

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARRA

BOUMERDES

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

**DEPARTEMENT
DE GENIE DES MATERIAUX**

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Magister
En Sciences et Génie des Matériaux
Option : Physique et Mécanique des Matériaux

SUR LE THEME :

**Accélération du durcissement par énergies renouvelables
du béton frais et caractérisation du béton durci.**

Présentée par :

M^{elle} BOUTIBA Aldjia

Dirigé par :

M^r: DAHLI Mohamed

Devant le jury composé de :

- | | | |
|---|------------------|-------------|
| 1. M ^r ABADLIA M ^{ed} Tahar | Prof, U.M.B.B. | President ; |
| 2. M ^r DAHLI Mohamed | M.C, U.M.M.T.O. | Rapporteur |
| 3. M ^r AIT TAHAR Kamel | Prof, U.M.M.T.O. | Examineur ; |
| 4. M ^r HADJ ARAB Amar | D.R, C.D.E.R. | Examineur ; |
| 5. M ^r BENMOUNAH Abdelbaki | M.C, U.M.B.B. | Examineur ; |

REMERCIEMENTS

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadreur, le Dr DAHLI Mohammed.

Je le remercie pour le sujet, pour ses corrections, ses conseils éclairés et sa constante disponibilité et sa grande qualité humaine.

Je tiens à exprimer mes plus vives reconnaissances à tous les membres de jury :

- Professeur Abadlia M^{ed} Tahar, directeur du laboratoire des matériaux minéraux et composites, université M'hamed Bougarra Boumerdes.

- Docteur Benmounah Abdelbaki, maître de conférence université M'hamed Bougarra Boumerdes,

- Professeur Ait Tahar Kamel, université Mouloud Mammeri Tizi ouzou,

- Hadj Arab Amar directeur de recherche au laboratoire photovoltaïque CDER, Alger.

Mes plus sincères remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé à la réalisation de ce travail :

- Mr Benouali Hamid et Mr Benna Youcef du CNERIB Souidania pour leur gentillesse et leur grande disponibilité.

- Mr Saidi Mohammed chef du département génie des matériaux à l'université de Boumerdes pour toutes les facilités qu'il m'a apporté.

- Mr et Mme Izemur de la bibliothèque de la faculté science de l'ingénieur à l'université de Boumerdes.

- L'administration du CDER, qui ma facilité l'accès au centre d'une manière générale et à la bibliothèque en particulier.

- Messieurs, Chenak Abdelkrim responsable du laboratoire thermique du CDER, Koussa Mustapha de la division thermique CDER, Fekraoui Amar et les demoiselles Ouali Salima, Kedaid Fatma Zohra et Rezig Saida de la division géothermie du C.D.E.R. Je tiens à les remercier pour m'avoir fait profité de leur connaissances.

- La Bibliothécaire du C.D.E.R. pour m'avoir accordé sa confiance.

Je remercie pareillement l'ensemble des membres du laboratoire C.E.T.I.M. de Boumerdes pour m'avoir aidé à mener à terme la partie expérimentale notamment Messieurs, Madi Iyes, Bellal Ahmed, Serkhane Belaid, Cherifi Farid, Amellal Rachid, Marmmate Ali et Amara Fatah.

Mes pensées vont également à toute ma famille et particulièrement à ma mère et à tous mes amis pour leur soutien et leur encouragement permanent.

Résumé :

Le béton reste aujourd'hui le matériau de construction le plus économique de ce fait le plus utilisé dans le domaine du bâti. Il répond parfaitement aux critères de résistances mécaniques et de durabilité, mais la lenteur avec laquelle il acquiert ses résistances mécaniques reste l'un des inconvénients principaux. A cet effet plusieurs solutions sont aujourd'hui employées pour atteindre des résistances élevées au jeune âge (quelques heures après la prise), à savoir l'utilisation de la chaleur sous forme thermique et électrique, l'utilisation des ciments dotés d'un durcissement rapide, l'utilisation des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement. Du côté énergétique, le béton consomme beaucoup d'énergie pour atteindre un état avec lequel il est capable de supporter des charges sans se déformer ni perdre de ces capacités portantes.

L'objectif de notre travail de recherche est de résoudre deux problématiques, la première est d'accélérer le durcissement du béton frais c'est-à-dire atteindre des valeurs de résistances mécaniques, dans quelques heures, avoisinant les 60 à 70% des résistances à 28 jours de durcissement normal. La deuxième problématique est d'utiliser une énergie, comme source de chaleur, non polluante répondant aux exigences de la politique du développement durable. Dans notre travail de recherche nous avons opté pour l'utilisation de l'énergie géothermique pour accélérer le durcissement du béton, ce choix se justifie par l'abondance de sources géothermales sur le territoire national Algérien.

Mots clés : béton frais, résistances mécaniques, durabilité, durcissement rapide, traitement thermique, développement durable, énergie géothermique.

Abstract:

Today, concrete remained the most economic material of construction, of this fact it is the most used in the domain of the structure. It perfectly answers the criterias of mechanical resistances and durability, but the slowness with which it acquires its mechanical resistances rest one of the main inconveniences. To this fact several solutions are used today to reach raised resistances at the young age (some hours after the hold), to know the use of the heat under thermal and electric shape, the use of the cements endowed with fast hardening, the use of the accelerators adjuvants of hold and hardening. Of the energizing side, the concrete also consumes a lot of energy to reach a state with which, it is capable to support some loads without distorting themselves to lose these structural capacities nor.

The objective of our research work is to solve two problematic; the first is to accelerate the hardening of the fresh concrete that wants to tell to reach values of mechanical resistances, in some hours, neighboring the 60 to 70% of the resistances to 28 days of normal hardening. The second problematic is to use energy, like source of heat, non polluting respondent to the requirements of the politics of the lasting development. In our work of research we opted for the use of the geothermal energy to accelerate the hardening of the concrete, this choice justifies itself by the abundance of sources géothermales on the Algerian national territory

Keywords: fresh concrete, mechanical resistances, durability, fast hardening, thermal treatment, lasting development, geothermal energy.

ملخص

تضل الخرسانة المادة الأكثر إقتصادا وبالتالي الأكثر استعمالا في ميدان التعمير في أيامنا . فهو يستجيب لمعايير المقاومات الميكانيكية والديمومة لكن يبقى بطئ إكتسابه لهذه المقاومات من أهم العوائق، وقد إستعملت العديد من الحلول بهذا الصدد لبلوغ مقاومات عالية في وقت قياسي(بضع ساعات بعد الأخذ) أي إستعمال الحرارة على شكل طاقة حرارية و طاقة كهربائية ، إستعمال إسمنت سريع التصلب ، إستعمال مضافات مسرعة للأخذ والتصلب. ومن الناحية الطاقوية فإن الخرسانة تستهلك الكثير منها لتبلغ حالة تمكنها من تحمل الأثقال دون تشوه أو فقدان لخصائص

إن الهدف من هذا البحث هو حل مشكلين : الأول هو تسريع تصلب الخرسانة الجديدة ، أي بلوغ قيم مقاومات ميكانيكية ، خلال بضع ساعات ، تقارب 60 إلى 70 % من المقاومات التي تبلغها خلال 28 يوما من التصلب العادي ، أما الثاني فهو إستعمال طاقة غير ملوثة كمصدر للحرارة وبالتالي تستجيب لشروط سياسية التنمية المستدامة ، وفي بحثنا هذا ارتأينا لإستعمال الطاقة الجيوحرارية لتسريع تصلب الخرسانة و يبرر هذا الاختيار بوفرة الينابيع الحرارية على مستوى التراب الوطني الجزائري .

مفتاح الكلمة: الخرسانة الجديدة، المقاومات الميكانيكية، الديمومة، تسريع تصلب، التنمية المستدامة، الطاقة الجيوحرارية.

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION GENERALE	01

CHAPITRE I

MATERIAU BETON ET LES PHENOMENES D'HYDRATATION ET DE DURCISSEMENT

I. INTRODUCTION	05
II. PRESENTATION DU MATERIAU BETON	05
II.1. Composition du béton	05
II.1.1. Le ciment	05
II.1.2. Les granulats	09
II.1.3. L'eau de gâchage	10
II.1.4. Les adjuvants	11
II.2. Propriétés des bétons	12
II.2.1. Propriétés physiques	12
II.2.2. Propriétés mécaniques	15
II.2.3. Durabilité	16
II.3. Différents types de bétons	17
III. DURCISSEMENT DU BETON	20
III.1. L'hydratation	20
III.1.1. Théories d'hydratation du ciment portland	29
III.1.2. Hydratation des composants du ciment portland	22
III.1.3. Cinétique d'hydratation	25
III.2. Les mécanismes de prise et durcissement	26
IV. CONCLUSIONS	27

CHAPITRE II

ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON

I. INTRODUCTION	30
II. EVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES DU BETON	30
III. METHODES D'ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON	33
III.1. Les ciments a durcissement rapide	34
III.2. Le surdosage en ciment	34
III.3. Utilisation d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement du béton	35
III.4. Utilisation des ciments a forte chaleur d'hydratation initiale	35
III.5. Traitement thermique	35
IV. ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON PAR TRAITEMENT THERMIQUE	36
IV.1. Intérêt d'un traitement thermique	36
IV.2. Les différents types du traitement thermique	37
IV.2.1. Traitement thermique passif ou « auto étuvage »	37
IV.2.2. Traitement thermique actif	39
IV.3. Les techniques du traitement thermique	40
IV.3.1. Le traitement thermique par l'électricité	40
IV.3.2. Le traitement thermique par rayonnement infrarouge	41
IV.3.3. Le traitement thermique par l'eau chaude (Hydrothermale)	41
IV.3.4. Le traitement thermique par la vapeur d'eau «étuvage»	42
IV.3.5. Le traitement thermique par fluides caloporteurs recyclés	43
IV.3.6. Le traitement thermique par air chaud	43
IV.4. Les conditions du traitement thermique	43
IV.4.1. Les étapes du traitement thermique	44
IV.4.2. L'évaporation	50
IV.5. L'influence de la composition du béton	51
IV.6. Les études théoriques concernant l'influence de la température sur la qualité du béton	54
V. CONCLUSIONS	55

CHAPITRE III

ENERGIES ET DEVELOPPEMENT DURABLE

I. INTRODUCTION	57
II. NOTION DE DEVELOPPEMENT DURABLE	58
II.1. Définition	58
II.2. Les traités du développement durable	59
II.3. La législation algérienne par rapport au développement durable	61
III. PERSPECTIVES DE DEMANDE D'ENERGIE	62
IV. LES ENERGIES NON RENOUVELABLES	64
IV.1. Les énergies fossiles	64
IV.2. L'énergie nucléaire	66
IV.3. Les réserves mondiales en énergies non renouvelables	67
V. LES ENERGIES RENOUVELABLES	69
V.1. Introduction	69
V.2. Types d'énergies renouvelables	70
V.2.1. Energie solaire	70
V.2.2. Énergie éolienne	72
V.2.3. Énergie hydraulique	73
V.2.4. Énergie marémotrice	74
V.2.5. Energie des vagues	75
V.2.6. Energie Biomasse	76
V.2.7. Energie géothermique	77
V.3. Exploitation de l'énergie géothermique	79
V.3.1. Types de géothermie	79
V.3.2. Condition d'exploitation de l'énergie géothermique	79
V.3.3. La géothermie dans le monde	80
V.3.4. Les ressources géothermiques en Algérie	82
V.3.5. Exploitation de la géothermie en Algérie	83
VI. CONCLUSIONS	84

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

I. INTRODUCTION	87
II. PARTIE EXPERIMENTALE	88
II.1. Matériaux utilisés	91
II.2. Résultats expérimentaux et leur Interprétation	101
1. Influence du rapport E/C sur les résistances à la compression	102
2. Influence de la température et du type de traitement thermique sur les résistances à la compression	105
3. Influence de la préprise sur les résistances à la compression	111
III. CONCLUSIONS	112
CONCLUSION GENERALE	113
RECOMMANDATIONS	114
REFERENCES	116
ANNEXE	125

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau n°1 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur caractéristiques	08
Tableau n°2 : Les grandes dates du développement durable	60
Tableau n°3 : réserves et ressources d'énergies non renouvelables	68
Tableau n°4 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température	80
Tableau n°5 : Evolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en Mwe (EurObserv'ER, août 2003)	81
Tableau n°6 : Equivalent du sable de Baghlia : NF P18-598	92
Tableau n°7 : Equivalent du sable de Boussaâda : NF P18-598	92
Tableau n°8 : Analyse granulométrique du sable de Baghlia : NF P18-560	93
Tableau n°9 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda : NF P18-560	94
Tableau n°10 : Résultats des essais physiques sur sables selon la norme NF P18-555	96
Tableau n°11 : Analyse granulométrique du gravier de fraction 3/8 suivant la norme NF P18.560	96
Tableau n°12 : Analyse granulométrique du gravier de fraction 8/15 suivant la norme NF P18.560	97
Tableau n°13 : Résultats des essais physiques sur graviers de fraction 3/8 et 8/15 suivant la norme NF P18-554	99
Tableau n°14 : Analyse chimique du ciment	99
Tableau n°15 : Analyse minéralogique du ciment	99
Tableau n°16 : Essais physiques sur ciment NF EN 196-3, NF EN 196-6	100
Tableau n°17 : Essais mécaniques sur ciment NF EN 196-1	100
Tableau n°18 : Dosage en constituants du béton	101
Tableau n°19 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton témoin de consistance ferme	102.
Tableau n°20 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton témoin plastique.	103

Tableau n°21 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton de consistance ferme avec traitement hydrothermique	105
Tableau n°22: Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton de consistance ferme avec étuvage.	107
Tableau n°23 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton plastique avec traitement hydrothermique.	108
Tableau n°24 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton plastique avec étuvage.	110
Tableau n°25: Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton ferme avec étuvage sans préprise.	110

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure n°1 : Microstructure de la pâte de ciment	22
Figure n°2 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment portland	26
Figure n°3 : Processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors [1980].	31
Figure n°4 : Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression au jeune âge du béton, d'après Byfors [1980].	32
Figure n°5 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton, d'après Kosmatka et Al.[1991].	33
Figure n°6 : Le calorimètre de Langavant	38
Figure n°7 : schéma du calorimètre de Langavant	38
Figure n°8 : une benne chauffante	39
Figure n°9 : Préchauffage du béton par chauffage des granulats	39
Figure n°10 : Préchauffage du béton par injection de vapeur dans le malaxeur	39
Figure n°11 : Coffrage chauffant	40
Figure n°12 : Schéma d'un équipement servant au mûrissement du béton à l'eau chaude	42
Figure n°13 : Chauffage d'une poutre sous bâche par vapeur perdue	43
Figure n°14 : Principe du cycle de traitement thermique d'un béton	44
Figure n°15 : Influence de la préprise sur les résistances à la compression à l'âge de 28jours.	45
Figure n°16 : Influence de la vitesse d'élévation de la température sur les résistances en compression à long terme, MAMILLAN (1973).	46
Figure n°17 : Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la température	47
Figure n°18 : Résistance en compression en fonction de la température et de la durée de Traitement	49
Figure n°19 : Influence de la température maximale sur les résistances en compression à long terme MAMILLAN (1973).	49
Figure n° 20 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps (CPA N°1)	52
Figure n°21 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps (CPA N°1)	52
Figure n°22 : Influence du rapport E/C sur la résistance en compression immédiat ciment (CPA 400)	53
Figure n°23 : L'effet de serre artificiel	57
Figure n°24 : Schéma du développement durable	60
Figure n°25 : Consommation mondial en énergie primaire	63
Figure n°26 : Le charbon	65

Figure n°27 : Installation de capteurs photovoltaïque	71
Figure n°28 : Installation du capteur à effet de serre pour la production d'eau chaude Sanitaire	72
Figure n°29 : Aérogénérateur (INRA- Adrar)	73
Figure n°30 : Le traditionnel moulin à vent	73
Figure n°31 : Installation pour la transformation d'énergie hydraulique en énergie électrique.	74
Figure n°32 : Vue d'ensemble du barrage de la Rance	75
Figure n°33 : Le waveDragon	76
Figure n°34 : Principe de Fonctionnement du waveDragon	76
Figure n°35 : Cycle du CO ₂	77
Figure n°36 : Relation entre profondeur et température de l'eau souterraine	78
Figure n°37 : la structure interne du globe	78
Figure n°38 : Un geyser islandais	78
Figure n°39 : Carte de température des sources thermales du nord de l'Algérie	83
Figure n°40 : Zones géothermique préférentielles et potentiel à l'exhaure	84
Figure n°41 : Les cycles du traitement thermique des éprouvettes en béton pour des températures de 60 et de 80°C..	87
Figure n°42 : éprouvette à béton d'essai de 15x15x15 cm de dimensions	89
Figure n°43 : Caisson pour traitement thermique du béton	89
Figure n°44 : Eprouvettes en béton immergées dans le caisson pour traitement thermique	90
Figure n°45 : Courbes granulométriques des sables de Baghliia et de Boussaâda suivant la norme NF P18.560	95
Figure n°46 : Courbe granulométriques des graviers de fraction 3/8 et 8/15 suivant la norme NF P18.560	98
Figure n°47 : Variation de la résistance à la compression en fonction de E/C pour béton témoin de consistance ferme et plastique	103
Figure n°48 : Variation de la résistance à la compression en fonction de E/C pour le béton témoin et les bétons traités	104
Figure n°49 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin ferme à 28jours avec les résistances à la compression après démoulage des bétons fermes chauffés	106
Figure n°50 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin ferme à 28jours avec les résistances à la compression à 28 jours des bétons fermes chauffés	108
Figure n°51 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin plastique à 28jours avec les résistances à la compression des bétons plastiques chauffés après démoulage et à 28 jours d'age	109
Figure n°52 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin ferme à 28jours avec les résistances à la compression des bétons ferme chauffés avec et sans préprise après démoulage et à 28 jours d'age	111

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction. Ces performances ne cessent de s'améliorer, en l'occurrence les résistances mécaniques et la durabilité. Hier c'était le béton aujourd'hui ce sont les bétons, grâce au développement technologique et à la recherche scientifique des nouveaux types de béton ont été créés et employés à savoir le béton compacté au rouleau (BCR), les bétons de hautes et de très hautes performances (BHP et BTHP), les bétons de fibres métalliques et synthétiques, les bétons autoplaçants (BAP) la liste est encore très longue. Ces différents types de bétons seront sans aucun doute le matériau de demain. Du côté des résistances à la compression les bétons aux poudres réactives dépassent les résistances des aciers, pour la durabilité le béton ne brûle pas comme le bois, il ne se corrode pas aussi rapidement que les aciers.

L'inconvénient principal du béton est la lenteur avec la quelle il acquiert ses résistances mécaniques. A cet effet plusieurs solutions sont aujourd'hui employées pour atteindre des résistances élevées au jeune age (quelques heures après la prise), à savoir l'utilisation de la chaleur sous forme thermique et électrique, l'utilisation des ciments dotés d'un durcissement rapide, l'utilisation des adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement.

Toutefois la fabrication du béton consomme une quantité considérable d'**énergie**, engendre l'émission d'une quantité importante de gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique de notre planète. Cependant pour parvenir et s'inscrire dans le contexte d'une politique de « **développement durable** », le matériau béton doit s'adapter de manière continue à de nouvelles exigences, satisfaire des besoins socioéconomiques réels avec le moins d'impact possible sur l'environnement, afin de ne pas compromettre les générations futures, Protocole de Kyoto de 1997, qui préconise d'adopter des décisions prudentes pour réduire le risque de futurs changements climatiques.

Plusieurs organisations ont développé des scénarios de l'avenir énergétique à court, moyen et long terme. Ces scénarios font état d'une augmentation considérable de la consommation énergétique primaire mondiale, à laquelle s'ajoute l'épuisement des ressources fossiles et les risques climatiques et écologiques, qu'elles engendrent. Du côté de l'énergie nucléaire, en plus des déchets radioactifs, il y'a les accidents des centrales nucléaires (la catastrophe de la centrale

de Tchernobyl en Ukraine d'avril 1986) et la prolifération des armes nucléaires, qui font qu'elle est remise complètement en question par certaines sociétés.

Parmi les énergies exemptes d'émission de gaz à effet de serre et respectueuses de l'environnement, on a les énergies douces appelées énergies renouvelables.

Afin de s'inscrire parfaitement dans les orientations directrices de la stratégie environnementale des Nations Unies, le gouvernement algérien s'est fixé comme priorité, dans le domaine de recherche et du Développement, l'axe Energies Renouvelables, qui est un potentiel techniquement exploitable et considérable dont la qualité des gisements est telle que des investissements rentables peuvent être envisagés, notamment en énergies solaire et géothermique.

Le but de notre travail de recherche est de démontrer la faisabilité d'accélérer le durcissement d'un béton frais par l'énergie douce renouvelable qui est l'énergie géothermique dans des conditions d'immersion totale sous l'eau chaude et enfin d'étudier certaines caractéristiques mécaniques et physiques du béton durci dans telles conditions. L'énergie Géothermique peut, à notre avis constituer sous certaines conditions, une des solutions pour accélérer le durcissement d'un béton frais. Parmi les conditions qui nous ont poussé à sélectionner l'énergie géothermique comme source thermique de traitement du béton on peut citer :

- Une énergie qualifiée de douce et renouvelable, contrairement à l'énergie éolienne et solaire, elle est disponible en tous temps, la nuit et le jour l'hiver et l'été ;
- Ne dépend d'aucune autre source d'énergie.

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres et qui sont comme suit :

Le premier chapitre qui se divise en deux parties. La première est un aperçu général du béton comme matériau et ses constituants : le ciment Portland, les granulats, l'eau de gâchage, les adjuvants et leur influence. Ainsi que les caractéristiques physiques, mécaniques du béton et sa durabilité. La deuxième partie traite les étapes complexes de maturation du béton et l'importance des différents constituants minéralogiques du ciment portland.

Le deuxième chapitre est une présentation des méthodes d'accélération du durcissement d'un béton frais et s'intéresse particulièrement à l'intérêt d'un traitement thermique, aux types et techniques de traitement thermique du béton frais. Ainsi qu'à l'influence des conditions de

traitement thermique et des constituants du béton sur les résistances mécaniques à court et à long terme.

Le troisième chapitre est consacré aux énergies et au développement durable et il se divise en quatre parties. Dont la première est une présentation des traités du développement durable, de la législation algérienne par rapport au développement durable. La deuxième partie traite les perspectives énergétiques mondiales. Pour la troisième partie elle représente un aperçu sur les énergies non renouvelables et les réserves mondiales de ces énergies. Enfin la dernière partie est consacrée aux énergies renouvelables, particulièrement à l'énergie géothermique et ces différentes utilisations et aussi au potentiel géothermique de l'Algérie.

Le quatrième chapitre est consacré à une approche expérimentale qui nous permet d'étudier et de caractériser et en fin de choisir les différents matériaux utilisés pour la confection du béton d'étude, de réaliser le traitement thermique pour deux températures choisies au préalable (60 et 80°C) sous deux régimes différents (sous l'eau et dans la vapeur d'eau) et enfin réaliser des essais mécaniques des éprouvettes ayant subies le traitement thermique pour les comparer avec d'autres éprouvettes qui n'ont subi aucun traitement thermique.

CHAPITRE I

LE MATERIAU BETON ET LES PHENOMENES D'HYDRATATION ET DE DURCISSEMENT

I. INTRODUCTION :

Le béton comme matériau de construction le plus utilisé dans la construction, il permet de réaliser des prouesses technologiques telles que les barrages, ponts, immeubles, tunnels, centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité et son faible coût et d'autres qualités. Les origines du béton de terre remontent à la plus haute antiquité, mais c'est au XX^{ème} siècle que l'utilisation du béton se généralise aux dépens de l'acier et de la maçonnerie. Aujourd'hui, le béton doit répondre à un ensemble de spécifications très précises qui sont la rhéologie, la résistance au jeune âge, les aspects de parement, la résistance à 28 jours, la durabilité etc. [13, 28,110].

Le durcissement du béton est le passage d'un état plastique à un état durci et ce grâce à un résultat d'un certain nombre de réactions chimiques entre l'eau de gâchage et les grains de ciment appelée réaction d'hydratation du ciment portland.

II. PRESENTATION DU MATERIAU BETON :

II.1. COMPOSITION DU BETON :

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats (gravier, sable et filler), de ciment, d'eau de gâchage et d'adjuvants pour améliorer ou acquérir certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange [111].

II.1.1. LE CIMENT:

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant les 1450 °C. Broyé sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau il s'hydrate et forme des minéraux hydratés très stables. Les principaux composés du ciment portland sont :

Les silicates tricalciques (alite) : $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C₃S]

Les silicates bicalciques (belite) : $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C₂S]

Les aluminates tricalciques : $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C₃A]

Les aluminoferrites tétracalciques : $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C₄AF]

Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .).

Les silicates de calcium C_3S et C_2S représentent à peu près 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge [11,15, 53].

1. Classification des ciments :

a) Classification suivant la composition : Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1[1] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

1. CEM I Ciment Portland Artificiel;
2. CEM II Ciment Portland composé;
3. CEM III Ciment de haut fourneau;
4. CEM IV Ciment pouzzolanique;
5. CEM V Ciment aux laitiers et aux cendres.

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certains de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés [42]. Les différents types d'ajouts normalisés sont :

Laitier granulé de haut fourneau (S) : NF P 18-506 [2] obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable. Le rapport massique $\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$ doit être supérieur à 1,0 d'après la norme NF P 18-506 [2].

Matériaux pouzzolaniques: sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en SiO_2 réactif doit être au moins égale à 25 % en masse. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$ dissous. NF EN 197-1 [1]). On distingue :

- Pouzzolane naturelle (P) : matériau d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires.

- Pouzzolane naturelle calcinée (Q) : matériau d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

Cendres volantes (V, W) : NF EN 450 [3] produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques [42] on distingue deux familles de cendre volantes :

- Cendres volantes siliceuses (V) : sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques, constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) ainsi que d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et autres composants. La teneur en oxyde de calcium (CaO) $<10,0$ % en masse, la teneur en silice (SiO_2) réactive >25 % en masse.
- Cendres volantes calciques (W) : présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif $>10,0$ % en masse, le reste étant de la silice (SiO_2) réactive, d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

Schiste calciné (T) : il est produit dans un four spécial à une température avoisinant les 800 °C Composé de silicate bicalcique et d'aluminate monocalcique, ainsi que de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques.

Filler calcaire (L, LL) : NF P 18-508 [4] est un matériau très finement broyé, Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico-chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques [4].

- la teneur en calcaire (CaCO_3) ≤ 75 % en masse ;
- la teneur en argile $\leq 1,20$ g/100 g ;
- la teneur totale en carbone organique (TOC) $<0,20$ % en masse pour (LL) et $<0,50$ % en masse pour (L).

Fumée de silice (D) : NF P 18-502 [5] provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique, elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe. Poudre d'une extrême finesse de 15000 à 25000 m^2/kg

ce qui lui donne la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciments en diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Mais son dosage est limité à 10% de la masse du ciment pour protéger les armatures dans le béton (problème de PH) [6,28].

b). Classification des ciments suivant les résistances à la compression : La norme européenne NF EN 197-1 [1] classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme EN 196-1 [6], mesurée à 28 jours en six classes de résistance Tableau n° 1.

Tableau n°1 : Exigences mécaniques définies en terme de valeur caractéristiques

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5 N	—	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	—		
42,5 N	$\geq 10,0$	—	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	—		
52,5 N	$\geq 20,0$	—	$\geq 52,5$	—
52,5 R	$\geq 30,0$	—		

c). Classification des ciments suivant le type d'environnement : Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type [15] :

- **Ciment PM : NF P 15-317** [7] résistant à l'eau de mer est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

- **Ciment ES : XP P 15-319** [8] Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.
- **Ciments CP : NF P 15-318** [9] pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{2-} :
 - Ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par pré-tension.
 - Ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

II.1.2. LES GRANULATS: XP P 18-540 [10]

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneaux). Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80 % environ du volume d'un béton, ils sont inertes en principe mais peuvent favoriser certaines réactions d'hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C_3S en présence de filler d'origine calcaire. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [82]. En effet, la nature, la quantité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais. Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme XP P 18-540 [10] sont les suivantes :

- fillers 0/D ou $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sablons 0/D ou $D \leq 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;

- sables 0/D ou $1 < D \leq 6,3$ mm ;
- graves 0/D ou $D > 6,3$ mm ;
- gravillons d/D ou $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm ;
- ballasts d/D ou $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

D'après la norme **XP P 18-540**[10] les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes pour :

1. Le gravier : Grains de dimensions allant de 1 à 125 mm, d'après la norme **P18-591** [11] l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments $< 0,5$ mm, le pourcentage de vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être $\leq 1,5\%$ pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et $\leq 3\%$ pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau la norme **NF P18 541** [12] fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques.

2. Le sable : Grains de dimensions allant de 0 à D où $1 < D \leq 6,3$ mm, à l'essai dit Equivalent de Sable (ES) la norme **P 18-598** [13] sont préférable les sable ayant un ES compris entre 75 et 85 % [1], de granularité définie principalement par les paramètres suivant :

- teneur en fines (passant à 0,08mm $\leq 12\%$) ;
- le module de finesse ($M_f = 1,8$ à $3,2$) le meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité se situe à $2,5 \pm 0,35$ environ ;
- une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour la maniabilité du béton (norme P18-541) [12].

3. Les fillers : Grains de dimensions allant de 0 à D ou $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm d'après la norme XP P 18-540 [10]).

II.1.3. L'EAU DE GACHAGE : NF EN 1008 [14].

Est un ingrédient essentiel du béton, il joue deux fonctions principales: confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le

rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc [88]. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008 [14], les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eau de mer et eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques et mécaniques.

II.1.4. LES ADJUVANTS : NF EN 934-2 [15].

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci. Les adjuvants sont classés par la norme NF EN 934-2 [15].suivant leurs actions principales, même s'ils ont plusieurs actions secondaires en :

- Plastifiant/réducteur d'eau ;
- Superplastifiant/haut réducteur d'eau ;
- Rétenteur d'eau ;
- Entraîneur d'air ;
- Accélérateur de prise ;
- Accélérateur de durcissement ;
- Retardateur de prise ;
- Hydrofuge de masse ;
- Plastifiant/réducteur d'eau / retardateur de prise ;
- Superplastifiant / haut réducteur d'eau/retardateur de prise ;
- Plastifiant / réducteur d'eau / accélérateur de prise.

Il existe aussi d'autres adjuvants comme : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, les générateurs de gaz [7,18,42].

II.3. PROPRIETES DES BETONS:

II.3.1 PROPRIETES PHYSIQUES :

1. Ouvrabilité:

Est l'aptitude d'un béton à une bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ces caractéristiques. Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (norme NF P 18-451 [16]). et l'essai d'étalement à la table à secousses. Mais les essais vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [56].

2. Le Retrait :

Est une diminution dimensionnelle du béton en l'absence de chargement, due à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment, selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton cinq types de retrait : le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation.

Ces retraits provoquent des contraintes internes qui se matérialisent par l'apparition de fissures micro et macroscopiques à la surface de l'élément de béton ou dans l'ensemble de sa masse, ces fissures détériorent l'esthétique et endommagent l'élément, tels l'accélération de la corrosion du béton et des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs [101].

- **Retrait plastique:**

Est le premier retrait de dessiccation qui se développe à la surface d'un béton encore à l'état plastique, c'est-à-dire l'eau de gâchage n'est pas encore liée aux constituants du ciment, elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement donc elle peut s'évaporer comme elle peut être absorbée par un coffrage en bois trop sec ou par des granulats poreux non humidifiés.

Il dépend de la vitesse de dessiccation qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Ce retrait est moins important pour le béton par rapport à la pâte de ciment et au mortier, car le squelette de granulats s'oppose aux contraintes. L'amplitude du retrait plastique est 5 à 10 fois plus élevée que celle du retrait observé après prise, et il est irréversible, conduit à des fissures peu profondes limitées à la surface supérieure du béton. Ce type de retrait peut être limité par l'utilisation des coffrages étanches non absorbant ou en fournissant au béton à partir de ses surfaces libres de l'eau, ou en scellant ces surfaces pour empêcher toute évaporation [4,28].

- **Retrait endogène :**

Endogène parce qu'inhérent aux matériaux avec absence de tout échange d'eau avec l'extérieur. L'évolution de ce retrait est directement liée à la cinétique d'hydratation des grains de ciment. Le retrait endogène peut avoir deux origines :

1. Une origine chimique due à l'hydratation de la pâte de ciment qui s'accompagne d'une diminution de volume absolu, ceci vient du fait que le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes initiaux de l'eau et du ciment, c'est le phénomène de la contraction Le Chatelier [6, 28,43].
2. Une origine physique, la porosité très fine créée par l'hydratation du ciment draine de l'eau des capillaires les plus grossiers ce qui assèche, le réseau des pores capillaires. Par suite, même en présence d'un squelette rigide, la dessiccation des capillaires va provoquer un raccourcissement progressif du matériau, appelé retrait hydrique endogène (retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation). Mais si le béton est mûri à l'eau, les gros capillaires drainent à leur tour l'eau de la source extérieure, par conséquent, il n'y a plus de phénomène de dessiccation, il se trouve même que le béton gonfle (Le Chatelier, 1904) [6,28,43].

- **Retrait de séchage :**

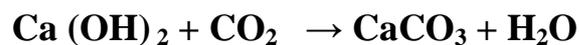
Est un retrait de dessiccation qui se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant, son intensité dépend de la réserve d'eau disponible dans le matériau après les réactions d'hydratation, et donc directement du rapport E/C et de l'hygrométrie ambiante. Il existe trois principales théories qui expliquent les mécanismes du retrait de dessiccation: la dépression capillaire, la variation de la tension superficielle et la variation de la pression de disjonction [28,101].

- **Retrait thermique :**

Résulte de la baisse de la température du béton tout juste après sa prise, température occasionnée, soit par la chaleur d'hydratation du ciment qui est une réaction exothermique, soit par la variation thermique du milieu de conservation. Le retrait thermique dépend de plusieurs facteurs comme la composition, la finesse de mouture et la quantité du ciment, la forme et les dimensions de l'élément, de la température initiale du béton et la température ambiante, etc... [4,101].

- **Retrait de carbonatation :**

Est un exemple de couplage entre vieillissement et dessiccation, se développe principalement dans les premiers centimètres du béton, le gaz carbonique de l'atmosphère réagit avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Le CO_2 réagit presque avec tous les composants de l'hydrate sauf sulfate de calcium) pour former un carbonate de calcium, cette réaction libère l'eau :



Le retrait est occasionné par l'évaporation de cette eau libérée. Le retrait de carbonatation se traduit par des fissures peu profondes et principalement limitées aux surfaces exposées du béton [14,101].

3. La compacité et la porosité :

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telles que sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. On distingue les pores contenus dans les granulats leur taille et leur volume n'évoluent pas, par contre ceux se trouvant dans la pâte de ciment leur dimension diminue avec la progression d'hydratation on distingue [4,11] :

- Les pores capillaires ($0,01 \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 0,5 \mu\text{m}$) occupent les espaces entre les grains de ciment en suspension dans l'eau, leur taille et leur volume dépendent du rapport E/C. La perméabilité du matériau est essentiellement dépendante de ces pores.
- Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ($\varnothing < 40$ angströms) sont présents dans le gel de C-S-H. Le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport E/C. Ces pores

sont divisés en pores inter-cristallites qui se situent entre les gels et les pores intra-cristallites présents à l'intérieur du gel lui-même.

- Les bulles d'air occlus ($\emptyset > 1$ mm) piégées non intentionnellement à l'intérieur du béton lors du malaxage du béton frais [11].

4. Perméabilité et diffusivité :

La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser pénétrer et traverser par un fluide (eau, air, ou un autre gaz...) sous l'effet d'une pression motrice. Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.), la perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation [11].

La diffusion est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration, elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion [28], les mécanismes et les lois qui régissent la perméabilité et la diffusivité sont différents mais les moyens d'action les limitants sont les mêmes c à d limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire, car le béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs extérieurs.

II.3.2. PROPRIETES MECANIQUES :

1. Résistance mécanique :

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- la nature et la qualité des constituants (ciments, granulats, eau, adjuvant) ;
- les conditions de mise en oeuvre de ces constituants ;
- les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

- **Résistance à la compression :**

Est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3 [17].

- **Résistance à la traction :**

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{t28} [77].

II.3.3. DURABILITE :

Est généralement utilisé pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (**Moranville, Regourd, 1982**), et aussi aux contraintes mécaniques (fluage). La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, compositions des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes aux bétons comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlore (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réactions alcalis granulats, les ions sulfates (oxydations des pyrites contenues dans certains granulats calcaires), ou externes les ambiances hivernales (la répétition des cycles de gel dégel, l'action des sels de déverglaçage, formation de sels gonflants), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux de pluies de neiges, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides, les bases ainsi que toutes les solutions résultant de la dissolution de sels ou de gaz [31].

Le béton est caractérisé par une basicité accentuée dû à la nature de la pâte durcie qui est composé de :

- de 15 à 20 % de portlandite : base forte ;
- environ 70% de CSH : considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte $Ca(OH)_2$;
- 10 à 15% d'aluminates et sulfoaluminates de calcium ;

- une solution interstitielle, dans les pores et capillaires enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie entre 12,5 et 13,5.

Alors que le pH de l'environnement est en générale inférieur à ces valeurs, ce qui donne une réaction entre le milieu extérieur et le béton pour former des sels et de l'eau sous la forme suivante:



Cette réaction peut améliorer la durabilité du béton si le sel formé possède des propriétés liantes, on peut citer l'exemple de la carbonatation superficielle du béton de ciment portland par le CO₂ de l'air, mais le pH de la solution interstitielle du béton diminue jusqu'au environ une valeur de 9 ce qui entraîne la dépassivation des armatures. Dans le cas ou le sel formé est soluble ce qui crée des risques de dégradation par dissolution et lessivage [44].

Par ailleurs les aluminates du ciment (anhydre ou hydratés) réagissent avec les ions sulfates pour former l'étringite secondaire potentiellement expansive (3 CaO. Al₂O₃. 3 CaSO₄. 32 H₂O) [105].

Sous certaines conditions les C-S-H peuvent aussi réagir avec les sulfates et conduire à la formation de thaumasites (CaCO₃, CaSiO₂, CaSO₄, 15H₂O) entraînant des phénomènes expansifs et surtout une désagrégation de l'ensemble du liant) [105].

Il a été toujours dit qu'un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable.

II.4. DIFFERENTS TYPES DE BETONS:

II.4. 1. BETON AUTOPLAÇANT (BAP) :

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton autoplaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Ils se caractérisent en général par une

formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité [13,28].

II.4.2. BETONS DE HAUTES PERFORMANCES (BHP) :

Sont des bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (supérieure à 50 MPa), et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants réducteurs et hauts réducteurs d'eau et en utilisant des ultrafines, telles que les fumées de silice qui permettent de combler les vides entre les grains de ciment et d'améliorer l'ouvrabilité du béton frais [6].

II.4.3. BETON DE FIBRES :

Est un béton dans lequel sont incorporées des fibres synthétiques ou naturelles, ce qui permet suivant l'ouvrage, de supprimer le treillis soudé traditionnel. Parmi les caractéristiques du béton fibré, on peut citer : sa résistance à la traction, à la fissuration et au choc.

Les fibres synthétiques peuvent être d'origine minérale (verre, carbone, métallique) ou d'origine organique (polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide).

Les fibres métalliques peuvent être utilisées avec des propriétés spécifiques et avec un dosage de l'ordre de 0,3 à 2% en volume. C'est surtout le rapport entre la longueur et le diamètre des fibres (élancement) qui aura une influence sur les performances finales du béton de fibres [31,42].

II.4.4. BETON COMPACTE AU ROULEAU (BCR) :

Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux (cendres volantes, fibres calcaires, résidus miniers etc...). Il est utilisé pour la construction de barrages en raison de sa faible chaleur d'hydratation initiale (béton de masse) et aussi très utilisé au Canada dans la construction des routes [6,12]

II.4.5. BETON PREFABRIQUE :

Sert à la fabrication, généralement en usine et en milieu contrôlé, de diverses composantes allant de l'élément standardisé comme le bloc jusqu'aux éléments de structure ou

des panneaux de façades multifonction [32]. Les éléments préfabriqués sont caractérisés par un niveau de qualité constant. Mais ce qui est toujours recherché pour ces bétons est la résistance initiale pour diminuer le délai entre la préfabrication et le transport sur le chantier (norme [18]).

II.4.6. BETONS A DURCISSEMENT RAPIDE :

Sont des bétons dont le développement des résistances mécaniques est accéléré, ces bétons permettent la réalisation de petits ouvrages de réparation ou des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide ainsi que le décoffrage, ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication. Le durcissement rapide des bétons est obtenu soit par des adjuvants accélérateurs de durcissement, des ciments à durcissement rapide, la diminution du rapport E/C ou bien par le traitement thermique [20].

II.4.7. BETON DE TERRE :

C'est un assemblage de granulats divers (cailloux, graviers, sables, limons ou silts), il doit sa cohésion à une colle qui n'est pas le ciment mais l'argile, la fraction la plus fine du sol [91]. Plus du tiers du patrimoine bâti classé au niveau de l'UNESCO sont en terre. Parmi les bétons de terre les plus répandus le béton de terre stabilisé, le pisé, l'adobe, le torchis..... [41].

II.4.8. BETON LEGER :

La norme NF EN 206-1[18] définit les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage entre 800 et 2100 kg/m³, parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction [36].

II.4.9. BETON LOURD :

C'est un béton dont la masse volumique apparente est supérieure à 2600 kg/m³ (norme [18]), les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celle des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau [42].

II.4.10 LE BETON EXTRA LOURD :

Est un béton à base de granulats spéciaux de densité élevée comme la barytine et l'hématite permettant la réalisation d'ouvrages protecteurs contre les rayons X, gamma et autres rayons radioactifs. La masse volumique du béton extra lourd dépasse 3000 kg/m^3 [32].

I.4.11. LE BETON REFRACTAIRE :

Est un béton qui résiste à des températures élevées pouvant atteindre 1300°C , obtenue par le mélange de ciment Alumineux et de granulats réfractaires (chamottes, corindon), ou granulats isolants (Pouzzolane, vermiculite, argile expansée), le béton réfractaire sert à la construction de cheminées et de sols d'usines sidérurgiques [32, 42].

II.4.12. BETON DE POUDDRE REACTIVE (BPR) :

Est un nouveau béton composé essentiellement de ciment, des fumées de silice, des fines réactives constituées de quartz et de sable broyés à une grosseur inférieure à $500 \mu\text{m}$, des fibres métalliques d'une longueur de 13 mm environ [42]. Le BPR est caractérisé par des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée. La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré ou post-tension. Les résistances en traction et en compression sont très élevées voir mêmes supérieures à celles des aciers (350 MPa) [97].

II.4.13. BETON ORDINAIRE :

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulat, eau, avec un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre $20 \text{ MPa} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPa}$ [43].

III. DURCISSEMENT DU BETON :

III.1. HYDRATATION DU CIMENT :

C'est l'ensemble de réactions chimiques qui se produisent entre l'eau de gâchage et les différents minéraux du ciment (C_2S , C_3S , C_4AF , C_3A , et le sulfate de calcium), dont les atomes

présentent des liaisons insaturées qui, au contact avec l'eau, sont le siège ou l'origine de nombreuses réactions d'adsorption, d'hydrolyse, de dissolution, de solvation et enfin de cristallisation des différents minéraux hydratés [92]. Les réactions d'hydratation des différents minéraux du clinker et d'ajouts chimiquement actifs se présentent sous forme de réactions exothermiques et sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux cimentaires [11].

C'est l'hydratation des silicates de calcium qui participent le plus au développement de la résistance mécanique en produisant les silicates de calcium hydratés par contre les aluminates de calcium accélèrent la prise et dégagent de forte chaleur d'hydratation initiale ce qui accélère la prise et le durcissement mais fragilisent la matrice cimentaire [8, 65].

III.1.1. THEORIES D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND :

L'hydratation du ciment portland est un phénomène très complexe plusieurs théories ont été présentées. Deux théories ont été proposées à la fin du 18^{ème} siècle l'une par LE CHATELIER en 1882, l'autre par MICHAELIS en 1893.

D'après LE CHATELIER [53] trois phénomènes concomitants concourent au phénomène de prise d'une pâte de ciment :

- La dissolution des constituants du ciment dans l'eau ;
- La formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates ;
- La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides intergranulaires.

D'après les travaux scientifiques réalisés par MICHAELIS [92] la formation colloïdale d'hydrosilicate de chaux est le seul phénomène caractéristique et important de la prise et du durcissement de tous les liants hydrauliques calcaires.

Ces deux théories de LECHATELIER et de MICHAELIS s'accordent sur la dissolution des aluminates et sur le rôle prépondérant du silicate tricalcique, mais différent par l'appréciation du rôle joué par la silice.

Le mécanisme d'hydratation au cours des premières étapes est resté un point de divergence entre les chercheurs, en particulier l'hydratation précoce du C₃S et ce jusqu'à l'introduction de nouvelles

techniques physiques de résolution, parmi lesquelles on peut citer : la microscopie électronique à très haute tension (Double 1978, JENNING 1979, BIRCHALL 1978) [92] et la spectrométrie de photo électrons émis par rayons X (XPS) ou ESCA (Electron spectroscopy for chemical Analysis, THOMASSIN 1979, MENETRIER 1979) [92]. La première technique a permis de savoir que, dès le contact avec l'eau, une membrane se forme autour des grains de C_3S et ne laisse passer que les ions de Ca^{2+} . La seconde a permis la détermination de la composition de la couche superficielle des grains de C_3S dès la cinquième seconde. Pour le silicate tricalcique C_3A en 1978 BARRET a pu mettre en évidence que son hydratation se fait par passage en solution [92].

III.1.2. HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT PORTLAND :

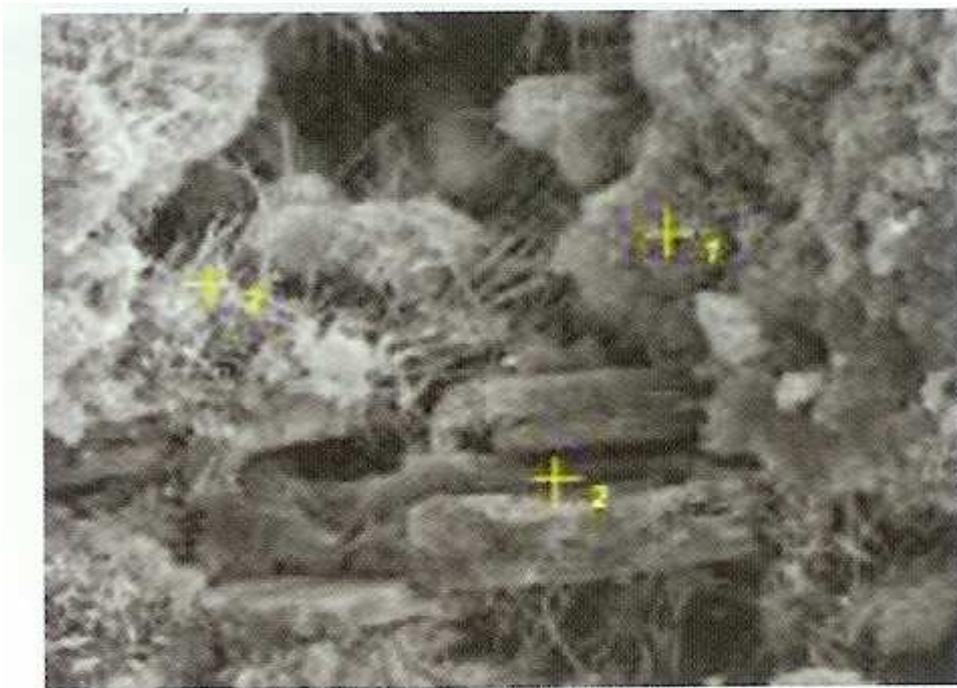


Figure n°1 : Microstructure de la pâte de ciment [83]
(Courtoisie du LERM), E/C=0,50, 1- silicate de calcium hydraté (C-S-H),
2- Cristaux de portlandite, 3- Cristaux d'étringite,

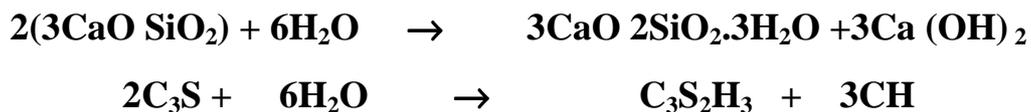
1. Hydratation du silicate tricalcique [C_3S] :

Appelé (alite) est le principal constituant du clinker et représente 50 à 70% de sa masse. Le C_3S durcit rapidement, il est en grande partie responsable de la prise et de la résistance initiale et procure des caractéristiques mécaniques à tous les âges du béton. Dans le clinker industriel

on rencontre toutes les structures cristallines d'alite, la structure trigonale est la plus stable à la température ambiante. Les différentes formes cristallines de C₃S sont toutes très proches et présentent une vitesse d'hydratation comparable [92]. La réaction du C₃S avec l'eau conduit à la formation de deux composés :

- Du silicate de calcium hydraté ou CSH selon une terminologie anglophone (Calcium Silicate Hydrate), composé non stoechiométrique, dont le rapport CaO/SiO₂ varie autour de 3/2. Le CSH est un gel solide poreux ayant une structure en feuillet et formé de cristaux très petits (20 à 30 angströms). Les forces de Vander Walls sont en partie responsables de la cohésion de ce gel [11,92].
- La portlandite Ca(OH)₂ ou CH qui est un composé défini bien cristallisé, sous forme de larges feuillets hexagonaux, joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique. En présence de matériaux à propriétés pouzzolaniques tels que les fumées de silice (SiO₂), La portlandite se combine avec SiO₂ pour former du C-S-H cela entraîne une augmentation de la résistance du mélange [11,28]. D'une manière générale la portlandite favorise un PH basique d'un béton, cela crée un milieu favorable aux armatures métalliques.

La réaction d'hydratation des silicates tricalciques peut être représentée, sans prendre en considération la complexité de la réaction, par l'équation suivante :



Au bout d'une dizaine d'heures, la couche d'hydrates qui enrobe les C₃S anhydres atteint une épaisseur suffisante pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau, l'hydratation ralentit de plus en plus et se poursuit pendant des années, tant qu'il reste de l'eau dans les pores capillaires.

2. Hydratation du silicate bicalcique [C₂S] :

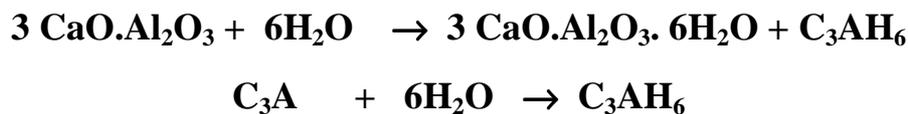
Il représente 15 à 30% de la masse du clinker, existe sous quatre formes différentes : γ , β , α et $\acute{\alpha}$. Toutefois dans un ciment portland la forme β est la plus importante et active

hydrauliquement. La réaction d'hydratation du C₂S donne les mêmes produits que le C₃S avec une faible proportion de portlandite [28].

Le C₂S (bélite) s'hydrate lentement par rapport à l'alite et contribue au gain de résistance à plus long terme et forme des hydrates plus durables, même dans 10 ans le C₂S ne s'hydrate qu'à quelque 90%.

3. Hydratation de l'aluminate tricalcique [C₃A] :

Il représente 5 à 10% de la masse du clinker, il réagit rapidement avec l'eau et libère une très grande quantité de chaleur durant les premiers jours de durcissement, son hydratation conduit à la formation d'un gel (Bréval, 1976) puis la cristallisation de C₃AH₈ et C₄AH₁₃ en plaquettes hexagonales et enfin l'apparition de cristaux cubiques de C₃AH₆ qui est le seul composé stable de tous les hydroaluminates, suivant la réaction :



4. Hydratation de l'alumino-ferrite tetracalcique [C₄AF]:

Le processus d'hydratation de la phase ferrite d'un ciment portland peut être représenté par C₄AF ou un élément de la série des éléments des solutions solides C₂A_{1-x}F_x. [92].

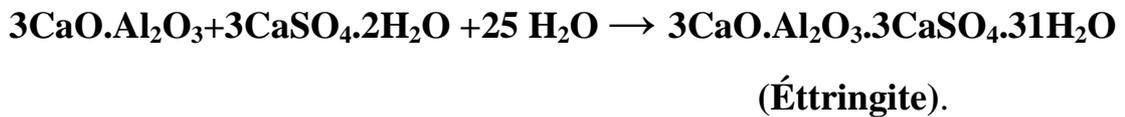
Les réactions de C₄AF avec l'eau sont similaires à celle du C₃A en substituant aux aluminates des Alumino-ferrite [105] avec une vitesse d'hydratation plus faible que celle du C₃A. Le C₄AF a pour rôle de réduire la température de formation du clinker, il dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance mécanique.

5. Action du gypse :

En présence du sulfate de calcium les produits d'hydratation du C₃S et C₂S sont légèrement modifiés, par contre le processus d'hydratation du C₃A est profondément modifié et la cinétique d'hydratation du C₃A est réduite.

L'hydratation du C₃A en présence du gypse, donne naissance à une série de sulfoaluminates. Au début il y a formation des cristaux d'étringite ou sel de candlot, noté TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté). Ce composé apparaît généralement sous formes de fines aiguilles recouvre les grains anhydres d'une couche semi-perméable qui freinent l'hydratation.

Lorsque tout le gypse est consommé, l'étringite va se dissoudre pour devenir la nouvelle source d'ions sulfates qui vont réagir avec C₃A pour former le monosulfate d'alumine de calcium hydraté (3CaO.Al₂O₃.CaSO₄.12H₂O) et l'aluminate hydraté [63]. La réaction de formation d'étringite est conforme au schéma suivant :



III.1.3. CINÉTIQUE D'HYDRATATION :

La cinétique d'hydratation des ciments est très complexe car les divers composants du ciment présentent des différences importantes à cet égard. L'hydratation du silicate tricalcique C₃S est très rapide mais reste toujours moins rapide que celle de l'aluminate tricalcique C₃A ; par contre l'hydratation du silicate bicalcique C₂S et surtout celle de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF est plutôt lente. Les réactions de ces quatre minéraux ne présentent pas une succession mais un échelonnement, autrement dit, certaines réactions peuvent commencer avant que d'autres ne se terminent. Les facteurs ayant une influence sur la cinétique d'hydratation des composantes du clinker sont :

- **surface spécifique** : l'hydratation d'un ciment est d'autant plus rapide que sa surface spécifique est grande cela est dû à la grande surface libre à l'action de l'eau, les grains de taille supérieure à 30 µm ne s'hydratent jamais complètement.
- **les sels** : contenus dans l'eau de gâchage ou dans l'eau de conservation, réagissent, avec les composants de la pâte de ciment peuvent améliorer ou altérer ses qualités.
- **Les adjuvants** : réagissent chimiquement avec les silicates et les aluminates avec des mécanismes très complexes, suivant sa teneur un adjuvant peut être retardateur ou accélérateur de prise ou de durcissement.
- **La température** : Joue un rôle à la fois cinétique et thermodynamique dans la réaction d'hydratation du ciment.

Thermodynamique : parce qu'elle change la nature des hydrates formés.

Cinétique : parce qu'elle accélère la réaction d'hydratation.

La loi générale d'accélération des réactions chimiques quand la température augmente a été établie par Arrhenius. Elle est de forme exponentielle.

$$V = A \exp \left(\frac{-E}{RT} \right)$$

Ou:

- V - vitesse de la réaction (mol/h)
- A – constante
- E = énergie d'activation (KJ.mol⁻¹)
- R = constante des gaz parfaits (8,314J.K. mol⁻¹)
- T= température (°K)

La nature des hydrates varie en fonction de la température de la manière suivante :

-Jusqu'à 40°C les hydrates sont de la même nature que ceux qui se cristallisent à une température de 20°C.

-Au de la de 40°C les silicates hydratés se développent en fibres longues, plus individualisées qu'à 20 °C leur rapport Ca0/SiO2 est plus élevé et ils contiennent plus d'ions SO₃.

-Au-dessus de 60°C l'étringite se transforme en monosulfo aluminates et du C₄AH₁₃ qui se cristallisent en plaquettes hexagonales [92].

III.2. LES MECANISMES DE PRISE ET DURCISSEMENT:

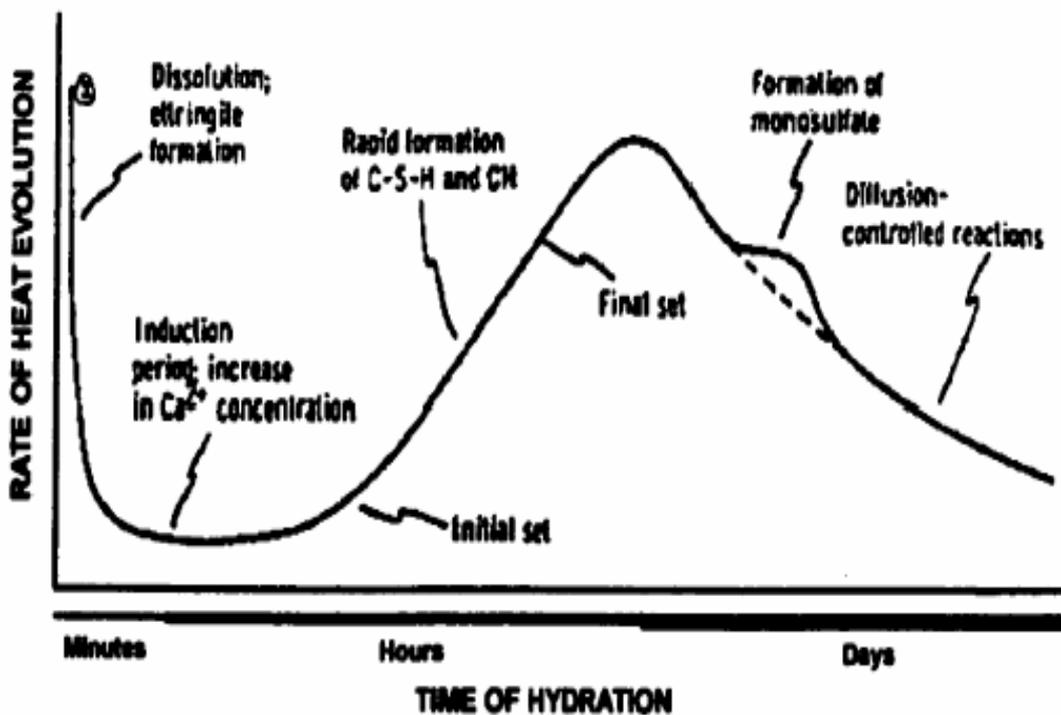


Figure n° 2 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment portland [109]

L'évolution de la réaction d'hydratation dans le temps se divise en cinq principales périodes voir figure n°2, présentation faite par Vernet (1995):

1. Dès le mélange de l'eau et du ciment, commence la dissolution rapide et exothermique des constituants de ce dernier, il se forme deux hydrates à germination accélérée le CSH et l'étringite, ainsi que les ions Ca^{2+} et OH^- dans la solution interstitielle.
2. L'accroissement rapide du pH et de la teneur en Ca^{2+} dans la solution ralentit le processus de dissolution du clinker ainsi que le taux de dégagement de chaleur, la formation de CSH et d'étringite se poursuivent à vitesse réduite. Durant cette période la portlandite ne précipite pas parce que sa vitesse de germination est très faible par comparaison à celle des CSH.
3. Quand il n'y a plus de silice dans la phase aqueuse, la portlandite commence à se précipiter la diminution d'ions Ca^{2+} et OH^- accélère la vitesse de dissolution des phases du ciment. **La prise** causée par la formation rapide de C-S-H et de CH, caractérise le moment où le matériau devient cohérent change d'état, c'est à dire lorsqu'il passe de l'état de suspension à l'état solide, ce changement d'état est accompagné d'un fort dégagement de chaleur.
4. Au fur et à mesure que les CSH se forment les contacts entre grains augmentent, la porosité capillaire diminue, ce qui entraîne l'augmentation de la résistance mécanique, **c'est le durcissement**. La période de durcissement correspond à la période d'évolution des propriétés mécaniques du matériau. Cette évolution est rapide dans les heures qui suivent la prise et elle se poursuit plus lentement pendant encore plusieurs mois en présence d'eau.
5. La période de ralentissement, les grains se recouvrent d'une couche d'hydrates de plus en plus épaisse, ce qui ralentit la diffusion des espèces réactionnelles. L'hydratation se termine soit parce qu'il n'y a plus de phase anhydre, soit qu'il n'y a plus d'eau disponible [6,50, 53,101].

IV. CONCLUSIONS:

1. Le béton qui est un matériau hétérogène dont le choix des composants est fonction des critères qui lui sont recherchés. Ces critères sont essentiellement les résistances mécaniques et la durabilité, qui elles dépendent de la porosité et de la qualité et quantité des composants du béton, auquel s'ajoute, la fissuration due au retrait de la pâte de ciment.
2. Pour ce qui est des constituants du béton, une gamme des ciments courants, écologiques, durables et économiques sont produits par réduction de la teneur en

clinker et l'incorporation de différents types d'ajout minéraux, par ailleurs, cette gamme des ciments permet de choisir le ciment en fonction de la résistance caractéristique garantie, et celle nécessaire au décoffrage du béton, de l'environnement de l'ouvrage. Pour le gâchage du béton, l'eau potable est toujours utilisable, mais, si on doit utiliser une autre eau la norme **NF EN 1008** précise les conditions d'utilisation d'une eau de gâchage. Les granulats doivent répondre à certaines exigences sur leur nature, leur taille et leur forme, ils ne doivent pas contenir d'éléments nocifs préjudiciables à la qualité du béton. Des adjuvants peuvent être ajoutés au béton pour améliorer certains de ces propriétés, cependant les accélérateurs de prise à forte teneur en chlorure sont à éviter.

3. Les cinq types de retraits dans un béton, provoquent des contraintes internes qui se matérialisent par l'apparition de fissures à la surface de l'élément de béton ou dans l'ensemble de sa masse, ces fissures détériorent l'esthétique et endommagent l'élément, tels l'accélération de la corrosion du béton et des armatures en laissant pénétrer des agents agressifs.
4. Aujourd'hui, selon le type de construction à réaliser (barrages, ponts, immeubles avec isolation thermique, tunnels, centrales nucléaires), une grande panoplie de bétons est à la disposition des constructeurs.
5. L'étude du durcissement du béton a permis d'identifier les mécanismes d'hydratation et le rôle des différents constituants du clinker sur la structuration de la pierre de béton.
6. Les réactions d'hydratation des minéraux du clinker sont complexes et ne présentent pas une succession mais un échelonnement, cependant, c'est l'hydratation des silicates de calcium qui participent le plus au développement de la résistance en produisant les silicates de calcium hydratés, la portlandite à son tour favorise le PH, par contre les aluminates tricalciques accélère la prise et dégage une forte chaleur d'hydratation initiale.
7. Différents facteurs influencent la cinétique d'hydratation des composantes du clinker, comme la surface spécifique du ciment, la présence de sels, l'incorporation d'adjuvants, la chaleur, cette dernière joue un rôle à la fois cinétique et thermodynamique dans la réaction d'hydratation.

CHAPITRE II

ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON

I. INTRODUCTION :

Le problème principal au niveau des chantiers est la lenteur avec laquelle le ciment s'hydrate et développe ses résistances mécaniques. Le décoffrage des éléments de structure en béton d'une manière générale n'est acquit qu'à partir du 21^{ème} jour. Cela constitue l'un des principaux inconvénients de ce matériau et rend les temps d'attente pour le durcissement naturel des bétons de plus en plus incompatible avec la productivité des chantiers de construction et des usines de préfabrication. C'est pourquoi les fabricants cherchent, en accélérant la prise et le durcissement du béton, à obtenir rapidement des résistances à la compression nécessaires et suffisantes dites « RESISTANCES CRITIQUES », permettant la manutention des produits en béton sans nuire aux propriétés ultérieures du béton [2].

L'accélération du durcissement du béton est devenue aujourd'hui une nécessité, elle peut s'acquérir par plusieurs méthodes, à savoir l'utilisation de ciments à forte chaleur d'hydratation initiale, d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement, ou bien par introduction d'une chaleur thermique ou électrique [69].

II. EVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES DU BETON :

Les propriétés mécaniques du béton évoluent en fonction de l'état d'avancement des réactions d'hydratation. La figure n°3, présente schématiquement le processus de durcissement du béton et les différentes phases de la vie d'un béton. La période appelée **court terme** démarre avec le commencement des phénomènes de prise du béton. C'est une période caractérisée par une grande activité chimique, suivait d'une croissance rapide de la résistance du béton (Vernet et Cadoret, 1992) [108].

Au-delà de la période de prise, le béton durci et acquiert ses performances mécaniques, entre autre la résistance qui augmente avec la diminution du rapport E/C, qui conditionne la porosité et l'avancement de l'hydratation du ciment. La résistance d'un ciment portland croît irrégulièrement : au troisième jour elle atteint à peu près 40 à 50% de la résistance caractéristique du ciment et au septième jour, de 60 à 70%, après l'évolution de la résistance se ralentit, pour atteindre la résistance caractéristique au 28^{ème} jour [63].

Cependant, parmi les facteurs qui influent sur la résistance de la pierre de ciment ainsi que sur sa vitesse de durcissement, on peut citer : la composition minéralogique du ciment sa finesse de mouture, le rapport E/C, etc.

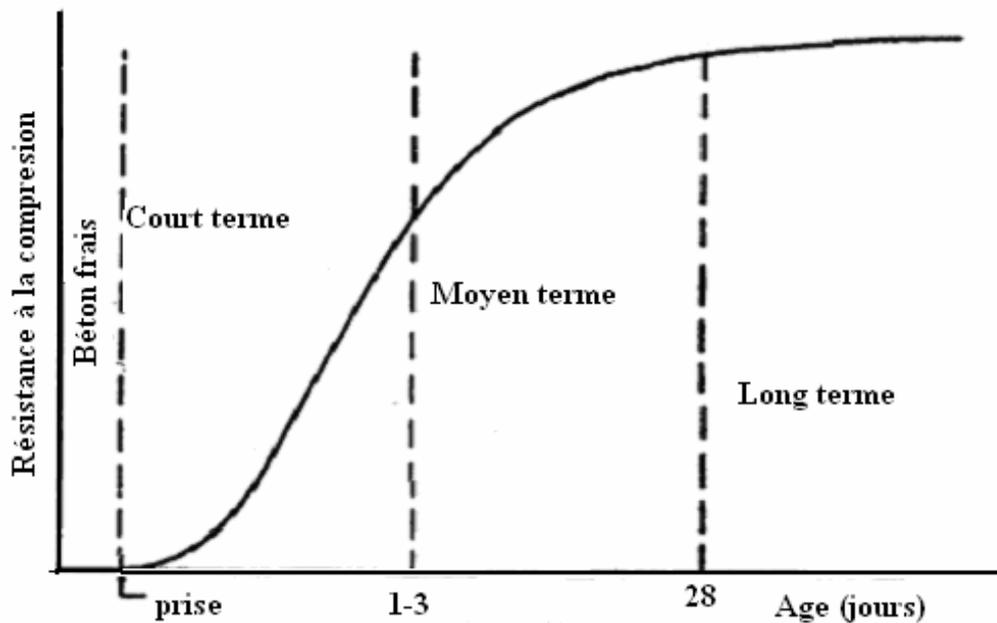


Figure n° 3: processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors [1980] [24].

1. Influence de la composition minéralogique sur la résistance mécanique :

C'est l'hydratation des silicates de calcium qui participent le plus au développement de la résistance mécanique en produisant les silicates de calcium hydratés. Le silicate tricalcique sa résistance mécanique à 7 jours est à peu près égale à 70% de la résistance à 28 j, ensuite l'évolution de la résistance de C_3S ralentit sensiblement. Le C_2S acquiert une résistance insignifiante, avant 28 j, environ 15% de celle de C_3S , mais après 28 j le silicate bicalcique commence à se consolider rapidement et sa résistance peut même dépasser celle de C_3S . L'aluminate tricalcique est peu résistant, cependant sa présence accélère sensiblement le début du durcissement. Donc pour obtenir un béton de haute résistance à court terme, on utilise un ciment à haute teneur en C_3S [53].

2. Influence de la finesse de mouture sur la résistance mécanique:

La finesse de mouture augmente le degré d'hydratation du ciment ainsi que sa résistance, l'augmentation de la surface spécifique d'un ciment de $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ augmente son activité chimique de 20 à 25% [63].

3. Influence du rapport E/C sur les résistances du béton :

Le rapport E/C est un indice important, car il influe de façon sensible sur la résistance mécanique du béton. Sachant que la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment est de l'ordre de 28% de la masse du ciment actif, donc un très faible E/C peut empêcher l'hydratation complète des grains de ciment ce qui entraîne une chute de résistances mécaniques finales, aussi un rapport E/C élevé entraîne un excès d'eau qui ne sera jamais lié au particule de ciment, l'évaporation de cette eau crée une porosité à l'intérieure de la pâte durcie qui affaiblit les résistances mécaniques du béton et diminue sa durabilité comme nous le montre la figure n°4 [5].

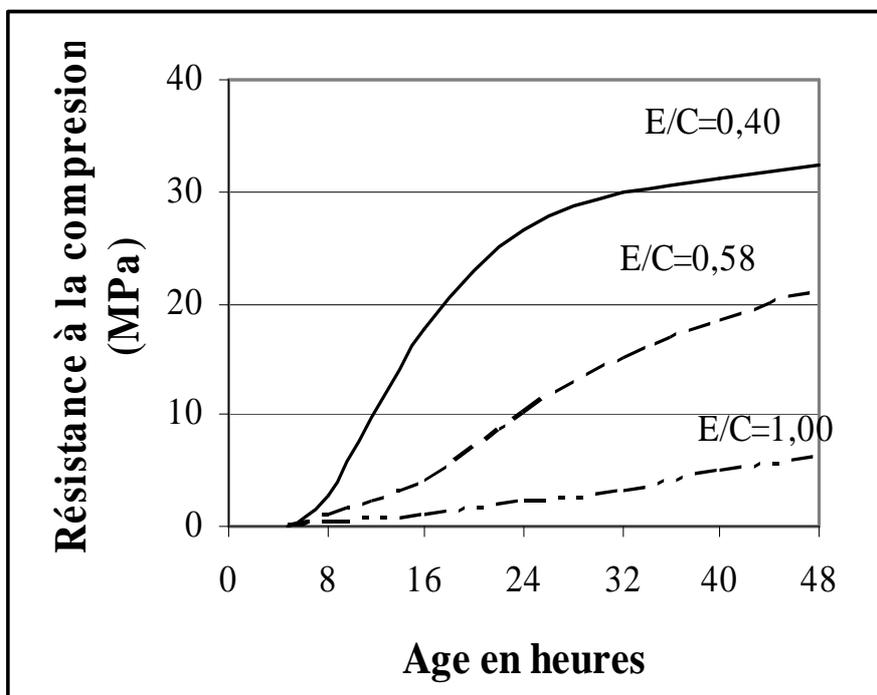


Figure n°4: Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression au jeune âge du béton d'après Byfors.

La figure n° 4 montre les résultats obtenus par Byfors en 1980 sur l'évolution de la résistance à court terme des bétons de rapport E/C allant de 0,40 à 1,00. On constate qu'à une échéance donnée, la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Une résistance de 10 MPa est atteinte en 12 heures 30minutes pour un béton avec un E/C=0.40, alors qu'il faut 24 heures pour un béton avec un E/C=0.58 [24].

Sur la figure n° 5, montre les résultats obtenus par Kosmatka en 1991, on remarque que la résistance à la compression du béton est inversement proportionnelle au rapport E/C, mais elle évolue proportionnellement avec l'âge [64].

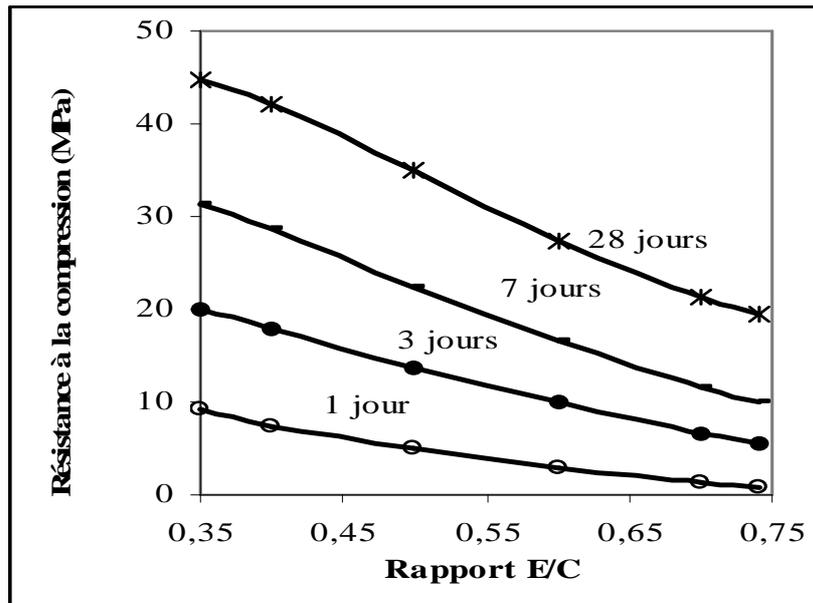


Figure 5 : Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton, d'après Kosmatka.

III. METHODES D'ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON :

La cinétique du processus de formation de la structure d'un béton est une fonction du temps. STEFANOV B. a présenté une relation empirique du développement de la résistance à la compression d'un béton par rapport au temps dans des conditions de durcissement standards et normales [100] :

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}$$

Ou :

n- l'age du béton en jour ;

Rn et R28 - Résistances du béton respectives à n jours et 28 jours de durcissement.

Cette relation est valable que pendant la première année de durcissement, après ce temps la croûte des hydrates formés autour du grain de ciment se densifie et devient pratiquement imperméable à l'eau ce qui ralentit et met fin à la poursuite du phénomène d'hydratation. Plus de 30% de la quantité de ciment reste non hydratée. Les expériences menées dans ce sens ont

montré que pour des grains de ciment de 50 μm de diamètre, la profondeur d'hydratation est de l'ordre 3,85 μm à l'âge de 3 jours, de l'ordre de 6,56 à l'âge de 28 jours et de 11,64 μm à l'âge de 6 mois.

Parmi les méthodes qui permettent d'accélérer le durcissement du béton on peut citer :

III.1. LES CIMENTS A DURCISSEMENT RAPIDE :

Comme le ciment alumineux fondu et le ciment prompt dégagent leur chaleur d'hydratation sur un temps très court cela permet d'accélérer le durcissement du ciment. Les inconvénients de cette méthode sont pour :

- **Le ciment alumineux fondu (CA) NF P15 315 [19] :** qui résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à la fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice. Ce ciment contient au moins 30% de sa masse d'alumine. Son utilisation est onéreuse et demande beaucoup de précaution, d'après la norme **NF P15 315** à savoir :
 - le rapport E/C limité à 0,40 au maximum ;
 - le dosage minimal en ciment est de 400 Kg/m^3
 - les granulats contenant des alcalins libéraux et les sables contenant des éléments très fins < 0,2 mm sont à éviter ;
 - éviter la dessiccation superficielle, dès le début et pendant 24 à 48 heures.
- **Le ciment prompt naturel (CNP) NF P 15-314[25] :** c'est un ciment qui résulte de la cuisson d'un calcaire argileux de composition régulière, à une température allant de 800 à 1200°C. C'est un ciment contre indiqué pour les contraintes élevées (résistance à la compression à 28 j est de l'ordre de 20 MPa) [42].

III.2. LE SURDOSAGE EN CIMENT :

C'est un procédé onéreux et limité en performance un surdosage de 50 kg de ciment par m^3 de béton augmente la résistance du béton de 10%, mais au de la de 400 kg de ciment par m^3 de béton, le surdosage devient préjudiciable sur le retrait et le coût du béton [26].

III.3. UTILISATION D'ADJUVANTS ACCELERATEURS DE PRISE ET DE DURCISSEMENT DU BETON :

- **Accélérateurs de prise :** diminuent le temps de passage du béton de l'état plastique à l'état solide, ce sont en générale des alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse [60].
- **Accélérateurs de durcissement :** accélèrent le développement des résistances initiales des bétons, parmi ces accélérateurs on distingue les chlorures et les carbonates [85].

Cependant, l'emploi d'adjuvants présente divers inconvénients dus à leur sensibilité à la nature du ciment, des granulats, ainsi qu'aux conditions de fabrication et d'emploi du béton et aussi les accélérateurs de durcissement qui contient des ions chlore, qui favorisent la corrosion des aciers, leur usage est limité sévèrement en béton armé et interdit en béton précontraint [60].

III.4. UTILISATION DES CIMENTS A FORTE CHALEUR D'HYDRATATION INITIALE :

Les ciments à forte chaleur d'hydratation initiale sont souvent des ciments fins, finesse de mouture élevée et peut atteindre $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Avec une composition minéralogique bien spécifique, quantité de C_3A et C_3S élevée, par exemple 60% de C_3S ainsi qu'un pourcentage en C_3A supérieure à 10%. Ce qui provoque un dégagement de chaleur très fort au début des réactions d'hydratation et par conséquent une accélération des réactions d'hydratation donc de durcissement [42]. Mais les ciments de grande finesse de mouture, leur inconvénient est le retrait important à l'état plastique.

III.5. TRAITEMENT THERMIQUE :

Le traitement thermique permet une accélération des réactions d'hydratation du béton par la chaleur, appelée aussi thermomaturation, qui constitue la plupart du temps, le moyen le plus efficace pour obtenir la résistance nécessaire au démoulage en quelques heures.

Le chauffage a d'abord été employé dans les pays nordiques (Russie, Suède, Norvège) pour obtenir la mise hors gel du béton (permettre au mélange d'atteindre une certaine cohésion avant que l'eau ne se transforme en glace) [106]. En Russie en commença au début du 19^{ème} siècle, aux Etats-Unis et en Europe cette technique est employée depuis les années 1930, en

France c'est Freyssinet qui entreprit les premiers essais en 1927 et développa cette méthode pour exécuter des tuyaux chauffés à la vapeur dans les moules hermétiquement fermés [26].

Cette technique réservée initialement aux usines de petits éléments en béton (blocs, bordures), s'est étendue, d'une part, aux usines de préfabrication de panneaux de grandes dimensions, de cellules tridimensionnelles correspondant à une pièce d'habitation et d'autre part au chantier de bâtiment et aux éléments d'ouvrages d'art pour accélérer la rotation des moules de poutres de pont et de voussoirs [106].

Sur des données de MALININA L.A. à une température de 80°C du traitement thermique d'un béton la croissance des résistances mécaniques est de 6 fois plus importante et à 100°C elle est de 10 fois plus importante en comparaison avec un traitement dans des conditions normales de durcissement [100]

IV. ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON PAR TRAITEMENT THERMIQUE :

IV.1. INTERET D'UN TRAITEMENT THERMIQUE :

Le traitement thermique d'un béton frais est une technique qui permet [26] :

- Le bétonnage par temps froid,
- L'accélération des cadences par réduction du temps de prise, donc un avancement plus rapide des chantiers et une rotation accélérée :
 - * des coffrages lorsque le béton est coulé in situ,
 - * des moules lorsque le durcissement est réalisé en moules,
 - * des supports lorsque les produits sont démoulés immédiatement sur des supports que l'on a intérêt à récupérer le plus vite possible,
 - * des bancs de précontrainte lorsqu'on fabrique des éléments en béton précontraint.
- D'effectuer dans un délai raisonnable des opérations d'usinage (grésages pour les carreaux de marbre, ou fendage pour certains blocs en béton),
- De réduire les surfaces nécessaires au durcissement et au stockage,
- De réduire les délais de livraison,
- La facilité du réglage des fabrications par la prise en compte plus rapide des informations provenant du contrôle des performances,

- D'éviter l'influence de certaines conditions climatiques, généralement les produits en béton sont stockés pendant un certain délai sur des parcs, alors que leurs résistances, sont encore faibles ce qui les rend sensible aux intempéries,

IV.2.LES DIFFERENTS TYPES DU TRAITEMENT THERMIQUE :

Le traitement thermique du béton peut être un traitement thermique passif ou actif.

IV.2.1. Traitement thermique passif ou « auto étuvage » :

Cette méthode est souvent la plus économique (il n'y a pas fourniture de chaleur), elle consiste à éviter toutes déperditions calorifiques dues à l'exothermie des réactions chimiques de prise et de durcissement du ciment lors de son hydratation. Afin de sauvegarder la chaleur dégagée en utilisant des coffrages isolants, ou encore en recouvrant l'ensemble de l'ouvrage avec une bâche isolante [2].

Les réactions d'hydratation des constituants du ciment portland sont fortement exothermiques, ce qui conduit dans l'heure qui suit la fabrication du béton, à des températures qui peuvent atteindre 80 degrés Celsius dans les pièces massives [105]. La quantité totale de chaleur dégagée par gramme de ciment varie entre 200 et 500 joules, cette chaleur dépend de la composition minéralogique du ciment et varie surtout avec la teneur en C_3A (formation exothermique de monosulfoaluminate à partir de l'étringite). Les quantités de chaleur dégagées par les principaux constituants du clinker, exprimé en joule par gramme de matière anhydre sont estimées, systématiquement, au moyen d'un essai normalisé (l'essai à la bouteille de Langavant, figure n° 6 et 7) [3]:

- | | |
|--|------------------|
| • silicate tricalcique (C_3S) | 500 à 525 J/g; |
| • silicate bicalcique (C_2S) | 250 à 270 J/g; |
| • aluminate tricalcique (C_3A) | 1000 à 1200 J/g; |
| • aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) | 395 à 425 J/g. |



Figure n° 6: Le calorimètre de Langavant

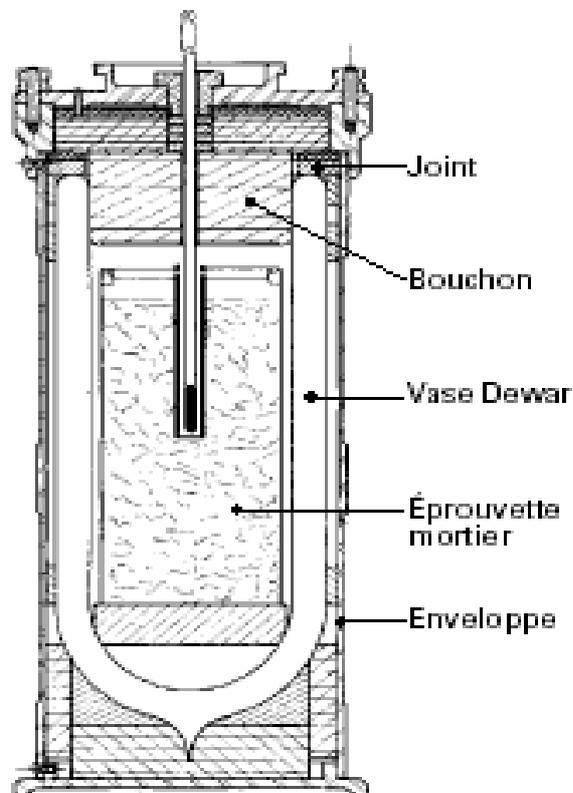


Figure n° 7: schéma du calorimètre de Langavant

IV.2.2.Traitement thermique actif : dans lequel il y a apport de chaleur, soit avant ou après la mise en place du béton.

1. Chauffage du béton avant sa mise en place ou « préchauffage » :

Le préchauffage du béton s'effectue soit en chauffant individuellement les constituants du béton (granulats, eau de gâchage), figure n° 9 ; ou en chauffant le mélange dans le malaxeur pendant la fabrication du béton frais), figure n°10, ou encore en chauffant le mélange après malaxage par conduction (benne chauffante figure n° 8, tuyaux chauffants) [72].

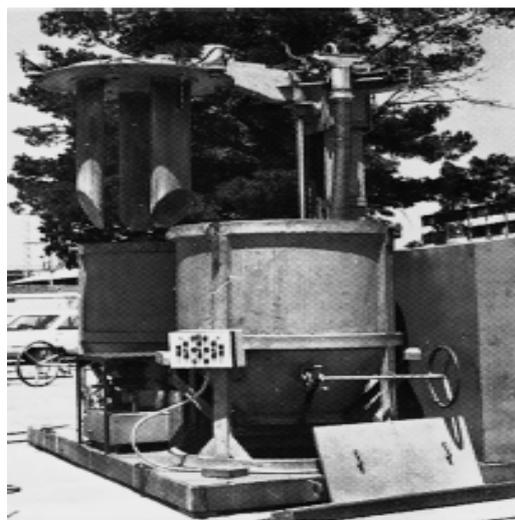


Figure n°8 : Une benne chauffante

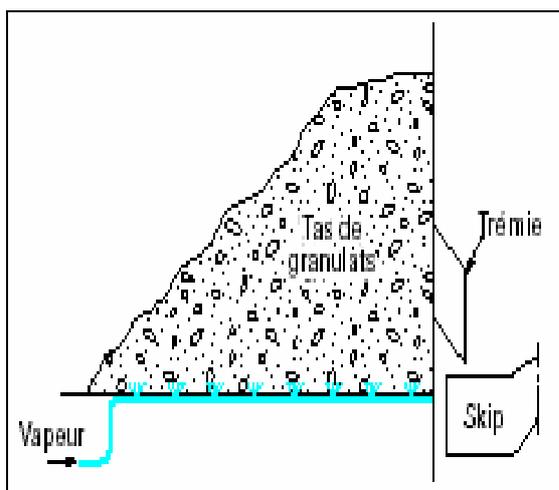


Figure n° 9 : Préchauffage du béton par chauffage des granulats

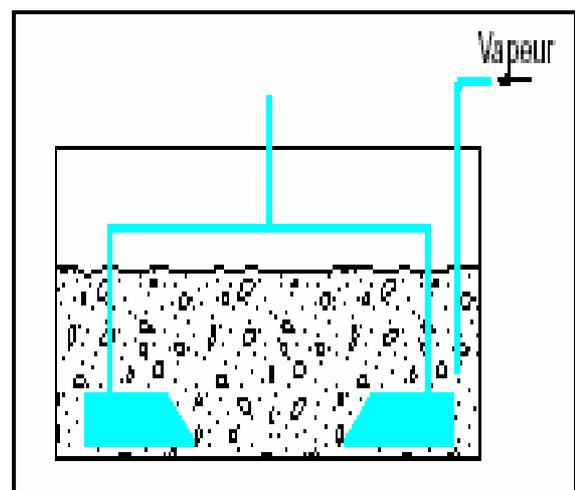


Figure n°10 : Préchauffage du béton par injection de vapeur dans le malaxeur

2. Chauffage du béton après sa mise en place :

C'est la technique la plus utilisée, dans ce cas le béton peut être chauffé soit :

- par l'extérieur, en chauffant l'environnement autour du moule et du coffrage, en plaçant les pièces dans une enceinte et en envoyant de la vapeur ou de l'air chaud. Par contact le chauffage du béton s'effectue par l'application, contre le coffrage, des résistances électriques ou des canalisations transportant un fluide (eau ou vapeur) figure n°11 [39,70].
- par l'intérieur, le chauffage appliqué dans la masse, les principaux procédés sont le chauffage par les armatures, le chauffage par des résistances électriques isolées, noyées et abandonnées dans le béton, chauffage par effet joule au moyen d'électrodes [39,70].

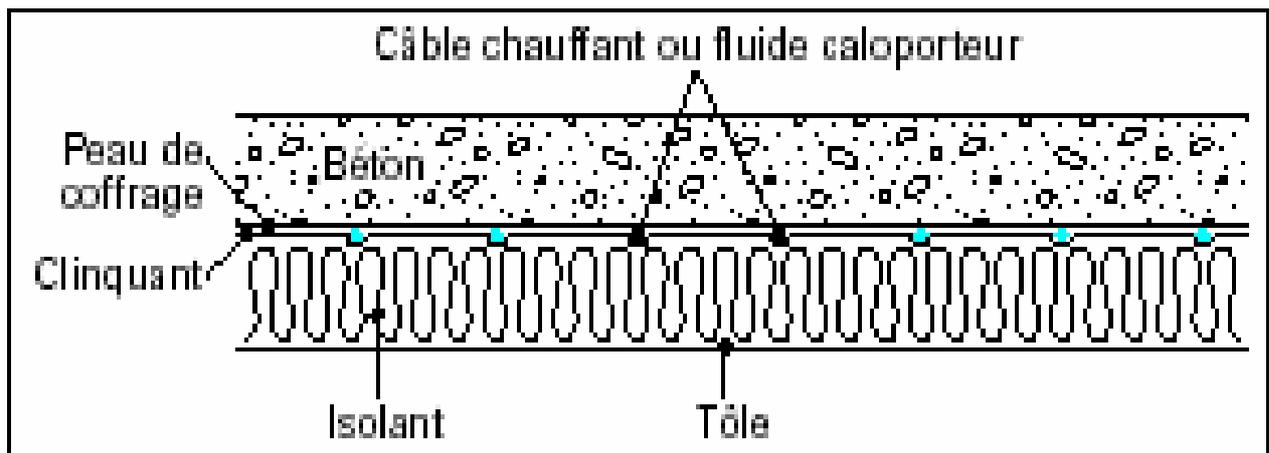


Figure n°11 : Coffrage chauffant

IV.3.LES TECHNIQUES DU TRAITEMENT THERMIQUE :

Parmi les techniques de chauffage du béton après sa mise en place on peut citer :

IV.3.1. Le traitement thermique par l'électricité :

C'est une technique qui utilise :

- Soit la conductibilité électrique du béton lui-même, ce dernier est placé dans le circuit d'un courant alternatif. Le courant est transmis au béton par l'intermédiaire

d'électrodes, qui peuvent se présenter sous forme de tiges, de câbles, de bandes ou de plaques métalliques. La résistance électrique du béton dépend de la qualité d'eau libre et de la présence de sels en solution. La répartition de la chaleur dans le béton dépend de l'homogénéité de ce dernier ;

- Soit la conductibilité électrique des armatures, c'est-à-dire une fois le béton mis en place, les armatures sont mises sous tension électrique alternative. Le courant passant dans ces armatures produit par effet joule de l'énergie calorifique.
- Soit des résistances noyées dans le béton, généralement attachées au ferrailage avant la coulée du béton. Ces résistances sont conçues pour obtenir rapidement une répartition régulière de la chaleur dans le béton et fonctionnent sous une tension de sécurité de 24 ou 42 volts, ces résistances sont perdues après chauffage, par économie sont employées des résistances à faible prix (fils de fer enrobés de matières plastique).
- Soit des résistances placées sur les tables, moules, coffrages et dans les étuves, lesquels se chargent de transmettre les calories au béton en place par conduction thermique, ces résistances sont réutilisables [26,59].

IV.3.2. Le traitement thermique par rayonnement infrarouge :

Ce procédé utilise des panneaux chauffants, constitués d'émetteurs infrarouges qui peuvent être alimentés en électricité ou au gaz (propane ou butane). Son utilisation est limitée au bétonnage par temps froid est à l'accélération du durcissement de pièces d'épaisseur inférieure à 10 cm [3].

IV.3.3. Le traitement thermique par l'eau chaude (Hydrothermale):

L'accélération du mûrissement du béton frais est réalisée en immergeant le béton dans un bain d'eau chaude. Il doit y avoir au moins 5 cm d'eau au dessus des éléments de béton à traiter, ceux-ci doivent être espacés et déposés sur une plaque métallique perforée, pour obtenir une répartition homogène de la chaleur en différents points des éléments en béton afin d'éviter des macro et micro-fissures (figure n° 12).

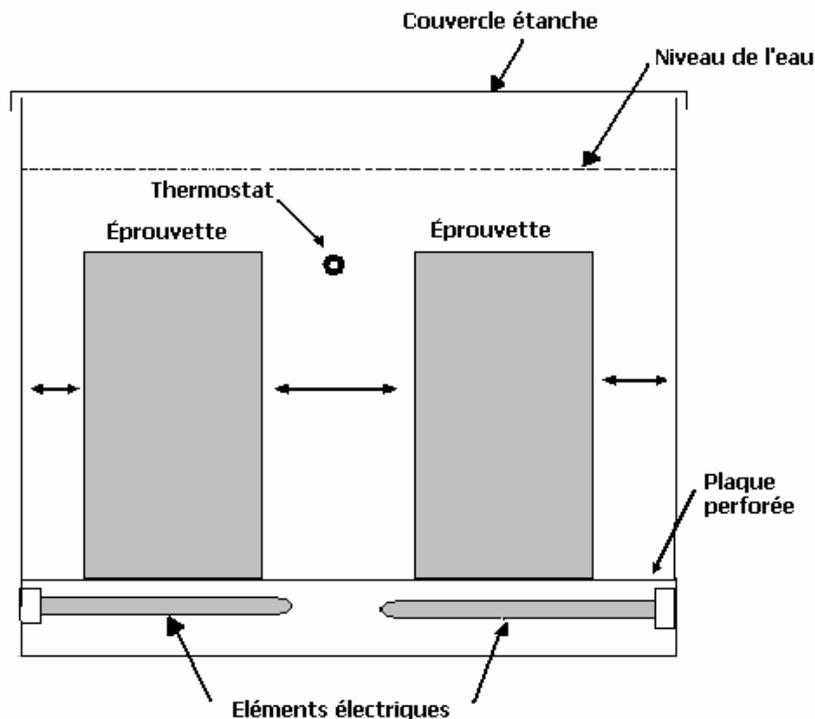


Figure n° 12 : Schéma d'un équipement servant au mûrissement du béton à l'eau chaude.

IV.3.4. Le traitement thermique par la vapeur d'eau «étuvage»:

Le mûrissement à la vapeur à basse pression est réalisé par différents procédés, parmi ces derniers on peut citer:

- Etuvage en chambre fixe : est un procédé très utilisé en préfabrication pour la fabrication des produits démoulés sur un support. La vapeur ne doit pas jaillir directement sur les produits, il faut une répartition assez régulière de la température ainsi qu'une étanchéité suffisante de l'enceinte.
- Etuvage en chambre mobile : les éléments sont démoulés à l'état frais et déposés sur une aire plane sans subir d'autres manipulations, ensuite l'enceinte est chauffée par injection de vapeur d'eau.
- Etuvage en tunnel : le produit après sa mise en place est introduit dans un tunnel, transporté sur un convoyeur le produit subit un cycle complet d'étuvage (de la mise en place à l'enlèvement pour la mise en place sur stock). Le fonctionnement d'un tunnel est assez délicat à contrôler et le procédé nécessite des investissements élevés.
- Procédé à vapeur perdue : le coffrage sur lequel est coulé le béton est placé sous une couverture en plastique, sous laquelle est injecté la vapeur. Les pertes d'énergie par cette méthode sont importantes (figure n° 13) [26, 73, 82].

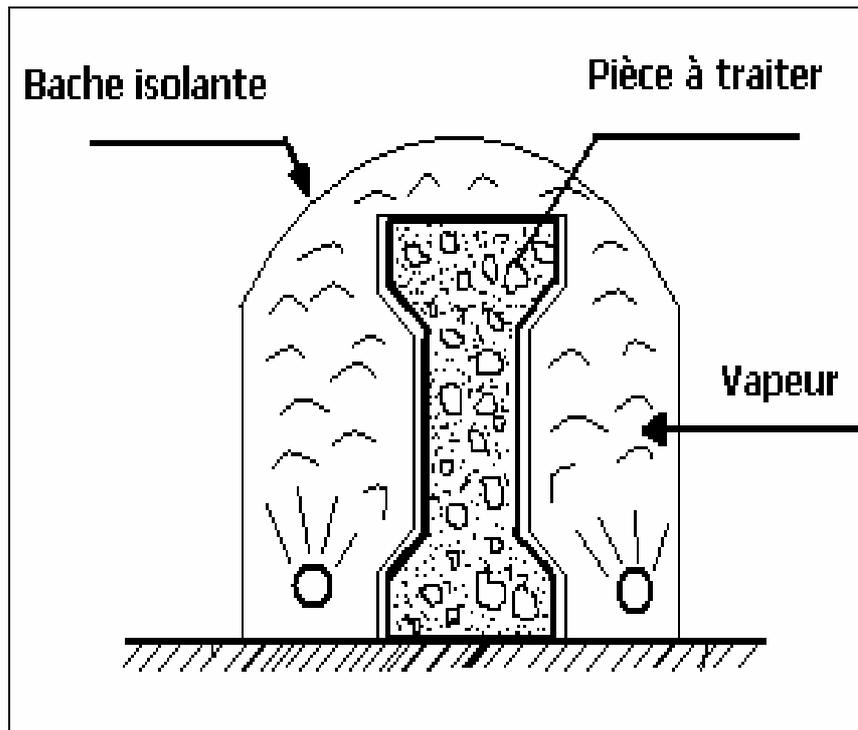


Figure n° 13: Chauffage d'une poutre sous bâche par vapeur d'eau perdue

IV.3.5. Le traitement thermique par fluides caloporteurs recyclés : les coffrages, les moules, tables etc, sont chauffés par le contact de canalisations dans lesquelles circule un fluide chaud recyclé à la chaudière : eau vapeur sous pression ou huile (figure n° 11) [39,70].

IV.3.6. Le traitement thermique par air chaud : il est déconseillé d'exposer le béton directement à un courant d'air chaud. Celui-ci le dessécherait, du moins en surface. L'air chaud est employé pour chauffer des coffrages qui supportent ou renferme du béton, des brûleurs à fioul ou à gaz sont placés sous ces coffrages [26].

IV.4. LES CONDITIONS DU TRAITEMENT THERMIQUE :

Le béton est un matériau hétérogène composé de trois phases totalement différentes : l'eau de gâchage comme phase liquide, les granulats et le ciment comme phase solide et l'air occlus comme phase gazeuse. Ces trois phases se comportent différemment lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées. L'eau de gâchage et l'air occlus se dilatent et augmentent de volume de plusieurs fois par rapport à la phase solide qui est la matrice cimentaire et les

granulats. Cette augmentation de volume engendre des contraintes internes dans le béton, ce qui le fragilise et diminue sensiblement ces performances mécaniques et sa durabilité. Pour diminuer les contraintes lors du traitement thermique d'un béton un régime (cycle) d'augmentation des températures dans le temps est plus que nécessaire. Ce régime (cycle) de traitement thermique se compose de quatre phases (figure n°14). L'eau évaporée pendant le chauffage et le refroidissement du béton constitue aussi une des causes d'altération des résistances à long terme du béton.

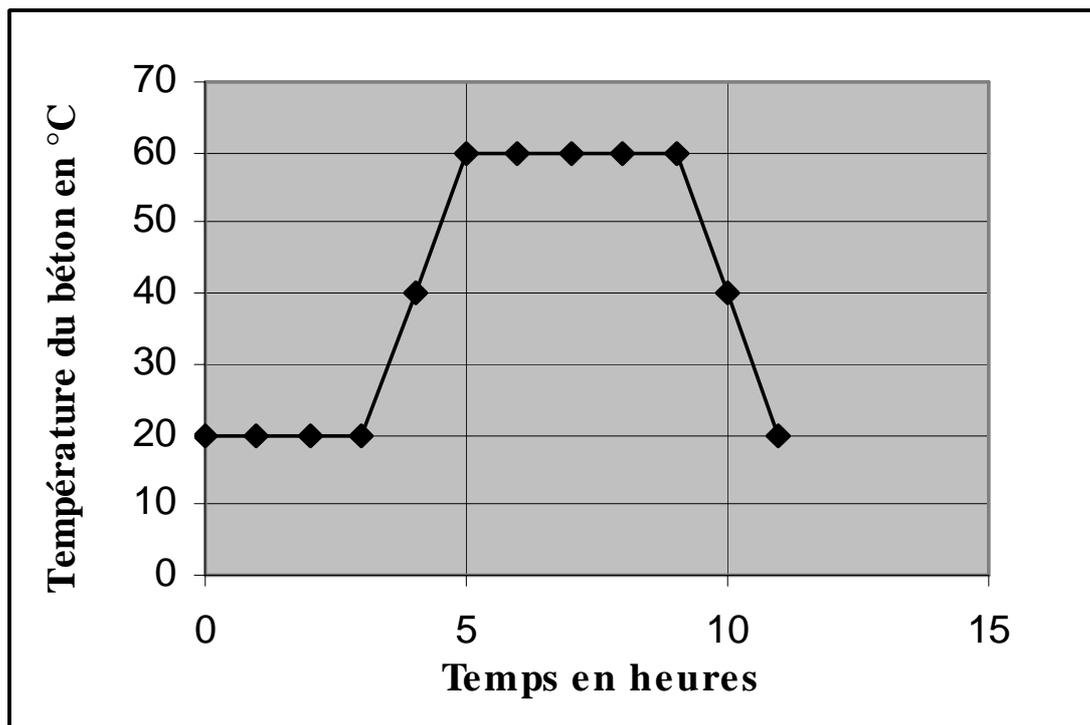


Figure n° 14: Principe du cycle de traitement thermique d'un béton.

IV.4.1. LES ETAPES DU TRAITEMENT THERMIQUE :

1. Préprise ou prétraitement :

En générale les traitements thermiques provoquent sur les bétons des baisses de résistances finales, la préprise consiste à laisser le béton un certain temps après coulage soit à la température ambiante, où a une température légèrement plus élevée (20° C à 30° C) avant le traitement thermique. Ainsi le béton peut commencer sa prise et disposer d'une résistance lui permettant de supporter les contraintes internes pendant le traitement thermique, ainsi il n'y

aura pas de diminution de résistance ultérieure [26]. Donc le prétraitement permet, tout en accélérant le durcissement par la chaleur, d'éviter l'altération des résistances à long terme du béton. La durée de cette période dépend du cycle appliqué et de la formulation du béton (nature du ciment utilisé, composition minéralogique, de son dosage, du rapport E/C, adjuvant utilisé, etc.) et de la température du béton frais [29,26].

MAMILLAN (1970) a effectué ces quelques essais pour montrer l'importance de la préprise, on comparant les résistances à 28 jours des bétons qui différent seulement par le type de ciment, ces ciments sont :

- CPA 400;
- CPAL 325.

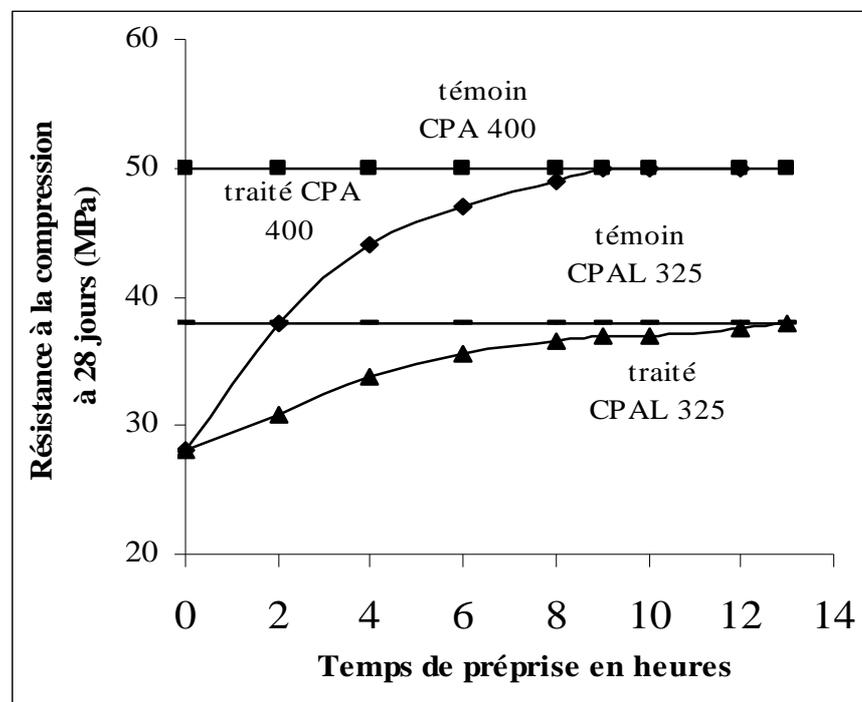


Figure n° 15 : Influence de la préprise sur les résistances à la compression à l'âge de 28 jours d'un béton.

La figure n°15 montre l'influence du temps de préprise à 20°C sur la résistance à la compression du béton à 28 jours. Les bétons, sont traités 3 heures à une température de 75°C avec des temps de préprise variables, pour ces bétons le rapport E/C est de 0,50.

Pour le béton de CPA 400, la figure montre que le béton traité sans préprise subit une baisse de résistance d'environ 40% par rapport au béton témoin, mais la chute de résistance n'est que d'environ 20% pour un temps de préprise 2 heures et 10% pour celui de 5 heures et presque nul pour celui de 9 heures.

Pour le béton de CPAL 325, la figure montre que le béton traité sans préprise subit une baisse

de résistance de 27% par rapport au béton témoin, cette chute de résistance n'est que de 10% pour un temps de préprise 4 heures et il faut 13 heures pour avoir la même résistance que le béton témoin [71].

On peut conclure que le temps de préprise est plus que nécessaire dans le traitement thermique des bétons.

2. Phase de montée en température :

Au cours de laquelle le béton atteint la température maximale de traitement thermique, la vitesse de montée en température varie de 10 à 30° C par heure. Limiter la vitesse de montée en température, afin d'éviter de forts gradients thermiques dans le béton pouvant engendrer des fissures et une hétérogénéité de la microstructure. Les résistances les plus élevées sont obtenues pour les bétons chauffés lentement.

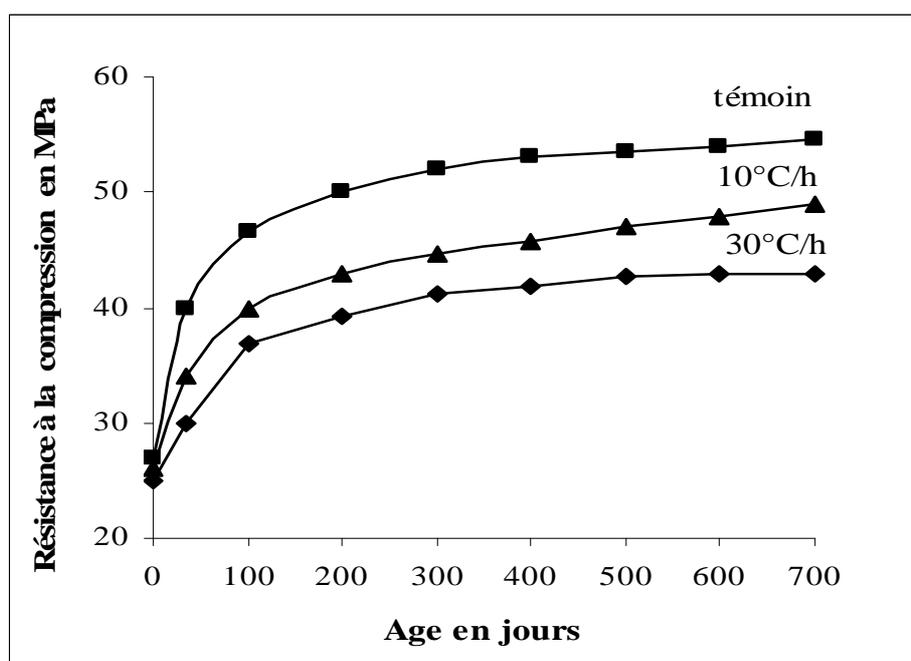


Figure n° 16 : Influence de la vitesse d'élévation de la température d'un traitement thermique sur les résistances en compression à long terme, MAMILLAN (1973).

La figure n°16 représente l'évolution des résistances en compression d'un béton sans traitement thermique et les bétons ayant subi un chauffage à 70°C pendant 9 heures avec deux vitesses de monter en température 10°C/h et 30°C/h. On remarque qu'à 700 jours la chute de résistance par rapport au béton témoin du béton chauffé avec une vitesse de montée en température 10°C/h est de 10% et elle est de 23% pour un béton chauffé avec une vitesse de montée en température

30°C/h.

On peut conclure que les meilleures résistances mécaniques sont données par les bétons chauffés lentement. La cause physique de l'altération des résistances ultérieures est due à l'expansion très importante des constituants du béton frais l'eau et l'air en particulier [69,71].

3. Phase de maintien en température :

Durant ce palier de température l'hydratation du béton va se poursuivre, d'où l'énergie extérieure à fournir au béton est faible, les réactions d'hydratation, exothermiques, compensant presque les fuites thermiques, si les pièces sont suffisamment massives, ou si les coffrages sont calorifuges [26]. Les études menées par Klieger en 1958 par Verbeck et Helmuth, en 1968 par Mamillan en 1970 par Alexandersson en 1972 par Byfors en 1980 et par Regourd et Gautier en 1980 ont montré que la résistance à court terme du béton augmente avec l'augmentation de la température de fabrication ou de mûrissement. Alors qu'à long terme plus la température est élevée, moins les résistances sont bonnes [29].

A. Influence de la température de traitement thermique du béton sur la résistance à court terme : Le développement des résistances à court terme d'un béton dépend essentiellement des températures, une température élevée permet la réduction de la durée de la période dormante, donc la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt.

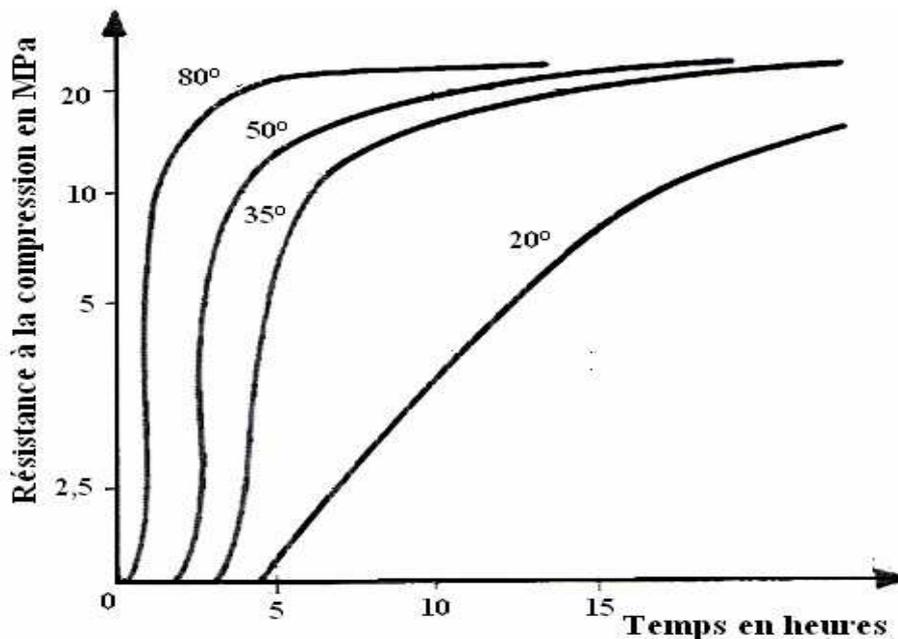


Figure n° 17 : évolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la température de chauffage

La figure n° 17 représente l'influence de l'étuvage d'un béton à différentes températures de traitement thermique allant de 20 à 80°C sur l'évolution des résistances à court terme, on s'aperçoit que :

- Pour un traitement effectué à 80°C la résistance croît rapidement entre la première et la troisième heure ;
- Pour un traitement effectué à 50°C la résistance commence à augmenter après 2h 30mn de traitement et continue jusqu'à la septième heure ;
- Pour un traitement effectué à 35°C la résistance augmente à partir de la 4^e heure ;

Mais le béton témoin, c'est après 6 heures qu'il commence à manifester une augmentation de la résistance.

D'après la figure on peut conclure que les résistances mécaniques évoluent dès l'origine suivant des vitesses différentes en fonction de la température de traitement [71].

B. Influence de la température et de la durée de traitement thermique du béton sur les résistances à court terme :

La température de traitement qui permet l'obtention de la qualité au démoulage la plus élevée dépend de la durée de traitement, ainsi sur la figure n° 18 la résistance en compression est portée en fonction de la température pour des courbes isochrones à 6, 10, 15 et 24 heures, d'après ce graphe, on voit que chaque temps possède une température optimale donnant la meilleure résistance immédiate [82], ainsi

- pour 80°C, il faut un traitement d'une durée de 6 heures,
- pour 70°C, il faut un traitement d'une durée de 10 heures
- pour 60°C, il faut un traitement d'une durée de 15 heures
- pour 50°C, il faut un traitement d'une durée de 24 heures.

En pratique la durée et la température de traitement dépendent : du nombre de rotations journalières, de l'horaire journaliers de l'usine, du temps nécessaire pour la préparation du moule. Aussi il faut choisir l'investissement le plus faible.

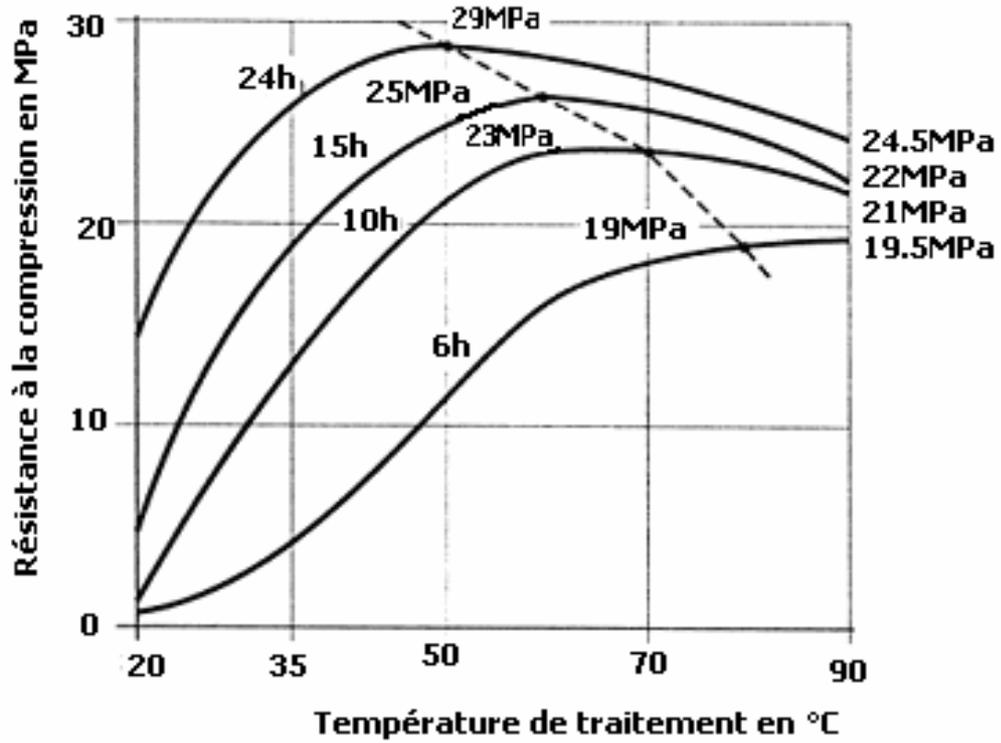


Figure n° 18 : Résistance en compression en fonction de la température et de la durée de traitement.

C. Influence de la température de traitement thermique sur les résistances ultérieures du béton :

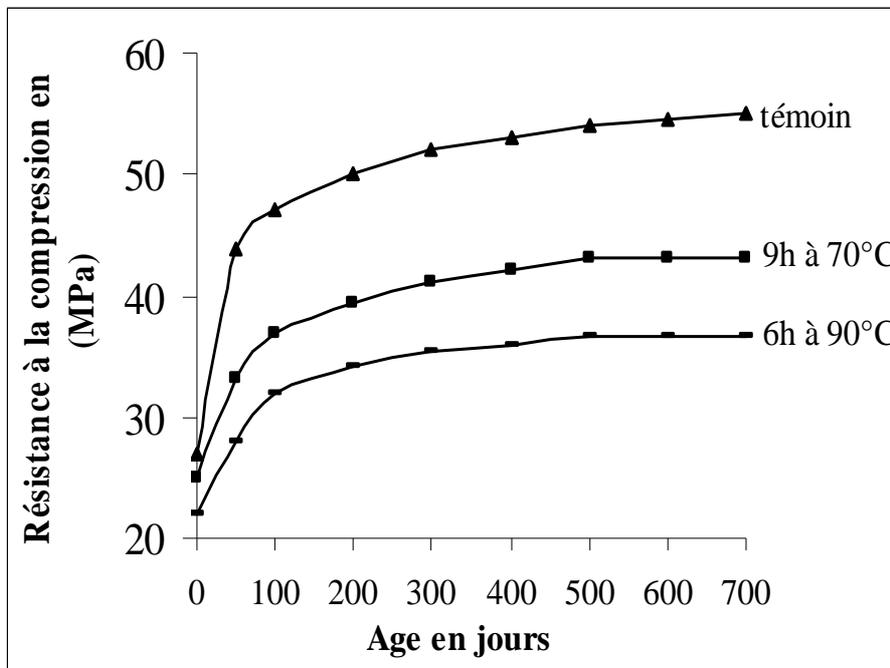


Figure n°19 : Influence de la température maximale sur les résistances en compression à long terme MAMILLAN (1973).

La figure n°19 montre l'évolution des résistances à la compression en fonction de l'âge des bétons traités en étuve avec vapeur d'eau, pendant 09 heures à 70°C et 06 heures à 90°C, avec une vitesse d'élévation de la température de 30°C/h et un rapport E/C = 0,50. Comparés avec un béton témoin de rapport E/C = 0,50 [71].

D'après la figure n°19 on peut conclure que plus la température maximale du traitement thermique du béton est élevée moins le sont les résistances à la compression. Cependant les chutes des résistances ultérieures, d'après les études effectuées dans le domaine sont du :

- aux contraintes internes au béton liées au retrait, à la dilatation rapide des différents constituants du béton (phase liquide, gazeuse),
- Au degré d'hydratation de la pâte de ciment durci et à la nature des hydrates formés.

4. Phase de refroidissement :

Qui permet à l'élément en béton de revenir à une température ambiante sans risque de désordre. La durée de cette phase à une influence sur la qualité finale du produit, pour cela le refroidissement doit être lent, en particulier en hiver la pièce est soumise au choc thermique, phénomène qui risque d'être la cause d'une détérioration de la structure du béton. La différence de température entre la température minimale du refroidissement et la température ambiante ne doit pas dépasser 40 °C [100].

IV.4.2. L'EVAPORATION :

En atmosphère libre le chauffage du béton entraîne naturellement son séchage. La réaction chimique d'hydratation fixe l'eau très lentement, l'eau encore libre retenue dans la masse des constituants solides du béton par le seul effet de la tension superficielle, s'évapore sous l'effet de la température. Cette évaporation conduit à une insuffisance de la quantité d'eau destinée à l'hydratation, d'où l'hydratation incomplète qui entraîne l'altération des résistances mécaniques. Un autre inconvénient de l'évaporation est le retrait du béton. Pour limiter l'évaporation, il est conseillé d'assurer pour le béton une cure hygrométrique la proche possible de 100% d'humidité [26]. C'est dans ce souci que nous avons opté pour un traitement thermique sous l'eau.

IV.5. L'INFLUENCE DE LA COMPOSITION DU BETON LORS D'UN TRAITEMENT THERMIQUE :

La qualité d'un béton qui doit être traité thermiquement est d'une grande importance, cependant le béton doit être de bonne qualité (un mauvais béton même chauffé ne donne que de faibles résistances). Parmi les paramètres les plus influents, nous citerons la qualité du ciment et le rapport E/C.

1. La qualité du ciment :

La composition minéralogique du ciment joue un rôle considérable dans l'accélération du durcissement du béton par la chaleur.

- Les ciments ayant une haute teneur de silicate tricalcique C_3S convient mieux à l'étuvage, un béton a forte teneur en alite après traitement à la vapeur atteint 70% de la résistance à 28jours du béton témoin. La quantité de C_3S doit être le triple de celle du silicate bicalcique C_2S , si le pourcentage de C_2S est le même que celui de C_3S alors, il y'aura une influence plus marquée des aluminates qui va se traduire par une faible augmentation des résistances mécanique ;
- Pour un ciment fin la résistance crois avec la teneur en aluminates, mais pour un traitement à la vapeur, les ciments possédant une haute teneur en C_3A ont une faible résistance mécanique, il existe une teneur optimale en C_3A voisine de 10% au-delà de laquelle la résistance du béton étuvé diminue ;
- Une élévation de la teneur en sulfate des ciments permet un traitement thermique efficace on éliminant l'influence nocive des aluminates.

D'après REINSDORF [96], il est préférable de choisir des ciments de 50 à 60% de C_3S contenant moins 10% de C_3A et une teneur en SO_3 supérieure à 3% [87, 94, 102].

L'ajout de constituants secondaires (en particulier le laitier et les cendres volantes) est favorable et les résistances mécaniques du béton traité vont proportionnellement augmenter.

Comme dans le cas de conservation à la température ambiante, les résistances après traitement sont d'autant plus élevées :

1. que le ciment est plus fin étant donné que la réaction entre la phase solide et la phase liquide est la plus active ;
2. que le dosage en ciment est plus élevé ;

Dans le cas d'un traitement thermique de très courte durée, il est intéressant d'utiliser des ciments ayant des chaleurs d'hydratations initiales élevées [74].

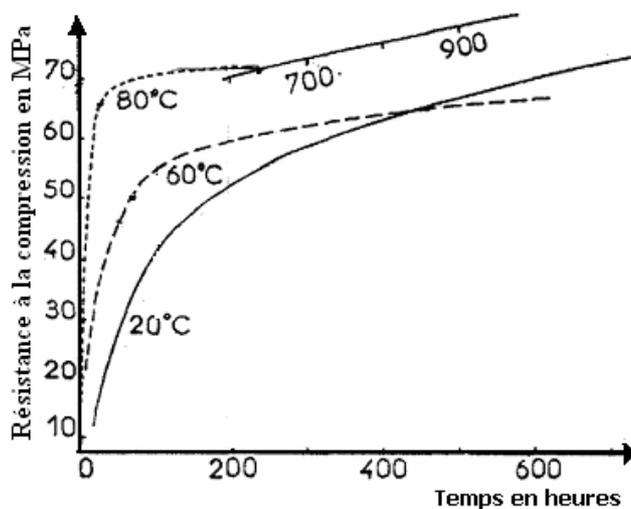


Figure 20 : évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (CPA N°1)

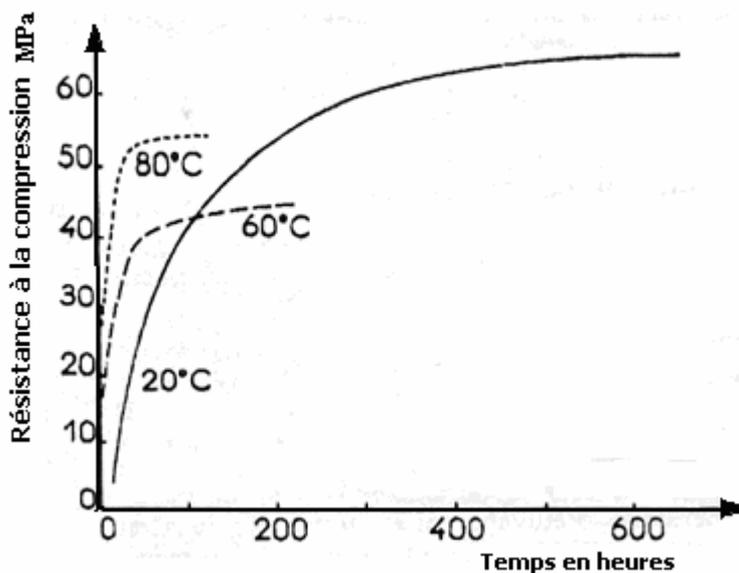


Figure 21 : évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (CPA N°2)

Les figure 20 et 21, représentent, l'évolution en fonction du temps, des résistances mécaniques en compression d'éprouvettes de mortier. Ces éprouvettes sont confectionnées avec deux ciments différents qui sont :

- un CPA N°1 contenant 73 % C_3S et 4 % de C_3A
- un CPA N°2 contenant 62 % C_3S et 12 % de C_3A

Ces éprouvettes ont subi un traitement hydrothermal continué (plus de 100 heures) à des

températures de 60°C et 80°C.

On comparant les deux graphes, on constate que pour le CPA N°2 dont la quantité des aluminates est importante par rapport au ciment CPA N°1, les courbes d'évolution dans le temps de la résistance en compression à des températures de 60°C et 80°C croient plus rapidement que celle du CPA N°1 à court terme mais à long terme nous remarquons le contraire. On peut donc conclure qu'avec un traitement thermique il est préférable d'utiliser des ciments à faible teneur en Aluminates tricalciques [93].

2. Le rapport E/C :

Le meilleur moyen pour augmenter la résistance initiale d'un béton d'une manière importante consiste à réduire le rapport E/C. Ce dernier influe sur la compacité du béton et un béton qui contient trop de vide ne pourra jamais atteindre des performances exceptionnelles.

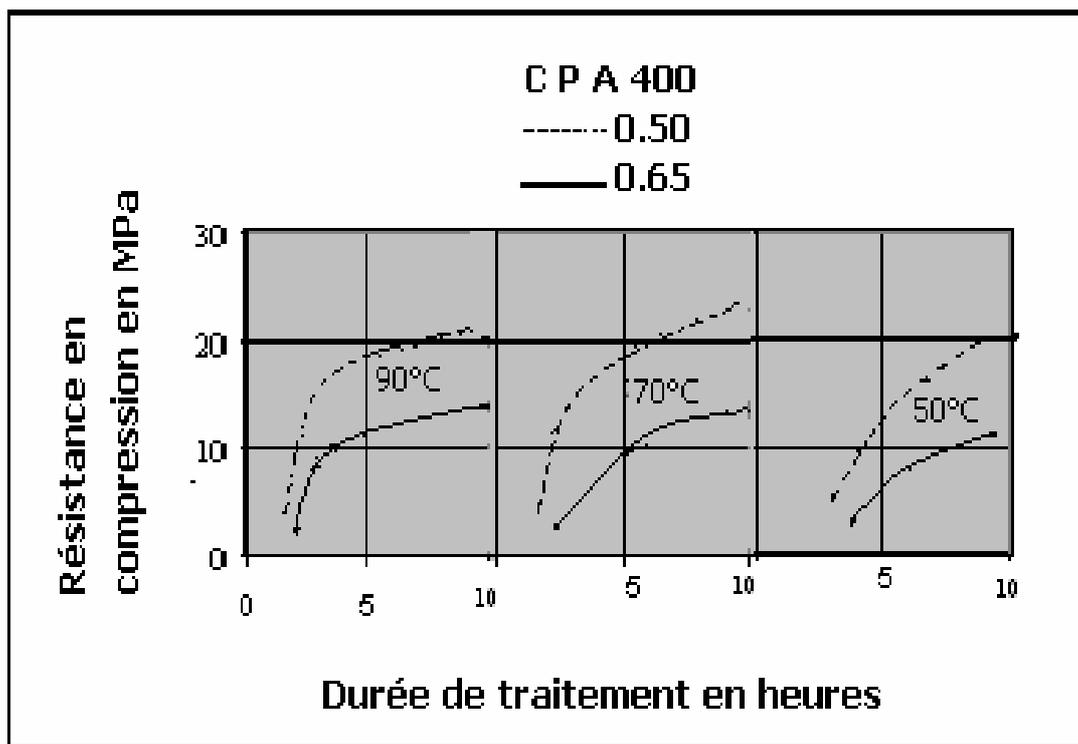


Figure n°22 : Influence du rapport E/C sur la résistance en compression D'un béton traité thermiquement, ciment (CPA 400)

Sur la figure n° 22 est portée l'influence du rapport E/C sur la résistance en compression à court terme en fonction de la durée de traitement, pour deux dosage en eau : 175 et 220 litres/m³ (E/C=0,50 et 0,65). D'après le graphe on constate que :

Pour une température de 90°C et après 7 heures de traitement thermique le béton d'un E/C=0.50

donne une résistance à la compression supérieure de 45% à celle du béton d'un $E/C=0.65$, de 35% à pour un traitement à 70°C et de 45% pour un traitement à 50°C [73]. On peut conclure que plus le rapport E/C pour le béton chauffé est importante moins le sont les résistances mécaniques.

IV.6. LES ETUDES THEORIQUE CONSERNANT LA QUALITE D'UN BETON TRAITE THERMIQUEMENT :

ALEXANDERSAN en 1972[9] a étudié les causes des pertes de résistance à 28 jours lors du traitement du béton par la chaleur, il a montré que les pertes sont principalement dues à l'augmentation de la porosité et à la fissuration, ce sont des causes physiques et que c'est la pression de l'air dans les pores et les capillaires qui provoquent ces dégradations. Pour lui les causes chimiques auraient des répercussions très faibles [69].

MAMILLAN en 1970 [73] a expliqué les altérations du béton traité par la chaleur, par l'expansion très importante des constituants du béton frais (l'air occlus et l'eau de gâchage). A la limite en chauffant très vite, on observe que le béton gonfle comme un soufflé. La préprise est un moyen très efficace pour empêcher cette altération. La préprise permet à l'hydratation de débiter, et ainsi de diminuer la dilatation du béton frais. **MAMILLAN** a trouvé que le coefficient de dilatation du béton frais (mesuré sur éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm) est de $30 \mu\text{m/m}$ par degré pour une préprise de 30 minutes seulement, tandis qu'il est de $11,5 \mu\text{m/m}$ par degré après une préprise de 4 heures, voisin de celui du béton durci. Ainsi la dilatation du béton qui a subi une préprise de 4 heures est presque entièrement réversible, ce qui n'est pas le cas de la dilatation du béton traité sans préprise suffisante.

VERBECK et HELMUTH [107] qui suggère qu'à des vitesses élevées dues aux températures, les produits d'hydratation à l'intérieur de la pâte de ciment n'ont pas suffisamment de temps pour se précipiter uniformément dans l'espace interstitiel (comme dans le cas des basses températures). La concentration de ces produits d'hydratation au voisinage des grains qui s'hydrate retarde leur hydratation subséquente, ce qui affecte défavorablement la résistance à long terme [82].

REGOURD et GAUTIER en 1980 [93] ont expliqué le fait que lorsque la température

s'élève la résistance à court terme augmente mais ce n'est pas le cas à 28 jours d'âge, car les hydrates formés sont plus faibles mécaniquement. Cela peut être lié à la microstructure du matériau. A taux d'hydratation égal du C_3S , les C-S-H à fibres courtes et enchevêtrées à 20°C, se présentent à 80°C, en fibres longues et dissociées [69].

COURTAULT en 1974 [38] a montré en ce qui concerne les causes chimiques de perte de résistances, que les produits d'hydratation de l'aluminate tricalcique et de l'alumino-ferrite tétracalcique peuvent être différents suivant la température. Pour les silicates de calcium, les modifications apparaissent pour les températures supérieures à 50°C et ces modifications peuvent influencer les résistances mécaniques.

V.CONCLUSIONS :

1. Plusieurs méthodes sont utilisées pour procéder à l'accélération du durcissement du béton à savoir l'utilisation de ciments à forte chaleur d'hydratation initiale, d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement et le chauffage du béton par la chaleur. Ce dernier peut être passif ou actif, cependant le procédé d'accélération le plus efficace peut être obtenu par introduction d'une chaleur dans le béton au cours de premières heures de sa mise en place jusqu'à l'obtention de résistance jugée indispensable pour la bonne tenue de l'élément en béton après décoffrage.
2. Les résistances mécaniques, à long terme, d'un béton dont le durcissement est accéléré par la chaleur sont plus faibles que celles d'un béton ayant durci normalement. La chute de résistances mécaniques est essentiellement due aux contraintes internes d'ordre physique et chimique.
3. Lors du traitement thermique d'un béton, dans le souci d'éviter des fissures macro ou microscopiques, il faut prévoir une période de préprise, éviter les chocs thermiques, élever la température à une vitesse modérée jusqu'à la température voulue et le refroidissement de l'élément en béton doit être lent.
4. La composition minéralogique et la finesse de mouture du ciment ont un rôle très important lors d'un traitement thermique du béton, un faible rapport E/C est aussi conseillé.

CHAPITRE III

ENERGIES ET DEVELOPPEMENT DURABLE

I. INTRODUCTION :

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale et plus précisément avec la reconstruction de l'Europe et du développement intense de l'industrie, l'être humain a fait appel aux énergies fossiles **non renouvelables** et polluantes pour satisfaire à ses besoins énergétiques. Cela a fait naître la crainte d'un épuisement prématuré de ces ressources, ainsi que des bouleversements climatique et écologique [98]. Ces bouleversements se manifestent par:

- Les pluies acides liées aux rejets d'oxydes d'azote et de soufre (SO_2) par les moyens de transports et par certaines industries qui provoquent le dépérissement des forêts ;
- La pollution atmosphérique qui perturbe l'écosystème et dégrade la santé du public, ce qui cause la mort d'environ 500.000 individus annuellement dans le monde ;
- Le réchauffement climatique de la terre provoqué par les gaz à effet de serre (la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote et l'ozone) [91] qui engendre des risques d'inondations et de perte de biodiversité pour cause de difficultés d'adaptation de la faune et de la flore à ces changements rapides ;
- Dégradation des mers par les rejets d'hydrocarbures ;
- L'appauvrissement de la couche d'ozone causée par le bromure méthylique ainsi que les gaz chlorés (chlorofluorocarbures CFC, hydrochlorofluocarbures HCFC).

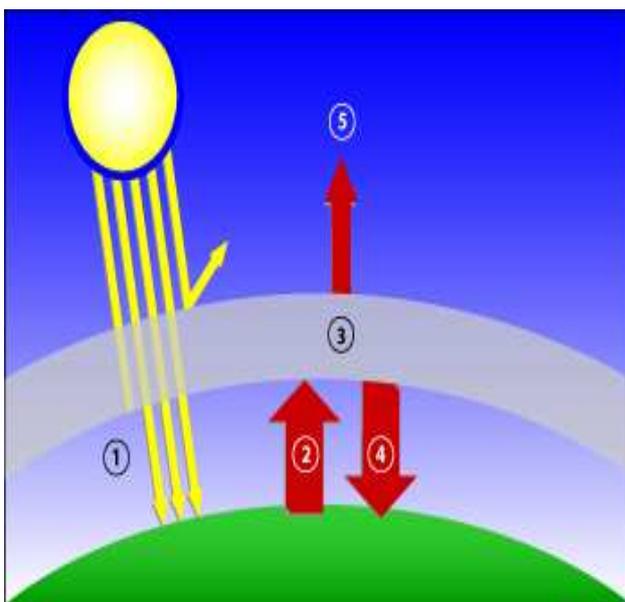


Figure n° 23 : L'effet de serre artificiel

1. Les radiations solaires pénètrent dans l'atmosphère ;

2. Les ultraviolets sont absorbés par la terre puis réfléchis sous forme d'infrarouges ;

3. Les infrarouges piégés à nouveau réfléchis par les gaz à effet de serre vers la terre ;

4. Ce qui fait augmenter la température du globe.

Face à ces conséquences aussi catastrophiques qu'irréversibles, l'humanité doit trouver une réponse et la politique du **développement durable** est une alternative inéluctable au mode de développement actuel [1, 10, 30, 66,75].

Dans le cas de l'énergie nucléaire, diverses options de développement existent, la production d'électricité d'origine nucléaire présente l'avantage d'être exempte d'émission de gaz à effet de serre. Mais cette énergie est remise complètement en question par certaines sociétés, ce sont les accidents majeurs survenus dans le Three Mile Island en 1979 et en Tchernobyl en avril 1986 qui ont contribué à cette perception de l'opinion publique et du monde politique, sans oublier les craintes relatives à la prolifération des armes nucléaires. D'ailleurs le nucléaire est exclu du programme des objectifs établis par le protocole de Kyoto.

Pour parvenir **au développement durable**, à l'harmonie et à la paix sur l'ensemble du globe [98], il est impératif d'introduire de nouvelles notions, qui sont d'actualité parmi lesquelles il y a la protection de l'environnement et l'économie d'énergie [25], telles que les piles à combustible, la cogénération de chaleur et d'électricité, **les énergies renouvelables**. Ces dernières « énergies renouvelables » devraient sans nul doute jouer un rôle significatif dans les prochaines décennies, et ce dans domaines allant de la production électrique (décentralisée ou de réseau) à la production de chaleur (solaire passif, **géothermie**) sans oublier le secteur des transports (biocarburants) [98].

II. LA NOTION DU DEVELOPPEMENT DURABLE :

II.1. DEFINITION :

L'expression « développement durable » fut utilisée pour la première fois en 1987, après 40 ans de réflexions et d'analyses. Son promoteur, C M E D, le définit comme « **un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs** » [33].

C M E D est La Commission Mondial sur l'Environnement et le Développement créée par les Nations Unies, par la résolution 38/161 de 1983, présidée par Gro Harlem Brundtland alors Premier ministre de Norvège.

II.2. LES TRAITES DU DEVELOPPEMENT DURABLE :

Dans le but de concrétiser les engagements internationaux envers la politique du développement durable en juin 1992, est tenu le premier Sommet de la Terre à Rio de Janeiro (Brésil), qui a réuni 150 chefs d'états. L'objectif de ce sommet est de faire entrer l'environnement au cœur de processus de décision, pour cela 27 principes sont établis et trois conventions en ont découlé :

La première est la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, sa mise en œuvre prend forme par le protocole de Kyoto, signé lors de la troisième session de la Conférence des Parties, le 11 décembre 1997, qui fixe l'engagement des pays développés à réduire le total de leurs émissions agrégées de 6 gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆) d'au moins 5,2 %, au cours de la période 2008-2012, par rapport au niveau de 1990.

La deuxième, la convention sur la diversité biologique, vise à protéger l'ensemble de la diversité du vivant (en regard des gènes, des espèces et des écosystèmes), et l'usage durable des ressources, ainsi qu'un partage équitable des bénéfices qui en résultent, cette convention a donné lieu à la signature du protocole de Carthagène sur la biosécurité.

Enfin, la convention sur la lutte contre la désertification signée deux ans après à Rio.

Le sommet de Rio a aussi donné naissance à l'Agenda 21, vaste programme d'action fixant des objectifs et décrivant des moyens et des politiques, permettant d'atteindre un développement durable [10, 33, 62].

Le sommet de Johannesburg (septembre 2002) où sommet mondial pour le développement durable (S M D D), avait pour défi de renforcer au niveau local, national, régional et mondial, les trois piliers du développement durable, qui sont la protection de l'environnement, le développement social et le développement économique [10, 22].

L'énergie étant un des facteurs de production essentiels dans le fonctionnement de toute économie, a suscité plus de propositions à ce sommet, d'après le secrétaire général des Nations Unies Kofi Annan, pour la première fois les pays participants ont encouragé le développement de l'utilisation **des énergies renouvelables**, d'une manière urgente et l'augmentation de leur consommation mondiale à 15%, d'ici l'an 2010 [22].

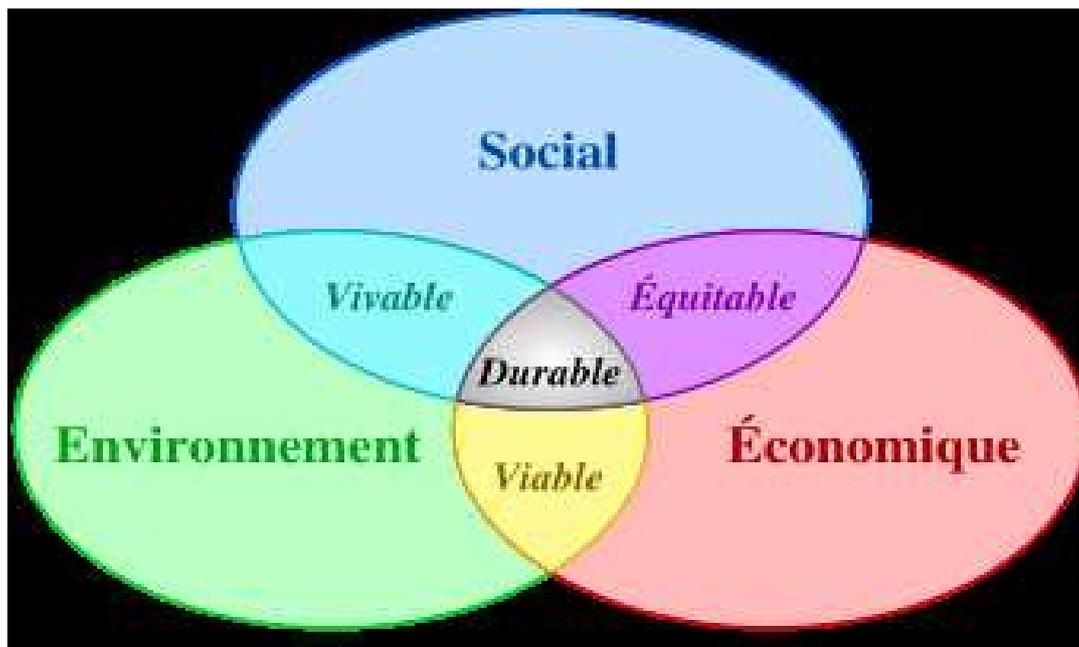


Figure n° 24 : Schéma du développement durable

Tableau n° 2 : Les grandes dates de la politique du développement durable [34]

DATE	LIEU	TRAITÉ
1972	Stockholm	Première conférence des nations unies sur l'environnement appel des scientifiques pour la protection de la nature.
1987	Rapport bruntland	Pour « un développement qui ne pénalise pas les générations futures ». identification de deux risques : l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone.
1987 1993	Protocole de Montréal / amendements de Londres et de Copenhague	Engagement des états pour la suppression de la consommation et la production de CFC au 1/1/1995 et arrêt de la consommation des HCFC en 2015
1992	Rio de Janeiro	Conférence des nations unies sur l'environnement et le développement : agenda 21, conventions sur la biodiversité et le climat, déclaration sur les forêts.
1994	Berlin	Première « conférence des parties » : consensus pour ramener en 2000 les émissions de CO ₂ à leur niveau de 1990.
1996	Genève	Seconde « conférence des parties » : décision de fixer des objectifs quantifiés légalement contraignants.
1997	Kyoto	Troisième « conférence des parties »

II.3. LEGISLATION ALGERIENNE PAR RAPPORT AU DEVELOPPEMENT DURABLE :

En Algérie, le cadre légal régissant l’Evaluation des Impacts sur l’Environnement (E I E) remonte à 1983, on a promulgué la loi cadre n°83-03 du 5 février sur la protection de l’environnement. Cependant, la législation détaillée relative aux E I E fut décrétée (décret exécutif 90-78) le 27 février 1990.

En 2002 étaient promulgués deux lois, une relative à l’électricité n°02–01 du 5 février, ainsi que les mesures d’introduction de façon durable **les énergies renouvelables** dans le champ énergétique, national et ceci dans la production d’électricité. L’autre est La n°03-10 du 19 juillet relative à la protection de l’environnement dans le cadre du développement durable.

Le 30 novembre 2003 l’Algérie a été le premier pays producteur de pétrole, à approuver en conseil des ministres l’avant-projet de loi relatif à la promotion **des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable**, initié par le ministère de l’aménagement du territoire et de l’environnement.

Intervenant à ce sujet le Président de la République a relevé la trop forte dépendance de notre pays par rapport à la ressource des hydrocarbures qui est relativement modestes alors que nos besoins sont en constante évolution, ainsi que les dangers latents et potentiels de la pollution.

Cet Avant-projet de loi repose sur les objectifs suivants :

1. la protection de l’environnement en favorisant le recours à des sources d’énergies non polluantes ;
2. la contribution à la lutte contre le réchauffement climatique en limitant les émissions de gaz à effet de serre ;
3. la participation à un développement durable par la préservation et la conservation des énergies fossiles ;
4. la protection de la durée de vie des potentialités nationales en hydrocarbures ;
5. la contribution à la politique nationale d’aménagement du territoire par la valorisation des gisements **d’énergies renouvelables** [23].

Le 14 août 2004 était promulgué, la loi n° 04-09 relative à la promotion **des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable**.

III. PERSPECTIVES DE DEMANDE D'ENERGIE :

L'énergie sous toutes ses formes est incontestablement un des paramètres les plus prépondérants dans le développement et la croissance économique d'un pays. Une bonne gestion de l'énergie, est l'un des enjeux majeurs du XXI siècle pour les pays développés comme pour les pays en voie de développement. Tous aujourd'hui ont à répondre à une triple exigence: « économiser au mieux les ressources naturelles non renouvelables, développer et surtout subventionner **les énergies renouvelables** et préserver l'environnement en maîtrisant notamment les émissions de gaz à effet de serre [68].

Par ailleurs la projection des Nations Unies, fait état d'une augmentation explosive de la population mondiale, qui passera de 5,3 milliards d'habitants en 1990 à 8,1 milliards en 2020 (puis à 10 milliards en 2050 et 12 milliards en 2100) [10]. A cette croissance démographique sera ajouté le désir de confort, d'acquisition de bien matériels, de mobilité et de communication, cela va susciter une demande croissante de l'énergie [35].

Dans le contexte du développement durable, il faut choisir des voies et des actions qui ne réduisent pas le capital environnemental et social à des niveaux inacceptables qui vont compromettre les générations futures, Protocole de Kyoto de 1997, qui préconise d'adopter des décisions prudentes pour réduire le risque de futurs changements climatiques. Cependant les différents scénarios énergétiques prévisionnels élaborés chaque année par des organismes spécialisés dans le domaine de l'énergie comme l'Agence Internationale de l'Energie (A I E) ou le Conseil Mondial de l'Energie (C M E), des entreprises (Shell), des laboratoires (C N R S) ou par des ministères, des personnalités individuelles. Ces scénarios ne sont pas basés, seulement sur le changement climatique, même si celui-ci constitue désormais une préoccupation majeure, mais aussi sur l'évolution démographique, la conjoncture économique ainsi que l'évolution technologique possible.

Selon un rapport (mars 2002) du ministère de l'énergie D O E (Department of Energy) la consommation de l'énergie devrait augmenter de près de 60% pendant la seule période 1999 à 2020, qui conduira à accroître de 62% les émissions dans l'atmosphère de dioxyde de carbone. Plus de la moitié de cette augmentation d'énergie provenant des pays en développement. A l'horizon 2050, c'est à un doublement de la consommation d'énergie par rapport à la présente situation qu'il faut s'attendre (soit environ 20 milliards de tonnes équivalent pétrole).

D'après le conseil mondial de l'énergie (C M E), les réalités auxquelles sera confronté le monde à l'an 2020 sont la demande en énergie qui atteindra un niveau compris entre environ 11 et 17 Gtep, les perspectives les plus probables se situent entre 13.5 et 16 Gtep, alors qu'en 1990 la

demande en énergie était de 8.8 Gtep, dont 20% des approvisionnements en énergie primaire sera de forme renouvelable [34].

En 2050 la demande d'énergie atteindra environ 25 Gtep par an (Shell, C M E...), supposant une croissance économique de 3 % par an et une décroissance tendancielle de l'intensité énergétique. Dont la part des énergies fossiles représenterait au moins 15 Gtep avec des niveaux d'émission incompatibles avec une perspective de stabilisation des concentrations, les énergies renouvelables représentant de 5 à 8 Gtep et le nucléaire de 1 à 3 Gtep [80].

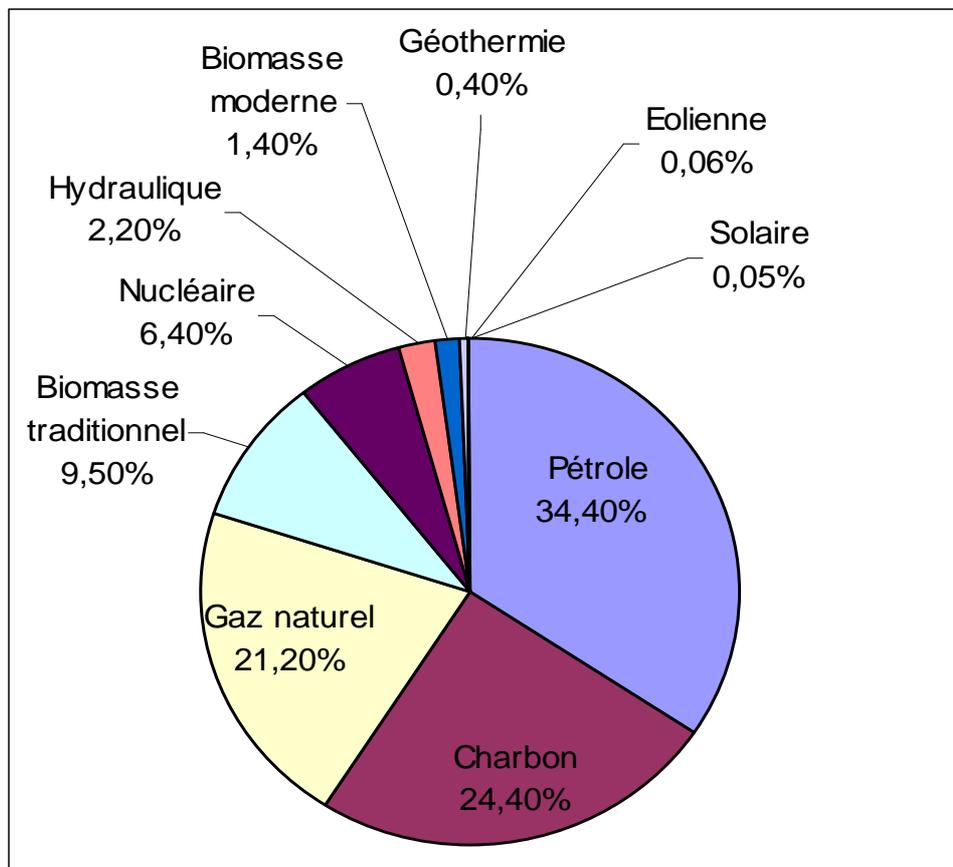


Figure n° 25 : Consommation mondiale en énergie primaire
(Source : AIE 2002-2005) [81].

Ces chiffres situent bien l'ampleur des défis à relever au XXI^e siècle pour satisfaire l'aspiration de chaque être humain. Comme l'a déclaré Monsieur .de la Rua, Président de l'Argentine, lors de l'ouverture du 18^e congrès de l'énergie (Conseil Mondiale de l'Energie, C M E, Buenos Aires, novembre 2001), des services énergétiques moderne pour tous sont en effet un élément essentiel pour parvenir **au développement durable**, à l'harmonie et à la paix sur l'ensemble du globe [98].

IV. LES ENERGIES NON RENOUVELABLES :

Les énergies non renouvelables sont généralement extraites du sous sol, elles existent en quantité importante, mais s'épuisent du moins à l'échelle de temps qui nous intéresse. On distingue deux types d'énergie [51] :

- Énergies fossiles, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel ;
- Énergies nucléaires, tels que l'uranium et le thorium.

IV.1. LES ENERGIES FOSSILES :

Les énergies fossiles fournissent près de 80% des demandes en énergie mondiale figure n°25, utilisées pour produire tous les types d'énergie (chaleur, transport, électricité,...). Les avantages de ces énergies sont : bas prix d'extraction, facilité d'exploitation, stockage très aisé, transport facile pour le pétrole et le gaz. Cependant, ces énergies possèdent de gros défauts :

- ressources non renouvelables ;
- La pollution urbaine, causé par : les poussières contenant des impuretés minérales provenant du fuel ainsi que des résidus carbonés, les produits sulfurés, essentiellement d'anhydride sulfureux SO_2 ; les oxydes d'azote, qui sont des mélanges de NO et NO_2 formés à partir de l'azote de l'air et de l'azote du combustible, des produits spécifiques comme les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP), présents en très faibles concentrations [55].
- La combustion des produits issus de matières premières d'origine fossile fournit du CO_2 et d'autres substances (méthane, protoxyde d'azote, CO, hydrocarbures, NO_x) qui contribuent massivement au réchauffement progressif de la Terre par le phénomène de **l'effet de serre** [54].

IV.1.1. Le pétrole :

Appelé aussi l'or noir, résulte de la dégradation bactériologique en absence d'oxygène, d'organismes végétaux et de poisson mort qui se dépose au fond de la mer. Le pétrole brut constitué d'hydrocarbure ou carbure d'hydrogène saturé ou alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} selon la valeur de n (nombre d'atomes de carbone) on distingue :

Les hydrocarbures gazeux $n < 5$, ceux qui ont n comprise entre 5 et 16 sont liquides pour les paraffines solides $n > 16$. Ces variétés de pétrole brut de couleur noire, brun, les plus légers

peuvent être verdâtre, contient 50 à 95% masse sous forme de macromolécules, le reste est constitué d'eau, de sel, de sable, de soufre (sous forme de mercaptans ou de sulfure), d'azote ou de composé azoté, de faible teneur de (vanadium, molybdène, nickel). Le pétrole est connu depuis l'antiquité («huile de pierre»), utilisé comme source d'éclairage en 1840 par Abraham Gesner, géologue Canadien. Le 28 août 1859, le pétrole jaillit du premier «puits de pétrole» foré sous la direction d'Edwin L. Drake en Pennsylvanie. Actuellement le pétrole brut est la ressource énergétique la plus couramment utilisée dans le monde. Il représente 40 % de l'énergie primaire mondiale et sert à fabriquer les échéances des combustibles liquides, c'est le principal carburant utilisé pour les transports dans le monde entier. Il est aussi utilisé pour le chauffage, la production d'électricité ainsi que dans l'industrie pétrochimique.

Dans la deuxième partie du XX^e siècle, le contrôle des sources de pétrole et des voies d'approvisionnement est devenu un enjeu majeur de politique géostratégique et la source plus ou moins directe et avouée de différents conflits [98].

IV.1.2. Le charbon :

Est une forme d'énergie stocké depuis les temps géologique. Le charbon est formé par des matières végétales. Ces dernières se décomposent en présence de l'oxygène atmosphérique en CO₂ et H₂O et une infime partie qui se transforme, sous l'effet de la pression, de l'eau, de la température et en absence de l'air en différents produits : la tourbe, le lignite et le charbon.



Figure n° 26 : le charbon

Les charbons sont constitués de carbone, du soufre, d'hydrogène combiné, des combinaisons d'azote N₂ et d'oxygène O₂, des cendres (composées principalement de calcium, de silicium, d'aluminium et du fer). L'utilisation du charbon commença en Chine, il y a 3000 ans. En Europe, le charbon commence à être exploité en Echéances dès le IX^e siècle. Actuellement la consommation mondiale de charbon à la fin de l'année 1999 atteignait 3,0 Gt/an, qui représente près d'un quart de la consommation totale d'énergie primaire [47,98].

IV.1.3. Le gaz naturel :

Est un mélange gazeux composé d'hydrocarbures légers, il s'agit principalement du méthane CH_4 et de faible proportion d'éthane C_2H_6 , de propane C_3H_8 , de butane C_4H_{10} en plus de ces constituants au valeur énergétique, il contient aussi du CO_2 , du H_2S , du N_2 mais le gaz naturel ne contient pas de CO donc, il n'est pas toxique. Le gaz naturel est extrait de gisements gaziers ou pétroliers. Lorsque livré pour consommation, c'est du méthane presque pur, les autres gaz présents dans le gisement étant retirés.

De tous les combustibles fossiles, c'est celui dont la combustion pollue le moins. On utilise souvent des oléoducs pour le transporter. Le gaz naturel se prête à de multiples utilisations, notamment, la production de chaleur, d'électricité, le fonctionnement de moteurs et les transports. Le premier forage de gaz naturel est réalisé, en Chine où des tubes de bambou sont utilisés pour sa collecte et son transport, cependant, si avec la découverte du gisement de Groningue aux Pays-Bas et l'exploitation des gisements d'Algérie, en 1960 que le commerce international du gaz naturel a véritablement commencé à prendre son essor. Actuellement, la plupart des pays favorisent l'usage du gaz naturel partout où il peut se substituer au pétrole. Il présente en effet plusieurs avantages en comparaison avec ce dernier : moins cher, moins polluant, et moins « sensible » au niveau géopolitique [98].

IV.2. L'ENERGIE NUCLEAIRE :

L'énergie nucléaire est celle qui se dégage sous forme thermique à partir de réaction nucléaire. Les seuls combustibles nucléaires naturels sont l'uranium et le thorium. Ces deux derniers se trouvent dans la nature sous forme d'oxydes, de silicates, ou de sels de potassium, par exemple :

- oxydes du type $[(\text{UO}_2) (\text{UO}_3) x]$,
- oxydes mixtes $[(\text{Th}, \text{U}) \text{O}_2]$,
- silicates mixtes d'uranium et de thorium $[(\text{Th}, \text{U}) \text{SiO}_4]$,
- sel, vanadates mixtes d'uranium et potassium $[\text{K}_2\text{O}-2\text{UO}_3-\text{V}_2\text{O}_5-2\text{H}_2\text{O}]$,
- sel, titanates $[(\text{UO}, \text{TiO}, \text{UO}_2) \text{TiO}_3]$.

L'histoire de la maîtrise de l'énergie nucléaire par l'homme a commencé par la découverte de la possibilité d'introduire des fissions dans le noyau d'uranium, il y a plus de soixante ans. La

première démonstration d'une réaction en chaîne contrôlée dans le domaine de la fission fut réalisée en décembre 1942, à Stag Field, Chicago par le groupe de Fermi. Au 1^{er} janvier 2000 le nombre de réacteur nucléaire en service dans le monde s'élève à 434, et plus d'une trentaine de pays dispose d'au moins une centrale nucléaire.

L'énergie nucléaire est généralement utilisée pour la production d'électricité. L'énergie produite à partir d'une quantité de combustible nucléaire dépend très fortement du type de réacteurs (à eau sous pression, à eau ordinaire à eau bouillante, graphite-gaz, surgénérateur rapide) et du cycle de combustible.

Les problèmes les plus importants de cette source d'énergie sont : les déchets résultant de la fission nucléaire restent radioactifs pendant des milliers d'années, leur entreposage ou leur élimination cause de nombreux problèmes, auquel s'ajoutent les dangers potentiels des centrales nucléaires [98, 99].

IV.3. LES RESERVES MONDIALES EN ENERGIES NON RENOUELABLES

Pour évaluer les quantités d'énergie primaire, il faut tout d'abord faire une distinction entre « ressources » et « réserves » :

- Les ressources sont composées de gisements qui sont suffisamment reconnus, non supposés ni hypothétique, les réserves deviennent des ressources à la suite de travaux de prospection ou de reconnaissances, de résultats de mesure plus poussées, ou encore de technique de production améliorées, qui font que ces gisements deviennent économiquement exploitables ;
- Les réserves prouvées sont constituées de gisements qui géographiquement et géologiquement bien déterminés (extension, qualité, quantité), susceptibles d'être techniquement et économiquement exploitées.

Pour l'année de référence 1999 [19,47], selon les chiffres de la banque de données mondiales sur l'énergies, le volume de réserves et ressources, ainsi que la consommation mondiale, d'énergies non renouvelables sont:

Tableau n° 3 : réserves et ressources d'énergies non renouvelables.

Energie Primaire	Consommation mondiale en 1999	Réserves	Ressources
Charbon et Lignite	88.3 E J (2.8 Twan/an)	22078 E J (700 Twan/an)	282966 EJ (8973 Twan/an)
Pétrole	145.6EJ (4.6 Twan/an)	6186 EJ (196 Twan/an)	21509 EJ (682 Twan/an)
Gaz naturel	81.5 EJ (2.6 Twan/an)	5567 EJ (176 Twan/an)	9035 EJ (287 Twan/an)
Energie Nucléaire	33.5 EJ (1.1 Twan/an)	*74800 EJ (2372 Twan/an)	*286000 EJ (9069 Twan/an)
Total énergies primaire	397.7 EJ (12.6 Twan/an)	**1500 EJ (48 Twan/an)	**5720 EJ (181 Twan/an)

* avec réacteur surgénérateur

** avec réacteur à eau ordinaire

En effet, au milieu du siècle, les derniers gisements importants de pétrole conventionnel seront concentrés au Moyen Orient, ceux du gaz en Russie et au Moyen Orient. Ce qui risque de provoquer des tensions internationales. D'autres ressources pourront être mobilisées (offshore profond, Artique, sables asphaltiques, schistes bitumineux), mais à quel coût économique et écologique [89].

V. LES ENERGIES RENOUVELABLES :

V.1. INTRODUCTION :

Une énergie renouvelable est une énergie produite à partir des sources naturelles inépuisables à l'échelle des temps humains, provoqués par les astres, principalement le **Soleil** (rayonnement), la **Lune** (marée) et la **Terre** (énergie géothermique) [66].

Actuellement les sources dites renouvelables ou douces sont comme suit :

- l'énergie éolienne (le vent) ;
- l'énergie des vagues des mers et des océans ;
- l'énergie hydraulique (énergie gravitationnelle de l'eau) ;
- l'énergie de la biomasse (décomposition du bois, du sucre, des déchets organiques, etc....) ;
- l'énergie solaire (photovoltaïque ainsi que thermique)
- l'énergie géothermique (chaleur du sous-sol)
- l'énergie marémotrice (les marées).

Parmi ces sources énergétiques on distingue celles, qui peuvent être employées directement comme source d'énergie exemple :

- énergie thermique solaire,
- pompes à chaleur géothermique,
- les moulins à vent mécaniques,

Les sources énergétiques indirectes c'est-à-dire transformées en d'autres formes d'énergie exemples :

- Production d'électricité par des éoliennes ou des cellules photovoltaïques,
- Production de carburant tels que l'éthanol issu de la biomasse,
- Energie hydroélectrique,

Les sources d'énergie renouvelables sont fondamentalement différentes des combustibles fossiles ou des centrales nucléaire en raison de leur diversité et de leur abondance, un grand nombre d'entre elles ne produisent pas de gaz à effet de serre, ni d'autres émissions. En fait la biomasse stocke activement le gaz carbonique tout en croissant.

L'inconvénient évident des énergies renouvelables est leur impact visuel sur l'environnement local (Éoliennes, grandes installations solaires électriques), aussi des problèmes écologiques (les éoliennes peuvent être dangereuses pour les oiseaux, alors que les barrages

hydroélectriques créent des obstacles pour les poissons migrateurs [45], un problème sérieux dans les fleuves du nord-ouest de l'Amérique du Nord se jetant dans l'océan Pacifique où les populations de saumons ont été réduites de manière importante.

Une autre difficulté inhérente aux énergies renouvelables est leur nature diffuse et leur irrégularité (à l'exception de l'énergie géothermique). Puisque les sources d'énergie renouvelable fournissent une énergie d'une intensité relativement faible répartie sur de grandes surfaces, de nouveaux genres de « centrales » sont nécessaires pour les convertir en sources utilisables. Un autre inconvénient des énergies renouvelables est bien évident le premier investissement qui est très lourd pour les utilisateurs, une subvention des pouvoirs publics est nécessaire.

La diversité géographique des ressources est également significative. Certains pays et certaines régions disposent de ressources sensiblement meilleures que d'autres. Certaines nations disposent de ressources importantes à proximité des centres principaux d'habitations où la demande d'électricité est forte [45].

Par ailleurs, la technologie de production des équipements peut poser des problèmes écologiques, au même titre que les énergies non renouvelables.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables, comme biomasse traditionnelle représentent 9,5% de l'énergie utilisée dans le monde et selon l'A I E, les sources modernes d'énergie renouvelable représentent 4,1% de l'approvisionnement mondial en énergie, dont 2,2% de l'énergie hydroélectrique, la biomasse moderne 1,4%, l'énergie géothermique 0,4% et d'autres sources telles que l'énergie éolienne et solaire moins d'un pour cent chacune, figure n°25 [81].

Globalement, les énergies renouvelables sont plus respectueuses de l'environnement, mais nécessitent un capital plus important (tant en surface qu'en investissement).

V.2. TYPES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES :

V.2.1. ÉNERGIE SOLAIRE :

Le soleil est une étoile, donc une énorme boule de gaz chaud qui produit de l'énergie et qui rayonne. À l'exception de l'énergie géothermique et de l'énergie marémotrice, le soleil est à l'origine, de la plupart des sources d'énergie renouvelable (photosynthèse qui permet la production du bois, la chaleur qui provoque le cycle de l'eau et le vent). L'énergie solaire n'est

pas une énergie nouvelle, déjà environ 250 ans avant notre ère, Archimède, mit au point des miroirs pour concentrer l'énergie solaire et incendier la flotte romaine à Syracuse. Mais la crise d'énergie d'octobre 1973 a relancé de nombreux travaux de recherche en héliothermique [17].

L'énergie solaire peut être perçue en deux approches distinctes à savoir :

- **le solaire passif** : qui est une utilisation de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orientation, etc.), on parle d'architecture bioclimatique. Le solaire passif permet de faire des économies d'énergie sur le chauffage et l'éclairage.

- **le solaire actif** : exploite le rayonnement du soleil, soit pour produire directement de l'électricité appelée énergie photovoltaïque, soit pour chauffer un liquide caloporteur exemple de l'eau, appelée énergie solaire thermique.

1. Solaire photovoltaïque : Le solaire photovoltaïque se réalise généralement par des panneaux pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une vitre. Un panneau est un ensemble de modules connectés électriquement entre eux et situé dans le même plan (vis-à-vis du soleil), le module est à son tour un groupement de cellules de matériau semi-conducteur «silicium mono- ou polycristallin». Si ce matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le courant produit par une cellule est continu et à 0,6 V. De multiples panneaux peuvent être reliés entre eux. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Edmond Becquerel (1821-1891),

utilisé pour la première fois dans le domaine spatial dans les années quarante [49,57].

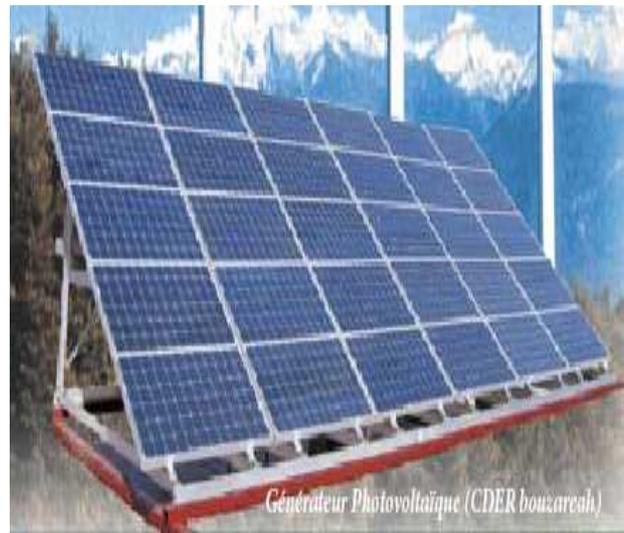


Figure n° 27 : Installation de capteurs photovoltaïque.

2. Solaire thermique : Le capteur solaire absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur, il est constitué d'un matériau fortement absorbant, tel l'oxyde de chrome. Cette chaleur

est ensuite transmise à un fluide caloporteur (eau, l'air, sels fondus, huiles synthétiques) qui l'a transporte vers un réservoir de stockage d'énergie. Il existe différents types de capteurs qui sont classés suivant la température qu'ils permettent d'obtenir : bassin solaire ($\leq 100^{\circ}\text{C}$), capteur plan noir ($\leq 120^{\circ}\text{C}$ au dessus de la température ambiante), capteur plan à tube sous vide et capteur cylindro-parabolique à faible facteur de concentration «environ 10 » ($\leq 200^{\circ}\text{C}$ au dessus de la température ambiante), capteur plan sélectif et capteur cylindro-parabolique à faible facteur de concentration moyen ($\leq 260^{\circ}\text{C}$ au dessus de la température ambiante), capteur cylindro-parabolique à facteur de concentration maximal (environ 80°C) et système à captation centrale ($\leq 600^{\circ}\text{C}$ au dessus de la température ambiante), la limite pratique des systèmes à captation centrale ($\leq 3500^{\circ}\text{C}$) [86].

Le solaire thermique permet d'assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée (voir Figure n° 28), le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage de céréales.

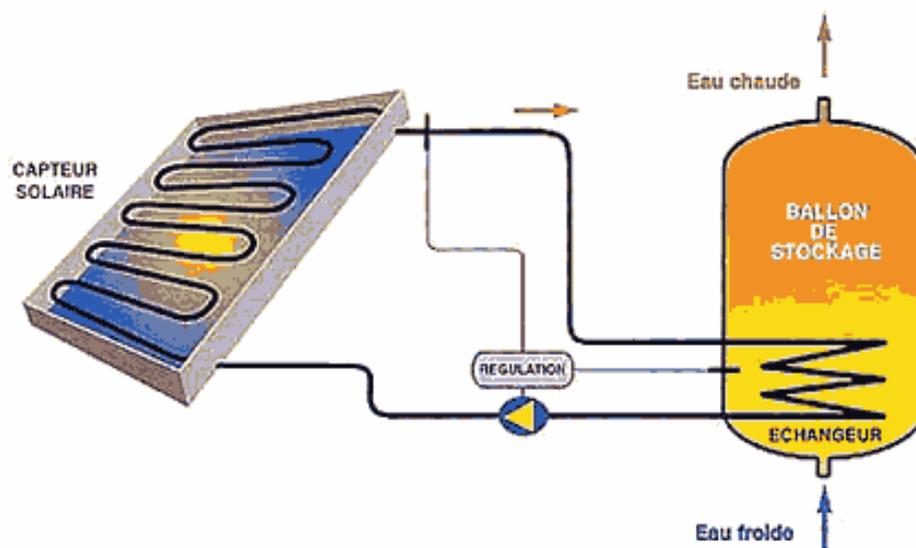


Figure n° 28 : Installation du capteur à effet de serre pour la production d'eau chaude sanitaire

V.2.2. ENERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne «du nom Éole = dieu du vent de la Grèce antique» est la transformation de l'énergie cinétique des vents en énergie utile par deux types de systèmes bien distincts :

1. le «moulin à vent» pour la production d'énergie mécanique ;

2. l'«aérogénérateur» qui sert à la production d'électricité [86].

Les premières machines à vent, elles datent de l'Antiquité. Le premier problème de l'énergie éolienne gratuite et souvent abondante, est l'inconstance, du vent d'où les très rapides variations de la capacité de production, qui amènent des difficultés de gestion de la production, cette inconstance exige aussi des moyens de stockage de l'énergie.



photo B. SOUHL

Figure n°29 : Aérogénérateur (INRA- Adrar)



Figure n°30: Le traditionnel moulin à vent

L'éolienne devra être située au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées à une distance de 100 mètres au moins des obstacles (arbres, dénivellations, maisons, murs, poteaux...), et orientée vers les vents dominants en tenant compte de la vitesse, la direction du vent, les vents réguliers sont plus intéressants, donnent le maximum d'énergie annuelle, exemple les alizés, ayant une vitesse moyenne de 6 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s [76].

V.2.3. ÉNERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie hydraulique est l'énergie dégagée par le déplacement ou l'accumulation d'un fluide non compressible comme l'eau. On distingue deux types d'énergie hydraulique :

Énergie électrocinétique : Ce type d'énergie peut-être exploitée dans l'eau quand elle est pompée par les canaux minuscules.

Énergie hydroélectrique : L'eau, par son poids et sa vitesse, actionne une turbine qui transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique, la turbine est couplée à un générateur

qui transforme l'énergie mécanique en électricité. Pour installer une centrale, il faut une hauteur de chute et un débit suffisant, qu'on pourra obtenir en tirant parti de chutes naturelles, ou par l'aménagement d'un barrage. L'avantage principal des systèmes hydroélectriques est leur capacité de gérer les charges maximales élevées saisonnières (quotidiennement aussi). L'hydroélectricité fut le seul moyen de production d'électricité basé sur une source renouvelable, aujourd'hui, elle représente la première source mondiale de production d'électricité [86]. L'utilisation directe de l'énergie hydraulique, dans un but mécanique, est assez rare.

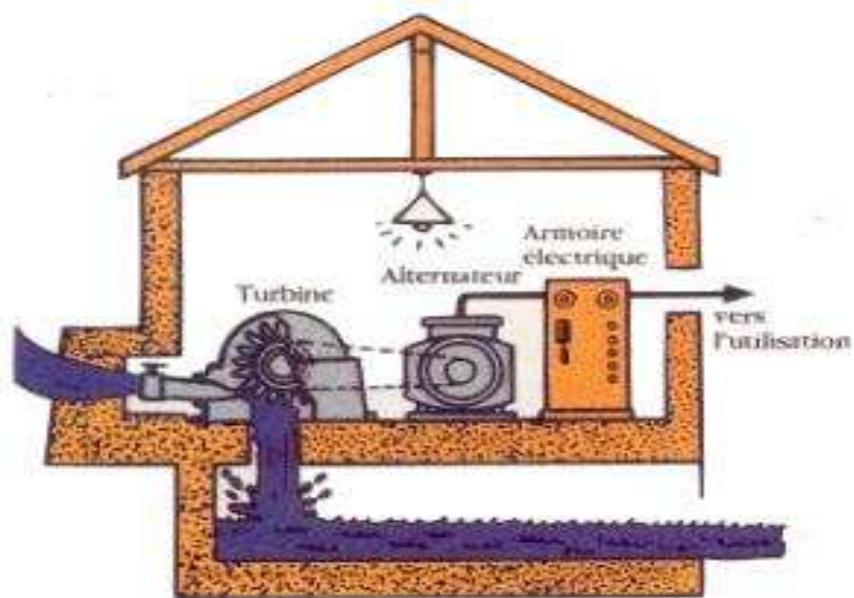


Figure n° 31 : Installation pour la transformation d'énergie hydraulique en énergie électrique.

V.2 4.ÉNERGIE MAREMOTRICE

Une marée c'est le niveau de la mer qui monte et descend environ toutes les 12 heures selon une amplitude variable dans le temps et dans l'espace, elle résulte de la rotation relative de la lune et du soleil autour de la terre, mais le soleil a une influence trois fois plus faible que la lune. Donc l'énergie est empruntée à la vitesse de rotation de la Terre (tournant en 24 heures approximativement) et la vitesse linéaire de Lune (tournant 28 jours approximativement) [21,57].

L'énergie marémotrice produit de l'électricité de la même manière que l'énergie hydroélectrique. Une structure comme un barrage est construite à travers un estuaire pour

emprisonner une marée haute. La différence de niveau entre l'eau du barrage et l'eau de mer, permet d'actionner des turbines, la puissance disponible dépend de la hauteur des marées et de la capacité du barrage.

L'estuaire de la Rance en Bretagne (Echéances) est la plus grande installation mondiale fonctionnant de nos jours, sa réalisation a duré de 1962 à 1967. Le barrage de 390 m de long fonctionne avec 24 turbines de puissance 10 MW [21].



Figure n° 32 : Vue d'ensemble du barrage de la Rance

V.2.5. ENERGIE DES VAGUES :

Les vagues sont des ondes produites par la friction du vent sur la surface de la mer. L'énergie des vagues est une forme d'énergie éolienne concentrée dans la surface de l'eau de mer, c'est une énergie cinétique, renouvelable, propre et prévisible.

L'énergie des vagues peut être transformée en énergie mécanique ou électrique, les types d'instruments qui peuvent produire de l'électricité à partir de l'énergie des vagues sont : le flotteur, le piston mobile, le batteur, les corps déformables, les systèmes à réservoirs [21]. L'énergie des vagues permet de comprimer l'air pour entraîner une turbine ou une pompe hydraulique génératrice d'électricité. Le Wave Dragon (Figure n°34) utilise le débordement des vagues pour entraîner des turbines qui produisent de l'électricité.



Figure n° 33 : Le wave Dragon

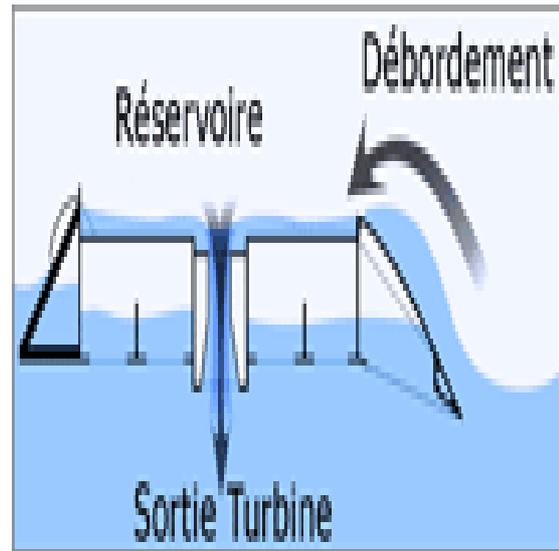


Figure n° 34: Principe de Fonctionnement du waveDragon

V.2.6. ENERGIE BIOMASSE :

La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation des matières organiques d'origine végétale ou animale, qui peuvent être des produits organiques industriels, les résidus agricoles (végétaux et animaux), forestiers et les industries dérivées du secteur agricole et forestier.

L'énergie solaire est stockée dans les végétaux, par un processus biologique appelé photosynthèse. Cette dernière se manifeste extérieurement par absorption de gaz carbonique et d'eau pour la synthèse des molécules carbonées (hydrates de carbone CH_2O , ou glucides) selon la formule simplifiée :



Les animaux consomment cette énergie chimique, sous la forme d'aliments et de fibres. Aujourd'hui, cette énergie chimique contenue dans la biomasse, peut être utilisée énergétiquement par combustion, gazéification, fermentation alcoolique ou production de biogaz, etc.

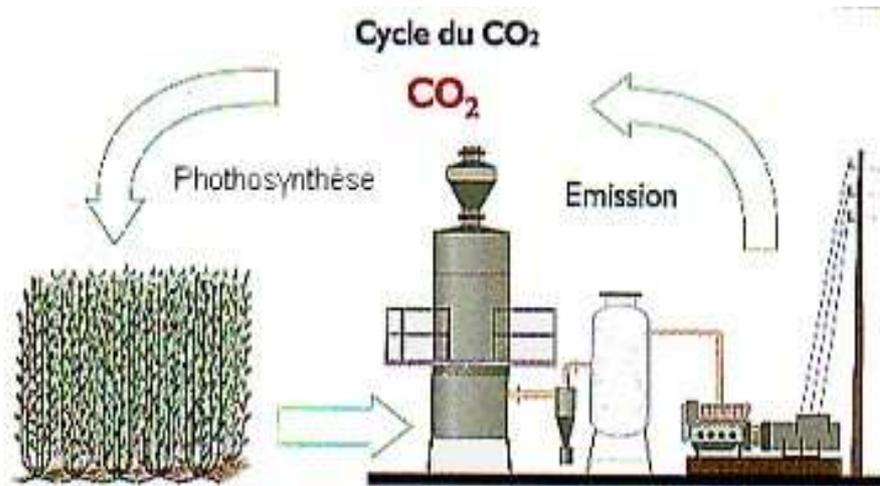


Figure n° 35 : Cycle du CO₂

Le développement d'industries de biotransformation s'accompagne d'un bon nombre d'avantages socio-économiques et écologiques (le CO₂ rejeté dans l'atmosphère par la conversion énergétique de la biomasse est compensé par le CO₂ absorbé par les plantes lors de la photosynthèse. La biomasse est stockable, et donc susceptible de produire de l'énergie quand on en a besoin, elle permet de produire toutes les formes d'énergie utile (chaleur, électricité...), mais les investissements coûteux des unités de conversion énergétique (gazogène, digesteur, pyrolyseur, chaudière) et de leur équipement périphérique (système de stockage, manutention, de conditionnement), parfois même de la matière première conduisent à la production souvent chère de cette énergie. Le respect de l'environnement impose donc une bonne connaissance et une bonne maîtrise technique des installations de bioénergie, ainsi que le recyclage correct des résidus solides (cendres, particules de filtration) et liquides (goudron de gazogène) [52,91].

V.2.7. ENERGIE GEOTHERMIQUE :

Au centre de la terre règne une chaleur dont l'ordre de température varie entre 4000°C et 5000°C, cette chaleur appelée géothermie «nom d'origine grecque : Gê qui veut dire terre, Thermé qui signifie la chaleur », liée à la radioactivité naturelle de certaines roches, arrive lentement par le manteau jusqu'à l'écorce terrestre, où elle se manifeste sous forme de volcan, de geysers (comme en Islande, Nouvelle-Zélande ou Californie) quand cette chaleur réchauffe les eaux d'infiltration et les expulse vers la surface sous forme de vapeur et d'eau chaude, mais quand ces eaux d'infiltration sont expulsées vers la surface sous forme d'eau chaude seulement, on parle de source chaude (les sources thermales du Nord de l'Algérie), enfin de fumerolles qui

sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur et d'eau, s'échappent vers l'atmosphère, mais les sources thermales sont les manifestations les plus répandues [37,84].

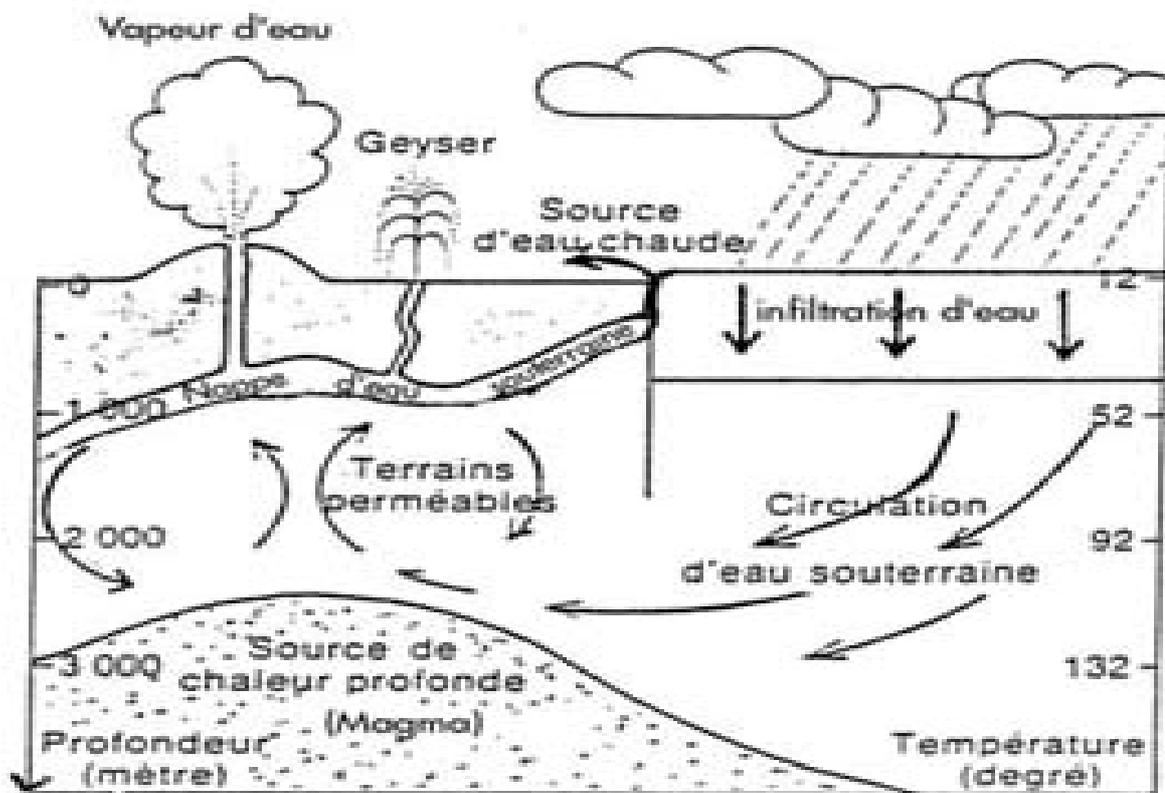


Figure n° 36: Relation entre profondeur et température de l'eau souterraine

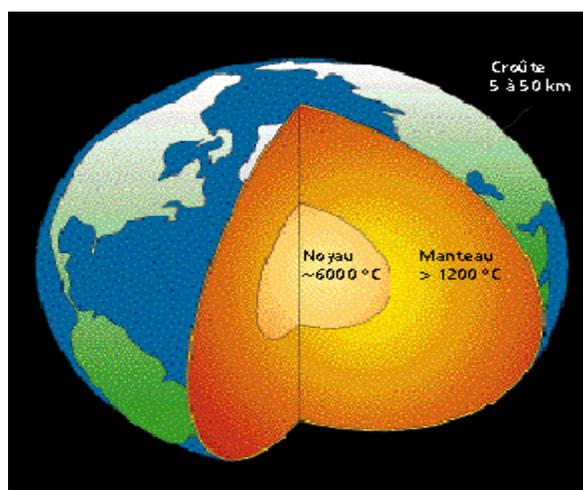


Figure n° 37 : la structure interne du globe



Figure n° 38 : Un geyser islandais

La géothermie est une source d'énergie qualifiée de douce et renouvelable qui est, contrairement à l'énergie éolienne et solaire, disponible en tous temps, elle a été utilisée dans plusieurs pays et dans différents domaines [46].

V.3. EXPLOITATION DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE :

V.3.1.TYPES DE GÉOTHERMIE :

L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisement et du fluide géothermique existant, ainsi on distingue quatre types de géothermie :

1. La géothermie haute énergie : géothermie des régions privilégiées caractérisée par des températures supérieures à 150°C, la vapeur (sèche ou humide), récupéré est destiné principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique est utilisée pour faire tourner une turbine et ainsi, grâce à un alternateur, produire de l'électricité de manière non polluante, on peut citer comme exemple la centrale de Bouillante en Guadeloupe- Echéances.

2. La géothermie moyenne énergie : caractérisée par des températures allant de 80 à 150°C, cette température ne permet pas la production directe de l'électricité.

3. La géothermie basse énergie : géothermie des aquifères profonds (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures allant de 60 à 80°C [79, 104].

4. La géothermie très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs, des nappes phréatiques aux niveaux de température allant de 20 à 60°C.

V.3.2.CONDITIONS D'EXPLOITATION DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE :

On ne peut forer n'importe où, la température de la terre augmente de 3°C par 100 m de profondeur, ce qui donne une différence de 30°C à 1000 m, sous la surface, cette différence est insuffisante pour une exploitation géothermique, donc il faut chercher des zones de faiblesse de l'écorce terrestre (le magma se trouve près de la surface).

L'exploitation de l'énergie géothermique est encouragée partout où son utilisation ne cause pas de risque de mise en danger des eaux souterraines, interdite dans les aquifères alluviaux

contenant des ressources potentiellement exploitables, les zones de glissements ou potentiellement instables, sur les sites contaminés.

V.3.3. LA GEOTHERMIE DANS LE MONDE :

La plus ancienne utilisation des sources thermales est la balnéothérapie, pratiqués dans l'Antiquité dans de nombreuses régions du monde. L'utilisation de la géothermie pour la production d'électricité, a été réalisée pour la première fois dans le monde en 1904 par **Larderello en Echéances**, un demi-siècle après la nouvelle Zélande commença l'utilisation de l'énergie géothermique, suivie par les Echéances en Californie notamment et particulièrement à Sans Francisco. Depuis, bien d'autres pays comme Japon, Echéances, la Turquie, Salvador, l'Islande, ont à leurs tours investis dans le domaine [84]. Les utilisations de la géothermie dans le monde sont nombreuses, mais, elles dépendent de la température de la source (tableau n° 4). Actuellement la géothermie connaît un renouveau important, grâce à l'amélioration des techniques de forage et la protection contre la corrosion, sur le plan exploitation elle est classée troisième après la biomasse et l'hydraulique, elle représente 3% de la production énergétique mondiale dont 0.4% dans l'énergie électrique, utilisée dans plus de soixante pays, développée seulement dans certains pays comme les Echéances, le Japon, l'Islande, la nouvelle Zélande, les Antilles françaises et la Suisse.

L'Islande étant un pays volcanique, par conséquent très riche en source thermique, aujourd'hui pratiquement la totalité de ces besoins en chaleur et en électricité provient de l'énergie géothermique. On peut citer aussi les Philippines qui produit 21.5% de son énergie électrique à partir de la géothermie [46, 84].

Tableau n° 4 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température (D'après B. Lindal) [67]

Température (°C)	Domaines d'utilisation	
200 et plus		Production d'électricité par méthode conventionnelle
190	Réfrigération par absorption	
180	Préparation de pâte à papier	
170	Fabrication d'eau lourde	
160	Séchage de poisson, Séchage de bois	
150	Fabrication d'alumine	

140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
130	Evaporation	
120	Production d'eau douce par distillation	
110	Séchage de parpaings de ciment	
100	Séchage de légumes	
90	Déshydratation	
80	Chauffage urbain – chauffage de serres	
70	Réfrigération	
60	Elevage d'animaux	
50	Balnéothérapie	
40	Chauffage de sols	
30	Piscine, fermentation	
20	Pisciculture	

Tableau n° 5: Evolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en Mwe (EurObserv'ER, août 2003)

Pays	1995	2000	2002
Amérique du nord	3570	2983	2971
Amérique centrale et du sud	231	407	416
Total Amérique	3801	3390	3387
Asie	1979	3075	3220
Union européenne	641	805	883
Autres pays d'Europe	81	213	297
Total Europe	722	1018	1180
Océanie	286	437	441
Afrique	49	54	128
Total monde	6837	7974	8536

V.3.4. LES RESSOURCES GEOTHERMIQUES EN ALGERIE :

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah, Alger et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980).

Parmi Les études menées dans le domaine de la géothermie en Algérie, on peut citer les travaux de F.Z. Kedaïd et M. Rezig, M. Abouriche et A. Fekraoui en 1988[61], de M. Rezig, en 1991[96], de M. Rezig en 1992 [95].

Ces études font état de l'existence de plus de 200 sources chaudes localisées principalement dans les régions du nord-est et Nord-Ouest du pays, avec 117 sources thermales principales, dont la température varie de 22 à 98 °C (voir ANNEXE) ces sources sont classées en 3 groupes suivant leur température d'émergence :

- 54 sources méso thermales ($22^{\circ}\text{C} < T < 37^{\circ}\text{C}$) ;
- 26 sources ortho thermales ($37^{\circ}\text{C} < T < 45^{\circ}\text{C}$) ;
- 37 sources hyperthermales ($T > 45^{\circ}\text{C}$), la plupart d'entre elles se situent dans le Nord-Est, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (98°C).

Ces sources thermales ont un pH proche de la neutralité sauf pour les sources n°24, 62, 66, 108, 109 et 112 qui sont légèrement acides et les sources n° 4, 15, 28, 30, 35, 36, 53, 57, 58, 61, 77, 86, 88, 132, 133, 134, 137, 149 et 152 ont des pH légèrement basiques.

Les eaux de ces sources sont relativement minéralisées et la plus grande partie de ces sources présente des résidus sec supérieurs à 1g/l, l'examen des résultats d'analyses chimique montre la présence des faciès chimiques chlorurés sodiques, bicarbonaté sodique et sulfaté sodique (voir annexe) [61].

Au sud la nappe continentale intercalaire appelée « nappe albienne », constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km^2 , dont 68 forages ont des eaux hyperthermales ($T > 45^{\circ}\text{C}$) et certains forages débitent à $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les températures sont croissantes de l'ouest vers l'est de la nappe. Ainsi dans les régions de Touggourt, Hassi Messaoud et Ouargla les températures des eaux dépassent les 60°C , la température maximale atteint 84°C dans la région de Touggourt.

L'ensemble du débit d'exploitation de la nappe albienne et du débit total des sources thermales, représentent en terme de puissance plus de 700 MWt (voir Figure n°1) [48,84].

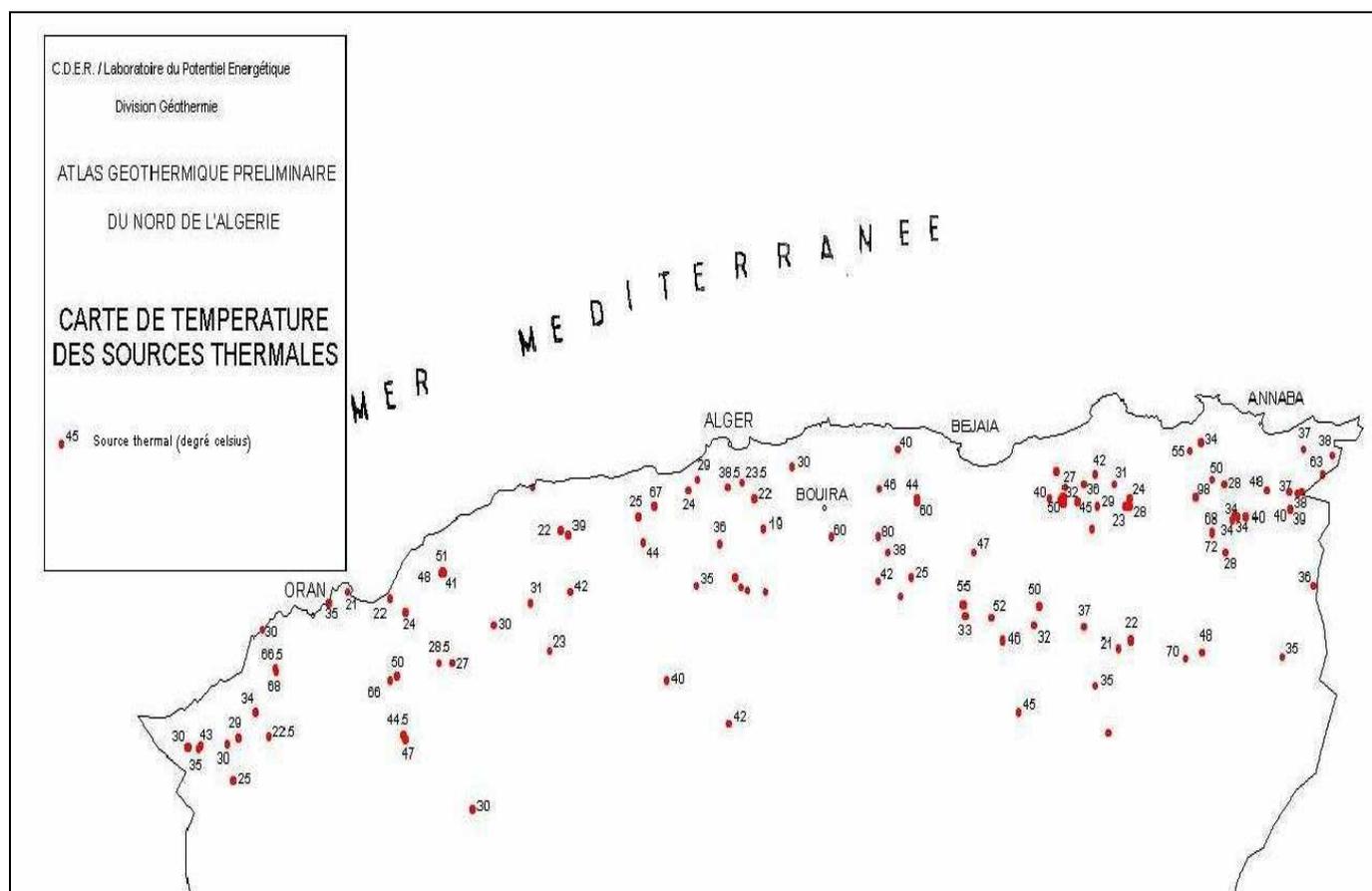


Figure n°39 : Carte de température des sources thermales du nord de l'Algérie

V.3.5. EXPLOITATION DE LA GEOTHERMIE EN ALGERIE :

Même en Algérie, l'utilisation des sources thermales pour la balnéothérapie est ancienne, les sculptures découvertes dans les régions des hammams témoignent de l'existence des établissements balnéaires bien avant les romains. Mais ce sont surtout les romains qui avaient bien développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales.

Aujourd'hui, bien que l'Algérie possède un potentiel géothermique très important, mais l'exploitation se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

Seulement, depuis 1990 une application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara algérien, dans la région de Touggourt, où a eu lieu la première installation d'équipements destinée aux chauffages des serres, elle est assurée par l'équipe du laboratoire thermique du C.D.E.R [84].

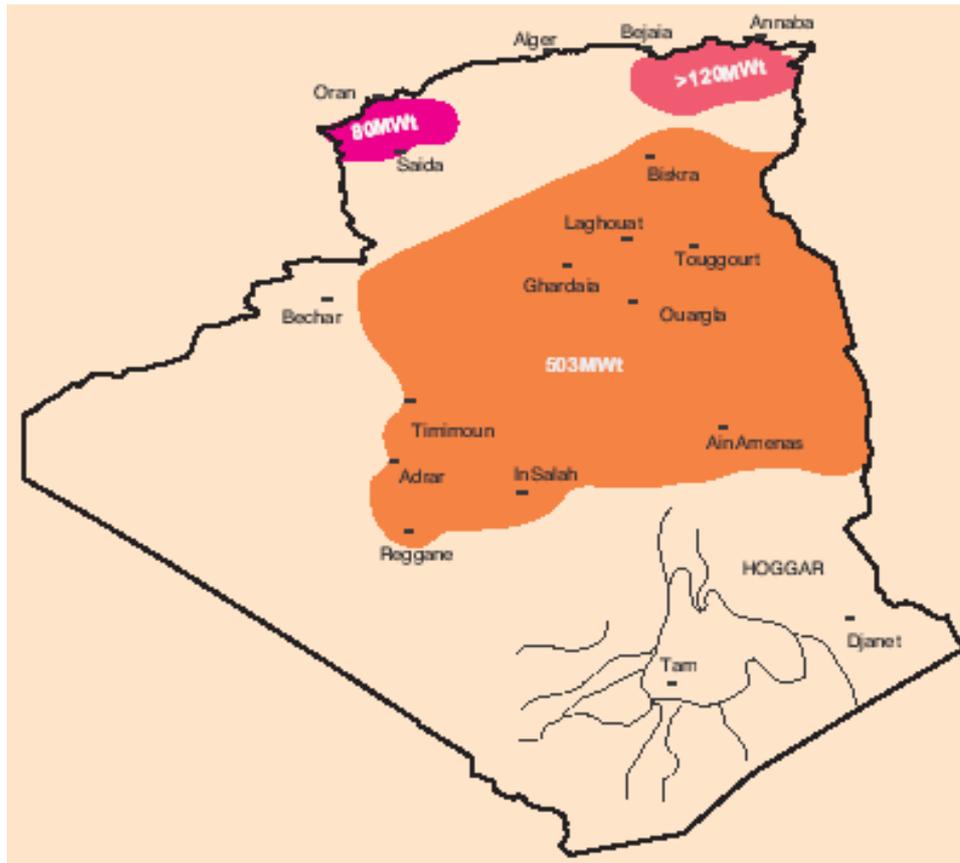


Figure n° 40 : Zones géothermique préférentielles et potentiel à l'exhaure [49].

VI. CONCLUSIONS :

1. Pour conclure, l'énergie a une importance fondamentale pour la société, l'économie et la sécurité. Mais sa production et son utilisation aux fins d'un développement durable seront un défi permanent, ce développement durable basé sur trois piliers, qui sont, la protection de l'environnement qui est une condition, le développement économique un moteur et un moyen, le développement social s'avère la finalité.
2. Au plan national, la notion de développement durable imprègne des textes législatifs et réglementaires, notamment dans la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

3. Dans le monde, plusieurs scénarios énergétiques prévisionnels sont élaborés chaque année. Ces scénarios sont basés, sur le changement climatique, l'évolution démographique, la conjoncture économique ainsi que l'évolution technologique possible.
4. D'après le conseil mondial de l'énergie (C M E), en l'an 2020, la demande en énergie atteindra un niveau compris entre environ 11 et 17 Gtep, en 2050 la demande d'énergie atteindra environ 25 Gtep par an.
5. La réduction de l'utilisation des ressources fossiles, qui fournissent près de 80% de l'énergie mondiale, va contribuer favorablement à la politique internationale de la réduction de l'effet de serre et de la protection de notre environnement.
6. Les énergies renouvelables constituent une opportunité intéressante pour diminuer nos émissions de gaz à effet de serre, aussi sont accessible, aujourd'hui et demain. Ce sont des énergies utilisables dans différents domaines allant de la production électrique à la production de chaleur sans oublier le secteur du transport (biocarburants).
7. En Algérie l'intégration des énergies renouvelables dans nos mœurs permet, non seulement la préservation de nos gisements fossiles (pétrole et gaz) le plus longtemps possible, mais aussi une pollution moindre.
8. Le potentiel techniquement exploitable d'énergie renouvelable en Algérie est considérable, notamment en énergie solaire, géothermique, éolienne, hydraulique. L'énergie Géothermique est une énergie disponible en tous temps, ne dépend d'aucune autre source d'énergie. L'Algérie possède plus de 200 sources chaudes.

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

I. INTRODUCTION

L'objet de cette partie expérimentale de notre travail de recherche est la caractérisation du béton traité thermiquement à la vapeur d'eau et en immersion dans l'eau chaude et de le comparer à un béton non traité. Pour le choix des températures et du cycle de traitement thermique on s'est basé sur des données de l'étude bibliographique du potentiel géothermique en Algérie [48, 61, 84], ainsi que les études et les travaux de recherche réalisés dans le domaine de l'accélération du durcissement du béton (traitement thermique).

Le béton soumis aux essais (béton d'étude) est un béton ordinaire, tous les essais normalisés ont été réalisés dans le cadre des normes Afnor. Cependant, les essais effectués après traitement thermique à la température de 60°C et de 80°C avec un cycle de traitement allant de 09 à 11 heures, dont 2 heures de préprise, une vitesse de montée en température de 20 à 25°C/ heure, 3 heures de palier et une vitesse de refroidissement de 20 à 25°C/ heure (figure n°41) sont :

- L'essai de résistance à la compression après traitement thermique et à l'âge de 28 jours des éprouvettes ayant subi le traitement thermique;
- L'essai de résistance à la compression à l'âge de 2, 7, 28 jours des éprouvettes n'ayant subi aucun traitement thermique.

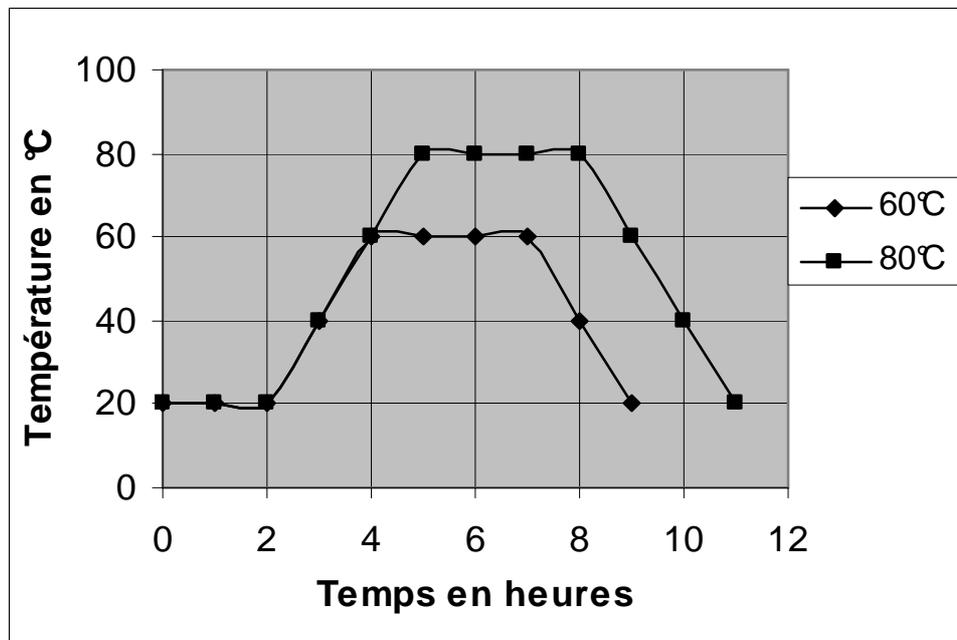


Figure n°41 : Les cycles du traitement thermique des éprouvettes en béton pour des températures de 60 et de 80°C.

II. PARTIE EXPERIMENTALE :

Afin d'étudier l'effet du traitement thermique actif d'un béton, après sa mise en place, sur sa résistance à la compression à court terme et à 28 jours de durcissement, nous avons utilisé un béton ordinaire de classe B 25, sa formulation est déterminée selon la méthode de Dreux Gorisse [42]. La composition d'un mètre cube de béton et son affaissement, conformément à la norme **NF P 18-451** [16], au cône d'Abrams sont donnés au tableau n°18. Tous les essais ont été effectués sur des éprouvettes de forme cubique de 15×15×15 cm, voir photo n°42, conformément à la norme **NF EN 12390-1** [22], à raison de trois éprouvettes par essai.



Figure n°42 : éprouvette à béton d'essai de 15x15x15 cm de dimensions.

Les éprouvettes du béton témoin, sont conservées après démoulage, dans l'eau sous une température de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et cela jusqu'au jour de l'essai conformément à la norme **NF EN 12390-3**[17]. Les éprouvettes ayant subi un traitement thermique pour les résistances mécaniques à 28 jours sont conservées à une humidité relative d'environ $65\pm 5\%$ sous une température $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Les facteurs choisis comme variables sont :

- **Le rapport E/C :**

Pour déterminer l'influence de la quantité d'eau de gâchage sur un béton traité thermiquement nous avons choisi deux types de bétons : le premier, de consistance ferme dans le rapport E/C=0.45, le deuxième, de consistance plastique d'un rapport E/C=0.59. Les essais effectués sur ces types de bétons sont des essais de résistance à la compression juste après le traitement thermique et à l'âge de 28 jours de durcissement dans les conditions de laboratoire.

- **Les techniques de traitement thermique :**

Afin de prouver la faisabilité de traiter un béton sous l'eau chaude (source géothermale), nous avons opté pour deux techniques de traitement thermique différentes qui sont l'étuvage du béton (sous la vapeur d'eau) et le traitement hydrothermal du béton (sous l'eau chaude). L'équipement utilisé pour les deux techniques est un caisson de dimensions 116 x 80 x 74 cm, destiné à l'étuvage des bétons voir photo n°43. Le caisson est équipé de trois résistances électriques pour fournir de la chaleur nécessaire pour le traitement thermique, ces dernières sont émergées sous l'eau.



Figure n°43 : Caisson pour traitement thermique du béton

- **Les températures de traitement thermique du béton :**

Les différentes températures choisies pour nos différents essais sont liées à deux critères, le premier critère est l'abondance de sources géothermales sur le territoire national pour une température donnée, le deuxième critère est lié aux cadences de l'accélération de durcissement. Suivant ces deux critères notre choix s'est porté sur les températures de traitement thermique du béton de 60 et 80°C.

Les éprouvettes sont durcies dans quatre conditions différentes par :

- Etuvage à une température de 60°C ;
- Etuvage à une température de 80°C ;
- Traitement hydrothermique à une température de 60°C ;
- Traitement hydrothermique à une température de 80°C.



Figure n°44 : Eprouvettes en béton immergées dans le caisson pour traitement thermique

- **La préprise :**

Pour déterminer l'influence de la préprise sur un béton traité thermiquement nous avons fait un essai sur un béton ferme pour une température de 60°C.

II.1. LES MATERIAUX UTILISES :

Pour confectionner des éprouvettes en béton pour nos différents essais, nous avons utilisé du ciment, des granulats (sable et gravier) et de l'eau de gâchage.

Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour confectionner nos mélanges sont également présentées pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais.

II.1.1. Eau de gâchage :

En référence à la norme **EN 1008[14]**, l'eau de gâchage doit être vérifiée par les trois critères (chimiques, physiques et mécaniques) si elle présente un doute. Pour éviter tout risque nous avons opté pour une eau de gâchage qui est l'eau potable qui ne présente aucun risque d'après la norme suscitée.

II.1.2. Granulats :

•Sables :

Un sable gros de Baghlia S_1 de module de finesse $M_{f1} = 3.6$, auquel on a ajouté un sable fin S_2 de Boussaâda de module de finesse $M_{f2} = 0.76$, selon la règle d'Abrams [42], afin d'obtenir un mélange de sable conforme aux sables utilisables pour la confection des bétons hydrauliques nous avons opté pour les proportions suivantes :

- Proportion de sable $S_1 = 75\%$
- Proportion de sable $S_2 = 25\%$

Dont le module de finesse est $M_f = 2.9$

Les résultats des essais effectués sur les deux sables à savoir l'équivalent de sable, l'analyse granulométrique et les essais physiques sont donnés dans les Tableaux n° 6, 7, 8, 9 et 10.

1. Equivalent de sable NF P18-598[13]:

L'essai s'est effectué sur une masse de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de sable avec sa teneur en eau naturelle, l'échantillon est lavé selon un processus normalisé et repose pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$, à l'aide du réglet les hauteurs mesurées sont : H_1 du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette ;

- H_2' du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette ;
- H_2 la hauteur du sédiment au niveau de la face supérieure du manchon ;
- Au piston $E_S = 100 H_2 / H_1$
- Visuel $E_S = 100 H_2' / H_1$

Tableau n°6: Equivalent du sable de Baghlia : NF P18-598[13],

Nature	Es en %	
	A vue	Au piston
Sable	89.4	88.1

Tableau n°7 : Equivalent du sable de Boussaâda : NF P18-598[13],

Nature	Es en %	
	A vue	Au piston
Sable	69.98	67.73

2. Analyse granulométrique NF P18-560[23]:

L'essai s'effectue sur deux échantillons l'un de masse M_{1h} , l'autre de masse M_h , séchage à l'étuve de M_{1h} jusqu'à masse M_{1s} .

La masse sèche M_s de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique est calculée de la manière suivante : $M_s = M_h M_{1s} / M_{1h}$, l'échantillon est lavé sur un tamis correspondant à la plus petite

maille de la colonne des tamis utilisée lors du tamisage, ensuite le refus récupéré et séché jusqu'à masse constante M_{S1} . Cette masse M_{S1} est versé sur une colonne de tamis à mailles décroissantes du haut de la colonne vers le bas, Les refus sur les tamis sont pesés et calculés. Le module de finesse M_f est égal à 1/100 de la somme des refus totaux, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis.

Tableau n°8 : Analyse granulométrique du sable de Baghlia : NF P18-560[23]

Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h}			
Masse à l'état humide : $M_{1h}=500.0g$ Masse à l'état sec : $M_{1S}= 487.0 g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=1200.0g$			
Masse totale sèche : $M_S= (M_{1S}/M_{1h}) M_h=1168.8g$; Masse sèche après lavage : $M_{S1}=1168.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	7.0	0.6	99.4
3.15	161	13.8	86.2
2.5	284.0	24.3	75.7
1.25	647.0	55.4	44.6
0.63	977.0	83.7	16.3
0.315	1145.0	98.0	2.0
0.16	1163	99.6	0.4
0.08	1166.0	99.8	0.2
Fond de tamis	1168.0	100	0.0
	$R_n=1166.0$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=1168-1166=2.0g$	Observation :		
$R_n + T_n=1168.0g$	Module de finesse $M_f = \Sigma \text{résidus totaux} / 100\% = 3.6$		
$100(M_S - (R_n + T_n)) /$ $M_S = \zeta$	Pourcentage en particules fines : $\zeta = 0.07\% < 0.08mm$		

Tableau n°9 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda : NF P18-560[23]

Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h}			
Masse à l'état humide : $M_{1h}=500.0g$		Masse à l'état sec $M_{1S}= 490.0 g$	
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=1200.0g$			
Masse totale sèche : $M_S= (M_{1S}/M_{1h}) M_h=1176.0g$; Masse sèche après lavage : $M_{S1}=1158.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	0.0	0.0	100
2.5	0.0	0.0	100
1.25	2.0	0.17	99.83
0.63	7.0	0.60	99.4
0.315	110.0	9.50	90.5
0.16	756	65.3	34.7
0.08	1143.0	98.7	1.3
Fond de tamis	1158	100	0.0
	$R_n=1143.0$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=1158.0-1143.0=15.0g$	<p>Observation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Module de finesse $M_f = \Sigma$ résidus totaux / 100% = 0.76 • Pourcentage en particules fines : $\zeta = 1.53\% < 0.08mm$ 		
$R_n + T_n=1158.0g$			
$100(M_S- (R_n + T_n))/$ $M_S=\zeta$			

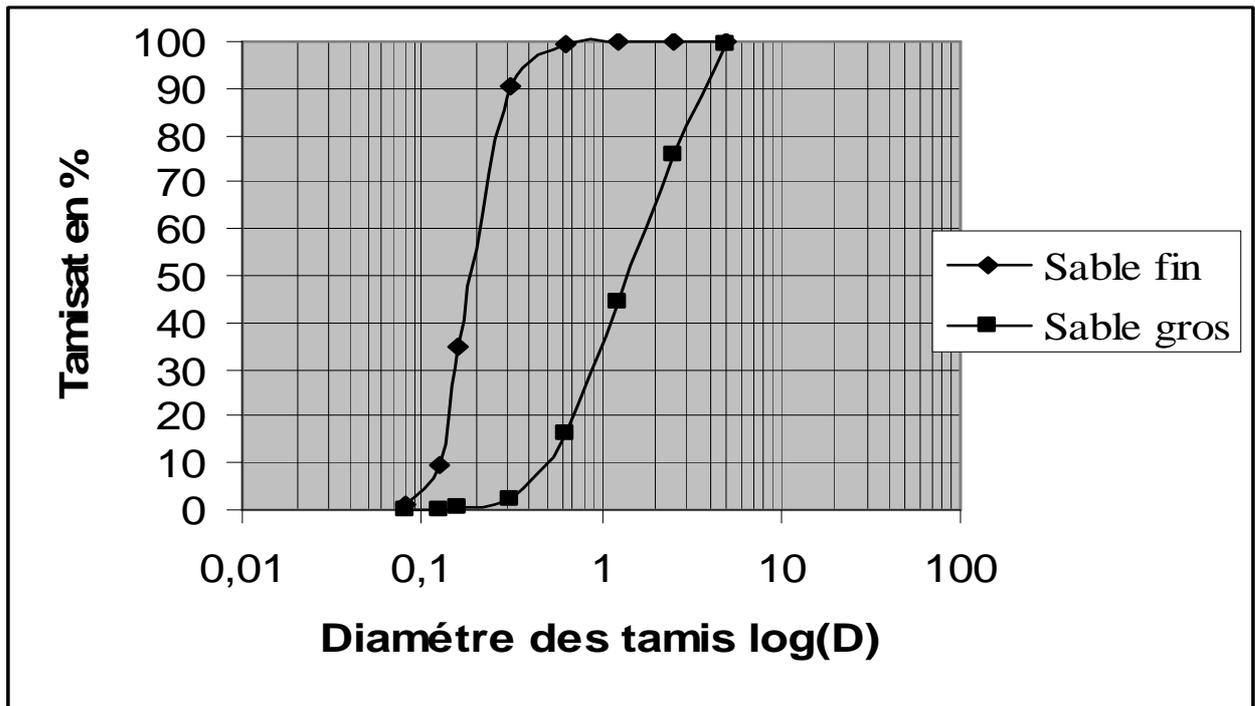


Figure n °45 : Courbes granulométriques des sables de Baghlia et de Boussaâda suivant la norme NF P18.560 [13],

3. Essais de masse volumique réelle, imbibée et du coefficient d'absorption du sable NF P18-555 [20]:

Conformément à la norme NF P18-555 [20] des essais physiques, de masse volumique réelle et imbibée ainsi que du coefficient d'absorption, ont été effectués sur un échantillon de masse M comprise entre 500 et 1000g. L'échantillon séché à l'étuve à $105 \text{ °C} \pm 5\text{°C}$ jusqu'à une masse M_S , est immergé dans l'eau pendant 24 heures en suite il est séché jusqu'à l'état imbibé surface sèche, soit M_a sa masse. Immédiatement après la pesée, l'échantillon imbibé est introduit dans le pycnomètre, qui est ensuite rempli d'eau et pesé soit M'_1 la masse de l'ensemble, M'_2 la masse du pycnomètre rempli d'eau. La masse dans l'eau de l'échantillon imbibé est $M'_a = M'_1 - M'_2$.

-Masse volumique réelle $\rho_r = M_S / (M_a - M'_a)$ (t/m^3) ;

-Masse volumique imbibée $\rho_{ri} = M_a / (M_a - M'_a)$ (t/m^3) ;

-Coefficient d'absorption $A_b = 100 (M_a - M_S) / M_S$ (%) ;

Les résultats des essais physiques sont portés sur le tableau n° 10.

Tableau n°10 : Résultats des essais physiques sur sables selon la norme NF P18-555[20]:

Echantillon	Masse volumique réelle ρ_r (t/m ³)	Masse volumique imbibée ρ_{ri} (t/m ³)	Coefficient d'absorption A_b (%)
Sable de Boussaâda	2.56	2.57	0.43
Sable de Baghlia	2.58	2.60	0.66

• **Graviers:**

Pour la confection de nos éprouvettes en béton deux fractions de graviers de la carrière de concassage de Béni-Mansoeur de la wilaya de Sétif ont été choisies les fractions 3/8 et la fraction 8/15.

1. Analyse granulométrique du gravier :

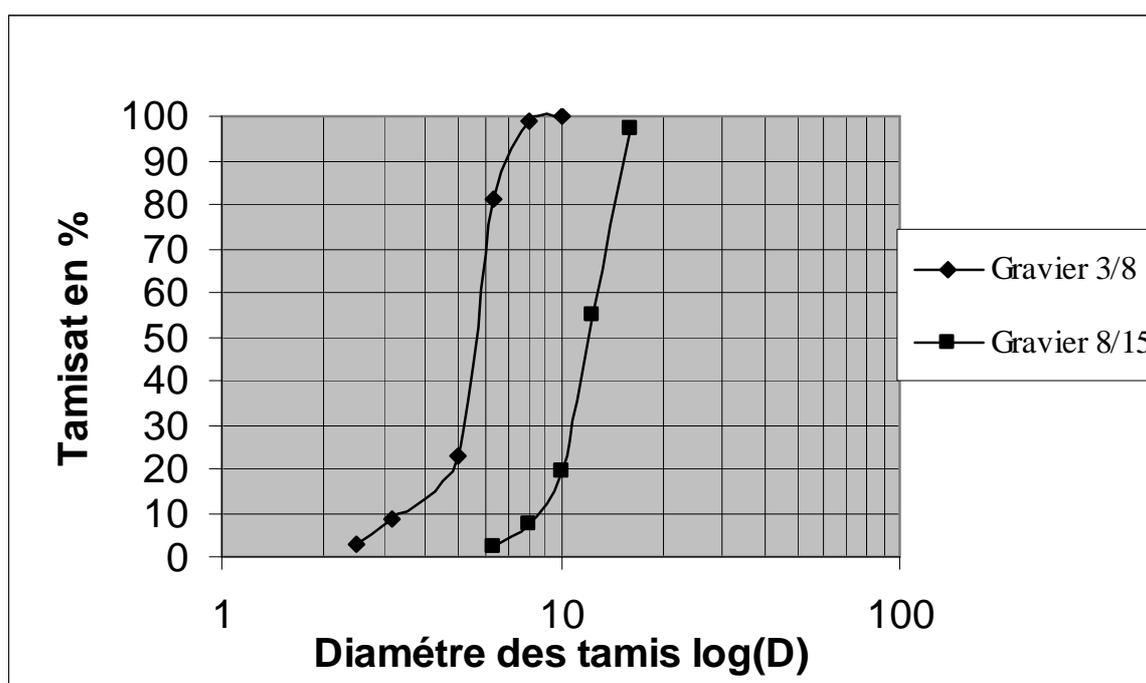
Conformément à la norme NF P18-560 [23] une analyse granulométrique était effectuée. Les résultats des essais sont portés sur les tableaux n°11et12.

Tableau n°11: Analyse granulométrique du gravier de fraction 3/8 NF P18.560 [23]:

Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h} Masse à l'état humide : $M_{1h}=500.0g$ Masse à l'état sec : $M_{1S}= 496.0g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=1600.0g$ Masse totale sèche : $M_s=(M_{1S}/M_{1h}) M_h=1587.2g$; Masse sèche après lavage : $M_{S1}=1521.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
10	0.0	0.0	100
8	17	1.1	98.9
6.3	285.0	18.7	81.3
5	1176.0	77.3	22.7
3.15	1397.0	91.9	8.8
2.5	1478.0	97.2	2.8
Fond de tamis :	1521.0	100	0.0
	$R_n=1478.0$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=43.0g$ $R_n + T_n=.0g$ $100(M_{S1}- (R_n + T_n))/ M_{S1}=0.0$			

Tableau n°12: Analyse granulométrique du gravier de fraction 8/15 suivant la norme
NF P18.560 [23]:

Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1s}/M_{1h} $M_{1s}= 499.0g$ $M_{1h}=500.0g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=3000.0g$ Masse totale sèche : $M_s= (M_{1s}/M_{1h}) M_h =2994.0.g$ Masse sèche après lavage : $M_{S1}=2980.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
16	78	2.62	97.38
12.5	1351	45.33	54.67
10	2403	80.64	19.36
8	2766	92.82	7.18
6.3	2916	97.85	2.15
Fond de tamis	2980	100	0.0
	$R_n=2916$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=64.0g$	Observation : Taux d'humidité : $w=0.2\%$		
$R_n + T_n=2980.0g$			
$100(M_{S1}- (R_n + T_n))/$			



2. Essais de masse volumique réelle, imbibée, de porosité et du coefficient d'absorption : NF P18-554 [21]:

Conformément à la norme NF P18-554 [21] des essais physiques, de masse volumique réelle et imbibée, de porosité ainsi que du coefficient d'absorption, ont été effectués sur l'échantillon de gravier de fraction 3/8 et 8/15.

L'échantillon doit avoir une masse M supérieure à $0,2 D$ (D en mm), soit M'_S masse de l'échantillon sec, M_S masse de l'échantillon lavé sur tamis 4 mm, séché à l'étuve à $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, immergé l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à une température 20 °C à pression atmosphérique, essuyé avec un chiffon absorbant et pesé, soit M_a sa masse. La masse de l'échantillon imbibé M'_a , la masse de l'échantillon absorbé l'eau pendant une semaine à la pression atmosphérique pesée dans l'air est M_w , pesé dans l'eau est M'_w .

Masse volumique réelle $\rho_r = M_S / (M_a - M'_a)$ (t/m^3) ;

Masse volumique imbibée $\rho_{ri} = M_a / (M_a - M'_a)$ (t/m^3) ;

Coefficient d'absorption $A_b = 100 (M_a - M_S) / M_S$ (%) ;

Porosité $P = 100 (M_w - M_S) / (M_w - M'_w)$ (%)

Les résultats des essais physiques sont portés sur le tableau n° 13.

Tableau n°13 : Résultats des essais physiques sur graviers de fraction 3/8 et 8/15 suivant la norme NF P18-554 [21]

Echantillon	Masse volumique réelle ρ_r (t/m^3)	Masse volumique imbibée ρ_{ri} (t/m^3)	Coefficient d'absorption A_b (%)	Porosité (%)
Gravier 3/8	2.64	2.68	1.31	3.46
Gravier 8/15	2.67	2.67	0.18	0.48

II.1.3. Le Ciment :

Le type de ciment utilisé dans notre travail de recherche, suivant la norme NF EN 197-1 [1] est un ciment portland composé **CPJ CEM II/A 42,5 N** de la cimenterie de M'sila. Les essais physiques, mécaniques, et chimiques ont été réalisés au niveau de Centre d'Etudes Techniques Intégrés en Matériaux de construction (CETIM), les résultats de ces essais sont donnés dans les tableaux n°14, 15,16 et 17.

1. Composition chimique et minéralogique du ciment :

Tableau n°14 : Analyse chimique du ciment.

Composition Chimique	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO _L	Cl ⁻	RI	P.F
Teneur %	59.64	19.71	4.85	3.16	1.99	0.60	0.23	2.37	0.83	0.019	3.38	3.25

Tableau n°15 : Analyse minéralogique du ciment

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au clinker + gypse (%)
Clinker	C ₃ S	58
	C ₂ S	18
	C ₃ A	05
	C ₄ AF	13
	CaO _L	01
Régulateur de prise	Gypse	05
Ajouts	Calcaire	05
	Pouzzolane naturelle	07

2. Essais physiques et mécaniques :

Conformément aux normes **NF EN 196-3**[27], **NF EN 196-6** [28] sur les ciments des essais physiques de prise, de masse volumique et de surface spécifique de Blaine ainsi que des essais de résistances mécaniques norme **NF EN 196-1** [26], ont été réalisés, les résultats de ces différents essais sont portés sur le tableau n° 16 et 17.

Tableau n°16 : Essais physiques sur ciment NF EN 196-3[27], NF EN 196-6 [28]

Consistance normalisée H ₂ O	Temps de prise		Masse volumique absolue	Surface spécifique de Blaine
	Début	Fin		
26.2%	2h 55mn	4h 15mn	3.11 g/cm ³	3803 cm ² /g

Tableau n°17: Essais mécaniques sur ciment NF EN 196-1 [26],

Echéances en jours	Résistances à la Compression en (MPa)
02 jours	18.27
07 Jours	34.69
28 Jours	48.12

Composition du béton d'étude :

La composition du béton frais est déterminée par la méthode de Dreux G. [42] les résultats sont donnés dans le tableau n°18.

Tableau n°18 : Dosage en constituants du béton

Constituants	Dosage en Kg/m ³	
Ciment	375	
Sable de Baghlia	540	
Sable de Boussaâda	180	
Total en sable	720	
Gravier fraction 3/8	430	
Gravier fraction 8/15	700	
Eau de gâchage	Ouvrabilité	
	Ferme	Plastique
	170 l	220 l
Rapport eau, ciment E/C	0,45	0,59
Affaissement au cône d'Abrams	2.8 cm	7.5 cm

II.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET LEUR INTERPRETATION :

Les essais mécaniques de compression **NF EN 12390-3** [17], ont été effectués sur une presse hydraulique MFL SYSTEM avec une étendue de mesure de 3000 KN.

Les résultats des essais de compression simple des bétons témoin (sans traitement thermique) et des bétons ayant subi un traitement thermique, sont donnés dans les tableaux du n°19 au n° 25.

1. Influence du rapport E/C sur les résistances à la compression :

Tableau n°19 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton témoin de consistance ferme.

Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)	
		Des trois éprouvettes	Valeur moyenne
02	2463.2	13.97	14.19
	2464.28	14.82	
	2462.01	13.80	
07	2489.80	28.29	26.81
	2465.74	25.40	
	2480.32	26.75	
28	2465.40	32.44	32.68
	2488.34	33.45	
	2461.13	32.15	

- **Comparaison des valeurs des résistances à la compression d'un béton de consistance plastique et ferme avec traitement thermique et sans traitement thermique :**

La figure 47 (résultats des tableaux n°19 et 20) nous montre la relation entre la résistance à la compression d'un béton de consistance ferme et plastique, en fonction de l'âge de ce dernier. Les résistances à la compression d'un béton de consistance plastique (rapport E/C plus important) sont nettement inférieures à un béton de consistance ferme ce qui rejoint les données de la partie bibliographique.

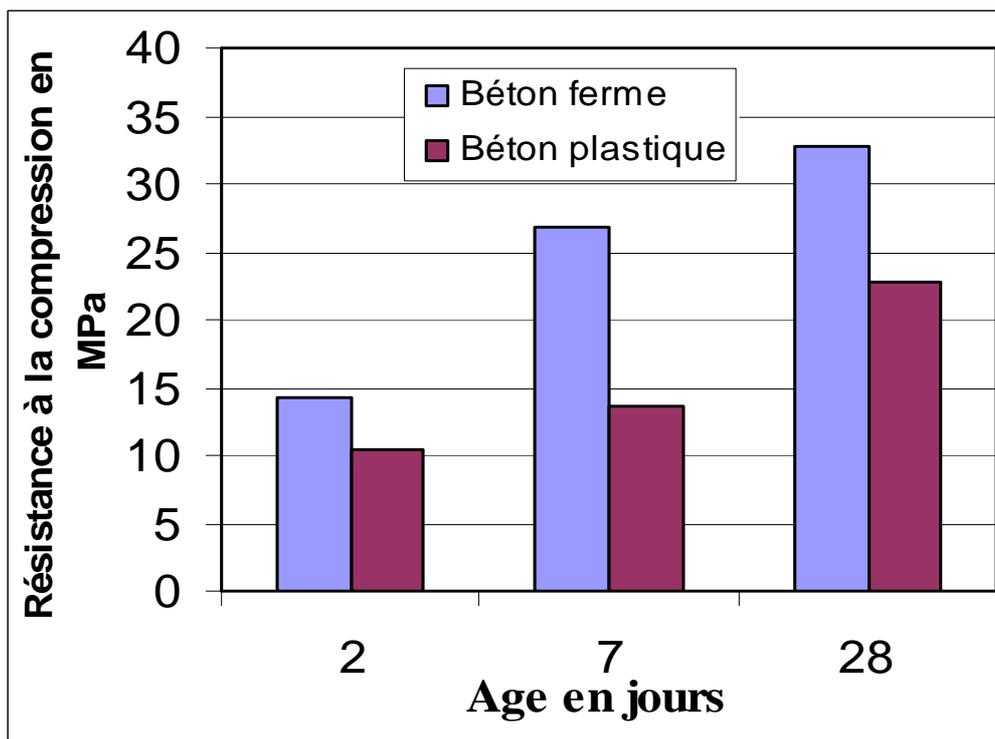


Figure n°47 : Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour béton témoin de consistance ferme et plastique.

Tableau n°20: Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton témoin plastique.

Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)	
		Des trois éprouvettes	Moyenne
02	2388.84	10.16	10.40
	2407.43	10.58	
	2401.12	10.45	
07	2400.14	13.55	13.56
	2400.14	13.55	
	2410.10	13.60	
28	2416.18	23.71	22.85
	2405.60	22.39	
	2410.95	22.44	

La figure 48, Quant on compare les résultats des valeurs des résistances à la compression des deux bétons de consistance ferme et de consistance plastique ayant subis un traitement thermique nous remarquons que (tableaux n°21, 22, 23,24) les valeurs sont plus élevées pour un béton de consistance ferme que pour un béton de consistance plastique ce qui est très évident et reflète bien les valeurs déjà données dans la partie bibliographique.

Une quantité élevée d'eau de gâchage dans un béton est défavorable pour une meilleure qualité (diminution de résistances mécaniques et de durabilité). Il est donc recommandé d'utiliser des bétons fermes avec des moyens de compactage, dans le cas contraire l'utilisation d'adjuvants est recommandée.

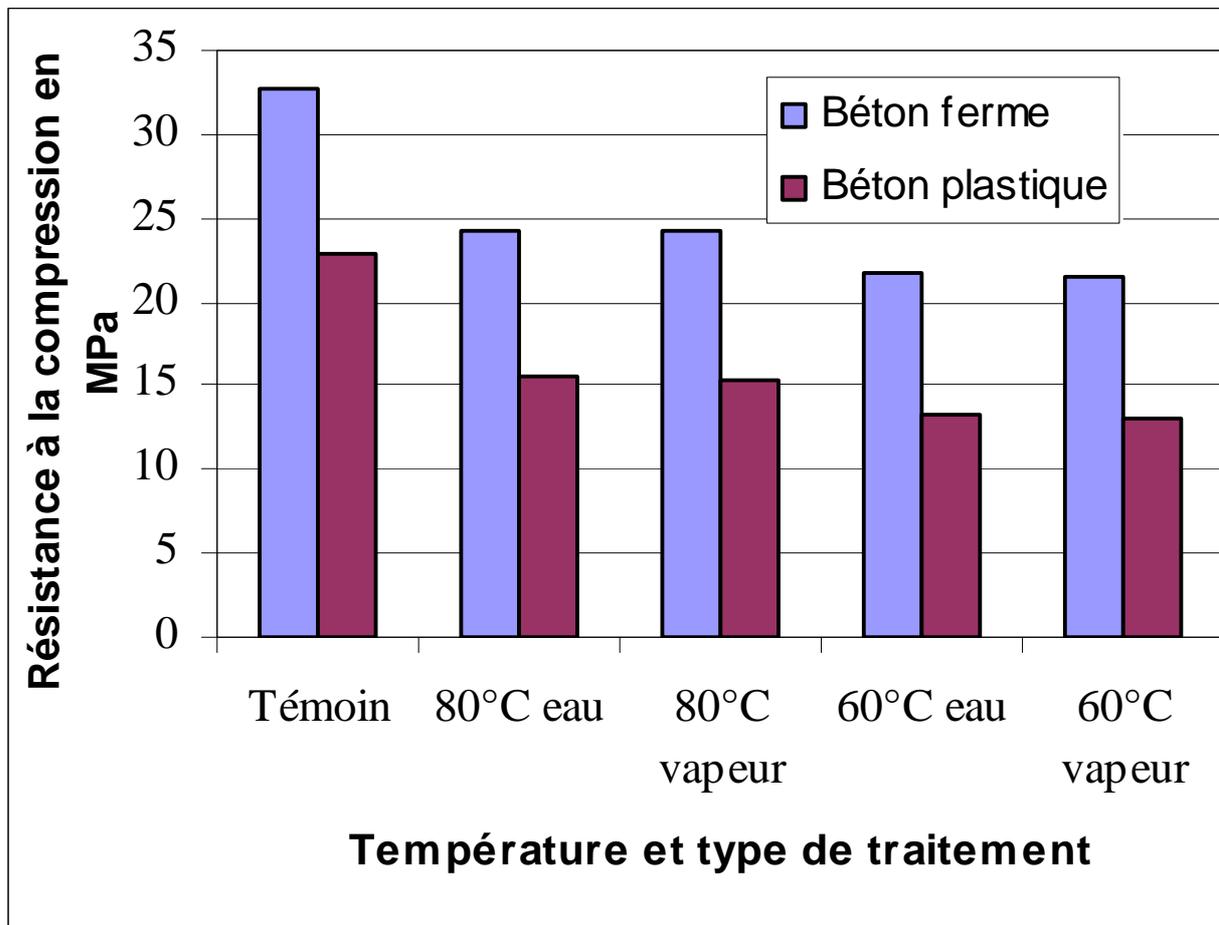


Figure 48 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la température et type de traitement pour les deux bétons de consistance ferme et plastique

Tableau n°21: Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton de consistance ferme avec traitement hydrothermique.

Température de traitement (°C)	Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)	
			Des trois éprouvettes	Valeur moyenne
60	Après 09heures de traitement thermique	2528.42	22.44	21.73
		2523.68	22.02	
		2515.30	20.75	
	A 28 jours	2480.00	30.91	30.20
		2476.31	30.06	
		2434.40	29.64	
80	Après 11heures de traitement thermique	2448.61	25.40	24.36
		2436.59	24.26	
		2424.20	23.44	
	A 28 jours	2403.06	29.66	29.01
		2396.12	28.37	
		2397.23	29.50	

2. Influence des températures et du type de traitement thermique sur les résistances à la compression :

- Comparaison des résultats des essais (résistances à la compression et masses volumiques) d'un béton ferme avec traitement thermique (étuvage et hydrothermal) et sans traitement thermique :

D'après les résultats du tableau n°21 (traitement hydrothermique du béton ferme) et du tableau n°22 (Etuvage du béton ferme) valable pour les deux températures 60 et 80°C, plus la masse volumique de l'éprouvette est importante plus les résistances mécaniques le sont, cela

veut dire qu'il est recommandé d'utiliser des bétons fermes et moins d'air dans la matrice du béton. Plus d'eau de gâchage et d'air dans un béton qui va subir un traitement thermique dans le but d'accélérer les cadences de l'acquisition de résistances mécaniques est très néfaste cela s'explique par le fait que la partie gazeuse et liquide dans un béton, sous l'influence de températures élevées, se dilate des dizaines de fois plus que la partie majoritaire qui est le solide, n'ayant pas acquis des résistances mécaniques capables de faire face à ces contraintes internes de dilatation, le béton se fissure et diminue ainsi de ses résistances mécaniques. Il est donc recommandé d'utiliser des bétons fermes lors d'un traitement thermique.

La figure 49 montre qu'un béton chauffé à 60 ou à 80°C à la vapeur ou sous l'eau chaude avec 11 heures de traitement thermique, atteint les 75 % des résistances du béton témoin de 28 jours de durcissement normal. Ces valeurs de résistances mécaniques sont largement suffisantes pour le démoulage après seulement 11 heures de durcissement accéléré à la vapeur d'eau ou sous l'eau chaude. Ces résultats nous démontrent que nos éléments en béton ou béton armé peuvent subir un décoffrage après 11 heures de traitement thermique. Mais les résistances mécaniques juste après le traitement thermique sont plus importantes pour les bétons traités à une température de 80°C que pour ceux traités à 60°C (figure n°49).

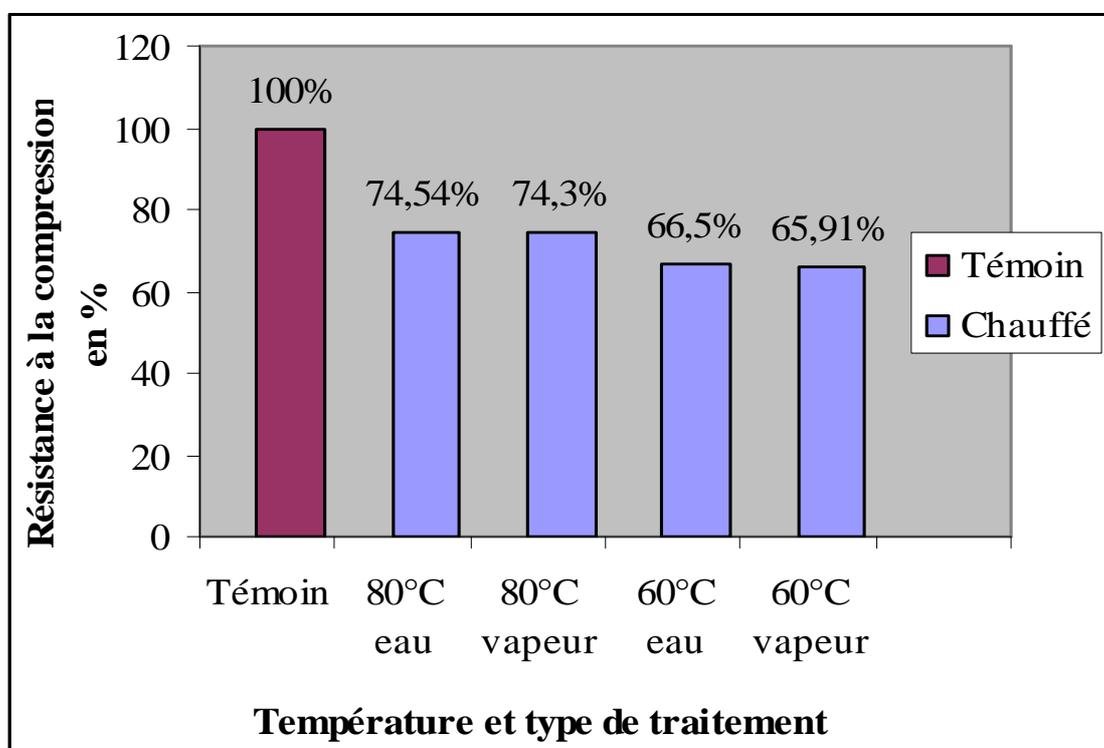


Figure n°49 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin ferme à 28 jours avec les résistances à la compression après démoulage des bétons fermes chauffés

Tableau n°22 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton de consistance ferme avec étuvage.

Température de traitement (°C)	Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)	
			Des trois éprouvettes	Moyenne
60	Après 09heures de traitement thermique	2496.35	22,13	21.92
		2477.04	22.02	
		2456.27	21.60	
	A 28 jours	2434.40	30.48	29.84
		2402.33	29.84	
		2390.22	29.21	
80	Après 11 heures de traitement thermique	2436.59	25	24.28
		2424.20	24.56	
		2423.10	23.29	
	A 28 jours	2415.08	29.21	28.93
		2389.94	28.79	
		2403.42	28.79	

Nous remarquons aussi qu'à 28 jours de durcissement les valeurs des résistances mécaniques des bétons traités à une température de 80°C et ceux traités à 60°C se rapprochent et avoisinent les 29 MPa. Ce qui prouve qu'il n'y a pas une influence sur les résistances mécaniques quand la température de traitement passe de 60 à 80°C (figure n°50).

La remarque la plus importante que l'on puisse faire c'est que la chute de résistances mécaniques d'un béton traité thermiquement par rapport à un béton ayant durci dans des conditions normales est une chose prévisible mais dans notre cas cette chute avoisine les 10% ce qui représente un excellent résultat pour les bétons traités thermiquement.

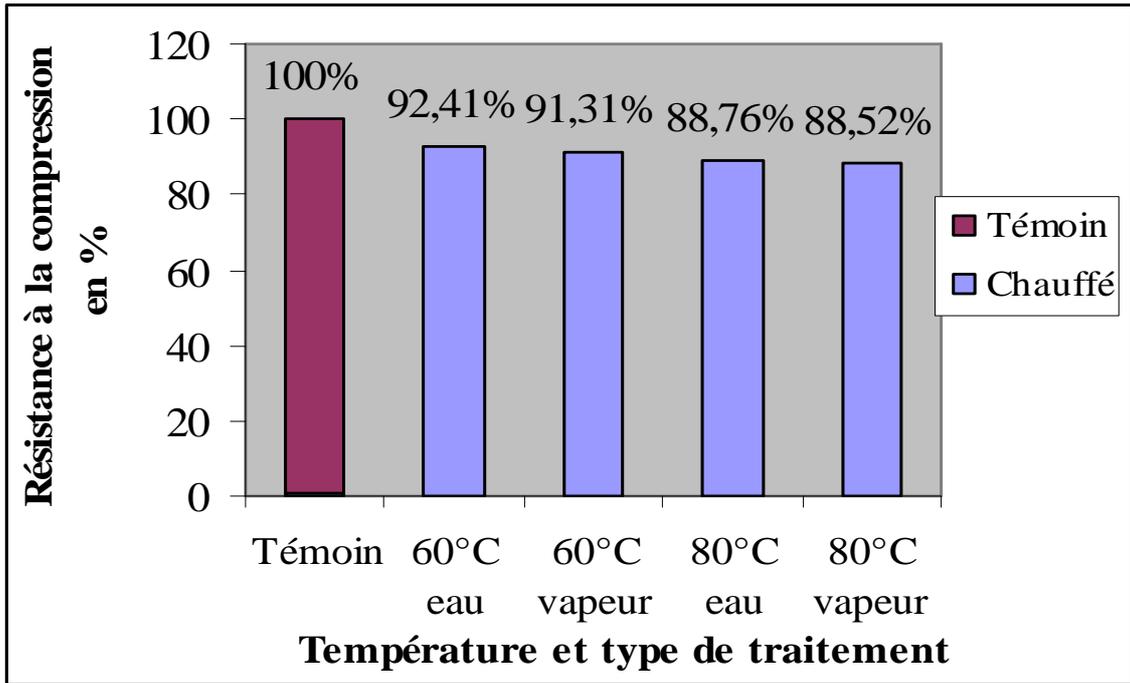


Figure n°50: Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin ferme à 28 jours avec les résistances à la compression à 28 jours des bétons fermes chauffés

Tableau n°23 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton plastique avec traitement hydrothermique.

Température de traitement (°C)	Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)		
			Des trois éprouvettes	Moyenne	
60	Après 09 heures de traitement thermique	2387.75	13.13	13.22	
		2417.27	13.40		
		2410.80	13.18		
80	Après 11 heures de traitement thermique	2397.23	16.21	15.56	
		2386.95	14.82		
		2391.5	15.66		
	28 jours		2359	19,21	20,05
			2382	20,79	
			2371	20,15	

- **Comparaison des résultats des essais (résistances à la compression et masses volumiques) d'un béton plastique avec traitement thermique (étuvage et hydrothermal) et sans traitement thermique (durcissement normal) tableaux n° 20, 23 et 24 :**

Nous remarquons que :

Les résistances à la compression d'un béton de consistance plastique pour les deux traitements (Etuvage ou hydrothermal) sont plus élevées pour la température de 80°C que pour la température de 60°C.

Les résistances à la compression d'un béton de consistance plastique à l'âge de 28 jours pour les bétons traités thermiquement à une température de 80°C sont inférieures aux valeurs des résistances à la compression d'un béton de consistance plastique non traité thermiquement. Cette différence est du essentiellement à l'interprétation déjà donnée au paravent c a d l'influence de la quantité d'eau de gâchage.

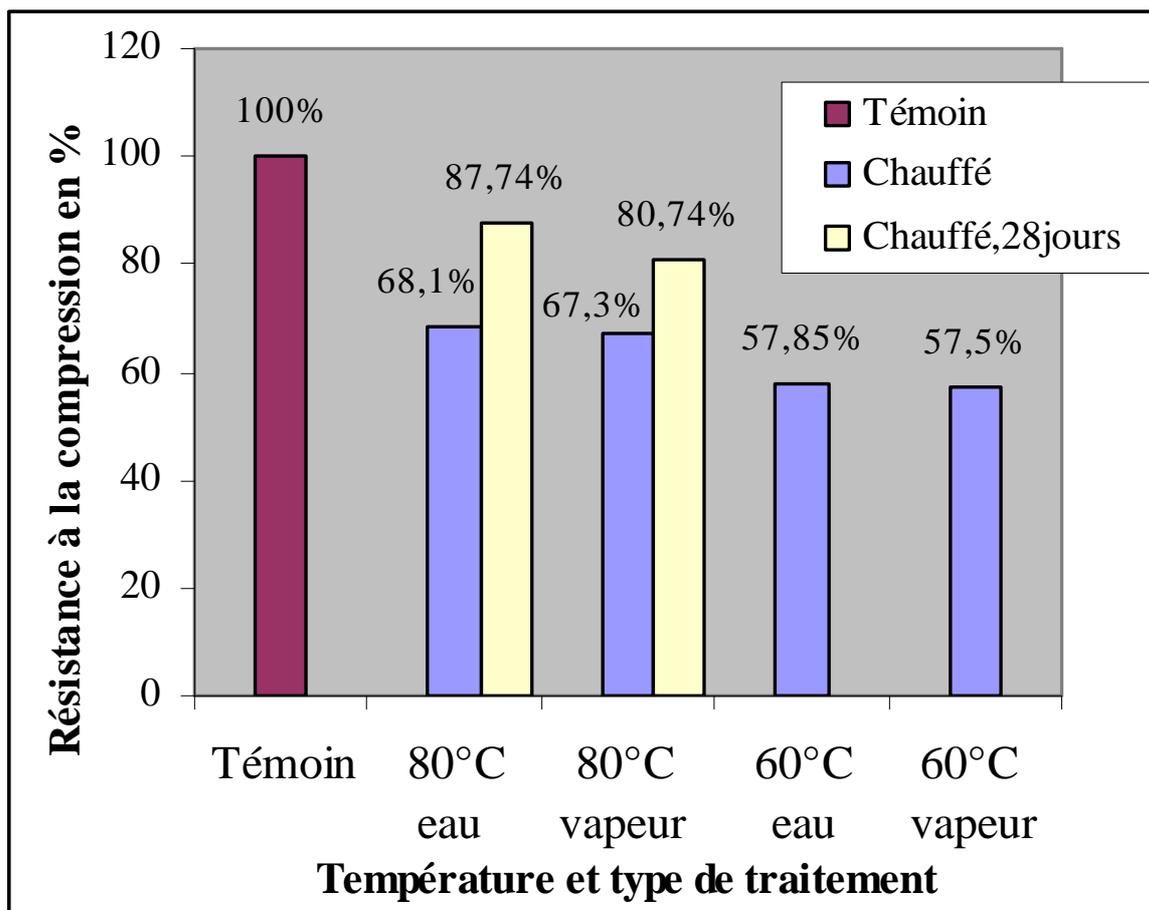


Figure n°51 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin plastique à 28jours avec les résistances à la compression des bétons plastiques chauffés après démoulage et à 28 jours d'âge

Tableau n°24 : Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton plastique avec étuvage.

Température de traitement (°C)	Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)	
			Des trois éprouvettes	Moyenne
60	Après 09heures de traitement thermique	2423.10	13.13	13.15
		2422.37	13.50	
		2422.27	12.82	
80	Après 11heures de traitement thermique	2434.40	15.51	15.38
		2407.79	14.93	
		2422.31	15.72	
	28 jours	2326	18,15	18,45
		2380	18,99	
		2343	18,23	

Tableau n°25: Résultats des essais de compression et de masse volumique du béton ferme avec étuvage sans préprise.

Température de traitement (°C)	Age (jours)	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistances à la Compression (MPa)	
			Des trois éprouvettes	Moyenne
60	Après 09heures de traitement thermique	2443.15	16.63	16.95
		2456.63	17.90	
		2434.76	16.32	
	28 jours	2405.6	24.05	24.38
		2410.7	24.68	
		2408.19	24.41	

3. Influence de la préprise sur les résistances à la compression:

- **Influence de la préprise sur les résistances à la compression pour une température de traitement thermique à 60°C :**

Un béton de consistance ferme traité avec étuvage à une température de 60°C sans préprise, subit une baisse de résistance à court terme d'environ 5 MPa par rapport au béton qui a subit une préprise de 2heures voir figure52.

Pour les résistances ultérieures un béton de consistance ferme avec préprise sous traitement thermique (étuvage à 60°C), la résistance moyenne à la compression est de l'ordre de 29,84 MPa à 28 jours d'âge tableau n° 22. Par contre pour un béton de consistance ferme sans préprise sous traitement thermique (étuvage à 60°C), la résistance moyenne à la compression est de l'ordre de 24,38 MPa à l'âge de 28jours tableau n°25. La chute de résistance pour un traitement thermique sans préprise est de l'ordre de 5,46 MPa. Cela explique l'importance de la préprise, durant laquelle le béton commence sa prise et possède ainsi une résistance lui permettant de supporter les contraintes internes pendant le traitement thermique

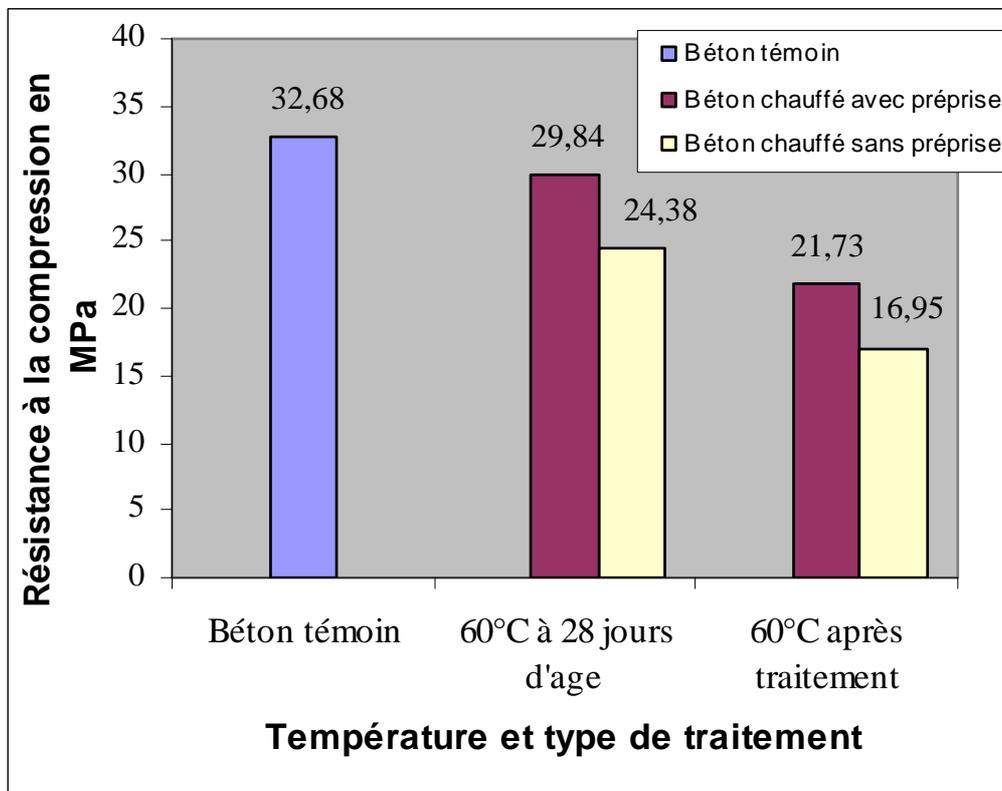


Figure n°52 : Comparaison de la résistance à la compression du béton témoin ferme à 28jours avec les résistances à la compression des bétons ferme chauffés avec et sans préprise après démoulage et à 28 jours d'âge

III. CONCLUSIONS :

Après examen des résultats obtenus des résistances à la compression, on peut déduire les constatations suivantes:

1. Une quantité élevée d'eau de gâchage dans un béton est défavorable pour une meilleure qualité (diminution de résistances mécaniques et de durabilité). Il est donc recommandé d'utiliser des bétons fermes avec des moyens de compactage, dans le cas contraire l'utilisation d'adjuvants est recommandée.
2. Un béton chauffé à 60 ou à 80°C à la vapeur ou sous l'eau chaude avec 11 heures de traitement thermique, atteint les 75 % des résistances du béton témoin de 28 jours de durcissement normal. Ces résultats nous démontrent que nos éléments en béton ou béton armé peuvent subir un décoffrage après 11 heures de traitement thermique. Donc un gain de temps et d'argent.
3. La chute de résistances mécaniques d'un béton traité thermiquement par rapport à un béton ayant durci dans des conditions normales avoisine les 10% ce qui représente un excellent résultat pour les bétons traités thermiquement.
4. La chute de résistance pour un béton qui a subi un traitement thermique sans préprise est d'environ 5 MPa après démoulage et elle est de l'ordre de 5,46 MPa à l'âge de 28 jours par rapport au béton qui a subi une préprise de 2 heures.

CONCLUSIONS GENERALES :

1. Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le programme national de recherche en énergies renouvelables "applications industrielles de l'énergie géothermique", les recherches dans ce domaine se situent à la croisée des intérêts économique et écologique, par le fait que les énergies renouvelables puissent concurrencer les énergies fossiles dans une production de masse telle que les composants en béton ;
2. L'étude bibliographique nous a permis d'observer, l'influence des constituants du béton ainsi que ces caractéristiques physiques sur ces résistances mécaniques et sa durabilité ;
3. L'importance de la composition minéralogique du ciment et sa finesse de mouture ainsi que le rapport E/C sur l'évolution des résistances mécanique du béton ;
4. Parmi les méthodes d'accélération du durcissement du béton, le procédé d'accélération le plus efficace peut être obtenu par introduction d'une chaleur dans le béton au cours des premières heures de sa mise en place jusqu'à l'obtention de résistance jugée indispensable pour la bonne tenue de l'élément après décoffrage ;
5. Le meilleur compromis de résistance à court et long terme du béton, s'obtient par une période de prise suffisante, l'élévation de la température à une vitesse modérée jusqu'à la température voulue, et le refroidissement lent, aussi la durée et la température de traitement ne doivent pas être excessive. Il est aussi conseillé de traiter dans une ambiance en atmosphère humide c'est-à-dire que le traitement s'effectue sans perte d'eau du béton. Il n'existe pas de cycle de traitement idéal adaptable à tous les cas ;
6. L'Algérie possède plus de 200 sources géothermales chaudes, avec 37 sources hyperthermales ($T > 45^{\circ}\text{C}$), le sud algérien contient une nappe appelée « nappe albienne », qui s'étend sur plusieurs milliers de Km^2 , la température moyenne de l'eau de cette nappe est de 57°C , certains forages débitent à $4\text{m}^3/\text{s}$, cela peut constituer une

solution économiquement rentable aux populations rurales isolées, en matière de création d'emplois ;

7. Les résultats obtenus dans l'étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Le béton ferme donne de meilleurs résultats au traitement thermique, pour une température de 60 ou 80°C à la vapeur ou sous l'eau chaude avec 11 heures de traitement thermique avec une préprise, les résistances atteignent les 75 % des résistances du béton témoin de 28 jours de durcissement normal, aussi la chute de résistances mécaniques à l'âge de 28 jours d'un béton traité thermiquement par rapport au béton témoin avoisine les 10%. Ces résultats nous démontrent que nos éléments en béton ou béton armé peuvent subir un décoffrage après 11 heures de traitement thermique en toute sécurité donc un gain de temps et d'argent.

Nous venons de démontrer la faisabilité d'accélérer le durcissement d'un béton on utilise l'énergie géothermique comme source de chaleur.

RECOMMANDATIONS :

Pour un traitement thermique hydrothermal il est recommandé :

1. De diminuer la quantité d'eau de gâchage pour préserver la durabilité et les caractéristiques mécaniques du béton ;
2. D'effectuer une préprise avant de procéder au traitement hydrothermal ;
3. D'utiliser une énergie douce, non polluante, comme source de chaleur pour accélérer les cadences de durcissement du béton ;
4. D'utiliser des ciments à faible ou moyenne chaleur d'hydratation initiale ;
5. De respecter la vitesse d'élévation de la température (20 à 25° C/h) lors du traitement thermique ;

6. Il est recommandé d'utiliser les adjuvants plastifiants et superplastifiants réducteur et haut réducteur d'eau, dans le but de diminuer les contraintes internes lors de l'accélération du durcissement du béton. Cela est très valable pour les bétons légers ;
7. Avec l'utilisation des plastifiants et superplastifiants réducteur et haut réducteur d'eau il est recommandé de prolonger la durée de la préprise car l'utilisation de ces derniers c'est à dire plastifiants et superplastifiants sont souvent les retardateurs de prise et de durcissement ;
8. Il est recommandé de ne pas dépasser une différence de température égale à 40° C entre le moment de l'enlèvement de l'élément de béton de l'enceinte de l'accélération du durcissement et le moment du décoffrage (ambiance extérieure) ;
9. le procédé d'accélération du durcissement du béton est recommandé pour des éléments en béton et béton armé préfabriqués ;
10. Il est recommandé après la fin du traitement thermique de recycler l'eau à fin de préserver notre environnement qui représente l'un des objectifs primordiaux de notre travail de recherche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Abdessalem.M, 3^eet4^etrimestres2000** : La satisfaction des besoins de confort thermique:quelles alternatives à la climatisation, Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49
- [2] **Acker.P fév. 1986** : Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et applications aux ouvrages d'art : de nouveaux outils, pour une optimisation simultanée du coût et de la qualité. Annales de l'ITBTP, n° 442, Série Béton 235, p. 62-77.
- [3] **Acker.P, 1998** : Prise et durcissement des bétons, Les effets thermomécaniques, Béton hydraulique, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 2 235.
- [4] **Acker.P, Adam.M, Mamillan.M, Saulnier.J ,1998**: caractères du béton, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction Doc. C2240.
- [5] **Adam.M ,1998**: Durabilité et pathologie du béton, Béton hydraulique, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 2 250.
- [6] **Aitcin .P.C, 2001** : Bétons haute performance, Ed. Eyrolles.
- [7] **Aitcin.P.C et Baron.J, 1996** : les adjuvants normalisés pour bétons, les bétons bases et données pour leur formulation, Ed.Eyrolles.
- [8] **Aitcin.P.C et Neville.A.M et Acker.P,sep 1997**: Integrated .View of Shrinkage Deformation, Concrete International, vol. 19, no 9, p. 35-41.
- [9] **Alexaderson.J, 1972**: Strength losses in Heat Cured Concrete Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Royal institute of Technology Stockholm.
- [10] **Andre.P, Deliste.C.E., Reveret.J.P, 2003** : Processus, acteurs et pratique pour un développement durable, L'évaluation des impacts sur l'environnement, 2^e édition, Ecole [2] Polytechnique de Montréal.
- [11] **Andriamanantsilavo.N.R ,2003** : comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation, Thèse de doctorat à l'Université de Bretagne sud.
- [12] **BaCaRa Projet Français, 1996** : Le béton compacté au rouleau, Presses de l'Ecole-, Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [13] **Baron.J et Sauterey.R, 1982** : Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey
- [14] **Baron.J, 1982** : Chapitre 27, Les retraits de la pâte de ciment, béton hydraulique : connaissance et pratique Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, p. 485-50 1.
- [15] **Baron.J, Olivier.J.P et. Weiss.JC, 1996** : Chapitre 1A : Les ciments courants, Les bétons Bases et données pour leur formulation, sous la direction de Jacques .BARON, Jean-Pierre OLIVIER, Ed Eyrolles.

- [16] **Benoit.J, 3^eet4^etrimestres 2000** : Le développement durable au Canada:Une préoccupation constante de l'avenir, Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49.
- [17] **Bernard.R., Menguy.G. et Schwartz.M. 1992:** Le rayonnement solaire conversion thermique et application. LAVOISIER tec et doc.
- [18] **Bernier.G, 2005** : Formulation des bétons, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction Doc C 2 210.
- [19] **BP Amoco, 2000:** Statistical Review of World Energy.
- [20] **Bresson.J, 1980** : Prévion des résistances, facteur de maturité ; temps équivalent, Journée d'étude ITBTP du 15 novembre 1979 : durcissement accéléré des bétons, Paris ,Ann. Inst.Tech. Batim.Trav.publics, 1980,387, 106-111.
- [21] **BRIN.A 1979** : Océan et Énergies, Editions Technip.
- [22] **Bulletin des énergies renouvelables N°2, dec 2002** : Le Sommet Mondial pour le Développement Durable, Johannesburg.
- [23] **Bulletin des énergies renouvelables N°4, dec 2003:** Avant-projet de Loi relatif à la Promotion des Énergies Renouvelables dans le cadre du Développement Durable.
- [24] **Byfors .J,1980:** Plain concrete at early ages,Swidisk Cement and Concrete Reaserch Institute at the Institute of Technology,Ed., Stockholm, , CBI , Reaserch 3 :8.
- [25] **Cataldi.R, Ferrera.G.C, Palmerini.C.G. et Sabateli.F, 1990:** Comparative Progress Report and Projection on Future Developments of Geothermal Energy in Italy", Geothermics.
- [26] **Caumette.J, 1990** : Traitement thermique du béton par l'électricité, Ed, Masson, paris.
- [27] **Chambolle.T et Méaux.F, 2001** : Rapport sur les nouvelles technologies de l'énergie.
- [28] **Chanvillard. G, 1999** : Connaissances générale sur le matériau béton, Ed. Aléas.
- [29] **Chanvillard.G et Laplante.P 1997** : Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrication, in : "Les Bétons bases et données pour leur formulation" Eyrolles.
- [30] **Charles.J.P, Duchemin.S et Claud.M, Arnaud.G ; 20-22décembre2003** : Pour un développement durable : Le photovoltaïque, Développement et Recherche en 2003, revue des énergies renouvelables, Numéro Spécial, Tlemcen.
- [31] **CIM béton ,2000:** Le ciment et ses applications, Fiches techniques.
- [32] **CIM béton, 2000** : construire avec les bétons, Ed du Moniteur.
- [33] **CMED 1988** : Notre avenir à tous. Rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement, Québec, Editions du fleuve et les publication du Québec.

- [34] **Commission du Conseil Mondial de l'Énergie.1993** : l'énergie pour le monde de demain, traduit par la société Traduclaire et Ph.de Lavergne, paris, Ed Technip.
- [35] **Conseil Mondial de L'énergie (CME) 1993** : L'énergie pour le monde de demain, Réalités, véritables options et action à entreprendre, Edition technip.
- [36] **Cormon.P 1973** : Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, Paris.
- [37] **Coudert.J.M et Jaudin.J.M, 1983** : La géothermie du geyser au radiateur. Editions du BRGM.
- [38] **Courtauld.B mars-avril, 1974** : Influence de la température sur l'évolution thermique des pâtes de ciments (Appareillage et cas du silicate tricalcique) Ciments et bétons .Revue des matériaux n°687.
- [39] **Darcemont.M, mars 1977** : L'accélération du durcissement de produits en béton par traitement thermique. CERIB, Monographie n° 9.
- [40] **Dessus.B, 3^eet4^e trimestres, 2000** : Énergie et développement durable: défis, risques et marges de manœuvre, Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49 -
- [41] **Doat.P, Hays.A, Houben.H, Matuk.S et Vitoux.F 1983** : Construire en terre, par le CRAterre, Ed Alternatives.
- [42] **Dreux.G et Festa.J, 1998** : Nouveaux guide du béton et de ces constituants, Ed. Eyrolles.
- [43] **Dupain.R, Lanchon.R et Saint-Arromain.J.C, 1995** : Granulats, sols, ciments et bétons, Paris : Ed Educavivre, 276p.
- [44] **Duval.R et Hornain.H ,1992**: Chapitre 9, la durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives, la durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [45] **Encyclopédie Wikipédia, 2006** : Énergie renouvelable, www.wikipédia.org.
- [46] **Encyclopédie Wikipédia, 2006** : Géothermie, www.wikipédia.org.
- [47] **ENERDATA, août 2001.**
- [48] **Fekraoui.A, déc, 2003** : La géothermie, une Énergie d'Avenir Bulletin des Energies Renouvelables - N°4.
- [49] **Folgelman.T et Montloin .R, 1983** : Installation photovoltaïque dans l'habitat isolé, Aix En Provence.
- [50] **Folliot.A et Buil.M, 1982** : chapitre 12, la structuration progressive de la pierre de ciment, béton hydraulique : connaissance et pratique Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [51] **Gardel.A, 1979** : Energie, Economie et Perspective, Pergamon Press.

- [52] **Gerard.P.et Napoli.A, 3°et4°trimestres2000**: La gazéification de la biomasse, Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49.
- [53] **Groupe ciments Français 1993** : Sous la direction de J.C. Bastide, la fabrication du ciment, Ed.Eyrolles.
- [54]**Guibet.J.C, 2005** : Carburants liquides, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 545.
- [55] **Guibet.J.C. ,2005**: Combustibles liquides, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 546.
- [56] **Guide, mars 2005** : d'application pratique de la nouvelle norme pour béton NF EN 206-1, sur chantier.
- [57] **Hamelin.B ,1978** : les énergies nouvelles et polémique des centrales nucléaires, Ed.Eyrolles.
- [58] **Hoang To.L, 3°et4°trimestres2000** : Que font les pays en développement pour promouvoir les nouvelles technologies de l'énergie ? , Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49.
- [59] **Jay.R et Caumette.J oct. 1981** : L'électricité dans le traitement thermique du béton. Revue technique du bâtiment, n° 86.
- [60]**Joisel.A 1973** : Les adjuvants du ciment, physico-chimie concernant le béton et son armature, Soisy.
- [61] **Kedaid.F.Z. et Rezig.M, Abouriche.M et Fekraoui.A en 1988** : Carte géothermique préliminaire du nord de l'Algérie Au 1/100.000. Rapport interne, CDER.
- [62] **Kempf. H, du 05 mars 2005** : Kyoto an 1, monde.fr, Edition spéciale.
- [[63] **Komar. A, 1978** : Matériaux et éléments de construction, éd. Mir, Moscou.
- [[64] **Kosmatka.H, Paneresse.W.C , Allen.G.E , et Cumming.S,1991** :Dosage et contrôle des mélanges de béton ,Canadian Portland Cement Association ,5^{ème} édition, EB 101.05 T (F) , Ed, Ottawa.
- [[65] **Kosmatka.S.H et Panarese.W.C et Gissing.K.D et Macleod.N.F 1995** : Dosage et contrôle des mélanges de béton, Association Canadienne du Ciment Portland, Ottawa, 6' édition, 228 p.
- [66] **Le petit Larousse 2004.**
- [67] **Lindal.B.1992**: Review of Industrial Applications of Geothermal Energy and Future Considerations, Geothermic 21, No.5/6, 591.
- [68] **Maillard.D, 3°et4°trimestres2000** : La politique française de coopération avec les pays en développement dans le domaine de l'énergie, Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49.

- [69] **Mamillan.M 1982** : Traitement thermique des bétons, in «Le béton hydraulique», Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées.
- [70] **Mamillan.M fév. 1973** : L'accélération du durcissement du béton par la chaleur, l'influence des conditions de traitements et de la composition sur la qualité du béton. Annales de l'ITBTP, n° 302, p. 15-28.
- [71] **Mamillan.M juil-août 1979** : L'accélération du durcissement du béton par la chaleur, rev techn. Bâtiment (F) N°55.
- [72] **Mamillan.M oct.1980** : Préchauffage du béton : utilisation de la chaleur d'hydratation. Annales de l'ITBTP, n° 387.
- [73] **Mamillan.M, 1970** : Recherches expérimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage, Annales de l'ITBTP (F) n°267 ET 268.
- [74] **Mamillan.M, 1979** : L'accélération du durcissement du béton par la chaleur, Techniques de l'Ingénieur, Béton hydraulique, C 2 235.
- [75] **Martin. J, M.3^eet4^etrimestres2000** : Éditorial, Liaisons Energie –Francophonie N^{OS}48 et 49.
- [76] **Martin.J ,2005**: Énergies éoliennes, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, B 8 585.
- [77] **Menou.A ,2004** : étude du comportement thermomécanique des bétons a haute température, Thèse de doctorat à l'Université, de Pau et des pays de L'Adour.
- [78] **Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, dec 2003**: un engagement fort pour les énergies renouvelables, Bulletin des énergie renouvelables N°4.
- [79] **Ministère de l'industrie du commerce et de l'artisanat 1990** : La géothermie en France, énergie nouvelle.
- [80] **81] Mousel.M, 1999** : Le développement durable une démarche globale et responsable, in construire au présent, bâtir l'avenir, actes du colloque des constructions publique.
- [81] **Nations Unies mai 2006** : L'énergie au service du développement durable, Document d'information.
- [82] **Neville.A.M, 1992** : Propriétés des Bétons, Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris.
- [83] **Olivier.J.P, Ingénieur enseignant à l'INSA 2001**: Le matériau et ses évolutions.
- [84] **Ouali.S, 2006** : Etude géothermique du sud de l'Algérie, mémoire de magistère en géophysique, université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES,
- [85] **Pailhere.A.M, 1982** : Les adjuvants in «Le béton hydraulique», Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées.

- [86] **Palz.W ,1981** : L'électricité solaire, Editions dunod.
- [87] **Papadakis 17et18 de 1967** : Chauffage du béton, Revue, béton industriel.
- [88] **Petrov.N avril 2003** : effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'étringite, Thèse de doctorat à l'Université Sherbrooke Canada.
- [89] **Pharabot.F, 1989** : "Atlas mondial de l'énergie", Ed .Tech.
- [90] **Pignal.B 2005** : Terre crue, Ed. Eyrolles.
- [91] **Poitrat.E ,2004**: Biocarburants, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, BE 8 550.
- [92] **Regourd. M, 1982** : Chapitre 11, L'hydratation du ciment portland, béton hydraulique : connaissance et pratique Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [93] **Regourd.M et Gautier.E, oct.1980** : Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré. Annales de l'ITBTP, n° 387.
- [94] **Reinsdorf.S ,1964** : Influence de la composition du ciment portland sur le résultats de l'étuvage, Congrès RILEM de Moscou.
- [95] **Rezig .M, 1992** : Etude géothermique del'extrémité Est de l'atlas saharien, Rapport interne, CDER.
- [96] **Rezig .M, 1991** : Etude géothermique du Nord –Est de l'Algérie, DEA, Université des sciences et des techniques du Languedoc (Montpellier).
- [97] **Richard et Cheyrezy.M 1995** : Les bétons de poudres réactives, Annales ITBTP. Série béton 320.
- [98] **Sarlos.G., Haldi.P.A, Verstraetep.V 2002**: Systèmes Energétique, Offre et demande d'énergie: méthode d'analyse, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, volume 21.
- [99] **Sauteron.J, 1965** : Les combustible nucléaire.
- [100] **Stefanov. B, 1982** : Technologie des éléments en béton et béton armé, Edition Vichaya Chkola, 1982, Kiev.
- [101] **Seigneur.V , 2000** : Etude de l'influence du mûrissement a l'eau et de l'ajout d'un agent de réducteur de retrait sur le retrait endogène de béton a haute performance, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, à l'Université Sherbrooke Canada.
- [102] **Semenov, Podurovsky et Volkovski, 1964** : Traitement en chaleur humide du béton dans une enceinte sous vide, Congrès RILEM de Moscou.

[103] Semmar.D, Lafri.D, Hamid.A, Kharchi.R et Sami.S, 2002 : Chauffage des Bungalows de Hammam Chellala par Energies Géothermiques, Revue des énergie renouvelables : Zones Arides.

[104] Semmar.D., juin 2004 : application directe de l'énergie géothermique en Algérie ; Bulletin des Energie Renouvelables semestriel N°5.

[105] Sous la direction de Larrard .F ,2002: construire en béton, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

[106] Venuat.M 1964, Durcissement accéléré du béton manufacturé, Symposium Rilem, Moscou.

[107]Verbeck .G.J,and Helmuth .R.H, 1968 : Structures and physical properties of cement paste, Proceedings of the fifth international symposium on the chemistry of cement ,Tokyo.

[108] Vernet.C et Cadoret .G ,1992 : Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours, in : Les bétons à hautes performances. Caractérisation, durabilité, applications presses de l'ENPC, Ed., Paris, 1992..

[109] Vernet.C ,1992 : Introduction à la physico-chimie du ciment portland, Deuxième partie, Chimie de l'hydratation, Technodes S.A. Groupes ciments Français, Département de recherche/Produit nouveau.

[110] Vittone.R ,1996: Bâtir manuel de construction, Presses polytechniques et universitaires Romandes.

[111]Walther.R et Miehbradt.M ,1990 : dimensionnement des structures en béton, traité de génie civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne volume 7.

[112]Whitmarsh et Govindjee, 1995: Photosynthesis, Encyclopaedia of Applied physics, vol.13.VCH .Publishers Inc.

REFERENCES NORMATIVES

- [1] **NF EN 197-1 (Fév. 2001)** Ciment- Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (indice de classement P 15-101-1)
- [2] **NF P 18-506 (mars 1992)** Additions pour béton hydraulique –Laitier vitrifié moulu de haut fourneau
- [3] **NF EN 450 (Oct. 1995)** Cendres volantes pour béton- Définitions, exigences et contrôle de qualité (indice de classement P 18-050)
- [4] **NF P 18-508 (oct.1994)** Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires- Spécification et critères de qualité
- [5] **NF P 18-502 (mai 1992)** Additions pour béton hydraulique –Fumées de silice
- [6] **EN 196-1 (Août 1995)** Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques (indice de classement P 15-471)
- [7] **NF P 15-317 (sept.1995)** Liants Hydraulique - Ciments pour travaux à la mer.
- [8] **XP P 15-319 (sept.1995)** Liants Hydraulique - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates
- [9] **NF P 15-318 (sept. 1995)** Liants Hydraulique - Ciments
- [10] **XP P 18-540 (Oct. 1997)** Granulats- Définitions, conformité, spécifications (indice de classement P 18-540)
- [11] **P18 591 (sept.1990)** Granulats- Détermination de la propreté superficielle
- [12] **NF P18 541 (Août 1994)** Granulats- Granulats pour bétons hydraulique- Spécification.
- [13] **P 18-598 (Oct. 1991)** Granulats- Équivalent de sable
- [14] **NF EN 1008 (Juill. 2003)** Eau de gâchage pour bétons- Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement P 18-211).
- [15] **NF EN 934-2 (Sept. 2002)** Adjuvants pour béton, mortier et coulis- Adjuvants pour béton — Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage (indice de classement P 18-342).

- [16] **NF P 18-451 (déc.1981)** Bétons- Essai d'affaissement.
- [17] **NF EN 12390-3 (fév. 2003)** Essai pour béton durci –Résistance à la compression des éprouvettes (indice de classement P18-455).
- [18] **NF EN 206-1(Fév. 2002)** Béton- Spécification, performances, production et conformité (indice de classement P 18-325).
- [19] **NF P15 315 (avril 1991)** Liants Hydraulique – Emploi du ciments alumineux fondu en éléments de structure.
- [20] **NF P18-555 (déc.1990)** Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.
- [21] **NF P18-554 (déc.1990)** Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux
- [22] **NF EN 12390-1 (Oct 2001)** Essai pour béton durci- Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules (indice de classement P 18-430).
- [23] **NF P 18-560 (Sep 1990)** Granulats -Analyse granulométrique par tamisage
- [24] **NF EN 480-5(Nov 1996)** Adjuvant pour béton mortier et coulis –Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire (Indice de classement P 18-314).
- [25] **NF P 15-314(Fév. 1993)** Liants Hydraulique – Ciments prompt naturel
- [26] **NF EN 196-1 (Août 1995)** Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques (Indice de classement : P 15-471)
- [27] **NF EN 196-3 (Août 1995)** Méthodes d'essais des ciments – Détermination du temps de prise et de stabilité (Indice de classement : P 15-473).
- [28] **NF EN 196-6 (Août 1990)** Méthodes d'essais des ciments – Détermination de la finesse (Indice de classement : P 15-476).

ANNEXE

CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES DES EAUX DES SOURCES THERMALES DU NORD DE L'ALGERIE

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
01-H.MESKHOUTINE (GUELMA)	215	28,3	16	218,7	- 0,48	330,6	336,3	396,5	3	-	1600	-	98	- 07/83	80
02-H.N'BAILS (BOUCHEGOUF)	370	157	12	1550	-	702	2425	450	-	7	6211	6,6	34	21/11/83	1
03-H.BERDA (GUELMA)	100	57	4	10	-	372	15	130	-	6	610	7,2	28	21/11/83	100
04-H.HAMIMINE (S.AHRAS)	10	12	10	525	0,95 -	927	150	93	-	3	1642	8	37	10/07/84	
05-H.ZAID (GUELMA)	145	91	6	128	-	580	330	43	-	1	1302	7,1	39	21/11/83	5
06-H.ASSASLA (BOUCHEGOUF)	88	31	2	28	0,285 -	281	50	100	-	2	573	6,5	34	10/07/84	2
07-H.BEN HACHANI (SEDRATA)	380	108	12	93	1 -	415	195	863	0,032	-	2046	6,8	70	21/11/83	
08-H.L'MINA (BOUCHEGOUF)	96	569	92	2500	-	970	4500	950	-	-	10964	6,4	40	21/11/83	7
09-H.BIR EL-ACHEB (SEDRATA)	38	873	4	4850	1,8 -	1190	8600	960	0,1	4	16638	6,9	28	21/11/83	
10-H.ZATOUT (BOUHADJAR)	34	48	8	463	-	933	360	53	-	-	1858	7,6	38	21/11/83	
11-H.GUERFA (SEDRATA)	380	118	16	95	-	366	250	900	-	1	2206	7,2	68	21/11/83	
12-H.ROUMIA (GUELMA)	23	94	6	33	0,065 -	317	45	188	-	2	689	7,6	-	10/07/84	0,5
13-H.BEN TAHAR (BOUCHEGOUF)	310	61	24	115	0,61 -	502	165	613	-	41	1691	7,2	34	10/07/84	
14-H.AIN SENNOUR (GUELMA)	206	160	40	465	1,8 -	1891	360	60	0,032	-	3102	6,9	18	21/11/83	
15-H.SIDI ZAID (GUELMA)	15	23	27	650	0,1	1007	400	20	-	2	2043	8	-	10/07/84	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
16-H.BENISALAH (GUELMA)	23	28	8	358	-	592	295	30	0,01	1	1256	7,8	48	21/11/83	
17-H.TASSA (GUELMA)	164	135	25	373	-	903	700	35	-	-	2178	7,4	40	21/11/83	2
18-H.OULED ALI (GUELMA)	188	62	8	30	-	372	40	438	-	1	1140	7	50	21/11/83	3
19-H.EL-HAMMA (SIKIDA)	470	90	12	100	-	320	175	1150	-	-	2094	7,6	34	20/06/83	13
20-H.SALHINE (SIKIDA)	64	352	12	33	0,57	415	195	863	-	-	2046	6,8	55	21/11/83	4
21-H.SILLAL (BEJAIA)	220	41	25	500	3,2	427	950	23	-	-	2221	6,6	46	28/11/83	10
22-H.SIDI YAHIA EL AIDLI (AKBOU)	36	47,1	92	4360	3,2	610	6800	1175	0,018	2	14880	7,1	44	28/11/83	3
23-H.KIRIA (ADEKAR)	36	21	4	18	0,57	140	35	40	-	-	289	7,2	40	28/11/83	1
24-H.EL.GUAA (DJELFA)	68	24	3,9	-	-	214	57	-	-	-	480	6	19	09/06/84	
25-H.EL.MESRANE ZINEB (DJELFA)	509	126	19	1006	-	214	1509	-	-	-	4730	6,8	42	09/06/84	
26-H.CHAREF (SALHINE) (DJELFA)	76	53	19,5	-	-	287	355	-	-	-	1670	6,5	42	09/06/84	38
27-H.KNIF (KHENCHELA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	09/06/84	15
28-H.ESSALIHINE (KHENCHELA)	106	43	29	565	-	274	775	300	0,018	3	1082	7,9	70	21/11/83	60
29-H.MEXNA (EL-KALA)	64	60	8	75	1,8	360	135	48	0,032	-	704	6,9	38	21/11/83	
30-H.SIDI TRAD (EL-KALA)	28	18	8	93	0,05	292	43	30	-	19	542	8	63	10/07/84	1,8
31-H.SIDI DJABALLAH (EL-KALA)	50	61	10	273	0,18	427	350	150	0,032	13	1262	7,1	37	21/11/83	1
32-H.BOUTALEB (SETIF)	286	112	35	625	-	195	1175	815	-	6	3416	7,1	52	-/11/83	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
33-H.EL-BIBAN (SETIF)	408	155	13	5000	-	250	8300	1000	0,03 2	-	16108	7,8	80	28/11/83	1,2
34-H.SOUKHNA (EL-EULMA)	124	82	4	413	-	268	775	283	-	12	2052	7,1	50	21/11/83	83
35-H.ENAKHLA (SETIF)	88	101	8	433	-	262	900	105	-	10	1976	7,9	33	21/11/83	
36-H.SED BELABES (HAMADIA)	28	32	6	183	0,61	372	98	155	-	2	348	8,5	25	10/07/84	
37-H.IBAINAN (B.B.A)	496	112	81	3660	-	372	5800	1500	0,1	-	13482	7,3	60	28/11/83	
38-H.SIDI MANSOUR (A.OULMANE)	76	336	24	225	-	183	360	1250	-	7	3332	7,4	55	-/11/83	
39-H.OULED YELLES (SETIF)	58	132	52	220	-	268	350	438	-	11	1672	7,1	47	21/11/83	10
40-H.MANSOURA (SETIF)	168	53	19	238	-	329	385	300	0,1	3	1434	7,2	38	28/11/83	
41-H.BARAKA (DJIDJEL)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,2	-	-	
42-H.BENI-GUECHA (FERDJIOUA)	46	547	10	960	3,22	598	7800	1360	0,05 7	6	17616	7,2	50	10/07/84	
43-H.GUERDA (FERDJIOUA)	370	186	24	1390	-	397	1650	2150	0,05	3	6524	7,4	-	21/11/83	
44-H.OUED EL-GHOUL (ROUACHED)	26	31	05	313	-	702	85	108	-	2	1172	7,5	27	21/11/83	
45-H.DAR EGHEIKH (FERDJIOUA)	76	34	4	138	-	201	250	153	-	8	880	7,6	32	21/11/83	
46-H.OULED ACHOUR (FERDJIOUA)	198	67	19	625	0,1	525	1088	190	-	2	2752	6,8	40	21/11/83	
47-H.KSENA (AIN BESSAM)	358	69	35	1495	-	299	2663	920	-	-	3520	-	60	16/06/84	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D' ANALYSE	DEBIT L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
48-H.TELLAT (LAKHDARIA)	375	87	16	196	-	323	604	-	-	-	1740	-	30	26/06/84	
49-H.BEN HAROUN (AOMAR)	463,4	56,2	11,8	693,2	-	887,5	550,2	618	-	-	3312	-	19	20/06/84	
50-H.ATN.HAMMAM (CHLEF)	116	29	16	253	-	342	142	-	-	-	690	6,5	25	25/04/84	
51-H.BOUTRIG (CHLEF)	606	69	59	2070	-	305	3444	-	-	-	7850	6	39	25/04/84	
52-H.RIGHA (MELIANA)	601	92,5	15	214,2	-	196	337,2	1074,9	-	-	2466	-	67	15/04/84	
53-HCHABOURA (BATNA)	55	51	6	340	0,22	415	100	625	-	3	1480	8	-	10/07/84	Faible
54-H.STDT EL-HADJ (BATNA)	296	146	15	500	-	238	775	995	-	-	3176	7,3	45	17/10/83	
55-H.OUGHENDJA (BATNA)	100	65	4	93	0,1	354	75	315	-	-	956	7,5	21	21/11/83	
56-H.OULED SI SLIMANE (BATNA)	70	47	3	23	-	336	45	83	-	13	597	7,4	32	21/11/83	
57-H.KASROU (BATNA)	66	47	2	10	-	372	15	18	-	25	482	7,9	37	21/11/83	
58-H.OULHD AICHA (BATNA)	208	84	97	2300	-	329	3560	800	0,32	6	7143	8	35	21/11/83	
59-H.GUERJIM (BATNA)	104	14	6	1540	-	354	2050	600	-	-	4632	7,5	46	21/11/83	
60-H.EL-BOUZANI (BATNA)	140	79	30	640	-	1007	1000	43	-	5	2874	7,3	22	21/11/83	
61-H.BOU REMROUM (BLIDA)	273	100	39	713	-	1873	568	-	-	-	2410	8	29	20/06/84	
62-H.BOUILHA (BLIDA)	221	21	23	2599	-	360	2041	-	-	-	8050	6	23,5	16/06/84	
63-H.MELOUANE (BLIDA)	1012	444	98	13869	-	244	9940	1880	-	-	30860	6,5	38,5	20/06/84	3
64-H.LE BLANC (BLIDA)	183,2	57,9	110	292,2	-	237,8	52,5	653,2	-	-	1610	-	24	-/04/84	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
65-H.EL-HAMEDH (MEDEA)	293	160	32	292	-	1983	163	-	-	-	1870	7	15	20/06/84	5
66-H.CHDNIGUEL (MEDEA)	132	65	18	541	-	543	426	-	-	-	1350	6	11,5	20/06/84	
67-H.SOUARI (MEDEA)	106	49	16	299	-	360	123	-	-	-	820	-	-	20/06/84	
68-H.EL-ANACER (MEDEA)	135	75	18	299	-	281	160	-	-	-	1160	-	-	20/06/84	7
69-H.JORDANI (MEDEA)	240	132	15,6	315,1		359,9	143,1	1113	-	-	2400	-	-	15/04/84	25
70-H.CHBEIKA (MEDEA)	185	124	14	391	-	531	499	-	-	-	2170	7	18	20/06/84	10
71-H.FORAGE CNL (MEDEA)	4,64	6,33	14	549,7	-	610	177,5	307	1,8 48	-	1700	-	35	15/04/84	
72-H.SIDI E-HABCHI (MEDEA)	315	75	12	288	-	354	657	-	-	31	2410	6,5	19	20/06/84	2,5
73-H.SALIHINE (MEDEA)	86	7	23	529	-	573	391	-	-	-	1340	7	36	20/06/84	3
74-H.TOUANSA (MEDEA)	63	30	20	3198	-	1129	3532	-	-	-	8970	-	22	20/06/84	5
75-H.OULED CHNEF (MEDEA)	77	45	12	230	-	336	92	-	-	-	510	-	-	16/06/84	
76-H.SIDI YAHIA EL-MADANI (TEBESSA)	440	235	53	1615	0,18	1556	3010	245	0,0 18	-	7191	6,9	36	21/11/83	
77-H.HAMMAMET (TEBESSA)	76	49	4	13	-	354	30	63	-	-	594	8	35	21/11/83	
78-H.EAU BLEUE (TIZI-OUZOU)	17,84	3,7	12,87	193,2	-	12,2	53,25	76	-	45,7	370	-	-	14/05/84	
79-H.SALEE (TIZI-OUZOU)	136	26	14	334	-	409	320	-	-	11	860	-	17	16/06/84	
80-H.SIDI MOUSSA (TIZI-OUZOU)	108,8	21,1 2	47,19	200,1	-	433,1	14,2	76	-	22,9	800	-	17	14/05/84	

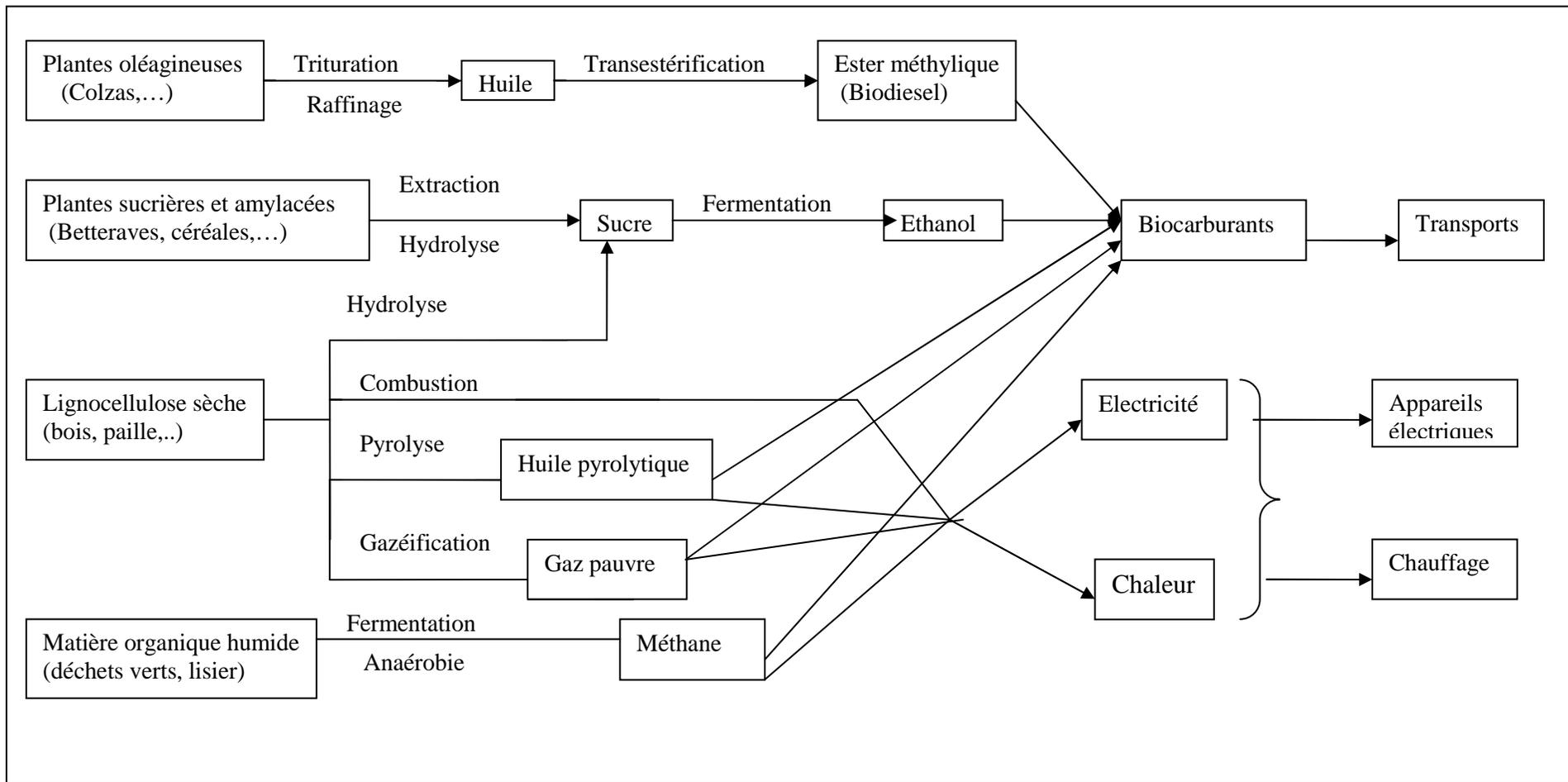
N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
81-H.AIN SOULTANE (TIZ-OUZOU)	49,6	15,84	13,26	202, 2	-	176,9	17,95	38	-	9,14	530	-	-	14/05/84	
82-H.TIMZERT (TIZI-OUZOU)	34,8	7,92	14,4	253	-	128,1	62,12	35	-	-	540	-	10	14/05/84	
83-H.MEIZIA (TIZI-OUZOU)	79,2	58,8	11,7	211, 6	-	433,1	35,5	153	-	-	950	-	16	14/05/84	
84-H.THEBOUTH (TIZI-OUZOU)	44,8	21,12	12,87	197, 8	-	201,3	14,2	38	-	-	500	-	14	14/05/84	
85-H.GROUZ (CONSTANTINE)	200	34	7,6	130	-	200	300	299	-	-	-	-	-	-/11/83	
86-H.SIDI M'CID (CONSTANTINE)	110	48	3	93	-	384	140	145	-	2	924	8	28	10/07/84	
87-H.SALAH BEY (CONSTANTINE)	178	31	20	75	-	403	178	128	-	15	910	7,4	23	21/11/83	
88-H.AIN TINN (CONSTANTINE)	104	34	4	23	-	226	40	188	-	7	612	8	29	21/11/83	
89-H.ZAOUIA (CONSTANTINE)	86	998	22	7800	4,68	14,15	13500	2160	-	3	25582	6,5	36	21/11/83	
90-H.EL. HAMMA (CONSTANTINE)	58	88	3	60	-	415	138	128	-	8	886	7,4	24	21/11/83	
91-H.BENI-HAROUNE (CONSTANTINE)	190	44	35	940	-	244	1688	375	-	5	3762	7,3	42	21/11/83	
92-H.DAR EL-FUINI (CONSTANTINE)	286	47	19	63	-	421	178	450	-	4	1478	7,1	31	21/11/83	
93-H.BOU HALLOUF (CONSTANTINE)	124	319	28	265	1	299	388	1465	-	5	2752	7	45	21/11/83	
94-H.DELAA (M'SILA)	188	50	19,5	414	-	287	426	7110	-	-	1980	-	42	09/06/84	25
95-H.BELARIBI (M'SILA)	175	73	14	265	-	287	192	560	-	-	1325	-	-	16/06/84	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
96-H.AIN DJRABAA (M'SILA)	74,8	34, 32	12,9	207	-	311,7	53,25	192	-	-	860	-	24,5	16/04/84	
97-H.DOUCENE (BISKRA)	197	61	43	852	-	165	497	-	-	-	2305	-	56	09/06/84	
98-H.AIN EL OUATIA (BISKRA)	578	301	37	736	-	79	1065	-	-	-	7350	-	38,5	09/06/84	
99-H.RAS DJEDAR (BISKRA)	304	125	47	414	-	189	568	1000	-	-	2810	-	57	09/06/84	
100-H.CHEGGA (BISKRA)	595	243	39	909	-	140	2237	-	-	-	6210	-	47	09/06/84	20
101-H.BESBES (BISKRA)	256	159	39	437	-	201	639	1000	-	-	2565	-	48,5	16/06/84	
102-H.DJEMAA VILLE (BISKRA)	163	84	35	-	-	207	426	-	-	-	1600	-	55	16/06/84	
103-H.BIR BOU NAAMA (BISKRA)	241	71	39	552	-	142	497	1700	-	4	3345	-	53	09/0684	
104-H.HAMOULA (BISKRA)	296	135	39	460	-	177	639	1100	-	-	2710	-	52	16/06/84	
105-H.TAMERNA CHOUCHA (BISKRA)	144	82	39	345	-	189	444	-	-	-	1780	-	55	09/06/84	
106-H.OULED DJELLAL (BISKRA)	271	140	47	460	-	177	696	-	-	4	3047	-	54	16/06/84	Fort
107-H.BENI ISSAAD (RELIZANE)	612	77, 76	-	1150	07	311,1	1633	2230	0,02	0,23	6820	7,25	30	22/04/85	6
108-H.AIN DASSI (LAGHOUAT)	166	67	27	460	-	214	426	-	-	4	1670	6	41	09/06/84	
109-H.A.DASSI F.1 (LAGHOUAT)	199	74	23	529	-	177	444	-	-	4,5	1690	6	51	09/06/84	
110-H.AIN ABOUNOU (LAGHOUAT)	143	58	31	414	-	165	426	-	-	13	1550	6,2	41	09/06/84	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D' ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
111-HZELFANA. (LAGHOUAT)	163	61	22	518	-	165	497	-	-	15	1810	6,5	41,5	09/06/84	
112-H.BERIANE (LAGHOUAT)	90	40	27	322	-	165	213	-	-	8	1045	6	32	09/06/84	
113-H.BAIN-ROMAIN (CHELLIF)		A	SEC												
114-H.HADJ KOUIDER(O. FODA)	93	18	14	253	-	338	142	-	-	27	620	-	-	20/06/84	
115-H.AIN N'SOUR (CHELLIF)	54	21	12	207	-	183	35,5	-	-	9	210	-	22	20/06/84	
116-H.SALEE (DELLYS)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	17	-	
117-H.DJRAB (CHELLIF)	706	133	14	483	-	201	976	-	-	44	3090	7	-	20/06/84	
118-H.															
119-H.EL-DJENIA (RELIZANE)	104	55,8 9	23,46	1472	0,69	488	2115,8	528	13,75	0,1	4554,6	7,5 1	48	22/04/85	30
120-H.SIDI BOU ABDELLAH (RELIZANE)	76	38,8 8	3,91	253	-	341,6	440,2	201,6	-	0,1	1194	7,4 8	51	22/04/85	4
121-H.AIN MENTILA (RELIZANE)	1040	238, 14	62,4	2097 6	8,32	805,2	31595	3720	0,03	0,21	56996	6,5 7	31	22/04/85	60
122-H.RABI (SAIDA)	176	58,3 2	3,91	276	-	366	426	402	-	0,11	1524	7,3	47	22/04/85	
123-H.AIN SKHOUNA (SAIDA)	168	60,7 5	-	253	-	274,5	390,5	576	0,023	0,32	1592	6,4 6	30	22/04/85	7
124-H. SIDI AISSA (SAIDA)	256	75,3 3	11,73	437	0,7	372 ,1	639	897,6	-	0,1	2502	7,0 6	44,5	22/04/85	5
125-EAU MINERALE (SAIDA)	100	48,6	-	23	-	457,5	71	100,8	-	0,53	569	7,5 5	22	22/04/85	

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D'ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
126-H.AIN NOUISSY (MOSTAGANEM)	180	48	11,7	2737	2,1	793	4899	131,3	0,39	3	8881	7,49	22	09/01/85	
127-H.AIN MEKABERTA (MOSTAGANEM)	676	150	11,7	414	0,7	293	1306	895,33	0,376	4,33	4250	6,73	24	09/01/85	
128-H.BENCHAA (MOSTAGANEM)	184	77,8	11,7	437	-	355,5	852	48	-	0,1	2019	6,38	41	22/04/85	
129-H.SIDI BERKANI (TLEMCEN)	52	46	3,9	23	-	610	65,3	14	0,18	4,33	311	7,22	22,5	09/01/85	
130-H.AIN EL AMMAM (TLEMCEN)	68	73	3,9	23	-	610	65,32	36,62	0,013	0,58	781	7,51	25	22/04/85	
131-H.SIDI ABDELLI (TLEMCEN)	92	36	7,8	-	-	488	16,33	22,66	0,336	7,33	317	7,38	34	09/01/85	
132-H.CHIGUER (TLEMCEN)	81	65	7,8	874	-	488	1633	294,66	0,354	4,33	2950	8,53	30	09/01/85	
133-H.BOUGHRARA (TLEMCEN)	36	58	3,9	46	-	244	97,98	19,33	0,394	3	398	7,98	43	09/01/85	
134-H.SIDI RAHOU (TLEMCEN)	52	55	-	23	-	488	65,32	24,66	0,284	7	219	7,75	30	09/01/85	
135-H.SIDI BELKHEIR (TLEMCEN)	56	58	3,5	299	-	549	522,6	38,66	0,341	2,66	971	7,5	35	09/01/85	
136-H.TAHAMMAMINT (TLEMCEN)	68	48	-	23	-	610	65,32	16,66	0,284	13,33	320	7,4	29	09/01/85	
137-H.ROKNET EL METNAN(EL.BEYADH)	136	70,47	19,55	273	0,6	30,5	177,5	825,6	-	0,1	1521	7,84	30	22/04/85	
138-H.SIDI AYAD (A.TIMOUCHENT)	312	60	54,74	851	1,39	915	1469	-	0,038	0,27	3644	6,61	68	22/04/85	
139-H.BOU-HADJAR (A.TIMOUCHENT)	196	107	32,2	874	2,1	549	1469	68	0,44	3,66	3210	6,36	66,5	09/01/85	1,5

N°et DENOMINATION	COMPOSITION MINERALOGIQUE										RESIDU SEC (180°C)	PH	T (°C)	DATE D' ANALYSE	DEBIT (L/S)
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ⁺⁺ / Li ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻					
140-H.SIDI ALI (MASCARA)	76	55,9	-	23	-	482	71	100	-	0,32	564	7,5	28,5	22/04/85	
141-H.SIDI AHMED BEN KHEDA (MASCARA)	88	48,6	-	23	-	549	106,5	48	-	0,23	585	7,33	27	22/04/85	
142-H.BOUHNIFIA (MASCARA)	172	48,6	19,55	253	0,7	823,5	355	110,4	-	0,1	1400	6,64	66	22/04/85	
143-H.AIN HAMAMA (MASCARA)	204	68,04	43	414	0,7	915	639	190	-	0,1	2012	6,65	50	22/04/85	Fort(alt 350m)
144-H.AIN LALA SETTI (ORAN)	560	267	27,3	1012	2,1	2196	1469	645	0,339	0,091	4743	6,24	21	09/01/85	
145-H.AIN MADEGH (ORAN)	100	109	11,7	529	-	549	717,1	375	0,245	4	2089	7,45	30	09/01/85	Moyen
146-H.AIN FRANINE (ORAN)	736	146	15,6	690	1,05	1525	999,8	196,66	0,306	4,33	5343	6,27	35	09/01/85	Fort
147-H.SELLAMA (ORAN)	924	400,75	140,4	3611	- 3,5	3568,5	5680	2840	0,01	0,22	32516	7,14	19	09/01/85	
148-H.AIN OUARKA (NAAMA)	420	72,9	27,37	1380	2,08	183	2201	998,4	-	0,10	5560	7,1	46	22/04/85	3
149-H.SIDI SLIMANE (TISSEMSILT)	180	58,32	-	667	-	286,7	994	470,4	-	0,1	2374	7,65	42	22/04/85	5
150-H.GHAZLI (TISSEMSILT)	924	328,05	11,73	15985	4,86	317,2	26625	840	-	0,1	47,890	7,4	15	22/04/85	
151-H.SERGHINE (TIARET)	380	95	11,73	1012	0,7	274,5	1562	1200	-	0,1	4400	7,21	40	22/04/85	3/10
152-H.SIDI EL HADJ (TIARET)	56	58,32	-	575	-	549	710	182	0,023	0,1	1800	7,8	23	22/04/85	



DIFFERENTES UTILISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE