasion due aux chocs des matériaux flottants et érosion due aux effets des vagues ;
- Agressions chimiques dues à l'action des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates ;
- Agressions climatiques dues aux variations de température et éventuellement à des phénomènes de gel-dégel.

Les structures situées en site maritime sont exposées à trois types de configurations. Selon les variations du niveau de la mer, elles peuvent être :

- Continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse), les bétons situés dans cette zone sont rarement l'objet de dégradations importantes ;
- Continuellement émergées et soumises aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures, les bétons situés dans cette zone peuvent subir de légères agressions ;
- Alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou soumises aux éclaboussures provoquées par les vagues, les bétons situés dans cette zone sont les plus agressés.

Quelques images de la digue séparant la plage de la barre à celle des cavaliers (ANGLET) :

Construite en 1977, la digue a bénéficié des travaux de confortement en 2013.



Figure 3 : Photographie exposant les dégâts dus à l'environnement marin



On remarque donc une fissure sur tout le long du bloc de béton ainsi que la corrosion avancée des armatures.

Cela fragilise donc la digue et entraîne la nécessité de nouveaux travaux.

Il est donc important de trouver une solution afin d'améliorer la durabilité du béton mis en place afin de minimiser les coûts d'entretien des digues mais aussi de toutes les infrastructures côtières.

3.1) La corrosion des armatures par les ions chlorures

Les ions chlorures constituent un facteur important de risque pour le béton armé : ils pénètrent dans le béton et peuvent provoquer la corrosion des armatures.

Dans des conditions normales, les armatures en acier des bétons armés sont protégées de la corrosion naturellement par une couche appelée couche de passivation. En effet, le pH de la solution interstitielle du béton est d'environ de 13.

On remarque donc avec le diagramme potentiel pH du fer que grâce à cet environnement, l'acier est maintenu dans un état de passivation.

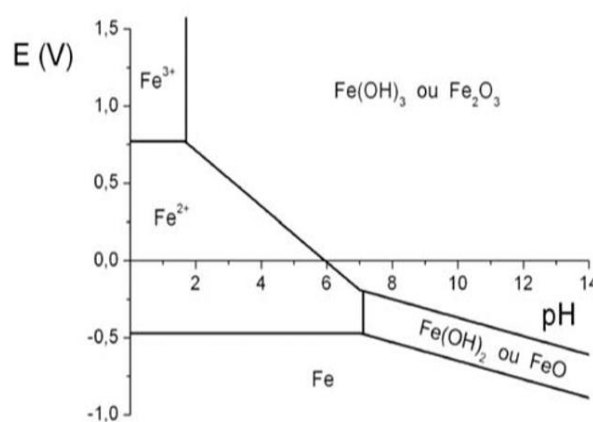


Figure 4 : Diagramme potentiel pH du fer [Pourbaix, 1963]

En présence de trop d'ions chlorures dans le béton, la corrosion des aciers est observée. Ils modifient la morphologie de la couche passive en donnant des ions FeCl_3^- ou FeCl_2 ($\text{Fe} + 3\text{Cl}^- \Rightarrow \text{FeCl}_3^- + 2\text{e}^-$ ou/et $\text{Fe}^{2+} + 2\text{Cl}^- \Rightarrow \text{FeCl}_2$) qui consomment les ions OH^- présents ($\text{FeCl}_3^- + 2\text{OH}^- \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 3\text{Cl}^-$ ou/et $\text{FeCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl}$).

D'après les réactions précédentes, le processus conduit à une diminution du pH et donc à la réduction du fer en ion Fe^{2+} .

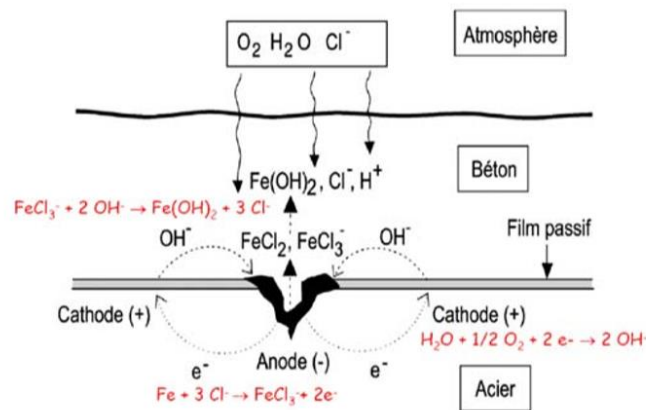


Figure 5 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures [Baron et Ollivier, 1992]

Les produits de corrosion occupent un volume plusieurs fois supérieur au volume initial de l'acier. Leur formation, lorsqu'elle a atteint un volume suffisant, peut alors entraîner une fissuration du béton. [Deby, 2008]

3.2) Limiter la diffusion des ions chlorures ou d'autres agents agressifs

Le facteur qui peut empêcher la diffusion des ions chlorures et ainsi préserver le béton en milieux marin est sa compacité. En effet, plus le béton sera compact plus les agents agressifs tels que les chlorures auront du mal circuler dans le réseau poreux du béton. Il est donc nécessaire de réduire le rapport E/C ainsi que de limiter la formation d'un réseau poreux trop important.

Pour cela, nous choisissons d'incorporer au mélange lors de l'élaboration de notre pâte de ciment des nanomatériaux.

4) Introduction aux nanomatériaux

Au cours de ces dernières années, la nanotechnologie se développe à une vitesse très importante. On la voit notamment se développer dans plusieurs domaines de recherche tels que l'électronique, l'automobile, la médecine et bien d'autre encore.

En raison de ses utilisations, il y a donc un fort intérêt de recherche de l'influence des nanoparticules dans les matériaux de construction et plus particulièrement dans les mortiers et bétons.

Au cours de mes recherches bibliographiques, j'ai donc pu constater qu'il y avait un bon nombre d'études disponible qui ont porté sur l'effet de l'ajout de nano silice sur leurs propriétés mécaniques.

Cependant outre l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons, il faut aussi s'intéresser à la question de durabilité de nos bétons c'est-à-dire, étudier les paramètres de durabilité. (cf page 14)

Tout au long de ce stage j'ai donc tenté de mesurer l'influence des nanomatériaux sur les propriétés de mortiers en sélectionnant donc plusieurs nanomatériaux, introduit à différents pourcentages dans nos mélanges et j'ai ensuite comparé mes résultats à un mortier de référence pour enfin déterminer le meilleur mélange possible afin de préserver les bétons de l'environnement marin.

4.1) Les nanomatériaux dans le béton

Le nano-béton est défini selon la recherche comme un béton issu du mélange de ciment Portland et des particules de taille inférieure à 500 nm.

Les raisons de l'utilisations des nanomatériaux dans le béton sont d'obtenir de meilleure performance mécanique et une meilleure durabilité mais aussi pouvoir si possible fournir de nouvelles propriétés. [Sanchez et Sobolev, 2010]

En raison de leur surface spécifique élevée (rapport surface/volume), les nanomatériaux favorisent l'hydratation du ciment.

4.2) Les nanomatériaux utilisés

4.1.1) Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone ont été découverts par Sumio Iijima en 1991. Ils font partie de la famille des fullerènes (1985). Jusqu'en 1985, seulement deux états cristallins étaient connus, le diamant et le graphite ce qui fait de ce nanomatériau une découverte récente.

Il existe deux types de nanotubes de carbone :

- Les nanotubes de carbone mono feuillets
- Les nanotubes de carbone multi feuillets

La structure d'un nanotube de carbone, a un diamètre compris entre 0,6 et 6 nanomètres pour une longueur variable, pouvant aller jusqu'à plusieurs micromètres.

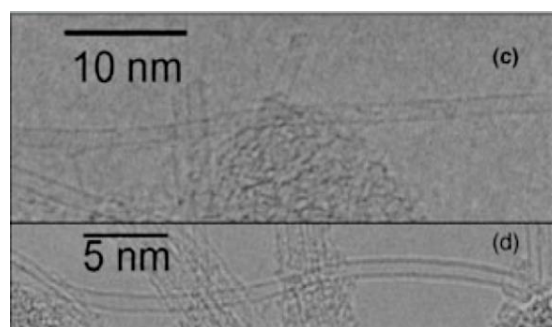
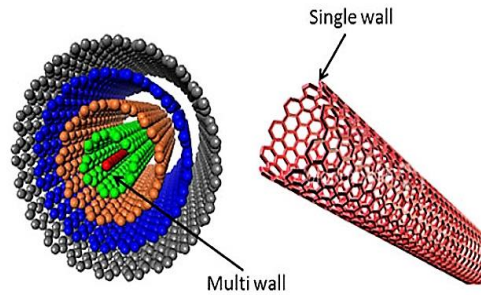


Figure 6 : Structure des CNT



Ce qui nous intéresse donc dans les nanotubes de carbones, ce sont donc leurs propriétés mécaniques. En effet ils possèdent un module d'Young d'environ 1000 GPa (comparable au diamant, 1220 GPa) [Ashby, 2009].

C'est cette caractéristique qui ainsi nous intéressera dans le test de nos éprouvettes, en effet on cherche à améliorer les propriétés mécaniques du mortier de référence.

De plus, les CNT possèdent de meilleures propriétés matérielles que les CNF (Nano Fibre de Carbone) et selon le Conseil national de recherches du Canada (SCGDV), ce sont des matériaux de renforcement idéaux pour le béton (SCGDV 2013). On essayera donc de plus, lors de nos expérimentations de vérifier cette information.

4.1.2) La nano silice

La nano silice est l'un des principaux nanomatériaux utilisé dans la conception de béton. Le principal composant chimique de la nano silice est le dioxyde de silicium (SiO_2).

Il peut être présent sous forme cristalline et amorphe. Sa structure amorphe est le plus couramment utilisé dans le nano-béton.

Les particules possèdent une taille variable, allant de 5 à 650 nm.

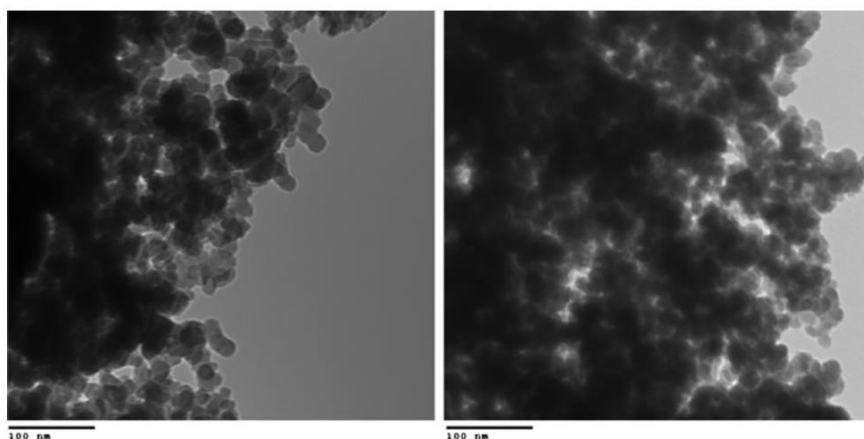


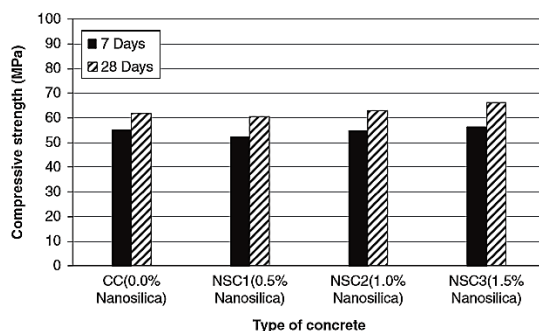
Figure 7 : Microscopie électronique de nano silice

[Hosseini et coll., 2010] ont mené une étude expérimentale pour expliquer la modification de la microstructure du béton en présence de nano silice. Ils ont résumé que la nano silice contribue à améliorer la microstructure du béton de plusieurs façons, notamment en produisant une meilleure cristallisation C-S-H et en remplissant les micro-vides.

Ainsi l'ajout de nano silice diminue significativement la porosité du béton ; je chercherai dans mon étude à vérifier ce résultat.

De plus, deux graphiques tirés de deux études différentes démontrent que les propriétés mécaniques d'un béton avec ajout de nano silice sont aussi améliorés. (Flexion et compression)

(a)



(b)

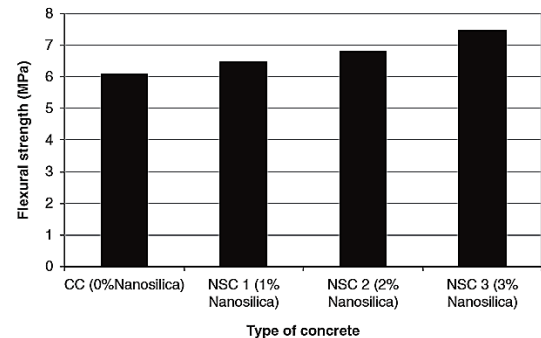


Figure 8 : Graphique représentant les résultats d'essais mécaniques sur béton avec nano silice (a) test compression, (b) test flexion

4.1.3) Les nano fibres de carbone

Le nano fibres de carbone deviennent de plus en plus utilisé dans la conception de béton. En effet, elles possèdent des qualités semblables à celle des nanotubes de carbone. De plus, ce nanomatériau est plus simple à synthétiser et surtout moins cher ce qui pourrait faire de lui l'un des principaux adjuvants de nano-béton dû à sa rentabilité.

Ce nanomatériau nous intéresse donc du fait de ses caractéristiques mécanique, en effet [Tyson et coll., 2011] ont rapporté que les CNF possèdent un module d'Young de 400GPa et une résistance à la traction de 7GPa.

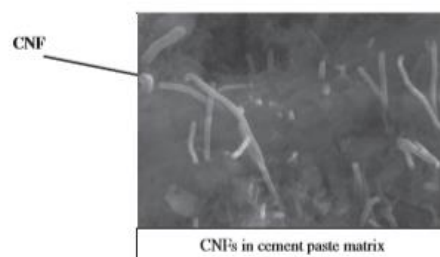


Figure 9 : microscopie électronique de CNF

4.3) Effets des nanomatériaux sur le béton

Basé sur l'ensemble de ma bibliographie, les nanomatériaux influencent à la fois les propriétés du béton frais et du béton durci, notamment :

- **L'hydratation du béton** : L'incorporation de nanomatériaux tels que la nano silice et les nanotubes de carbone peut influencer positivement les réactions d'hydratation et la structure physique de C-S-H dans le ciment [HE et Shi 2008]. Leur recherche a permis de démontrer la modification de la structure cristalline du béton, en effet ils ont observé la formation d'une quantité supérieure de silicates de calcium hydratés que dans un béton normal.
- **La microstructure** : Des recherches [Ji, 2005] ont démontrées que l'ajout de nano silice lors de la confection des bétons peut rendre la microstructure du béton plus uniforme et compact qu'un béton normal choisit comme référence. En effet, les nanomatériaux vont combler « les vides » de la matrice cimentaire du fait de leur très petite taille comparer aux matériaux conventionnels du béton. Le béton se retrouve donc avec une plus forte densité et surtout une porosité nettement réduite.
- **Les propriétés mécaniques** : Les nanomatériaux améliorent les propriétés mécaniques du béton. L'amélioration des propriétés du béton se traduit par une amélioration de la zone de contact agrégat/pâte, produisant ainsi une meilleure liaison interfaciale entre l'agrégat et la pâte de ciment [Guillaume et coll., 2011]. Plusieurs résultats démontrent l'influence positive des nanomatériaux (cf figure 11).

Du fait de ces nombreuses améliorations suite à l'incorporation de nanomatériaux dans le béton, la durabilité s'en retrouve à son tour améliorée. En effet, suite à la réduction de sa porosité le béton pourrait donc ainsi résister à l'agression d'éléments extérieur tel que les chlorures.

Ainsi les nanomatériaux semblent la solution la plus viable afin d'améliorer le béton en vue de construction marine. Notre étude vérifiera donc la validité des précédentes recherches ainsi que la conception d'un mortier à base de nanomatériaux capables de résister à l'environnement de nos côtes.

Partie 2 : Etude expérimentale

L'objectif de notre étude expérimentale est d'établir, par un ensemble de mesures, la composition idéale du béton avec des nanomatériaux afin de minimiser l'impact de l'environnement marin sur celui-ci et d'en améliorer sa durabilité.

1) Elaboration de nos échantillons

Dans un premier temps, avant tout essais il a été nécessaire d'effectuer le gâchage de mortier avec variations des compositions en nanomatériaux. Nous avons donc confectionné avec Amaia des éprouvettes (4x4x16 cm) qui subiront par la suite plusieurs tests dont nous discuterons les résultats ultérieurement.

Nous avons ensuite utilisé une gâchée pour trois éprouvettes qui sont chacune constituées de 450 +/- 2 g de ciment, 1350 +/- 5 g de sable et pour finir 225 +/- 1g d'eau.

Les nanomatériaux utilisés ont été introduit lors des gâchages de nano mortiers dans les proportions suivantes, (% par rapport au poids du ciment) NS 2%/3%/4%, CNT 0,006%/0,003%/0,015%, CNF 0,15%.

Après avoir préparé celle-ci, il est nécessaire de passer au malaxage du mortier. Pour commencer, nous avons pesé le ciment et l'eau à l'aide d'une balance. A l'aide d'un malaxeur, nous avons malaxé chaque mortier mécaniquement. Le chronométrage des différentes étapes du malaxage s'inscrit entre les moments de la mise en marche et de l'arrêt du malaxeur, et qui doit être respecté avec +/- 2s.

Pour procéder au malaxage, nous avons utilisé le mode opératoire ci-dessous :

- Le sable et le ciment préalablement pesé sont introduits directement dans notre bol.
- Nous avons mis le malaxeur en marche à petite vitesse, et en lançant le chronométrage en parallèle des étapes du malaxage. Après 30 secondes de malaxage, avons donc rajouté l'eau et laissé malaxer pendant 30 secondes encore. Nous avons passé la vitesse du malaxeur au maximum, et avons continué le malaxage pendant 30 secondes supplémentaires.
- J'ai ensuite arrêté le malaxeur pendant 90 secondes. Pendant les 30 premières secondes, j'ai enlevé à l'aide d'une raclette en caoutchouc ou en plastique tout le mortier ayant adhéré sur les parois et au fond du bol, et le placer au milieu. J'ai repris le malaxage pendant 60 secondes à grande vitesse.
- Après avoir fini le mode opératoire, nous avons dû préparer chaque éprouvette en forme de prisme mesurant 40mm x 40mm x 160mm. Je les ai immédiatement moulés. Le moule et la hausse étant solidement fixés sur la table à chocs, j'ai introduit à l'aide d'une cuillère appropriée (en une ou plusieurs fois), la première des deux couches de mortier, dans chacun des compartiments du moule à l'aide du bol de malaxage.
- Par la suite, j'ai étalé la couche uniformément. J'ai, ensuite, serrer la première couche de mortier par 60 chocs de l'appareil à chocs. Nous avons introduit la seconde couche de mortier, en veillant à assurer un surplus, niveler à l'aide de la petite spatule et serrer à nouveau par 60 chocs.

- Nos échantillons préparés, nous les avons conservés dans des poches jusqu'au lendemain (environ 24h) afin de pouvoir les démouler et les conserver dans l'eau jusqu'à la date des tests.

Les différents tests réalisés s'inscrivent dans une période de 7 jours, 28 jours et de 91 jours. Cependant la durée du stage ne m'a pas permis de réaliser tous les tests souhaités avec tous les échantillons effectués.

2) Tests réalisés

Nous avons donc réalisé plusieurs tests sur une multitude d'échantillons. En effet il s'agissait d'établir la meilleure composition d'un nano mortier mais aussi, observer par rapport au temps, le comportement de chacun.

2.1) Les essais mécaniques

2.1.1) Résistance à la flexion

La résistance à la flexion a été mesurée au moyen d'une machine d'essai de résistance à la flexion. Elle doit permettre d'appliquer des charges jusqu'à 10 kN avec une précision de 1%.

Nous avons donc positionné notre prisme en plaçant une face latérale sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculairement aux appuis. Nous avons ensuite lancé le test.

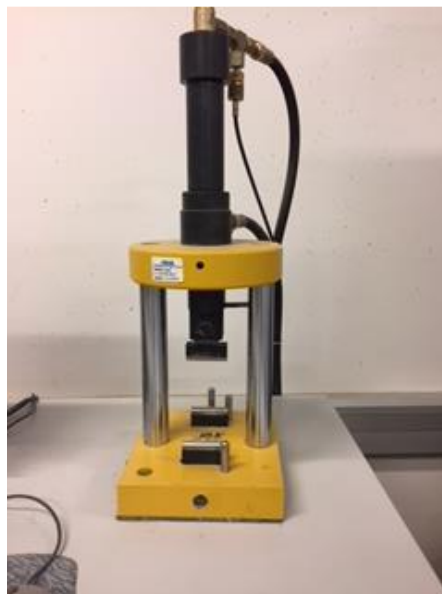


Figure 10 : Machine utilisée pour les essais de résistance à la flexion

On calcule la résistance à la flexion par la formule ci-dessous :

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * I}{b^3}$$

Avec, F_f : charge appliquée au milieu du prisme à la rupture (N).

I : distance entre les appuis (mm).

b : côté de la section carrée du prisme (mm).

Nous obtenons donc les résultats suivants, sous forme de graphique afin d'en faciliter la lecture.

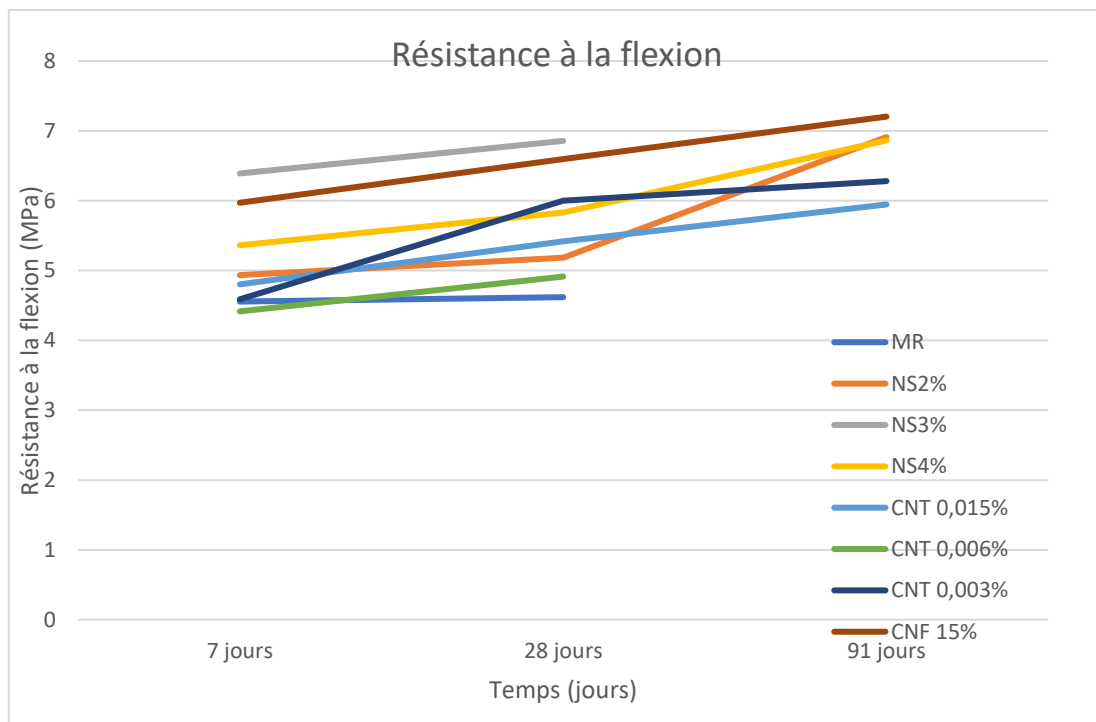


Figure 11 : Graphique représentant la résistance à la flexion à 7,28,91 jours

On remarque donc malgré quelques résultats manquant que la majorité de nos nano mortiers, ont une résistance à la flexion supérieure à celle de notre mortier de référence (voir légende).

Avec ce graphique on observe que l'on obtient de meilleurs résultats avec la nano silice, en effet si l'on compare la résistance à 91 jours, on en déduit que l'on a une résistance à la flexion inférieure avec les nano tubes de carbone.

Ainsi on retiendra pour l'instant le gâchage par NS et CNF avec qui l'on obtient de très bonne résistance à la flexion.

Il faut donc maintenant travailler sur la résistance en compression afin de déterminer les meilleurs nanomatériaux ayant les meilleures propriétés mécaniques

2.1.2) Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée au moyen d'une machine d'essai de résistance à la compression. Elle doit permettre d'appliquer des charges importantes afin d'être adaptée à nos essais avec une précision de 1%.

Nous avons donc positionné une partie de notre éprouvette (sectionnée en deux morceaux à la suite du test à la flexion) en prenant soin de recouvrir la section de compression par notre éprouvette.

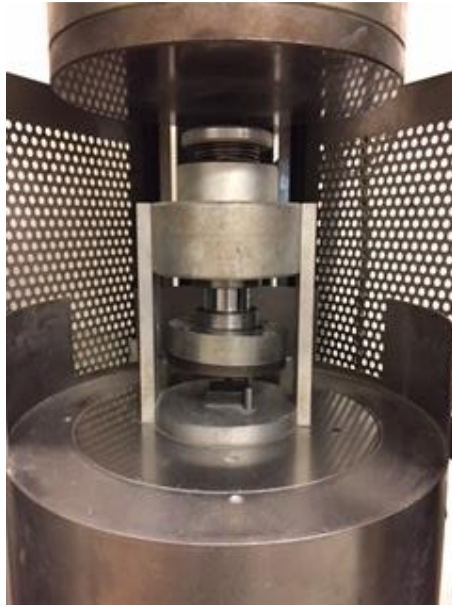


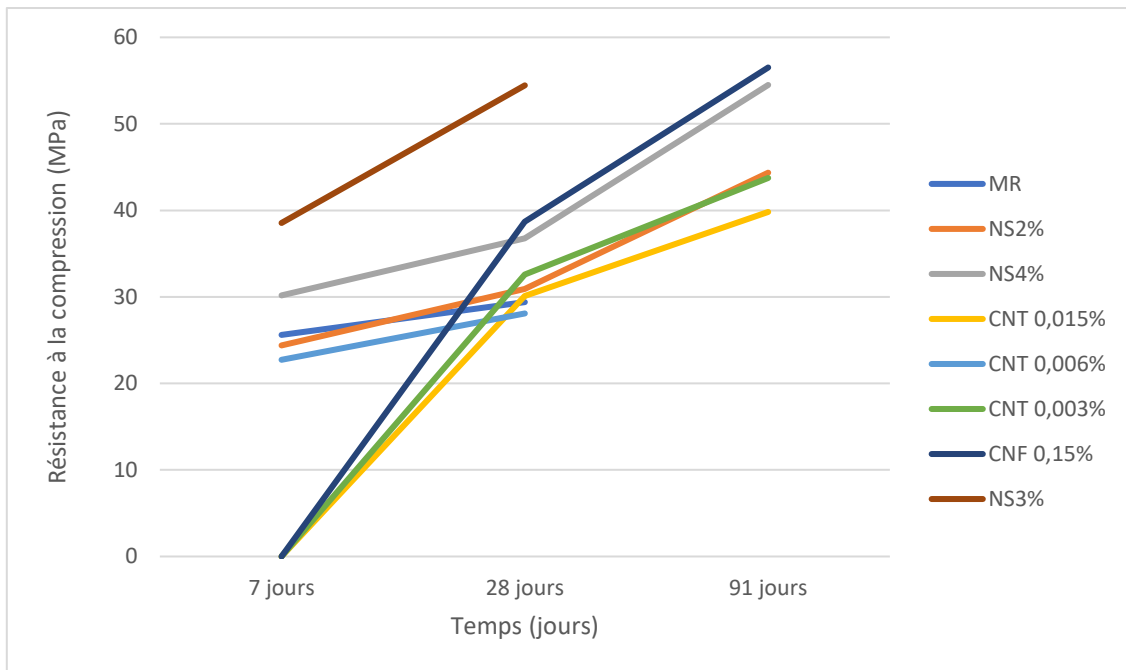
Figure 12 : : Machine utilisée pour les essais de résistance à la compression

On calcule la résistance à la compression par la formule ci-dessous :

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Avec, F_c : la charge maximale à la rupture (N)

Nous obtenons donc les résultats suivants, sous forme de graphique afin encore d'en faciliter la lecture.



On remarque donc malgré quelques résultats manquant que la majorité de nos nano mortiers, ont une résistance à la compression supérieure à celle de notre mortier de référence (voir légende). Cependant on remarque que CNT à 0,006% du poids de ciments à une résistance inférieure, on peut donc déjà exclure cet essai car il ne correspond pas à nos attentes.

Avec ce graphique on observe que l'on obtient de meilleurs résultats aussi avec la nano silice, en effet si l'on compare la résistance à 91 jours ou même 28 jours, on en déduit que l'on a une résistance à la flexion inférieure avec les nano tubes de carbone.

Ainsi cela nous permet de faire une première hypothèse, celle de concevoir un mortier ayant pour composition la NS et CNF avec qui l'on obtient de très bonne résistance à la flexion et à la compression.

Maintenant nous allons chercher à déterminer l'adsorption capillaire de chacun des échantillons afin de valider notre première hypothèse.

2.2) Absorption capillaire

L'absorption capillaire de nos échantillons est facilement déterminable par une simple expérience que j'ai réalisée avec Amaia. En effet il s'agit de plonger pendant 48 heures une section de notre échantillon préalablement recouvert de résine afin d'avoir uniquement une seule surface d'absorption disponible (40 x 40 mm).

Par la suite, après avoir pesé tous nos échantillons un par un nous les immergeons et les pesons à intervalle de temps bien déterminé, c'est-à-dire 15 minutes, 30 minutes, 1 heure, 2 heures, 4 heures, 8 heures, 24 heures et enfin 48 heures.

Nous avons pu ainsi déterminer l'adsorption capillaire à 7 jours et à 28 jours. Les échantillons à 91 jours n'étaient toujours pas disponibles pour nos essais.



Figure 13 : Photo de l'expérience absorption capillaire

Nous obtenons donc les résultats suivants, sous forme de graphiques :

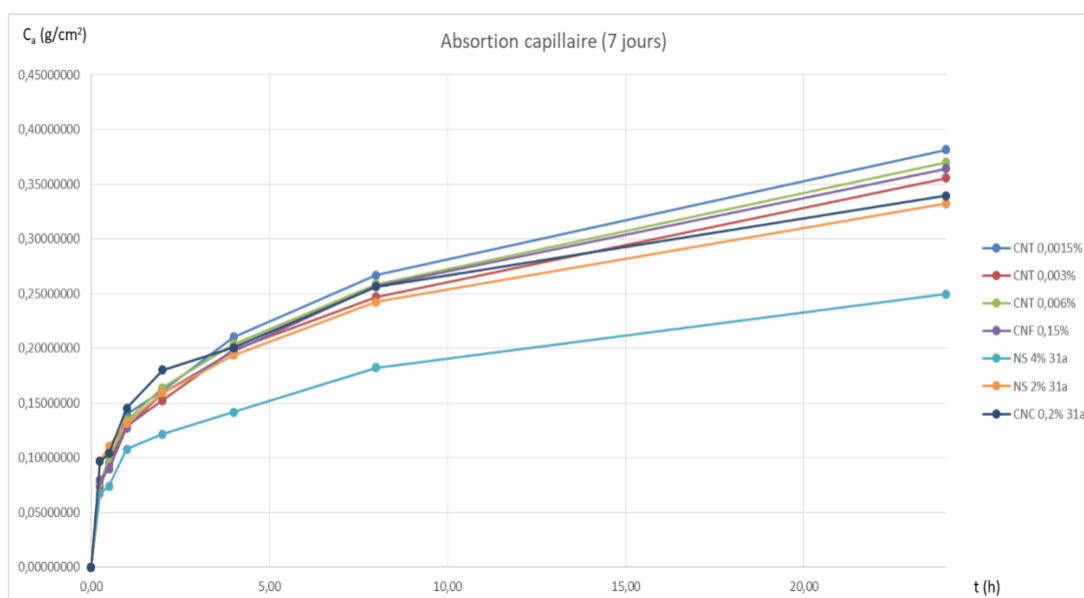


Figure 14 : Graphique représentant l'absorption capillaire à 7 jours

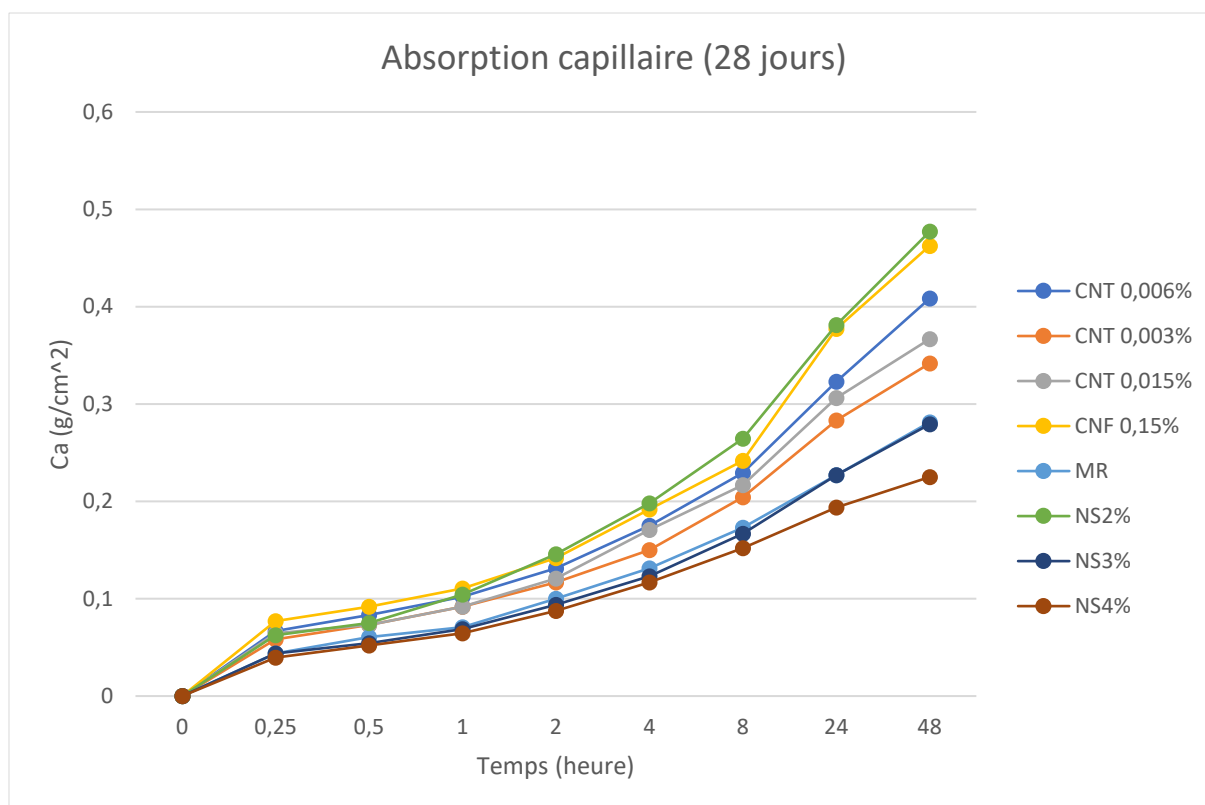


Figure 15 : Graphique représentant l'absorption capillaire à 28 jours

On obtient donc plusieurs courbes représentant l'adsorption capillaire pour chacun des échantillons.

On remarque donc pour chacun des deux graphiques que l'adsorption capillaire des échantillons gâchés avec la NS à 3% et 4% est bien inférieure comparée aux autres valeurs d'adsorption des autres échantillons.

De plus, on remarque que pour le graphique représentant l'absorption capillaire à 28 jours, il n'y a uniquement que les échantillons gâchés par la NS à 3% et 4% qui ont une adsorption inférieure à celle de notre mortier de référence.

3) Conclusion de mes essais

J'ai donc effectué la résistance à la flexion, la résistance à la compression et l'absorption afin de pouvoir avoir une idée de la composition « idéale » d'un nano mortier pouvant être utilisé pour des infrastructures portuaires.

Grâce aux essais mécaniques j'ai donc pu déterminer les nanomatériaux qui influencent le plus positivement la résistance à la flexion et la résistance à la compression. Les nanomatériaux les plus pertinents pour améliorer les propriétés mécaniques d'un mortier normal sont la nano silice à 3% et à 4% ainsi que la nano fibre de carbone à 0,15%.

De plus, j'ai pu déterminer aussi l'adsorption capillaire de chacun de nos échantillons. Ainsi on peut déduire aussi deux nanomatériaux adaptés pour concevoir un béton avec une durabilité améliorée.

En effet, on observe uniquement que les échantillons gâchés par la NS à 3% et 4% qui ont une adsorption capillaire inférieure à celle de notre mortier de référence.

Ainsi on pourrait donc utiliser la nano silice comme nanomatériaux afin d'améliorer les propriétés des bétons cependant, il nous reste certains essais à faire afin de pouvoir conclure nos hypothèses, en effet il faudrait réaliser la porosité au mercure ainsi que le temps de prise de chacun de nos échantillons pour avoir ainsi une idée globale de la viabilité d'un projet d'utilisation des nanomatériaux pour concevoir un ouvrage côtier.

Conclusion

Cette étude a eu pour but de mettre en évidence l'influence des nanomatériaux dans les propriétés de mortiers mais aussi de déterminer le ou les nanomatériaux les plus adaptés afin de minimiser l'impact de l'environnement marin sur le béton.

J'ai donc obtenu certains résultats qui me semblent utilisables et de plus j'ai pu donc vérifier certains des résultats utilisés lors de ma bibliographie. J'obtiens ainsi des résultats similaires pour la nano silice en matière de résistances mécaniques.

D'un point de vue personnel, ce stage m'a permis de découvrir le métier de chercheur, et plus particulièrement dans un domaine où je n'avais aucune notion. Je me suis rendu compte que dans le métier de chercheur, la garantie d'un résultat n'est jamais certaine. Il faut savoir faire face aux difficultés et trouver des solutions pour les contourner tout en ayant des contraintes physiques (matériel, budget ...) mais j'ai surtout vu aussi que l'on pouvait manquer de temps c'est pour cela qu'une extrême organisation est requise. Avoir un regard critique et avoir un raisonnement pertinent sur ses résultats est aussi très important pour réussir à les analyser correctement.

Cependant ce stage ne m'a pas conforté dans l'idée de continuer dans la voie du BTP malgré le souhait de rentrer à l'ISA BTP. Il a donc été d'une grande aide afin de préparer mon avenir et surtout m'a aidé dans le choix de mes futures études.

Bibliographie

Md. Safiuddina, Marcelo Gonzalezb, Jingwen Caob and Susan L. Tigheb (2014) State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete.

AFGC. Groupe de travail. (2004) Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages : maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Edition AFGC. 245 p.

Baroghel-Bouny, V. (1994) Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons : Méthodes, analyses, interprétations. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Edition LCPC. pp. 65, 72-74, 103.

Fabrice Deby (2008) Approche probabiliste de la durée des bétons en environnement marin.

CIMBéton, (2005) Les constituants des bétons et des mortiers. Collection Technique CIMBéton. Tome 1. pp. 32, 44. [En ligne] www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.pdf (consulté le 26/04/2017)

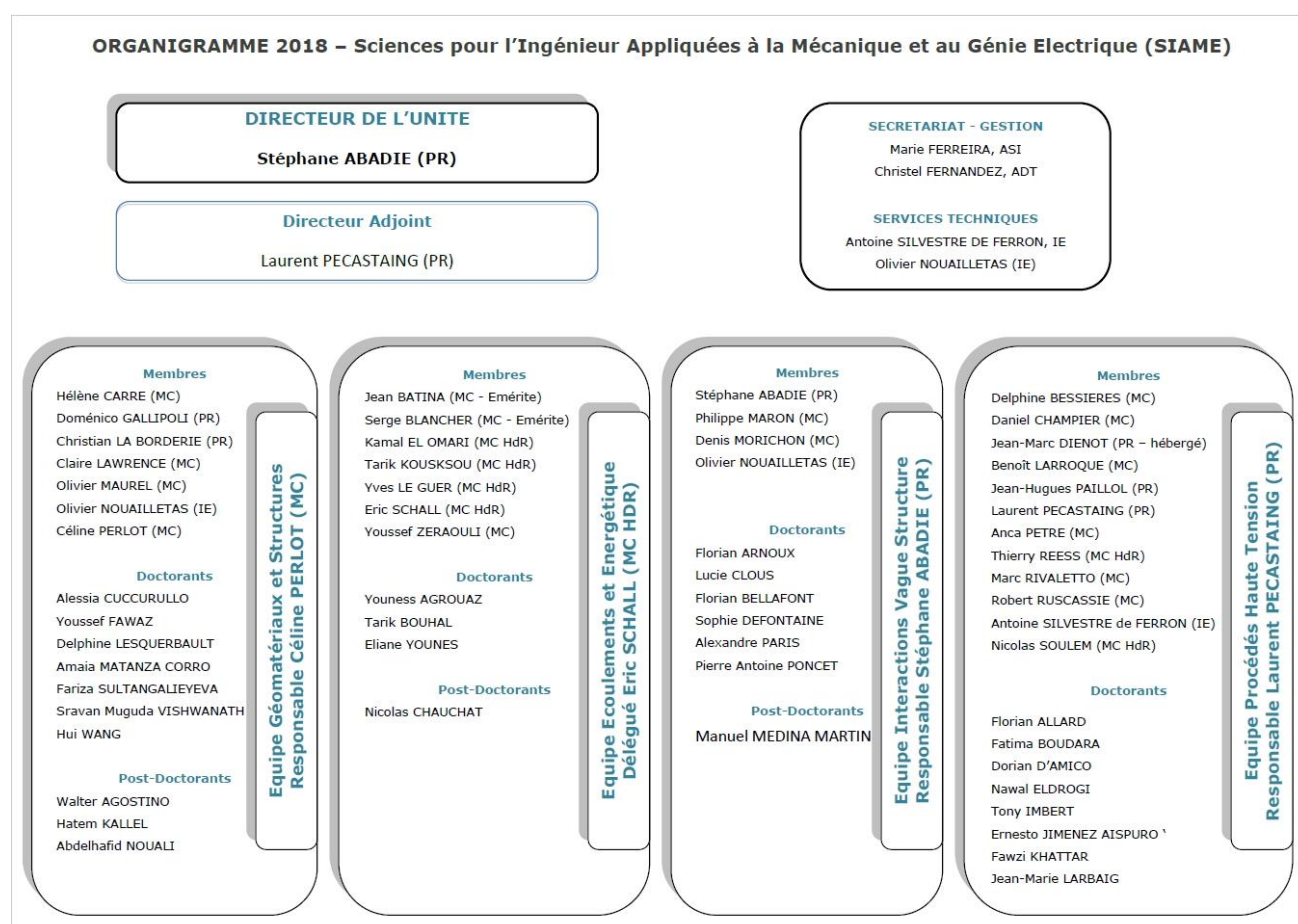
CIMBéton, (2008) Les ouvrages en béton : durabilité, dimensionnement, esthétique. Collection Technique CIMBéton Tome 3. pp. 15-20. [En ligne] www.infociments.fr/telecharger/CT-G12.pdf

Souchu, P. (2009) Hydratation du ciment portland. <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland>.

Tengfei Fu Cellulose Nano Materials additive to cementitious materials (2017)

Annexes

Annexe 1 : Organigramme du SIAME (2018)



Annexe 2 : Composition du ciment utilisé.

Direction Commerciale
Assistance
et Prescription Clients
Tél : 01 34 77 78 81
Fax : 01 30 98 73 50



Ciments Calcia
HEIDELBERGCEMENT Group

Version du : 06/02/2017
N° DoP : 0333-CPR-5006

Fiche produit

AIRVAULT

CEM V (S-V) 42.5 N CE PM-ES-CP1 NF "PMF2"

Caractéristiques physiques et mécaniques											
Compression en MPa				Eau pâte pure en %	Début de prise en mn	Stabilité en mm	Masse volumique en g/cm ³	Surface Blaine en cm ² /g	Chaleur en J/g		L*
1j	2j	7j	28j						41h	120h	
-	22	31	56	29.5	3H43	0	2.92	5023	275	309	62

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants			
				Nature		Caractéristiques	
Perte au feu	1.5	Principaux		Clinker (K) d'Airvault	CaO/SiO ₂	-	3.1
SiO ₂	31.1	Clinker (K) d'Airvault	56.0		C ₃ S+C ₂ S (%)	-	78
Al ₂ O ₃	10.2				MgO (%)	-	1.2
Fe ₂ O ₃	3.6	Laitier (S) (%)	22.0		Al ₂ O ₃ (%)	-	-
TiO ₂	0.6	Cendres (V) (%)	22.0		C ₃ S (%)	-	66
MnO	0.1				C ₂ S (%)	-	11
CaO	46.2	Secondaires			C ₃ A (%)	-	7
MgO	2.7	Calcaire (LL) (%)			C ₄ AF (%)	-	10
SO ₃	2.8						
K ₂ O	1.27						
Na ₂ O	0.37	FDEC (%)		Calcaire (L ou LL)	CaCO ₃ (%)		93.3
P ₂ O ₅	0.4				Vb (g/100g)		0.5
S-	0.17				TOC (%)		0.1
Cl-	0.01	Sulfate de calcium		Laitier (S)	Laitier vitreux (%)		97.5
Insoluble	-	Gypse	3.1		(CaO+MgO)/SiO ₂		1.4
Na ₂ O eq.	0.77	Anhydrite	-		CaO+MgO+SiO ₂ (%)		83.2
Na ₂ O eq. Actif	0.69	Additifs		Cendres (V)	PF (%)		4.6
C ₃ A	-	Agent de mouture	0.035		CaO réactive (%)		< 10
C ₃ A+0.27xC ₃ S	-	Agent réducteur de Cr VI	0.40		SiO ₂ réactive (%)		40.2
C ₄ AF+2xC ₃ A	-			Fumées de silice (D)	SiO ₂ amorphe (%)		-
					PF (%)		-
					Aire massique BET (m ² /kg)		-

Etablissement	Vrac	Big bag	Sac 25 kg	Sac 35 kg
Usine d'Airvault	Oui	Non	Non	Oui

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Les résultats d'auto-contrôle sont disponibles sur demande
à la Direction Commerciale Assistance et Prescription Clients



Siège social :
Rue des Tachettes
78693 Querville
Tél : 01 34 77 78 80
Fax : 01 34 77 78 86

SIS au capital de 525 556 525 €
Siren 824 895 648 RCS Versailles

Table 1 — The 27 products in the family of common cements

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass ^a)										
			Main constituents										Minor additional constituents
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone		
			K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Portland-composite cement ^c	CEM II/A-M	80-94	6-20									0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement ^c	CEM IV/A	65-89	—	11-35					—	—	—	0-5
		CEM IV/B	45-64	—	36-55					—	—	—	0-5
CEM V	Composite cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-30			—	—	—	—	0-5
		CEM V/B	20-36	31-50	—	31-50			—	—	—	—	0-5

a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.
b The proportion of silica fume is limited to 10 %.
c In Portland-composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B and in composite cements CEM V/A and CEM V/B the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for example see clause 8).

Annexe 3 : Résultats détaillés des essais mécaniques.

MR	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	4,555437088	25,60744246
28 jours	4,618280746	29,39817272

NS2%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	4,933667257	24,39487967
28 jours	5,185744725	30,93800974
91 jours	6,910219081	44,35860757

NS3%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	6,389387932	38,54772415
28 jours	6,855586742	54,45145833
91 jours	0	0

NS4%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	5,361296542	30,1751547
28 jours	5,83053808	36,78185602
91 jours	6,862266571	54,49704515

CNT 0,015%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	4,801585701	#DIV/0!
28 jours	5,417181472	30,09274752
91 jours	5,945141346	39,81914921

CNT 0,0006%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	4,414629399	22,73260913
28 jours	4,913120728	28,08672132
91 jours	#DIV/0!	#DIV/0!

CNT 0,003%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	4,587730491	#DIV/0!
28 jours	6,000300784	32,56967189
91 jours	6,279215782	43,74643995

CNF 0,15%	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)
7 jours	5,969941832	#DIV/0!
28 jours	6,595429642	38,69605708
91 jours	7,203220025	56,51484381

Résumé

Au cours de ces dernières années, la nanotechnologie se développe à une vitesse très importante. On la voit notamment se développer dans plusieurs domaines de recherche tels que l'électronique, l'automobile, la médecine et bien d'autre encore.

En raison de ses utilisations, il y a donc un fort intérêt de recherche de l'influence des nanoparticules dans les matériaux de construction et plus particulièrement dans les mortiers et bétons.

Cette étude propose ainsi d'étudier l'influence des nanomatériaux sur les propriétés des mortiers afin de savoir s'il est possible de les utiliser afin de concevoir des bétons résistant à l'environnement marin (force des vagues, diffusion des ions chlorures...)

Abstract

In recent years, nanotechnology is developing at a very high rate. It is seen in particular to develop in several fields of research such as electronics, automotive, medicine and much more.

Because of its uses, there is therefore a strong interest in researching the influence of nanoparticles in building materials and especially in mortars and concretes.

This study proposes to study the influence of nanomaterials on the properties of mortars in order to know if it is possible to use them in order to design concretes resistant to the marine environment (Strength of waves, diffusion of chloride ions...)