



Faculty of Sciences and Technology

كلية العلوم و
التكنولوجيا

Civil Engineering Department

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2... /GC/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : VOA

Option : TRAVAUX PUBLICS

Thème

**RENFORCEMENT DES STRUCTURES PAR DES
MATERIAUX COMPOSITES**

Présenté par :

YAHLA SABRIA

Soutenu le 26/06/2024 devant le jury composé de :

Mr ZELMAT

Président :

Université de Mostaganem

Mr REZIGUA

Encadrant :

Université de Mostaganem

Mr AYAD

Examineur :

Université de Mostaganem

Remerciements

Je remercie DIEU de m'avoir donné la force

De pouvoir terminer ce travail.

Je remercie en premier lieu mon encadrant

Pour son aide et son soutien

Au terme de ce modeste travail je tiens à

Remercier chaleureusement et respectivement,

Je tiens à remercier aussi les membres du jury

Tous ceux qui contribué de près ou de loin à la

Réalisation de ce modeste projet de fin d'étude

Je tiens à remercier tous les enseignants qui

M'ont suivi durant tous mon cursus universitaire

Merci à tous

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma Mère

Qui m'a inculqué un esprit de combativité et de persévérance et qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Sans elle, je ne serai certainement pas à ce niveau.

Que dieu, le tout puissant, la préserve et lui procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour la combler.

Merci Maman

Résumé

Le projet d'une structure consiste à définir avec précision chacun des éléments qui la composent ainsi que la manière de la construction, le tout en accord avec son usage ou sa fonction finale. Le schéma de sa conception et, plus tard, de sa construction est toujours le même :

- Résoudre un schéma structurel
- Comparer les charges majorées et les résistances minorées
- Dimensionner les éléments résistants
- Rédiger le projet
- Exécuter la structure
- Surveiller sa vie en service
- Assurer l'entretien approprié

Si une structure est bien conçue et correctement exécutée, elle n'aura pas besoin d'aucun renforcement au moment de sa mise en service. Cependant, suite à des erreurs dans le projet ou dans l'exécution, ou suite à des diverses circonstances lors de la vie en service (changement maximum dépassés, changement des conditions d'exploitation, fluage, fatigue, attaques chimiques dues à l'environnement ...) des renforts peuvent s'avérer nécessaires.

Ce mémoire présente une étude sur vis-à-vis l'impact des matériaux composites sur la réhabilitation des structures tout en s'intéressant à leur mode d'exécution, leurs propriétés et leur évolution à long terme.

Introduction générale :	11
Généralités :	13
PRINCIPAUX CONSTITUANTS DU BETON.....	20
PATHOLOGIES DU BETON.....	33
Généralités sur les matériaux composites.....	39
Application industriel des résines époxy	47
c/Matrice vinylester :	47
d/Résine phénolique :.....	48
2/THERMOPLASTIQUE	50
THERMODURCISSABLES ET THERMOPLASTIQUES :	51
Renforts :.....	52
Fabrication des fibres de verre :	54
2/Fibre de carbone :.....	58
3/Fibre aramide	62
Procédés de fabrication des composites à matrice polymère	64
Définition de la dalle mixte :.....	67
ACTION ET EFFETS DES ACTIONS	68
ANALYSE DES SOLlicitATIONS.....	69
VERIFICATION DE LA DALLE MIXTE	71
Méthode <i>m-k</i>	76
Méthode de la connexion partielle pour les dalles mixtes.....	77
INTRODUCTION.....	47
ACTIONS INTERNES	48
VERIFICATION DES SECTIONS	50
Vérification de la dalle mixte	51
APPLICATIONS.....	54
Conclusion générale.....	61
Référence Bibliographique	62

LISTE DES TABLEAUX :

- Tableau 1 : dosage des différents constituants du béton*
- Tableau 2: Calcul du dosage pour un 1 m³ de béton*
- Tableau 3 : Différents types de béton utilisés sur chantier*
- Tableau 4 : Différents types de ciments*
- Tableau 5 :les granulats les plus utilisés*
- Tableau 6 : nature des granulats vis-à-vis leur fonctions*
- Tableau 7 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du béton*
- Tableau 8 : Choix des adjuvants en fonction de leur propriétés*
- Tableau 9 : avantages et inconvénients de la résine polyester*
- Tableau 10 : Différence entre résine polyester orthophtalique et résine polyester isophtalique*
- Tableau 11 : propriétés mécaniques des résines polyester*
- Tableau 12 : avantages et inconvénients des résines époxy*
- Tableau 13 : propriétés mécaniques des résines époxy*
- Tableau 14 : avantages et inconvénients des résines vinylester*
- Tableau 15 :avantages et inconvénients des résines phénolique*
- Tableau 16 :les thermoplastiques les plus utilisés*
- Tableau 17 : différence entre THERMOPLASTIQUE ET THERMODURCISSABLES*
- Tableau 18 : caractéristiques des verres de type E*
- Tableau 19 : caractéristiques des verres R et S*
- Tableau 20 :Propriétés physique et chimiques des fibres de carbone*
- Tableau 21 :propriétés mécaniques du KEVLAR*

LISTE DES FIGURES :

- Figure 1 : Composition typique d'un béton en volume*
- Figure 2 : Mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS*
- Figure 3: Evolution de la résistance du béton à la compression et à la traction*
- Figure 4 : Schéma descriptif de l'effort de flexion*
- Figure 5: Exemple de retrait*
- Figure 6: Phénomène du retrait plastique*
- Figure 7: Retrait de séchage*
- Figure 8:Phénomène de fluage*
- Figure 9: Mode de fabrication du ciment*
- Figure 10 : Différents types de granulats*
- Figure 11: Décapage des terrains*
- Figure 12 : Mode de broyage*
- Figure 13 : criblage*
- Figure 14 : lavage des granulats*
- Figure 15 : pathologie de la carbonatation*
- Figure 16 : réaction interne sulfatique*
- Figure 17 :Cycle gel-dégel*
- Figure 18 :corrosion des armatures*
- Figure 19 :incendie /béton*
- Figure 20 :attaque des ions chlorures*
- Figure 21 : composition matériaux composites*
- Figure 22 : polymère thermodurcissable*
- Figure 23 :Formule du Polyester insaturée*
- Figure 24 : réaction exothermique des résines polyester*

Figure 25: formule chimique du résine époxy
Figure 26 : application industrielles des résines époxy
Figure 27 : formule chimique des matrices vinylester
Figure 28 : Structure générale des résines phénoliques
Figure 29 : production des fibres de verre par étirage mécanique
Figure 30 : roving en verre
Figure 31 : matt en verre
Figure 32 : tissu en verre
Figure 33 : fibre de carbone
Figure 34 : processus de fabrication des fibres de carbone
Figure 35 : fibre aramide
Figure 36 : formule chimique des fibres aramide
Figure 37 : projection par RTM
Figure 38 : charge supportée par le tôle profilée
Figure 39 : répartition des charges concentrées
Figure 40 : chargement de la dalle
Figure 41: section efficace de la tôle
Figure 42 : répartition des contraintes pour la flexion si l'axe neutre est situé au-dessus de la tôle
Figure 43 : répartition des contraintes pour la flexion positive si l'axe neutre est situé dans la tôle en composite
Figure 44 : portée de cisaillement
Figure 45 : portée simple équivalente pour la détermination de la résistance au cisaillement
Figure 46 : évaluation des résultats d'essais
Figure 47 : détermination des degrés de concentration à portée du moment expérimental
Figure 48 : diagramme de calcul en interaction parallèle
Figure 49 : méthode de vérification
Figure 50 : contribution d'une armature longitudinale supplémentaire
Figure 51 : dimensions de la tôles profilées
Figure 52 : variation des dimensions de la tôle sous une charge imposé $Q = 4\text{kn/m}^2$
Figure 53 : variation de S en fonction du matériau de la tôle (Kevlar , fibre de carbone et fer)
Figure 54 : variation de bt en fonction du matériau de la tôle (Kevlar , fibre de carbone et fer)
Figure 55 : variation de bb en fonction du matériau de la tôle (Kevlar , fibre de carbone et fer)
Figure 56 : type de tôles profilées
Figure 57 : variation de S en fonction de formes de nervures
Figure 58 : variation de bt en fonction de formes de nervures
Figure 59 : variation de bb en fonction de formes de nervures

Introduction générale :

Aujourd'hui , l'étude sur les actions de réhabilitation des ouvrages présente l'un des thèmes incontournables dans leur gestion alimentée par la susceptibilité de se dégrader au fil du temps par des mécanismes d'endommagements variés puisqu'un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers.

Le vieillissement des patrimoines d'ouvrages , la maintenance et la gestion des structures forment l'un des challenges du 21^{ème} siècle , identifiée au cours de ses dernières décennies cette problématique doit conduire à revoir notre manière de gérer et notre capacité d'intégrer de nouveaux mécanismes .

Un facteur important du génie civil pour promouvoir le progrès social et le développement économique , le génie civil implique l'utilisation de nombreux matériaux et équipements . Afin d'améliorer la stabilité et la fragilité du génie civil la science doit utiliser le matériau.

Les matériaux composites sont des matériaux ayant une haute performance et une faible consommation d'énergie , conformément aux besoins de la construction en génie civil ,

De nos jours, les matériaux composites ont connu un développement très remarquable car ils sont demandés dans de nombreux domaines industriels tels que l'industrie automobile, les navires, l'aviation, etc. Où les composites sont des matériaux importants par rapport aux autres matériaux traditionnels. Ils possèdent d'excellentes propriétés mécaniques et physiques telles que la légèreté, la résistance mécanique, la durabilité, un faible coût .

Dans le domaine du génie civil , les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les murs puisque les différents composites offrent des modules d'élasticité, des rigidités variées pouvant modifier le comportement axial et radial du béton.

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que les structures elles-mêmes parmi les plus fréquentes :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure
- Défauts dans le projet ou l'exécution
- Rénovation des structures anciennes
- Changement de la forme de la structure
- Dégâts dans la structure
- Nécessité d'améliorer les conditions en service

Chapitre I

GENERALITES SUR LE BETON

Préface

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques, la résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques.

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix :

- Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues à la surface de la terre.
- Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'œuvre rapidement formée.
- Il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes.
- Sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles

Introduction :

Employé dès la haute antiquité, le béton a largement contribué à la construction des infrastructures nécessaires tout en permettant la réalisation de nombreux ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques et bien sûr de logements. Il offre les solutions aux défis de notre temps et répond parfaitement aux trois piliers de la construction durable, ou plutôt du « développement soutenable ».

Considéré comme un matériau sain, inerte, imputrescible, incombustible, résistant au feu, excellent isolant acoustique conçu par l'homme et pour l'homme et à ce titre, il satisfait aux impératifs du pilier social. Grâce à sa grande capacité et inertie thermique, équivalente à celle de la pierre naturelle d'antan, à son étanchéité à l'air, il révolutionne le logement « passif » ou à faible consommation d'énergie.

Et, tout en étant, par ses concepts constructifs simples, le garant d'une architecture peu onéreuse et très durable dans le sens le plus noble du terme, il constitue une composante essentielle du langage architectural de notre temps.

Arrivé à maturité depuis le dernier quart du 20ème siècle, le béton n'en reste pas moins un matériau en pleine évolution. Sa technologie est aujourd'hui plus qu'hier une zone d'innovations. Sa composition évolue, sa résistance et son aptitude à la mise en œuvre augmentent, permettant la réalisation d'ouvrages plus importants, plus complexes.

Un ouvrage en béton bien conçu et bien réalisé résiste particulièrement bien à l'épreuve du temps. Le béton est un matériau durable.

Généralités :

Le béton est composé de ciment, de granulats (sable et gravillons), d'eau, avec, éventuellement, une addition minérale, un ou plusieurs adjuvants, des colorants, des fibres. Dans tous les cas, une certaine quantité d'air est présente dans le béton. Sa composition variant en fonction des différents constituants utilisés ainsi que leur proportion dans le mélange.

*le mélange ciment/eau forme une pâte ou colle qui durcit. Cette pâte est l'élément actif du béton puisqu'elle a enrober chaque granulats jouant le rôle du lubrifiant et de colle qui assure le durcissement du béton.

*les granulats (le gravier et le sable) constituent le squelette, l'ossature du béton. C'est grâce à eux que le béton est un matériau économique car on en met au maximum, l'assemblage des granulats et de la pâte cela forme le béton : un empilement de grains de différentes dimensions et de granularité étendue, qui passe d'un état frais, pâteux à un état solide

Constituants	Eau	Air	Adjuvants	Ciment	Granulats Fins (sable)	Gros Granulats (gravier)
Volume	14-21 %	1-9 %	0-2 %	7-15%	25-30 %	30-50 %

Tableau 1 : dosage des différents constituants du béton



Figure 1 : Composition typique d'un béton en volume

Principe fondamental :

Formuler un béton consiste à intégrer des paramètres essentiels tels que :

- *la qualité des matériaux disponibles
- *la nature du projet à réaliser
- *les moyens de mise en œuvre disponible sur le site
- * la qualité de l'environnement dans lequel va vivre l'ouvrage a réalisé.
- *Les conditions de mise en œuvre, besoin d'ouvrabilités.....
- *Les délais de réalisation.

Béton et dosage :

	Ciment CEM II 32,5 (kg)	Sable 0/4 sec (kg)	Gravier 4/20 Gravier 0/4 sec (kg)	Eau (litres)
Béton armé (poteau, poutre, dalle, plancher,...)	350	830	1030	175

Béton non armé (semelle filante non armée, fondation, scellement de poteau de clôture, ...)	300	900	1100	150
Béton de propreté	200	950	1180	125

Tableau 2: Calcul du dosage pour un 1 m³ de béton

1. Propriétés du Béton :

1.1 Propriétés physiques:

* masse volumique : la masse volumique du béton est de 2500 kg/m³

* Essai d'affaissement ou d'étalement :

*Méthode du cône d'ABRAMS: Cet essai est très souvent utilisé sur chantier et peu coûteux . Il est en général effectué pour des valeurs d'affaissement allant de 10 à 210 mm

Mode opératoire :

Il consiste a couler du béton dans un cône en acier (cône d'Abrams) mesurant 300 mm de haut avec un diamètre inférieure à 200 mm et supérieure à 100 mm

- Étape 1 : L'essai se réalise sur une surface horizontale. En dessous du cône, on humidifie légèrement la plaque pour éviter que le béton colle au lit de la plaque.
- Étape 2 : On va combler le moule en plusieurs couches, et utiliser une tige pour venir piquer 25 fois chaque couche, afin d'éviter que trop de bulles d'air restent piégées.
- Étape 3 : Une fois le cône rempli, on vient araser sa surface.
- Étape 4 : Puis on démoule le béton en 5 à 10s pour observer à quel point ce dernier retombe.
- Étape 5 : On regarde alors la forme du béton affaissé. Si l'affaissement présente des cisaillements ou une ségrégation, le béton ne pourra pas être mis en œuvre. On mesure l'affaissement à 10 mm près en faisant la différence entre la taille du cône et la hauteur du béton après affaissement.

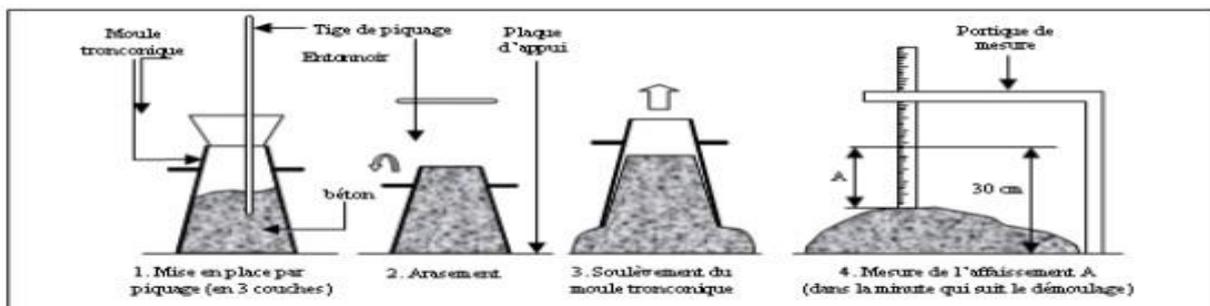


Figure 2 : Mesure de l'affaissement au cône d'ABRAMS

1.2 Propriétés mécaniques :

1.2.1 .Résistance à la compression : la résistance à la compression (MPa) du béton est obtenue expérimentalement par un essai de compression sur des éprouvettes cylindriques de béton (16x32cm²) soit:

$$\begin{aligned} J \leq 28 &\rightarrow f_{cj} = j/4,67 + 0,83j & f_{c28} \leq 40 \text{MPa} \\ &\rightarrow f_{cj} = j/1,40 + 0,95j & f_{c28} > 40 \text{MPa} \\ 28 < J < 60 &\rightarrow f_{cj} = f_{c28} \end{aligned}$$

1.2.2 .Résistance à la traction : on considère généralement que la résistance à la traction est égale à 1/10 de la résistance de la compression de ce même béton , cette résistance est mesurée par l'essai brésilien sur éprouvettes cylindriques , donc l'utilisation du béton seul pour résister à des efforts de traction est impossible .

$$\begin{aligned} * f_{cj} < 60 \text{MPa} & \quad f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{cj} \\ * f_{cj} \geq 60 \text{MPa} & \quad f_{tj} = 0,275f_{cj}^{2/3} \end{aligned}$$

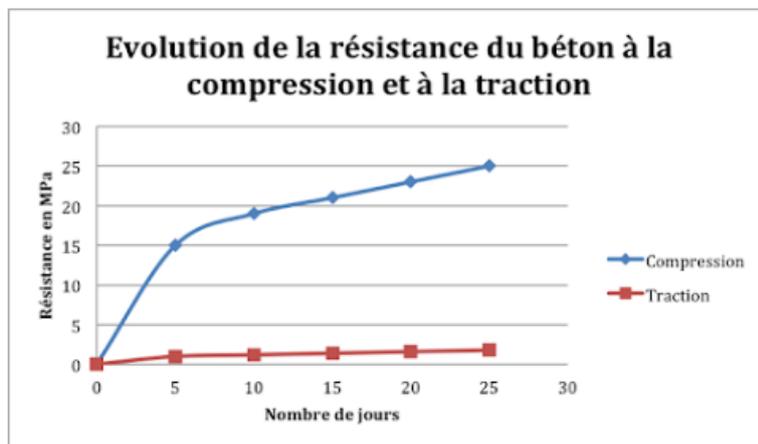


Figure 3: Evolution de la résistance du béton à la compression et à la traction

1.2.3 Résistance à la flexion:

On retrouve classiquement ce type d'effort dans les poutres bien qu'il ne soit une combinaison d'efforts de compression et d'efforts de traction

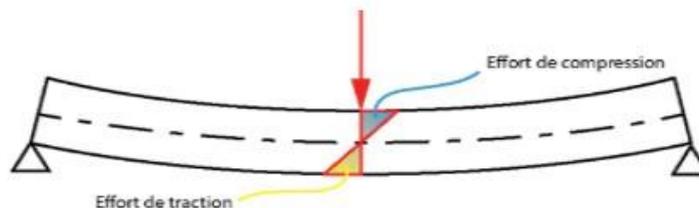


Figure 4 : Schéma descriptif de l'effort de flexion

Le béton seul ne pourra donc jamais être utilisé , les normes imposent toujours un ferrailage même en cas de pure compression .

C'est pour cela qu'on a recours au béton armé qui permet de supporter tous types d'efforts.

- Module d'élasticité : Il se varie entre 20 jusqu'à 4000 MPa
- Déformation transversale du béton :

Coefficient de Poisson:

$$\nu = 0 \text{ pour calculer les sollicitations}$$
$$\nu = 0,2 \text{ pour calculer les déformations}$$

2. Essai de retrait et de fluage :

2.1/Retrait:

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisée par le ferrailage, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition des fissures.

Le retrait se manifeste par une contrainte de traction qui lorsqu'elles dépassent la résistance à la traction du béton se traduit par des fissures .



Figure 5: Exemple de retrait

On distingue 4 types de retrait :

***Retrait plastique:** aussi appelé retrait d'évaporation il se manifeste par un départ d'eau plus au moins rapide du béton frais selon les conditions climatiques (température extérieures , température du béton , humidité relative , vent).

Ils arrivent que les fissures de retrait plastique créent une faiblesse dans le béton et traversent la dalle mais de manière générale , la résistance à la compression du béton demeure intacte seul l'aspect esthétique est altéré .



Figure 6: Phénomène du retrait plastique

Les facteurs favorisent le retrait plastique sont :

- Température élevée
- Vitesse de vent : Par exemple une augmentation de la vitesse du vent de 0 à 15 Km/h multiplie par 4 la vitesse d'évaporation , dans cette situation les fissures se manifestent en groupes parallèles , perpendiculaire à la direction du vent dominant .
- Absorption du support
- Rapport E/C trop élevé

***Retrait de séchage :** la dessiccation du béton est un phénomène liée à l'évaporation de l'eau dans le béton elle se manifeste à partir des faces exposées à l'évaporation. Le front de séchage se propage ainsi peu à peu de la surface vers le cœur du béton .La peau du béton va donc subir un retrait de dessiccation plus rapide que le cœur de la pièce en béton.

Le phénomène est dû à la variation d'hygrométrie interne et l'humidité du milieu environnant et à l'évaporation de l'eau excédentaire (évaporation de l'eau libre du béton), eau qui n'a pas été utilisée dans les réactions d'hydratation du ciment

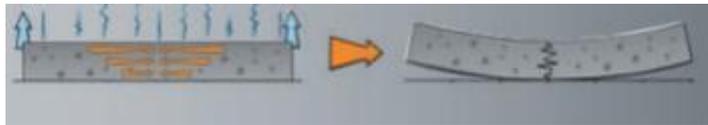


Figure 7: Retrait de séchage

***Retrait thermique :** Il est produit lors du refroidissement du béton après avoir atteint le pic de température maximale lors de l'hydratation . Le gradient thermique entre le cœur et sa surface peut alors engendrer des contraintes supérieures à celles que peut encaisser le matériau à ce moment la . Les principales causes sont justifiées par la nature et dosage du ciment, volume de coulage trop important

***Retrait endogène :** Il est dû à l'hydratation du ciment (Contraction de La Chatellier) : le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes des deux constituants (eau et ciment) .

2.2. fluage :

Comme tout matériau le béton évolue tout au long de sa vie , cette évolution se traduit par des déformations différées notamment lorsqu'il est soumis à des chargements mécaniques ou à des conditions hydriques favorisant les transferts d'humidité.

Le fluage est la déformation du béton lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques (généralement de compression) de longue durée. Ces déformations sont mesurées sur des durées de 3 mois à 1 an, en fonction des besoins, le fluage au très jeune âge pouvant être étudié avec des mesures en continu pendant les premiers jours. Il est ensuite possible de prédire le comportement du béton sur la durée de vie de l'ouvrage.

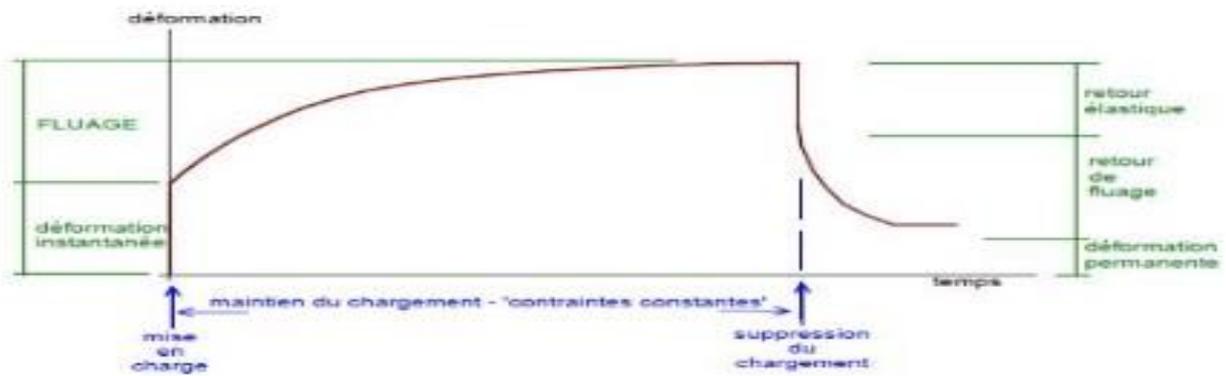


Figure 8: Phénomène de fluage

3. Dilatation : Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à 1×10^{-5} , pour une variation de $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ on obtient: $\Delta l = \pm 2 \text{ } \%$ x longueur. Pour chaînage en B.A de 20 m de longueur et un écart de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, on a une dilatation de : $2\% \times 2000 \text{ cm} = 4 \text{ cm}$

Différents types de béton utilisés sur chantier : (Tableau 3)

Type de béton	Avantages
Léger	<ul style="list-style-type: none"> Malléable et léger Résistant aux chocs
Lourd	<ul style="list-style-type: none"> Répond à des normes de sécurité très strictes Dispose de granulats très lourds
Armé	<ul style="list-style-type: none"> Fondations renforcées par l'acier Risque de fissuration du béton limité Béton très adapté en utilisation avec un coffrage COSMOS de type <u>manuportable</u>, métallique, mixte, circulaire, sur-mesure...
Auto-plaçant	<ul style="list-style-type: none"> Extrêmement fluide Mise en œuvre sans vibration pour un gain de temps conséquent Béton très adapté en utilisation avec <u>coffrage métallique COSMOS</u>
Fibré	<ul style="list-style-type: none"> Renforcement général de la fondation Risque de fissuration du béton limité
Prêt à l'emploi	<ul style="list-style-type: none"> Gain de temps conséquent Transféré et livré sur chantier
Précontraint	<ul style="list-style-type: none"> État de compression optimal Meilleure qualité de finition des fondations réalisées
Haute-performance	<ul style="list-style-type: none"> Plus résistant à la compression Plus fluide et moins poreux
Projeté	<ul style="list-style-type: none"> Réduit l'affaissement de la fondation Empêche le coulage ultérieur du béton
Béton de ciment Alumineux	<ul style="list-style-type: none"> Temps de bétonnage réduit Meilleure résistance sur le long terme

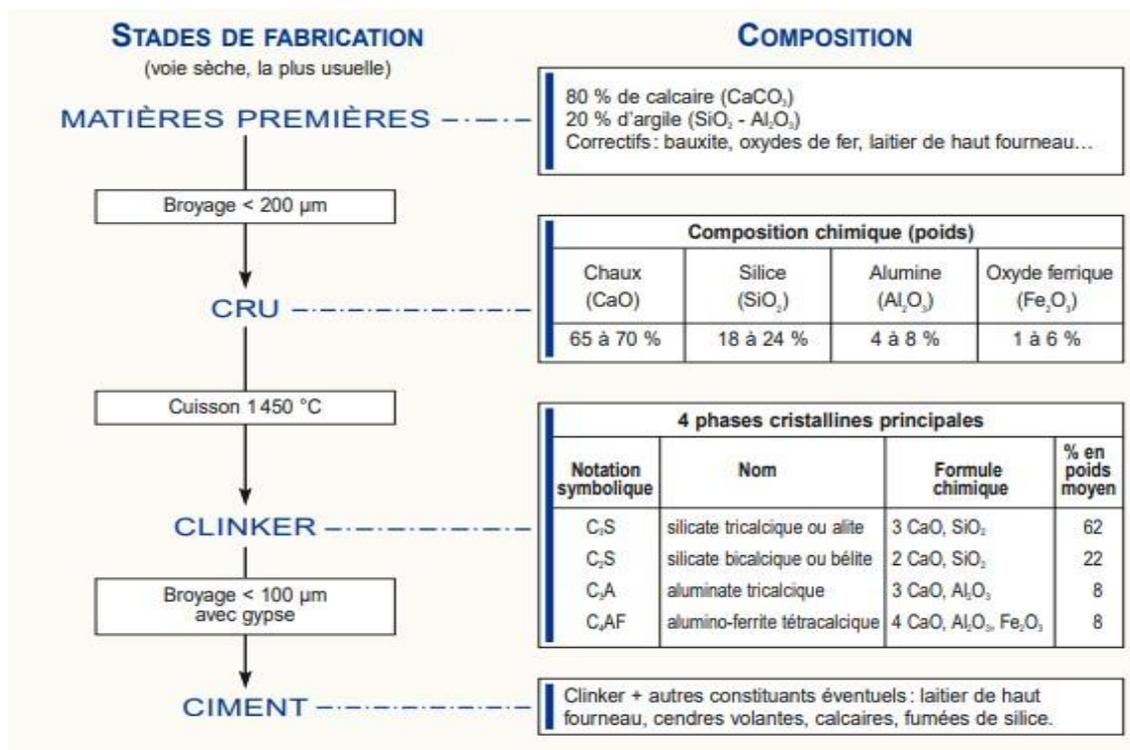
PRINCIPAUX CONSTITUANTS DU BETON

4. LE CIMENT :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'un poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau . Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

4.1. La fabrication du ciment :

Le constituant principale du ciment est le **clinker** obtenu par la combinaison chimique à très haute température de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile . Le calcaire et l'argile sont tout d'abord extraits de carrières, puis concassés en élément d'une dimension de 150 mm et mélangés. les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « **crû** » est ensuite cuit dans un **four rotatif cylindrique** de 50 à 90m de long, de 4 à 5m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute. La matière pénètre en amont du four où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (**1450°C**). Le temps de parcours est d'environ 1 heure. A la sortie du four la matière est brusquement refroidie. Au cours de ces opérations, et sous l'effet de la chaleur, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques (les constituants de l'argile vont notamment se combiner à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium). À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant d'autres constituants tels que du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des schistes calcinés, du calcaire, des fumées de silice ou encore des fillers.



LA FABRICATION DU CIMENT

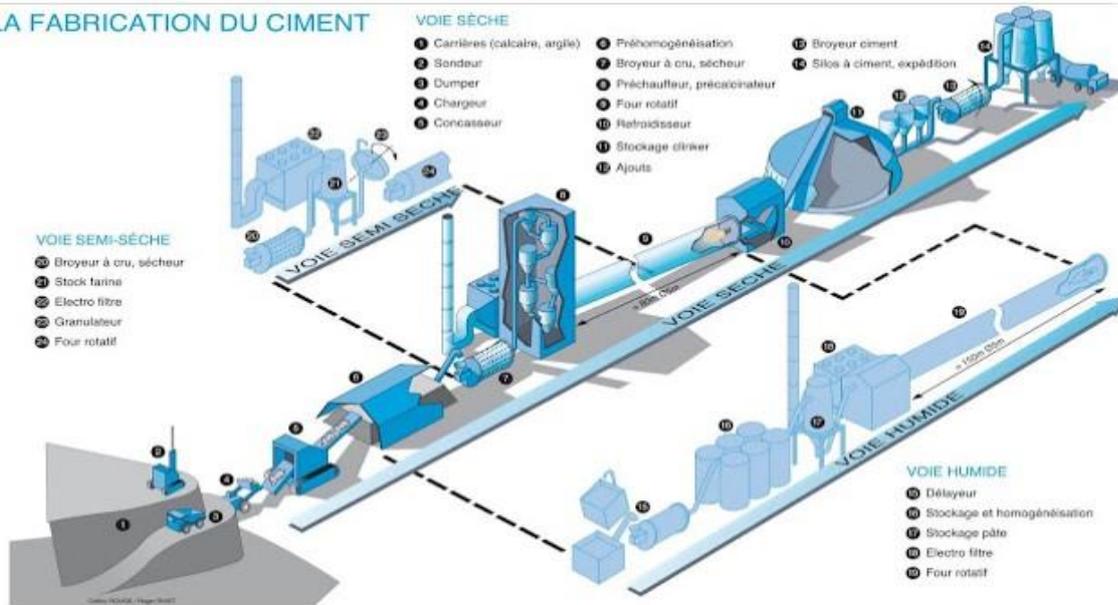


Figure 9: Mode de fabrication du ciment

4.1.2. Constituants chimique du ciment

Le ciment portland contient 4 principaux constituants :

- le silicate bicalcique (Bélite) : $2 \text{ CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C 2S,
- le silicate tricalcique (Alite) : $3 \text{ CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C 3S,
- l'aluminate tricalcique (Célite) : $3 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C 3A,
- l'alumino-ferrite tetracalcique (Célite) : $4 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C 4AF.

4.1.3. Différents de type de ciments courants :

TYPE	CIMENTS COURANTS				
APPELATION	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
	Ciment	Ciment	Ciment de	Ciment	Ciment
NOM COURANT	Portland	portland	haut	pouzzolanique	Composé
composition	Clinker	95- 100%	80-94%	20-64%	40-64%
	Laitier	-	-	35-80%	45-89% de clinker

Cendres volantes	-	-	-	11-55 % additions	18-30%
Calcaire	-	6-20%	-	0-5% autres	-
Autres	0-5%	0-5%	0-5%		0-5%

Tableau 4 : Différents types de ciments

- **Laitier granulé de haut fourneau :**

C'est un sous produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

- **Pouzzolanes naturelles :**

Les pouzzolanes naturelles sont:

- Des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée;
- Des argiles et des schistes activés thermiquement.

Les pouzzolanes doivent leurs noms aux cendres volcaniques de la région de pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les romains pour la confection du ciment.

Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydraulique intrinsèques; mais, en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formés à la suite de l'hydratation du clinker.

- **Cendres volantes :** Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. On distingue:

- * Les cendres volantes siliceuses qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- * Les cendres volantes calciques qui ont des propriétés hydrauliques et, parfois, pouzzolaniques

4.1.4 Caractéristique des ciment courants :

- * CEM I : - niveau de résistance élevée
 - adapté au béton armé et précontraint
 - à éviter pour les ouvrages massifs , car la chaleur d'hydratation trop élevée pouvant conduire à une température excessive lors de la réalisation de ces ouvrages .
- * CEM II : - ciment le plus utilisé dans la construction
 - très maniable
 - adapté pour les travaux massifs
- * CEM III : - réduction de 59 % de l'énergie nécessaire à sa production
 - durables
 - adapté à des environnements difficiles
- * CEM IV : - adapté aux structures hydrauliques
 - adapté aux milieux agressifs
- * CEM V : - même propriétés physiques que le CEM III

Précision sur le dosage en ciment :

Lorsque l'on évoque le dosage du béton, on pense de prime abord au **dosage en ciment**. Le ciment est un élément essentiel, car il apporte la résistance au béton. Son dosage est fonction du type de béton. Plus le dosage en ciment est élevé, plus la **résistance du béton** sera importante. En revanche moins le béton sera économique.

Pour la plupart des **ouvrages courants de maçonnerie en béton armé** tels qu'une dalle en béton, une terrasse en béton, un escalier, un mur, un linteau ou un poteau, il est d'usage de recourir à un **dosage ciment de 350 kg/m³** (i.e. béton dosé à 350 kg de ciment par mètre cube de béton frais).

4.1.5.Principales caractéristique du ciment :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur la pâte .

4.1.5.1/ Caractéristiques de la poudre :

La surface spécifique : (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm²/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm²/g. 13 Préparation automatique des échantillons de cru sous forme de perles pour analyse par fluorescence X.

La masse volumique apparente représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m³ (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

La masse volumique absolue représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m³ suivant le type de ciment.

4.1.5.2/ Caractéristiques mesurées sur pâte ou sur « mortier normal »

Le début de prise :est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat – aiguille de 1 mm² de section pesant 300 g – ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Suivant les types de ciment, le temps de début de prise doit être supérieur à 45 minutes ou à 1 heure.

5.Les granulats :

5.1.Définition :

Les granulats c'est l'ensemble de grains minéraux appelés, fines, sables, gravillons ou cailloux, suivant leur dimension comprise entre 0 et 125mm.



Figure 10 : Différents types de granulats

On distingue les granulats naturels comme les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres. Ils existent 7 familles de granulats : filler, sablon, gravillons, ballast , encrochement, sables , graves.

5.1.2.Origine :

Obtenu en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre/maritime en concassant des roches massives (calcaire/éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition .

- Granulats utilisés pour la confection du béton sont :
 - les filers
 - les gravillons
 - les sables
 - les graves

Outres les granulats d'origine minéralogiques on peut classer les granulats en deux catégories : Les granulats alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion;

- Les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires.

Critères essentiels requis pour une utilisation dans le béton :

- *La granularité
- *La propreté
- *La teneur en eau des granulats

5.2.Caractéristiques des Granulats :

5.2.1.Intrinsèques: liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement telles que :

- la masse volumique réelle
- absorption d'eau et de la porosité
- la sensibilité au gel
- la résistance à la fragmentation et au polissage

5.2.2. De fabrication : liées au procédés d'exploitation et de production des granulats tels que :

- la granularité
- la propreté des sables
- la forme

5.3.Types de granulats :

5.3.1.Granulats naturels : Les roches exploitées pour la production de granulats naturels sont des roches massives d'origine éruptive ou sédimentaire, constituées de minéraux fortement liés entre eux, et des roches meubles d'origine sédimentaire, formées d'éléments détritiques non consolidés.

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

5.3.2. Granulats artificiels : des matériaux ayant subi une transformation industrielle , thermique ou chimique tels que le laitier , le verre , l'argile expansé , le schiste expansé ...etc.

Granulats recyclés: des matériaux précédemment utilisés dans la construction (béton concassé , fraisât routier etc.)

5.4. Production des granulats :

Les granulats peuvent être issus:

- de roche massive (calcaire, roche dure, roche d'origine volcanique),
- de roche meuble (sables, matériaux alluvionnaires),
- du recyclage (granulats fabriqués à partir de la déconstruction d'ouvrages en béton, de rebuts et d'excédents d'unités de production...).
- La production des granulats se déroulent suivant quatre étapes :
- Le décapage des niveaux non exploitables
- L'extraction
- Le traitement des granulats pour obtenir des produits finis
- Le stockage et la livraison

5.4.1./ le décapage: consiste à retirer les terrains situés en surface pour mettre à nu les niveaux à exploiter. On retire ainsi la terre végétale , les roches plus au moins altérées et les niveaux stériles .



Figure 11: Décapage des terrains

5.4.2./ l'extraction : s'effectue dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type de gisement:

- gisement de granulats alluvionnaires exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement) ou en site immergé (au moyen par exemple de drague)
- gisement compact de roches massives qui nécessite l'emploi d'explosif, l'abattage et la fragmentation des blocs.

5.4.3./ le traitement: les installation de traitement comprennent plusieurs postes de fabrication

- Le broyage ou concassage : Opération essentielle du traitement des roches extraites pour la production de granulats, le concassage consiste à réduire la taille des morceaux de roche.
- Il permet d'obtenir :
- lors d'une première étape, par un concassage dit primaire, des matériaux relativement grossiers,

- lors d'étapes suivantes, dites secondaire puis tertiaire, des matériaux de plus en plus fins. Le concassage et le broyage sont des opérations mécaniques réalisées à partir d'appareils communément appelés concasseurs. Il en existe différents types que l'on choisit en fonction de la granulométrie d'entrée, de la charge circulante et du débit de sortie.



Figure 12 : Mode de broyage

•Le criblage :

Le criblage est une étape du processus que l'on rencontre dans le traitement de tous les gisements (roches massives et roches meubles) destinés à la production de granulats. C'est l'opération qui permet de sélectionner les grains et de séparer un ensemble de grains en au moins deux sous-ensembles de granulométries différentes, le crible ne laissant passer dans ses mailles que les éléments inférieurs à une certaine taille.



Figure 13 : criblage

- le lavage : Le lavage a pour but d'éliminer les fines polluantes agglomérées entre elles ou collées à la surface des produits finis. Cette propreté est une nécessité industrielle car la présence de boues d'argiles ou de poussières mélangées aux matériaux ou enrobant les grains empêche leur adhérence avec les liants (ciment, chaux, bitume, laitier).



Figure 14 : lavage des granulats

- le stockage et la livraison : En fin de traitement, on obtient des produits de qualité répondant à des critères bien précis : -nature des granulats : calcaire, silice -forme des grains : anguleux, arrondis, - granulométrie précise ou fourchette granulométrique (coupure). Les granulats sont traités et classés puis acheminés vers les aires de stockages, soit de forme de individualisés, soit en trémies ou silos. Enfin de les livrer à la clientèle.

5.5. Les granulats les plus utilisés :

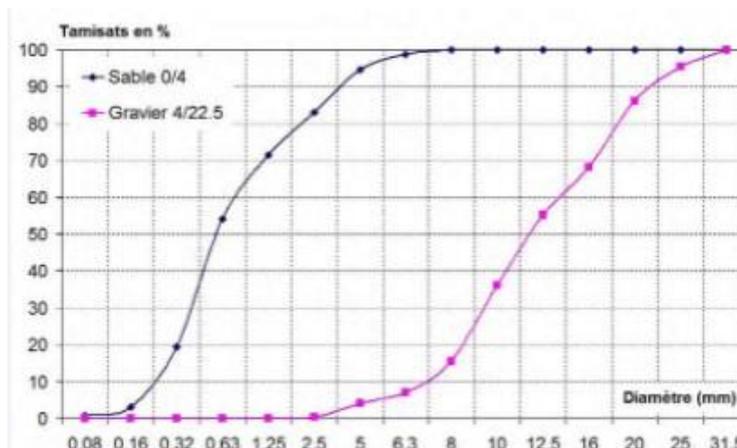
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D \leq 0,063$ mm
Sables	0/D	$D \leq 4$ mm
Gravillon:	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Ballast	d/D	$d=31,5$ mm $D=63$ mm
Graves	0/D	$D \leq 45$ mm

Tableau 5 : les granulats les plus utilisés

5.6. Caractéristiques des granulats :

- Géométrique:**

La granularité: la granularité représente la distribution dimensionnelles des grains contenus dans un granulat, elle est déterminée par tamisage et exprime le pourcentage massique des granulats



Elle représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains)
Le coefficient d'aplatissement : la détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus au moins massive des granulats .

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques : La longueur L, L'épaisseur E, La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat. Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation:

$$G/E > 1,58$$

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées,
- une série de tamis à fentes de largeurs normalisées

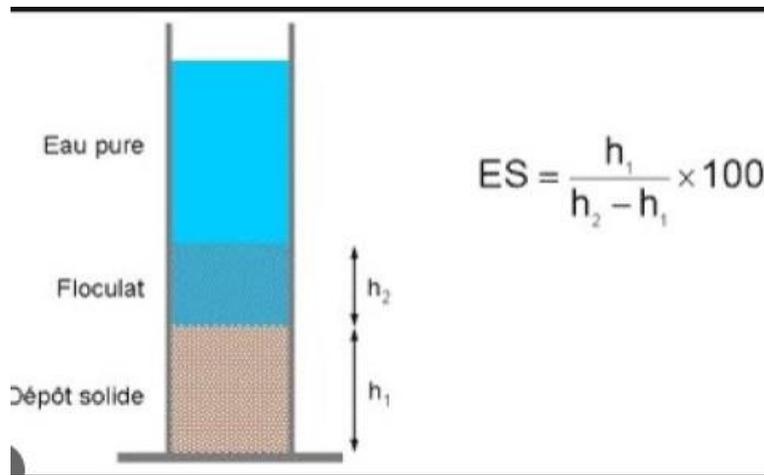
Procédure :

- Tamiser l'échantillon sur les tamis,
- Peser et éliminer tous les grains passant au tamis de 4 mm et retenus sur celui de 80 mm,
- Peser et retenir séparément tous les grains de fraction d_i/D_i comprise entre 4 mm et 80 mm est pesé,
- Puis le refus de chaque classe granulaire est tamisé sur le tamis à fente d'écartement E correspondant. Le passant à travers chaque grille est pesé.

Module de finesse : Coefficient caractérisant la finesse d'un granulat, obtenu en divisant par 100 la somme des pourcentages de refus sur 10 tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80 mm). Ce coefficient peut conditionner le calcul du dosage en sable d'une composition de béton.

Physico-chimique:

- Propreté des granulats:
Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment qui sont susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.
- Essai équivalent de sable :
consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de SE est grande, plus le sable est propre)



- Physique et mécanique:

Masse volumique en vrac ou apparente : C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre 1400 kg/m³ et 1600 kg/m³ pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée: de 2500 à 2600 kg/m³.

Porosité : La porosité représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. La porosité des granulats courants est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.

Résistance au polissage des gravillons : Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (CPA) est élevé, plus la résistance au polissage est importante.

Coefficient d'absorption d'eau: Le coefficient d'absorption d'eau A_b représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

- Chimique :

Teneur en soufre et en sulfates : Les granulats peuvent contenir de faibles quantités de sulfates et de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre total S n'excède pas 0,4 % en masse. La teneur en sulfates (SO₃) doit être inférieure à 0,2 %. On la détermine si S est supérieure à 0,08 %. Les sulfures présents dans les granulats peuvent en s'oxydant se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

- Esthétiques :

Les granulats contribuent à la teinte des parements des bétons. Ils sont mis en valeur en fonction du traitement de surface appliqué. On utilise indifféremment en fonction des disponibilités et de l'aspect recherché des granulats roulés, concassés ou semi-concassés.

Nature du béton ou de l'ouvrage	Nature des granulats	Masse volumique des béton
Béton classique pour chantier ou usine de Préfabrication	Tous granulats roulés ou concassés avec Préférence pour les siliceux , les calcaires ou Les silico-calcaires	2200 à 2400 kg /m ³
Béton apparents	Porphyres , les basaltes , granites qui offrent	2200 à 2400 kg / m ³

Usage routier		Une palette très riche d'aspects et de teintes Toutes origines roulés ou concassés	2200 à 2300 Kg/m ³
Béton léger	Pour structure	Argile ou schiste expansée, laitier expansé	1500 à 1800 Kg/m ³
	Semi – isolant	Pouzzolane , argile expansée , ponce	1000 à 1500 Kg /m ³
	Semi – porteur		
	Isolant	Liège , bois , verre expansée	300 à 800 Kg/m ³
Béton lourd		Magnétite ,barytine , corindon	3000 à 5000 Kg/m ³
Béton réfractaire		Corindon, déchets de produits réfractaires Granulats spéciaux	2200 à 2500 Kg/m ³
Béton ou chapes pour dallage industriels		Granulats métalliques , carborundum	2400 à 3000 Kg /m ³

Tableau 6 : nature des granulats vis-à-vis leur fonctions

6.1 L'eau de gâchage :

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Attention: un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008.

6.2 Les adjuvants :

Généralités :

Ils sont des produits ajoutés en très faible quantité aux bétons, mortiers ou coulis, avant ou pendant le malaxage. La dose est inférieure à 5 % du poids du ciment. Le but est d'améliorer certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais pendant la prise et le durcissement, ou à l'état durci .

Les 3 grandes catégories d'adjuvants

Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton

- plastifiants réducteurs d'eau ;
- super-plastifiants hauts réducteurs d'eau.

Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement

- accélérateurs de prise ;
- accélérateurs de durcissement ;
- retardateurs de prise.

Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton

- entraîneurs d'air ;
- hydrofuges de masse ;
- rétenteurs d'eau.

Adjuvants	Dosage %
Plastifiants	0,15 à 1.2
Super-plastifiants	0.6 à 2.5
Accélérateur de prise	1 à 3
Accélérateur de durcissement	0.8 à 2
Entraîneurs d'air	0.05 à 3
Hydrofuges de masse	0.5 à 2
Rétenteurs d'eau	0.1 à 2
Retardateurs de prise	0.2 à 0.8

Tableau 7 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du béton

Plastifiant : Sont dosés aux faibles quantités dans les bétons, moins 5% de la masse du ciment. Permettant d'augmenter la plasticité du béton en tenant au nom constantes et donc faciliter la mise en œuvre. Ils peuvent être à base de ligno- sulfates, de sels d'acide organique.

Super-plastifiant: * Il provoque un fort accroissement de l'œuvre labilité du mélange tout en conservant les performances mécaniques.

- Ils Réduisent fortement la teneur en eau de gâchage et donc leur rapport E sur C.
- Ils peuvent offrir un long maintien de Rhéologie et limiter les risques de dessiccation et de ségrégation.

Accélérateur de prise:

- Il diminue le temps des débuts et de fin de prise du ciment.
- Ils permettent d'augmenter la densité d'hydrater. À un temps donné.

Accélérateur de durcissement :

- Décoffrage rapide
- Accroissement La vitesse de montée en résistance du béton.

Retardateur de prise :

- Maintien de l'ouvrabilité du béton
- Régulation de la chaleur, de l'hydratation, du ciment.

Hydrofuge: adjuvants qui permet de diminuer l'absorption capillaire des bétons durcis.

Entraîneur d'air : sont des corps tension actif = sels d'éthalonamine

Rétenteurs d'eau :

- Réglez l'évaporation de l'eau.
- Réduire la perte en eau Et augmentation ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange.
- Ils diminuent les phénomènes de retrait

6.3 Choix du type d'adjuvant en fonction de sa propriété:

Les adjuvants , produit stratégique pour la formulation des bétons, le rapporte une forte valeur ajoutez pour toutes leurs applications, ils sont service de la Rhéologie des bétons frais et sont gage de qualité des bétons durcis de durabilité des ouvrages.

La performance d'un adjuvant est jugée vis-à-vis de son aptitude à être efficace dans son utilisation prévue. Sans produire d'effets secondaires dommageables.

Proprieties	Adjuvant							
Ouvrabilité	Rétenteurs D'eau	Plastifiant	Super plastiffian	AD	AP	RP	Entraîneur D'air	Hydrofuge De masse

Temps de Prise			+	+				+
	Long terme	+	+	+	-	-	+	-
Resistance Air occlus	Court terme	+	+	+	+	+	-	-
Compacité		+	+	+				+
État de surface			+	+				+

Tableau 8 : Choix des adjuvants en fonction de leur propriétés

PATHOLOGIES DES STRUCTURES EN BETON

Introduction :

Tout au long de son existence, le béton est soumis à de multiples phénomènes (climatiques, physico-chimiques, mécaniques, etc.) pouvant entraîner de potentiels désordres et dégradations impactant directement la santé des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages. Il existe plusieurs types de pathologies dont voici ci-dessous une liste non exhaustive.

La pathologie est la science des maladies de construction qui a pour objet d'étude et la connaissance des causes . la pathologie est donc l'étude des désordres , qui en s'aggravant donnent lieu à des catastrophes , ces derniers peuvent conduire à la ruine des ouvrages .

Les différentes pathologies pouvant affecter le béton armé :

Ces pathologies sont des de deux types principaux :

- Mécaniques
- Physico-chimique

7.1/ Mécanique :

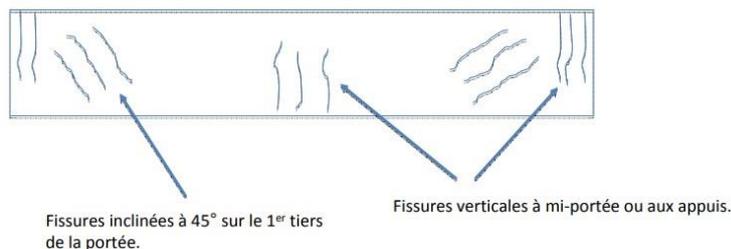
- Défauts d'ordre structurel :

*Les fissures verticales dues au Moment sont liées à un ferrailage insuffisant dans les zones les plus sollicitées :

- En partie inférieure à mi portée
- En partie supérieure aux appuis

*les fissures à 45°(fissures d'efforts tranchant) sont causées par un nombre insuffisant de cadres aux extrémités . L'origine de ces désordres peut être liée à un défaut d'exécution :

- Mauvaise disposition d'armatures : enrobage insuffisant « nids de caillou »
- Mauvaise formulation : porosité élevée
- Mauvaise exécution des coffrages



Désordre structurel lié à l'action des charges supérieures aux charges de services :

Origines :

Mauvaise conception ou mise en œuvre déficiente.

Symptômes

Fissure de retrait, de déformation de poinçonnement, de compression, de flexion, d'effort tranchant.

Solutions (réparation et prévention)

Renforcement par l'ajout d'armatures, reprises en sous-œuvre.

2 / Physico-chimiques :

Carbonatation :

La portlandite du ciment réagit petit à petit avec le CO₂ de l'air. Cette réaction réduit donc le pH du béton de 13 à 9. Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures, elles corrodent les armatures qui gonflent et éclatent le béton.

Elle entraîne des problèmes sur la durée de vie et sur la résistance des structures en béton. Les barres d'acier gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage. Les aciers sont alors mis à nu et continuent à se corroder.



Figure 15 : pathologie de la carbonatation

Réaction Interne Sulfatique (RSI) :

Les réactions sulfatiques internes (RSI) sont des pathologies attribuées à la formation d'ettringite dans un matériau cimentaire déjà durci, sans apport de sulfates par le milieu extérieur. Elles semblent nécessiter en général un apport suffisant en eau. L'étude de la réaction sulfatique interne principalement observée est la formation différée d'ettringite. Ce phénomène concerne uniquement certains bétons ayant subi, au jeune âge, une augmentation de température conduisant à une exposition suffisamment longue à une température supérieure à 65°C-70°C. Au-delà de ce seuil, l'ettringite déjà formée se décompose, tandis que la formation de nouvelle ettringite est empêchée en effet la forme stable des sulfates à cette température est le monosulfoaluminate éventuellement dissocier sous forme ionique. Les ions SO₄⁻² sont alors principalement adsorbés dans les C-S-H, dont la formation est également accélérée. De telles conditions de température peuvent se produire au cours de traitements par étuvage souvent utilisés pour les éléments préfabriqués en usine, ou dans le cas de pièces massives en béton lors que la chaleur d'hydratation du ciment ne peut pas s'évacuer assez vite. Par la suite, des cristaux d'ettringite peuvent se former dans le béton durci, après retour à

la température ambiante. Les ions SO_4^{-2} adsorbés dans les C-S-H, ainsi que ceux des monosulfates présents à l'intérieur du béton, servant de source de sulfates, sont ainsi susceptibles de provoquer des pressions de gonflement conduisant à des phénomènes .



Figure 16 : réaction interne sulfatique

Cycle gel-dégel :

Les cycles gel-dégel fragilisent le béton. L'eau pénètre dans le réseau des fissures et des pores du béton. Lors du gel, cette eau gonfle et va alors éclater localement le béton. Les sels de déverglaçage ont alors un chemin pour corroder les aciers.

Ils causent une fissuration interne par gonflement du béton à cœur. Écaillage du béton à sa surface sous l'effet des sels de déverglaçage.



Figure 17 : Cycle gel-dégel

Corrosion des armatures :

Dans certaines conditions, comme la carbonatation du béton d'enrobage ou une teneur critique en chlorures, cet équilibre peut être rompu en entraînant une dépassivation de l'acier et l'amorçage d'un phénomène de corrosion. Dans les deux cas, la destruction du film passif et la dégradation du métal mettent en jeu un mécanisme de piles électrochimiques avec des zones anodiques, des zones cathodiques et un milieu électrolytique constitué par la solution interstitielle du béton. Au niveau de

l'anode, le métal est dissous avec production d'électrons qui sont consommés au niveau de la cathode, par réduction de l'oxygène, cette réaction entraînant la libération d'ions hydroxyle OH⁻. Ces derniers réagissent ensuite avec les ions ferreux produits au niveau de l'anode pour former, en présence d'oxygène, des oxydes et hydroxydes de fer gonflants. Dans tous les cas, la corrosion ne peut se développer qu'en présence d'oxygène, ce qui explique, entre autres, que les cinétiques de corrosion dans les structures immergées en béton sont très faibles.



Figure 18 :corrosion des armatures

Incendie :

Le béton est incombustible et conduit relativement mal la chaleur. Il présente donc de bonnes propriétés isolantes pour un sinistre d'importance moyenne. Toutefois, si l'incendie se prolonge ou si la température est trop élevée, divers phénomènes peuvent se produire :

Pertes des caractéristiques du liant,

Dilatation des agrégats, entraînant la fissuration du béton,

Diminution des caractéristiques des aciers.

Liant :

- Jusqu'à 300 ° C : évaporation de l'eau libre et de l'eau liée physiquement,
- De 300 à 550 ° C : décomposition de la portlandite $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$,
- De 600 à 700 ° C : destruction des C-S-H et décohésion de la phase liante.

La perte de résistance peut atteindre 20 % pour une température de 300 ° C. À partir de 900 ° C, le matériau est considéré comme détruit.

Granulats :

- À 573 ° C : point quartz – éclatement des granulats siliceux,
- de 600 à 800 ° C : décohésion liant – granulats sous l'effet de la dilatation,
- Au-delà de 700 ° C : décarbonatation des matériaux calcaires ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)

Armatures :

- Jusqu'à 300 ° C : pas de modification sensible des caractéristiques,
- De 300 à 550 ° C : baisse rapide des performances.
- À 550 ° C la limite élastique R_e et le module d'Young E sont réduits de 50 %,
- À partir de 700 ° C : modification structurale de l'acier – fusion vers 1450 ° C



Figure 19 : incendie /béton

L'attaque des ions chlorures :

Des ions chlorures véhiculés par l'eau peuvent être présents dans le béton : ils peuvent être présents dans les composants du béton (granulats marins, ...), être incorporés au moment du malaxage (adjuvants accélérateurs de prise chlorés, ...) ou encore pénétrer dans l'ouvrage au fil du temps par diffusion à partir du milieu extérieur (eau de mer, sels de déverglaçage, ...). A partir d'une teneur critique en chlorures, une armature peut se corroder localement pour autant qu'elle soit mise en présence d'eau et d'oxygène : des cratères de faible dimension affectent l'acier et s'agrandissent progressivement. En effet, les ions Cl^- réagissent avec les ions Fe^{++} pour former du chlorure de fer. Celui-ci consomme les ions hydroxyle, migre et s'oxyde plus loin en déposant de la rouille. De là, les tâches de rouille en surface du béton, typiques d'une corrosion par les chlorures.



Figure 20 : attaque des ions chlorures

Chapitre II

GENERALITES DES MATERIAUX COMPOSITES

Introduction

Le concept des matériaux composites répondant à une sollicitation mécanique soulève deux questions fondamentales :

- D'une part la nature fibreuse du renfort
- D'autre part son interaction physique et chimique avec la matrice sélectionnée

Présents dans carrément tous les secteurs industriels les matériaux composites se démarquent par leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre, leur résistance mécanique, physique et chimique offre un large éventail de possibilités en termes d'utilisation, de design, de géométrie et d'intégration de fonctions. S'adaptant parfaitement à toute sorte d'environnement, même les plus hostiles, ils s'intègrent totalement à notre quotidien à tel point qu'ils peuvent passer inaperçus.

Les matériaux composites permettent d'atteindre des niveaux de performances inégalés. En effet, ils possèdent une structure géométrique spécialement conçue pour leur conférer des propriétés que leurs constituants élémentaires ne possèdent pas individuellement, et leur permettre de remplir de nombreuses fonctions techniques. Pour tirer le meilleur parti de leurs capacités, les composites sont généralement conçus en même temps que les pièces qu'ils constituent. La frontière entre le produit et le matériau est donc plus floue qu'avec les matériaux traditionnels, ce qui implique de profonds changements dans la conception des produits industriels.

Généralités sur les matériaux composites :

Historique :

Depuis les temps anciens, les constructeurs, les artisans, les ingénieurs et les fabricants ont continué à développer des composites constitués d'un plus large éventail de matériaux pour des applications plus sophistiquées. La première utilisation connue des composites est attribuée aux Mésopotamiens. Ces anciens peuples collaient des bandes de bois sous différents angles pour créer du contreplaqué en 3400 avant JC. Avec le temps les matériaux composites non cessée d'être remarqué dans plusieurs domaines vers 1961, la première fibre de carbone a été brevetée et, quelques années plus tard, elle est devenue disponible dans le commerce. Les fibres de carbone ont amélioré le rapport rigidité/poids des pièces thermo durcies, pour une utilisation dans encore plus d'applications .

Au cours des vingt dernières années , le marché des matériaux composites progresse. Tout début des années 1990, les matériaux composites sont devenus plus courants dans l'industrie manufacturière et la construction. En remplacement rentable des matériaux traditionnels comme le métal et les thermoplastiques techniques, les composites thermodurcissables étaient des composants courants dans les secteurs de l'électroménager, de la construction, de l'électricité et des transports.

Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite est constitué de deux matériaux différents
Et complémentaire permettant d'obtenir un matériau dont la performance dépasse celles des composants pris individuellement.

un matériau composite est un matériau hétérogène formé d'au moins deux constituants non miscible , disposé selon une organisation géométrique particulière.

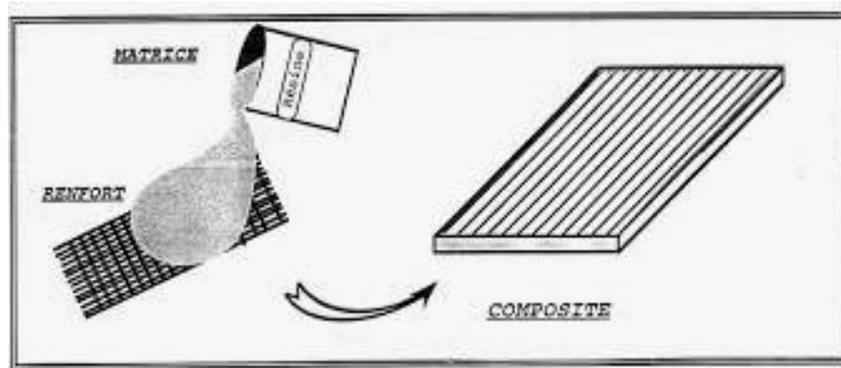


Figure 21 : composition matériaux composites

Caractéristique des matériaux composites :

Selon la composition des matériaux composites ses derniers peuvent avoir de nombreuses propriétés ils permettent une liberté presque infinie d'assemblage, ce qui permet de créer des matériaux 'à la carte' avec les propriétés souhaitées selon le produit fabriqué.

Les matériaux composites présentent des caractéristiques bien définies :

- *leur résistance : le matériau peut notamment supporter de nombreux chocs et pressions externes grâce au renfort.
- *leur faible volume : la masse est plus compacte et donc moins volumineuse, ce qui entraîne un allègement parfois considérable du produit final,
- *leur durée de vie : du fait de leur résistance, le matériau est durable et ne s'abîme pas ou peu avec le temps.

Les constituants des matériaux composites :

Les matrices :

Les matrices jouent un rôle important dans la structure des pièces composites car :

- elles maintiennent la disposition géométrique des fibres
- elles apportent au composite ses caractéristiques chimiques et thermiques
- elles transfèrent les sollicitations mécaniques

La matrice est l'un des principaux constituants des matériaux composites , on distingue de types de matrices :

- MATRICES MINÉRALES
- MATRICES ORGANIQUES

-Les matrices minérales : on distingue deux types métalliques , céramiques

-Les matrices organiques :

1/THERMODURCISSABLE :

Les thermodurcissables présentent une structure tridimensionnelle , la polymérisation induit un pontage des macromolécules et cette structure se solidifie de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée .

Pour le matériau obtenu après la mise en œuvre , les liaisons entre macromolécules sont des liaisons chimiques fortes : cette transformation est irréversible .

Les polymères thermodurcissables sont composés de différents types de matériaux qui ont des fonctions et des applications importantes dans l'industrie de la plasturgie. Les deux procédés pour les composants de moulage thermodurcissables sont le moulage par injection de réactions(RIM) et le moulage par transfert de résine(RTM).

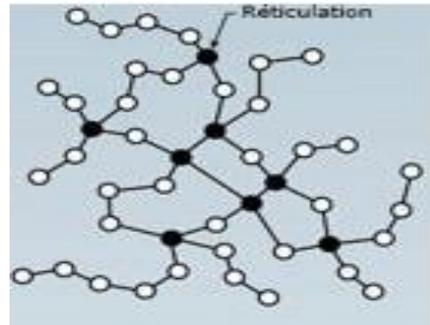


Figure 22 : polymère thermodurcissable

On distingue plusieurs matrices thermodurcissables :

a/ *Les matrices polyesters*: les polyesters insaturés sont d'un usage relativement ancien (1950) essentiellement dans le bâtiment (moulage au contact).Ce sont des résines thermodurcissables les plus utilisées et les moins chères, environ 95 % des composites thermo-durcis renforcé utilise ce type de résine.

La fabrication de la résine polycondensats se fait en deux étapes , elle est obtenue entre 60 et 130 C° par polycondensation d'un diol (glycol) avec un diacide saturé et diacide insaturé , ce polyester insaturé est mis en solution dans un monomère (en général le styrène) qui sert à la fois de diluant et de réticulant. Le transformateur reçoit le mélange polyester insaturé/monomère et ajoute un système catalytique (amorceur type peroxyde et accélérateur) pour réaliser la réticulation et obtenir un polyester réticulé après sa mise en œuvre.

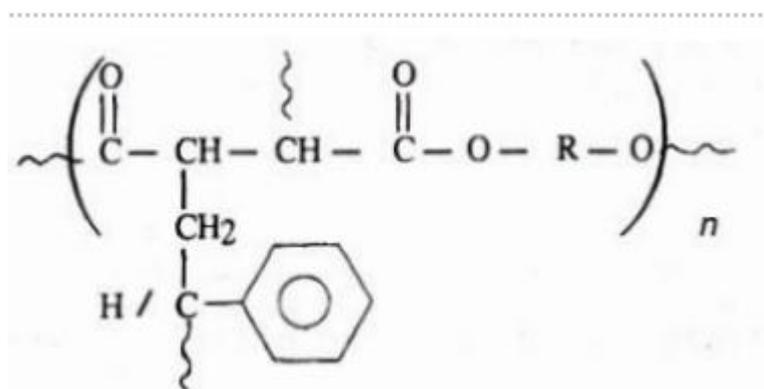


Figure 23 :Formule du Polyester insaturée

Diacides :

Les diacides sont généralement un mélange de diacides insaturés et diacides saturés utilisés sous leur forme anhydride .

- Diacide insaturée :

Le plus important des diacides insaturés utilisés dans la fabrication des polyesters est l'anhydride maléique produit par oxydation catalytique du benzène ou du butane de formule:

- Diacide saturé :
Les diacides saturés servent à espacer les pontages entre les différentes chaînes qui se forment au moment de la copolymérisation par l'intermédiaire des doubles liaisons des diacides insaturés.
Plus la proportion des diacides saturés est grande, plus les points de jonction entre les chaînes sont séparés, moins la résine est réactive et moins elle est rigide.
- Le principal diacide saturé utilisé dans la fabrication des polyesters est l'anhydride phtalique, obtenu industriellement sur un catalyseur à base d'oxyde de vanadium par oxydation du naphthalène ou de l'o-xylène.

Les avantages et les inconvénients de la résine polyester sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Avantages	Inconvénients
Facilité de mise en œuvre	Inflammable
Bon accrochage sur la fibre de verre	Temps de travail limité
Assez bonne tenue chimique	Retrait important (6 à 7 % en volume)
Prix réduit	Durée de conservation limitée

Tableau 9 : avantages et inconvénients de la résine polyester

Différentes classes des résines UP :

Les résines UP peuvent être classées en différentes catégories en fonction de la composition du polyester, on distingue de nombreuses variétés de résines polyesters mais les plus utilisées sont les orthophtalique et isophtalique

- Résine polyester orthophtalique ;
Les résines orthophtaliques sont basées sur un mélange d'anhydride phtaliques et d'anhydride maléique (condensation des anhydrides avec du propylène glycol)
- Résine polyester isophtalique :
Cette résine est formulée à base d'acide isophtalique, ce qui lui procure une qualité dite "marine". À l'inverse de la formulation orthophtalique, c'est une résine à faible retrait. Elle est donc plus adaptée pour les applications en moule.
La résine polyester isophtalique est polyvalente. Elle est parfaite pour la construction ou la réparation nautique, la fabrication de coque de piscine ou bassin, ou encore la carrosserie automobile. Elle peut être complétée d'un gel-coat de moulage ou d'un top-coat de finition, lui conférant ainsi des propriétés de protection, d'étanchéité et de résistance aux UV.

Les glycols:

Glycols couramment utilisés pour la synthèse du prépolymère polyester insaturé:

Les principaux polyols employés pour réagir avec les acides sont le propylèneglycol (PG), le dipropylèneglycol (DPG) et le diéthylèneglycol (DEG). Le propylèneglycol est un diol classique qui assure au polyester insaturé une solubilité en toute proportion dans le styrène. Le dipropylèneglycol et le diéthylèneglycol apportent de la souplesse à la résine : légère chute du module d'Young et augmentation de l'allongement à rupture en traction. Pour obtenir des caractéristiques spécifiques, d'autres polyols existent : le bisphénol A qui procure des propriétés anticorrosives intéressantes, les

diols chlorés ou bromés an d'améliorer les propriétés au feu, le néopentylglycol (NPG) qui assure une bonne tenue à l'hydrolyse.

Différence entre résine polyester orthophtalique et résine polyester isophtalique :

	Résine polyester orthophtalique	Résine polyester isophtalique
Tenue en température	80-90 C°	110-120 C°
Propriétés mécaniques	Moyennes	Elevées
Résistance à l'hydrolyse	Faible	Elevée
Coût	Modéré	Plus chère
Applications	Grande diffusion	Carrosserie , bateaux ,moule

Tableau 10 : Différence entre résine polyester orthophtalique et résine polyester isophtalique

Réticulation des résines polyesters :

La polymérisation est une réaction chimique utilisation d'un accélérateur et d'un catalyseur dans la résine.

L'accélérateur est généralement un sel de cobalt (octoate de cobalt) et le catalyseur un peroxyde organique (peroxyde de méthyléthyl cétone (PMEC))

-->Cas d'accélérateur :Seul, l'accélérateur sert à modifier le temps de gel, le taux en accélérateur est compris entre 0.1 et 0.4 g pour 100 g de résine. Plus la quantité en sels de cobalt est élevée, plus les temps relevés sont courts :

- A 36 °C (température indiquée dans la norme utilisée par les fabricants et assimilée au temps de gel ou de fin d'injection)

- Au maximum d'exothermie (pic exothermique = fin de réaction et donc de démoulage de la pièce).

Le but des promoteurs à base de cobalt est d'accélérer la réaction de durcissement des résines de polyesters et de leur permettre de durcir à température ambiante . Le promoteur à base de cobalt aide la catalyseur à démarrer la réaction chimique entre la résine et le monomère de styrène et à former un solide durci .

-->Cas d'initiateur = catalyseur : Le durcissement de la résine est obtenu par copolymérisation du polycondensat avec le monomère en présence d'un initiateur.

L'initiateur, par décomposition chimique ou physique, va donner naissance à deux radicaux de la forme :



Cette réaction exothermique peut se caractériser par la courbe ci-dessous :

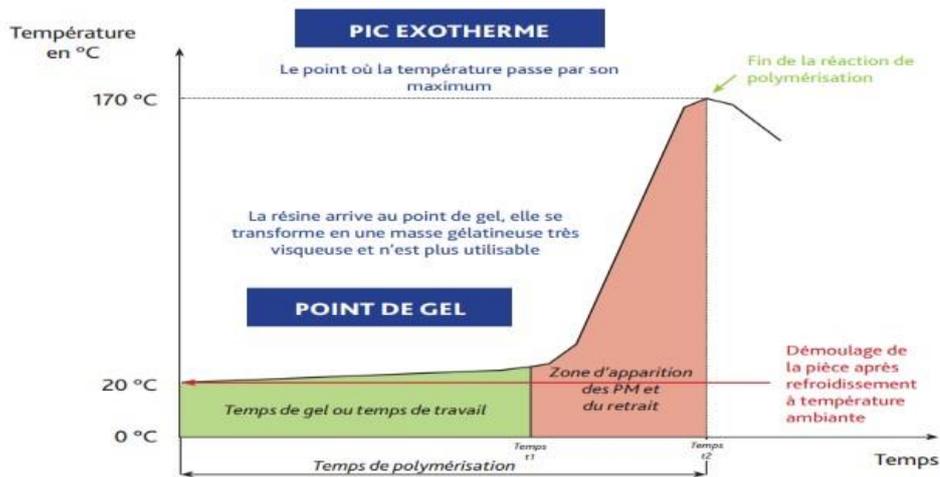


Figure 24 : réaction exothermique des résines polyester

A la résine, on ajoute en premier l'accélérateur puis en second le catalyseur. On ne mélange jamais l'accélérateur et le catalyseur en même temps sinon la réaction peut être explosive. Afin d'éviter ce type d'accident, la plupart des résines polyesters (globalement tous les gel-coats) sont déjà pré-accélérées (promotorisées), et ne nécessitent que l'ajout de catalyseur (initiateur) pour démarrer la réticulation. Le temps de transformation va donc dépendre uniquement de la quantité de catalyseur ajoutée.

Propriétés des résines polyester :

Propriétés mécaniques :

- Les résines polyesters présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en terme de rigidité (Module d'Young), cependant leurs contraintes et allongements à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde et vinylester.

Au niveau macroscopique, les résines de stratification sont considérées comme isotropes. Leur comportement dépend de la température, il passe de l'état vitreux à l'état caoutchoutique avec une augmentation de température. Ce passage s'effectue dans une certaine plage et une température de transition vitreuse T_g est définie. Comme tous les polymères, les thermodurcissables ont aussi des propriétés mécaniques qui évoluent en fonction de la vitesse de sollicitation (comportement visqueux). Cependant, pour des sollicitations statiques à température ambiante, le comportement mécanique des résines réticulées est modélisable par une loi élasto-plastique.

Résine	Module d'Young (GPa)	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Polyester Insaturé	3-4	40-50	1,5-2,2

Tableau 11 : propriétés mécaniques des résines polyester

Propriétés chimiques :

Les résines polyester comportent deux aspects chimiquement faibles du point de vue de leur structure : les fonctions ester hydrolysables et les ponts sensibles aux oxydants et aux solvants.

L'hydrolyse est un facteur non négligeable pour les composites polyester à usage marin. C'est pourquoi, ils sont généralement protégés par une couche de gel-coat formulé spécialement pour résister à l'environnement marin (résine polyester chargée faisant intervenir des glycols NPG par exemple)

On distingue qu'il sont résistants:

- Aux alcools (surtout pour les résine isophtaliques)
- Aux sels
- Aux hydrocarbures (bonne à froid , mauvais à chaud)
- Aux acides

Mais sont attaqués par :

- Des solvants halogénés
- Des cétones
- Des acides réducteurs
- Des amines
- Des alcalis (saponification)
-

b /Les matrices époxydes :

Histoire :

Les **résines époxydes** furent découvertes presque simultanément par le Suisse Castan et l'Américain Greenlee. Les auteurs anglosaxons désignent ces produits sous le vocable **epoxy resins** pour bien souligner que le groupe époxydique (un oxygène branché sur deux carbones consécutifs) constitue leur point commun. La notation abrégée, universellement adoptée, est **EP**.

Définition :

La résine époxy résulte de la polymérisation de "monomères":

- Groupement époxyde dont le forme la plus simple est l'épichlorhydrine (ECH)
- un odiol souvent un bisphanol-A (BPA)

Cette polymérisation donne lieu à matériau thermodurcissable disposant d'un faible degré de polycondensation (capacité à devenir rigide) . Un durcisseur est ainsi ajouté pour atteindre le stage thermo rigide final .

Les applications des résines époxydes sont vastes adhésifs , liants , matériaux de construction (revêtement de sol , pavage et agrégats) composites , laminés , revêtement , moulage.

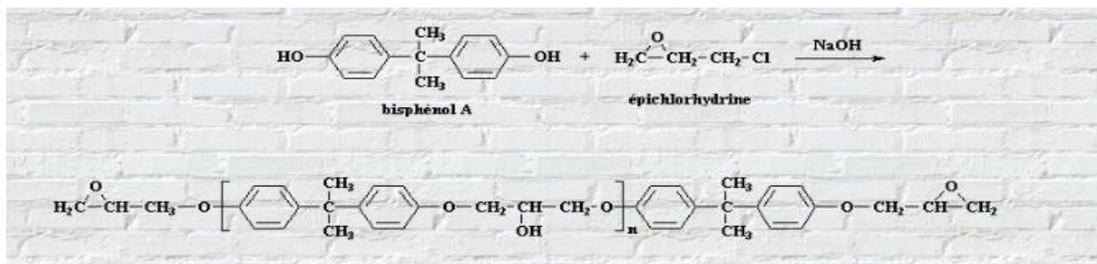


Figure 25: formule chimique du résine époxy

Durcisseur :

Les polyamines, les polyamidoamines et les composés phénoliques constituent les durcisseurs les plus communs. Leurs choix est un compromis de plusieurs caractéristiques :

- Viscosité du mélange réactif
- Réactivité du système lors de la mise en œuvre
- Propriétés finales : température de transition vitreuse Tg

Tg : température de transition vitreuse correspondant au passage d'un état solide à état viscoélastique . C'est un changement de phase réversible sous l'effet de la température présentant un point de ramollissement de la résines polymérisée.

Choix d'un durcisseur :

Le choix d'un durcisseur est un compromis entre plusieurs caractéristiques à savoir :

- La Viscosité du mélange réactif.
- La Durée de vie en pot du mélange.
- La Réactivité du système lors de la mise en œuvre.
- La Propriétés finales : Tg, module, reprise d'eau... etc

Fabrication des résines époxydes :

Les résines époxy peuvent être obtenues en phase liquide ou solide. Les deux procédés sont semblables. D'abord l'ECH et le BPA sont chargés dans un réacteur. Une solution de soude caustique de 20-40% est ajoutée pendant que la solution est amenée au point d'ébullition. Après l'évaporation de l'ECH en excès, les deux phases sont séparées par l'ajout d'un solvant inerte comme le méthylisobutylcéone (MIBK). La résine est lavée avec de l'eau et le solvant est enlevé par distillation sous vide. Les producteurs ajouteront ensuite des additifs spécifiques pour créer une formule qui apporte des propriétés spéciales telles que la flexibilité, la viscosité, la couleur, l'adhérence et un séchage plus rapide, selon chaque application.

Les résines époxydes ont de nombreux avantages qu'ont présentent dans le tableau ci-dessous :

Avantages	Inconvénients
Excellente propriété mécanique	Prix élevé
Bonne résistance à la fatigue	Sensibilité à l'humidité
Pouvoir adhésif important	et aux radiations
Tenue thermique	
Faible retrait <1%	

Tableau 12 : avantages et inconvénient des résines époxy

Principalement associés aux renforts de carbone et d'aramide , elles présentent malgré tout des limites et notamment en milieu oxydant où elles se dégradent très vite ou en présence d'arcs électriques.

Propriété des résine epoxy

- *Propriétés mécaniques :*

Propriété	Valeur
Masse volumique (Kg/m ³)	1100/1500
Module d'élasticité (GPa)	3-5
Résistance au cisaillement (MPa)	30-50
Allongement à la rupture(%)	2-5
Température de fléchissement sous	290

charge (C°)	
Contrainte à la rupture (MPa)	60-80
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	100-150

Tableau 13 : propriétés mécaniques des résines époxy

Application industriel des résines époxy

Les résines époxy se retrouvent dans une très grande variété d'applications industrielles, cette diversité est due principalement à leurs propriétés caractéristiques: une haute résistance thermique et mécanique, une forte résistance à la dégradation chimique, et enfin une production et une manipulation aisées à faibles coûts. La majorité des résines époxy sont utilisées principalement pour leur capacité à résister à la corrosion, leur faible densité et leur excellente adhésion à de nombreux substrats, faisant d'elles un matériau de premier choix pour les revêtements de tous type.

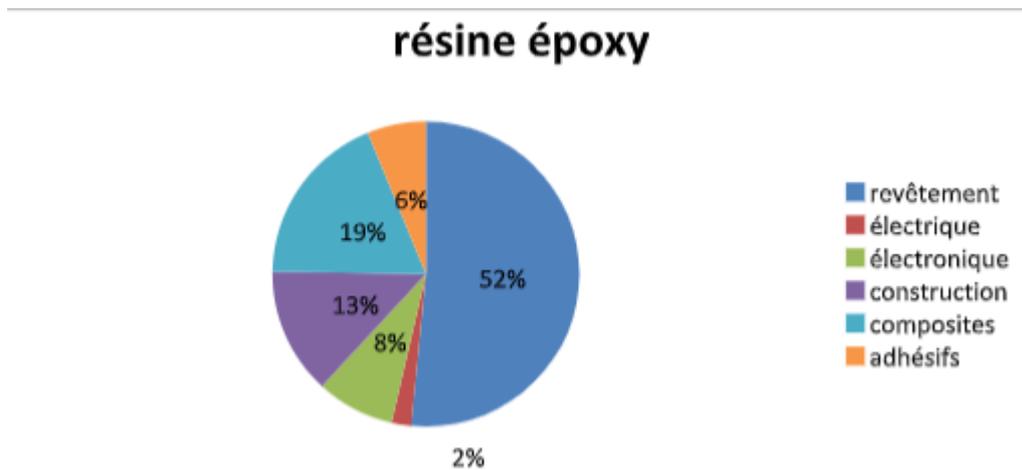


Figure 26 : application industrielles des résines époxy

c/Matrice vinylester :

Les matrices vinylesters résultent de une estérification entre le DGEBA et un acide carboxylique α - β insaturé (p. ex. acide méthacrylique) en présence d'un catalyseur, permettant d'obtenir le précurseur vinylester. Afin d'obtenir un meilleur contrôle de la polymérisation et des propriétés des polymères, les précurseurs VE nécessitent souvent un précurseur vinylique monofonctionnel comme diluant réactif pour la copolymérisation. Le styrène est le diluant réactif le plus couramment utilisé dans la formulation des résines VE, et il peut rapidement polymériser avec des agents de réticulation multifonctionnels comme des dérivés acrylates et méthacrylates.

Essentiellement utilisées dans le domaine anticorrosion car elles sont particulièrement résistantes aux agressions chimiques de toutes sortes, elles offrent aussi des propriétés mécaniques supérieures aux résines polyester.

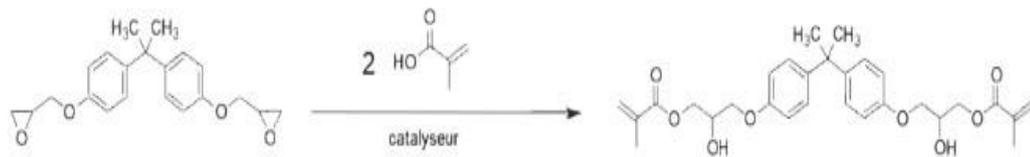
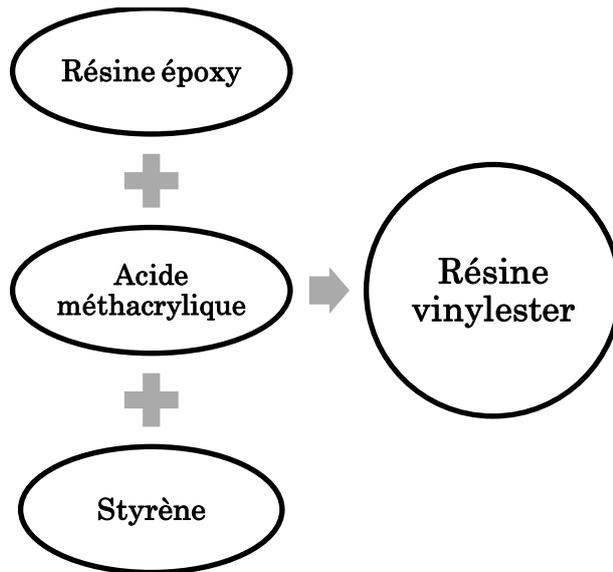


Figure 27 : formule chimique des matrices vinylester

Schéma de la préparation des monomères d'esters vinyliques par addition de l'acide méthacrylique avec les monomères DGEBP :



Ci dessous , On résume les avantages et les inconvénients des résines vinylester:

Avantages	Inconvénients
Excellente tenue chimique Bonne propriété mécanique Bonne tenue thermique Résine souple	Polymérisation plus lente qu'un polyester Nécessite des démoulants appropriés Retrait volumique de 6 à 8 %

Tableau 14 : avantages et inconvénients des résines vinylester

d/Résine phénolique :

Définition :

Ce sont des résines thermodurcissables obtenues par polycondensation de phénol et de formaldéhydes , de structure générale présentée dans la figure ci dessous . Utilisés principalement dans des applications nécessitant une résistance au feu importante , elles polymérisent à l'aide d'un catalyseur acide et ne présentent pas de propriétés mécaniques élevées .

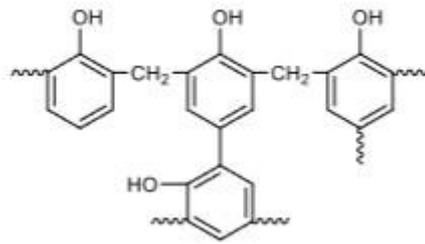


Figure 28 : Structure générale des résines phénoliques

Nature des précurseurs phénoliques :

- **Phénol :**

Le phénol est le composé phénolique le plus utilisé . Il est produit industriellement par oxydation du cumène. Le cumène est lui-même obtenu à partir du propylène et du benzène issus des coupes pétrolières. Des composés phénol monométhylés tels que les composés crésol ou diméthylés tels que les composés xylénol sont aussi largement utilisés et issus de ressources pétrolières. Ces composés phénoliques sont classés CMR de catégorie 2 (Cancérogène Mutagène Reprotoxique).

Avantages et inconvénient des résines phénolique.

Avantages	Inconvénients
Densité 1.25 à 1.3 Excellente tenue au feu Bonne tenue thermique Propriétés ablatives Prix modéré	Faibles propriétés mécaniques Dégagement d'eau lors de la mise en œuvre Coloration difficile

Tableau 15 :avantages et inconvénients des résines phénolique

e/ Les résines polyuréthanes :

Un polyuréthane est obtenu en faisant réagir un isocyanate et un polyol . La rigidité du réseau des chaînes qui le compose du poids moléculaire du polyol qui sert à la réaction n. Les chaînes courtes forment des ponts rapprochés et denses le système est alors rigide, les longues chaînes assouplissent le produit et donnent un matériau souple. Avec un agent d'expansion on obtient des mousses souples à cellules ouvertes, ou rigides à cellules fermées.

Avantages des résines polyuréthanes :

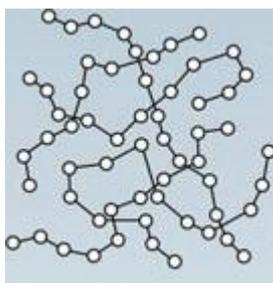
- Excellente résistance à la traction
- Bonne résistance au déchirement et à l'abrasion
- Tandis que pour les mousses qu'ont des propriétés d'isolation thermique

et phonique

2/THERMOPLASTIQUE

Définition :

D'une manière générale, les thermoplastiques sont constituées d'un ensemble de macromolécules longues, linéaires ou ramifiées, ils se ramollissent sous l'effet de la chaleur, et reviennent à leur état d'origine en refroidissant en gardant la même structure moléculaire. Cette qualité les rend éventuellement recyclable, leurs propriétés intrinsèques sont suffisantes pour permettre la réalisation d'objets et de pièces à fonction diverses.

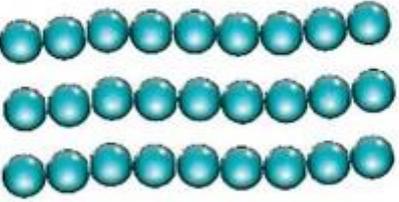


LES THERMOPLASTIQUES



Granulés
Poudre
Plaque

**Se ramollissent sous l'effet de la chaleur
et deviennent malléables.**
Se figent après refroidissement
La transformation est réversible



Structure moléculaire linéaire

Elles sont:

- Économiques et moins polluantes lors de leur transformation , elles offrent une bonne résistance à l'impact et permettent des cadences de production élevées grâce à des cycles relativement courts
- Plus facilement recyclables que les matrices thermodurcissables , leur propriétés restent généralement plus faibles , exceptées pour quelques polymères très techniques et forcément plus onéreux .

Avantages et inconvénients des thermoplastiques :

Le principal avantage des thermoplastiques est leur large éventail d'applications. Les thermoplastiques sont des matériaux légers et à haute résistance et ont des coûts de traitement relativement faibles , sans oublier à côté que l'utilisation de thermoplastique au lieu de matériaux comme le métal est leur point de fusion relativement bas . Certains types de thermoplastiques de qualité inférieure peuvent fondre lorsqu'ils sont exposés à une haute chaleur . D'autre part , les thermoplastiques peuvent avoir une faible résistance aux solvants organiques , aux hydrocarbures et aux solvants hautement polaires .

Types de Thermoplastiques :

Les thermoplastiques les plus utilisés sont le polyéthylène PE , le chlorure de polyvinyle(PVC) et le polystyrène PC

Les polyamides	PA
Polystyrène	PS
Polypropylène	PP
Les styréniques	ABS
Les polyphénylène-oxydes	PPO
Polyoxyméthylène	POM

Tableau 16 :les thermoplastiques les plus utilisés

THERMODURCISSABLES ET THERMOPLASTIQUES :

La différence entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion , d'une manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées en raison de leur plus grande facilité de mise en forme ; parmi les plus courantes on peut citer les résines époxy qui sont utilisées dans nombre d'applications. Leur plus large éventail d'applications se retrouve dans le secteur de la construction, où, en raison de leur robustesse, de leur dureté et de leur durabilité, ils servent à recouvrir et à protéger différents matériaux et surfaces, notamment la tuyauterie et les sols.

Propriétés	Thermoplastique	Thermodurcissable
Structure moléculaire	Polymères réseaux. Il existe un niveau élevé de réticulation ainsi que des liaisons moléculaires fortes.	Polymères linéaires. Les liaisons moléculaires sont faibles et forment une chaîne droite.
Point de fusion	Le point de fusion est supérieur à la température de dégradation.	Le point de fusion est inférieur à la température de dégradation.
Microstructure	Ils sont composés de résine et de fibres de renforcement à l'état solide.	Ils sont constitués de régions élastiques amorphes et cristallines dures à l'état solide.
Mécaniques	Fragile et inélastique. Rigide et solide. La résistance du thermodurcissable provient de la réticulation.	Souple et élastique avec une résistance accrue aux chocs. Le thermoplastique tire sa force de la cristallinité.
Recyclabilité	Non recyclable.	Recyclable et réutilisable.
Résistance chimique	Résistant aux produits chimiques et à la chaleur.	Très résistant aux produits chimiques.
Solubilité	Ne pas dissoudre dans des solvants organiques.	Peut se dissoudre dans des solvants organiques.

Tableau 17 : différence entre THERMOPLASTIQUE ET THERMODURCISSABLES

Renforts :

Introduction :

Au cours de sa vie une structure peut nécessiter un renforcement ultérieure dû à des besoins d'utilisation différentes à des augmentation de charges ou bien à des normes plus strictes , car l'utilisation des fibres date de l'empire romain ou les ingénieurs utilisaient des fibres animales et végétales dans leurs grands travaux de génie civil tels que le Colisée de Rome dont la construction remonte près de deux miles ans . On constate que les fibres ont donc un rôle capital :

- La cohésion du béton frais
- La résistance à la traction
- La tenue en feu
- La capacité à absorber
- La ductilité et la résistance post-fissuration

Leur nature peut être de diverses origines , elle peut être végétales (le bois , la jute, le coton) , Minérale (l'alumine , l'amiante) , Synthétique (Polyester , polyamide ...) ou bien Artificiel (le Bore , le carbone)

Dans cette partie on prend en compte les trois fibres les plus utilisés dans le marché

- Fibre de verre
- Fibre de carbone
- Fibre aramide (Kevlar)

Note :

Protéger : -assurer l'étanchéité

-limiter la corrosion

Réparer : -compenser les pertes on rugosité

-augmenter la résistance

Renforcer :- améliorer la durabilité de l'ouvrage

1/ Fibre de verre :

La production industrielle débuta en 1930 par les applications d'isolation électrique , c'est plusieurs années plus tard que l'on commence à les utiliser comme renfort des résines thermodurcissables car elles montrent de bonnes caractéristiques mécaniques .

Les fibres de verres sont constitués par la Silice (SiO_2), l'Alumine, la Chaux, la Magnésie, l'Oxyde de Bore, le Fluore, l'Oxyde de Fer, l'Oxyde de Titane, l'Oxyde de Sodium, l'Oxyde de Potassium.

Avantage des fibres de verre :

- Résistance à la corrosion
- Haute solidité mécanique
- Résistance aux produits chimiques
- Résistance aux rayons UV et au temps
- Isolant électrique et thermiques
- Résistance au chaud et au froid
- Faible coefficient thermique d'extension Antimagnétique sans formation d'étincelles
- Transparence électromagnétique
- Possibilité de choisir la couleur
- Façonnage facile
- Maintenance minimale

La matière première :

Plusieurs types de compositions verrières sont utilisées comme matières premières, en fonction de l'usage spécifique qu'il sera fait de la fibre. Pour les fibres de renforcement, les principaux verres utilisés comme SiO_2 .

Utilisation :

Les utilisations pour la fibre de verre régulière incluent des nattes et des tissus pour l'isolation thermique, l'isolation électrique, l'isolation acoustique, les tissus à haute résistance ou les tissus résistants à la chaleur et à la corrosion. Il est également utilisé pour renforcer divers matériaux, tels que les poteaux de tente, saut à la perche des poteaux, des flèches, des arcs et des arbalètes, des panneaux de toiture translucide, automobile corps, bâtons de hockey, planches de surf, bateau coques et nid d'abeille en papier. Il a été utilisé à des fins médicales dans les moulages. La fibre de verre est largement utilisée pour fabriquer des réservoirs et des cuves en PRF. Des grilles de fibres de verre à armure ouverte sont utilisées pour renforcer le revêtement en asphalte.

Les nattes de fibre de verre / mélange de polymère sont utilisées saturées avec l'émulsion d'asphalte et recouverte d'asphalte, produisant une membrane imperméable et résistante aux fissures. L'utilisation de barres d'armature en polymère renforcé de fibres de verre à la place des barres d'armature en acier est prometteuse dans les zones où l'on souhaite éviter la corrosion de l'acier

En renforcement :

Dans 9 cas sur 10, la fibre de verre est utilisée comme armature dans des matériaux composites à résine généralement thermodurcissables, polyester, vinyles ter ou encore époxy (« fibre de verre époxy »,

GRE). Dans ces matériaux, comme pour le béton armé, les deux matériaux se complètent, compensant les faiblesses de l'autre. Les fibres apportent la résistance en traction alors que la matrice leur permet de supporter des charges de compression. On utilise soit le moulage au contact, soit le moulage par compression. Dans les deux cas, l'utilisation de moules requiert l'utilisation d'un modèle (souvent en bois). Dans le moulage au contact, le tissu (c'est un exemple) de fibre de verre est posé au fond du moule ; de la résine est ajoutée, puis un rouleau comprime le tout. L'opération est répétée autant de fois que nécessaire pour obtenir l'épaisseur souhaitée. Le moulage par compression utilise un moule et un contre-moule chauffés (pour accélérer la polymérisation). Une presse hydraulique assure une bonne répartition de la résine et des fibres de verre, tout comme leur compression.

En isolation :

Depuis la montée en puissance des politiques d'économie énergétique, la fibre, par ses qualités d'isolation, est un partenaire obligé. Pour ce cas de figure, la fabrication est menée par encollage des fibres par une résine synthétique. Le produit fini aura la forme de panneaux rigides ou de matelas souples pour protéger murs et plafonds, ou encore la forme de coquilles pour isoler les tuyaux.

En optique :

Les fibres de verres, grâce à leur souplesse, leur transparence et leur excellente capacité de transmission de la lumière, sont jointes en faisceau et utilisées comme fibres optiques. L'utilisation reine est certainement l'endoscopie : un canal permet d'éclairer, par exemple les bronches, tandis qu'un autre canal renvoie la lumière réfléchi sur les bronches au praticien (ou à un support informatique).

En télécommunication :

Propagation de la lumière dans une fibre optique par réflexion totale. On peut également l'utiliser dans les applications télécom, en traduisant le signal utile non en impulsions électriques, mais en impulsions lumineuses. Mais les grandes distances exigent une pureté et une résistance mécanique parfaites, sans quoi une trop grande dispersion de la lumière conduit à une perte du message.

Fabrication des fibres de verre :

La production des fibres de verre par étirage mécanique est élaborée par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage (Pt-Rh), et percés (100-400 trous) à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2 mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffés (effet de Joule) à 1250 °C. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à une vitesse varie entre 10 et 50 m.s⁻¹. Les m. Avant d'atteindre le bobinoir, les diamètres obtenus sont compris entre 5 et 25 filaments sont rassemblés pour former un fil. Un fil est constitué de 100 à 2000 filaments

- 1-Four
- 2-Filière chauffée par l'effet de joule
- 3- Verre en fusion
- 4- Organe de dépôt d'ensimage
- 5- Organe d'assemblage.
- 6- Hélice d'encroissance.
- 7- Bobine.
- 8- Filaments unitaires
- 9- Fil de base.

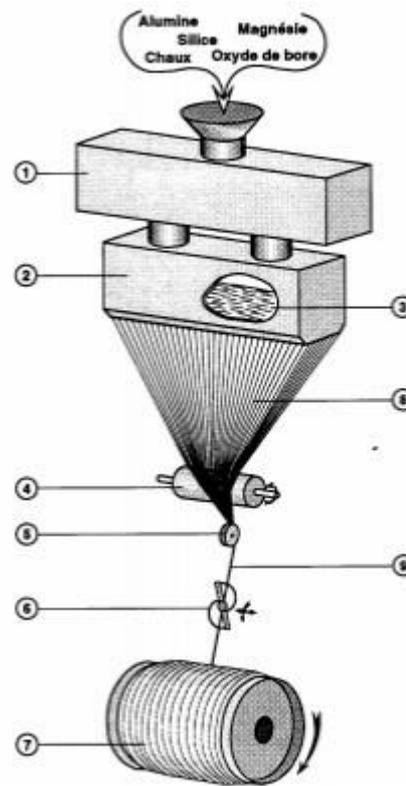


Figure 29 : production des fibres de verre par étirage mécanique

Propriétés des fibres de verre :

Le fibre de verre possède un certain nombre de propriétés qui méritent d'être prise en compte lors de la planification de son utilisation :

- résistance à la traction : il est exceptionnellement résistant à l'étirement, surpassant de nombreux matériaux traditionnels dans ce domaine,
- résistance à la corrosion : il ne se corrode pas, ce qui le rend idéal pour une utilisation en milieu humide ou chimique,
- isolation thermique et électrique : il isole parfaitement la chaleur et l'électricité, cruciales dans de nombreuses applications industrielles,
- léger : la légèreté du matériau le rend facile à transporter et à installer.

Les catégories de verres :

Selon leurs compositions, on distingue six types de fibres de verre : les verres E qui sont à usage général et qui présente de bonnes propriétés électriques, les verres D qui sont de hautes propriétés diélectriques, les verres A qui sont en haute teneur en Alkali, les verres C qui sont de bonne résistance chimique et les verres R et S qui sont de bonne résistance mécanique.

- Verre E:

La fibre de verre E est conçue en plusieurs étapes. D'abord, de l'oxyde de bore est ajouté à un mélange de silice, de chaux, d'alumine et de magnésie. L'oxyde alcalin est soigneusement exclu de cette préparation qui est chauffée jusqu'à 800 °C. La pâte en fusion commence à prendre une consistance visqueuse, puis liquide pour enfin se vitrifier. Elle doit être affinée à une température de

1 500 °C pour que les dernières bulles et impuretés disparaissent. La masse en fusion est alors parfaitement transparente et doit être filée pour produire un **fil de verre**. Ce fil est ensuite ensimé, bobiné puis séché.

Caractéristiques	Verre E
Diamètre du filament.	5 à 15 µm
Masse volumique.	2600 kg/m ³
Module d'Young.	73-75 GPa
Résistance à la traction.	3000 à 3400 MPa
Allongement à la rupture.	4%
Coefficient de poisson.	0,22

Tableau 18 : caractéristiques des verres de type E

On a recours aux fibres de verres à plusieurs occasions tels qu'en étant :

- Isolant électrique
- Isolant thermique
- Renfort divers
- Produits composites
- Transport
- Bâtiment
- Aéronautique
- Étanchéité pour porte de four
- Étanchéité pour tuyauterie
- Protection de câble gaine ou tuyau
- Calorifugeage
- Protection de bobine d'induction

- Verre A :
Pas utilisé dans les matériaux composites à cause de sa haute teneur en alcali (NaOH, KOH) qui le rend sensible à l'humidité.
- Verre D :
Est utilisé surtout pour ses propriétés. D'ÉLECTRIQUE, il sert à construire du matériel électronique à cause de sa grande perméabilité aux ondes électromagnétiques
- Verre C :
Caractérisé par une grande résistance chimique, particulièrement aux acides. Il est utilisé pour les couches superficielles des composites anti-corrosion.
- Verre R et S :
Ils sont à haute résistance mécanique à l'attraction. Principalement utilisé en aéronautique et en construction militaire de haut de gamme en très faible quantité parce qu'ils sont 5 fois plus chers que le verre E.

Diamètre de filament.	10 µm
Masse volumique.	2500 Kg/m ³
Module d'Young	85 GPa
Résistance à la traction.	4400 MPa
Allongement à la rupture.	5 %
Coefficient de poisson.	0,22

Tableau 19 : caractéristiques des verres R et S

Les fibres de verre peuvent être en Roving , Tissu ou Mat .

-Roving en verre : renfort en fibre de verre tissés en trames d'armatures taffetas est caractérisé par des fils de chaînes et d'armatures perpendiculaires Ce type de renfort est particulièrement adapté pour les pièces nécessitant une grande résistance mécanique en traction et en flexion. Pour renforcer une stratification et obtenir une épaisseur suffisante, il est souvent utilisé en complément du mat de verre. Cependant, lorsqu'il est disposé seul, le roving peut perdre de son efficacité et se délaminer. Il est généralement intercalé entre deux couches de mat pour garantir une solidité accrue et un meilleur accrochage.

Note : Le choix de l'épaisseur du roving dépendra des contraintes mécaniques auxquelles la pièce sera soumise. Les épaisseurs courantes sont le 300g/m², le 500g/m² et le 800g/m². L'utilisation de roving peut donc contribuer à améliorer les performances et la durabilité des pièces stratifiées.

Roving de verre considéré comme es fibres linéiques c'est à dire :

Pour un renforcement effectif dans le sens de la longueur de le fibre on définit : la longueur critique

$$L_c = \sigma_f \cdot d / 2\tau$$

Avec :

σ_f :résistance en traction

d: diamètre de la fibre

τ : résistance de la matrice de cisaillement



Figure 30 : roving en verre

-Mat en verre (fibre surfacique) le mat de verre est constitué de fibre de verre agglomérées avec un liant, sans orientation particulière, qui offre une déformation facile et une résistance élevée. Il est généralement utilisé comme première et dernière couche dans une stratification pour servir de support et permettre une meilleure adhérence des couches tissées.

Note: le mat de verre est disponible en différentes épaisseurs, les plus courantes étant 300 g/m², 450 g/m² et 600 g/m². Plus l'épaisseur est faible, plus la déformation est importante. Ce renfort est très utilisé pour les projets nécessitant une grande résistance et une bonne flexibilité.



Figure 31 :mat de verre

-Tissu : un ensemble surfacique de fils , de mèches ils sont constitués d'une chaîne et d'une trame .

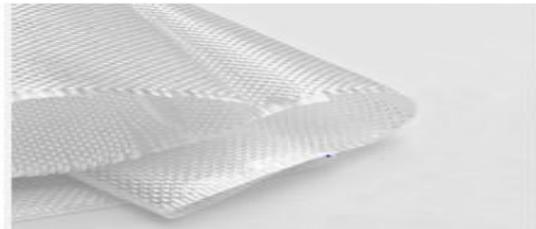


Figure 32 :tissu en verre

2/Fibre de carbone :

Introduction

La fibre de carbone sont utilisés dans l'industrie depuis la fin des années 60. Elles font l'objet d'une production. Il est utilisation croissante depuis une vingtaine d'années avec comme principaux secteurs concernés les sports et loisirs aéronautiques, mais aussi des applications industrielles diverses. De nouvelles utilisations sont en cours de développement dans le secteur de l'industrie pétrolière, du bâtiment et des transports notamment.

Définition :

La fibre de carbone se compose de filaments extrêmement fins, entre 5 et 7 microns de diamètre. Ces filaments de carbone sont composés à plus de 90 % d'atomes de carbone, le reste étant principalement des atomes d'azote. Les atomes de carbone forment des plans graphitiques organisés en cristaux.

Les fibres de carbone sont composées de 90 à 97 % de carbone , moins de 10 % d'azote , environ 1% d'oxygène et moins de 1% d'hydrogène .

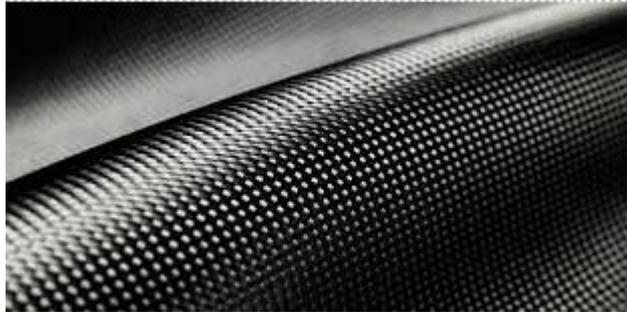


Figure 33 :fibre de carbone

Fabrication de fibre de carbone :

Les fibres de carbone sont produites à haute température par un procédé de carbonisation de l'un des trois matériaux précurseurs qui sont la rayonne (cellulose régénérée), la brai (issus de résidu de houille de pétrole) et le polyacrylonitrile $[(CH_2-CH-CN)_n]$ (PAN). La plus grande partie est réalisée à partir de PAN.

Le polyacrylonitrile est un polymère très cohésif. Il fait partie de la famille des acryliques.

L'acrylonitrile est polymérisé par voie radicalaire.

La fibre de carbone est produite à partir de fibre de polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres de PAN sont obtenues par polymérisation, filage puis étirage du polymère. Les chaînes polymériques obtenues ont ainsi une orientation dans le sens de l'axe des filaments essentielle pour obtenir les propriétés de la fibre de carbone.

- La première étape du procédé de carbonisation, appelée oxydation, consiste à rendre la fibre de polyacrylonitrile ininflammable. L'oxydation se produit entre 200 et 300 °C. Durant cette étape, la tension du fil permet de garder l'orientation de chaînes polymériques.
- L'étape suivante, appelée carbonisation, consiste à ne conserver que les atomes de carbone. Avec des températures de l'ordre de 1 500 °C, la fibre de polyacrylonitrile oxydée réagit sous atmosphère inerte pour former les plans graphitiques caractéristiques de la fibre de carbone.
- La fibre de carbone peut éventuellement subir un deuxième traitement thermique à des températures supérieures à 2 000 °C. Sous l'effet de la chaleur, la structure cristalline de la fibre de carbone se modifie permettant d'obtenir des fibres de carbone à haut module.
- La fibre de carbone subit ensuite un traitement de surface : une électrolyse chimique. Elle permet de greffer des groupes oxygène à la surface des filaments. Ces groupes réactifs vont ensuite réagir avec l'ensimage. L'ensimage permet à la fibre de réagir avec la matrice polymère du composite. Cette réaction permet une mise en œuvre optimale pour l'application visée.

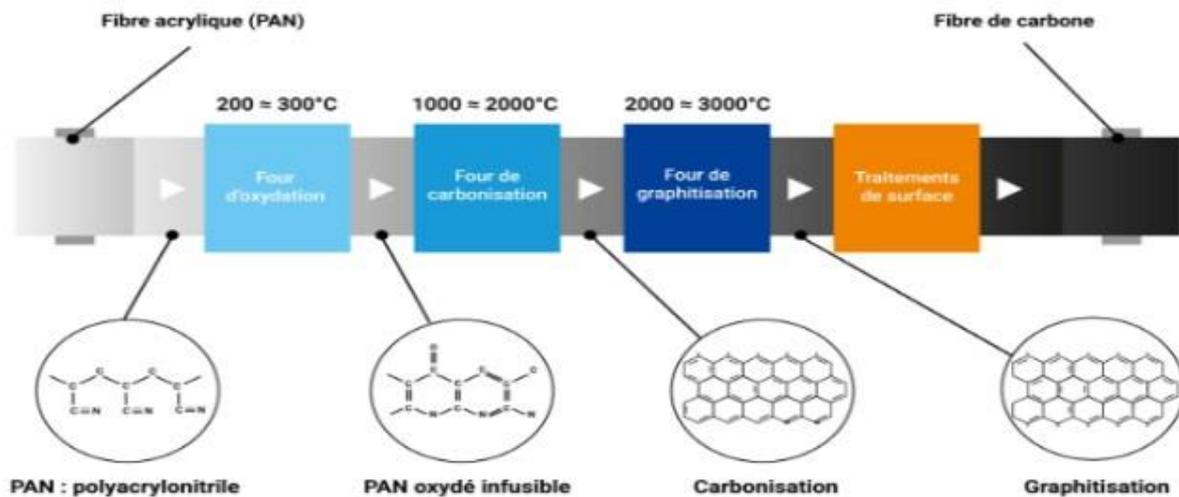


Figure 34 : processus de fabrication des fibres de carbone

Caractéristiques physiques des fibres de carbone :

Les fibres de carbones sont caractérisées par leur faible densité , leur résistance élevée à la traction ,leur souplesse , leur bonne conductibilité électrique , leur tenue en température (à plus de 2500 dans un milieu inerte) , leur faible coefficient de dilatation thermique et leur inertie chimique (sauf à l'oxydation).

Les propriétés physiques et mécaniques des fibre dépendent elles-mêmes de la nature chimique du précurseur , des conditions chimiques et physiques de fabrication des fibres de précurseur , des procédés et de condition de traitement thermique du précurseur .

Selon les procédés de fabrication mis en œuvre , en particulier les conditions thermiques on distingue les fibres "Haut Module (HM)" et les fibres "Haute Résistance (HR)"

Les HM ont un coefficient d'élasticité plus élevé contrairement au HR qui sont plus résistant à la traction.

Fibre	Densité (g/cm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Coefficient d'élasticité (GPa)
Fibre de carbone à base de PAN	1,70- 1,80	2400-2750	193-241
Fibre de carbone à base de Brai	2	2000	345

Tableau 20 :Propriétés physique et chimiques des fibres de carbone

Utilisation des fibres de carbone dans le renforcement des structures

Depuis les années 90, on répare et on renforce des structures à l'aide de laminés de carbone (généralement des plats ou des joncs). Ces interventions se font sur des ponts, des parkings, des immeubles, des installations industrielles, des silos, des digues, des cheminées... Aujourd'hui, l'usage de renforts composites pultrudés en fibre de carbone sur des structures en béton est une méthode de renforcement reconnue et efficace. Elle est bien plus performante que l'utilisation de plaques en acier (lourdes et vulnérables à la corrosion).

Avantages de l'utilisation de la fibre de carbone pour le renforcement du béton

L'utilisation de la fibre de carbone pour le renforcement du béton présente de nombreux avantages. Tout d'abord, la fibre de carbone est extrêmement résistante, ce qui permet d'améliorer considérablement la résistance et la durabilité du béton. Elle offre également une plus grande résistance aux contraintes, ce qui permet de réduire les risques de fissures et de dommages structurels. De plus, la fibre de carbone est légère, ce qui facilite sa manipulation et son installation. Elle permet également de réduire le poids total de la structure en béton ce qui peut être bénéfique dans les projets de construction nécessitant une charge légère. Enfin, la fibre de carbone offre une meilleure résistance aux conditions environnementales tels que les intempéries, les produits chimiques et la corrosion, ce qui prolonge la durée de vie du béton renforcé. En résumé, l'utilisation de la fibre de carbone pour le renforcement du béton offre de nombreux avantages en termes de résistance, de durabilité et de performance globale.

Processus d'application de la fibre de carbone sur le béton :

Le processus d'application de la fibre de carbone sur le béton est relativement simple mais nécessite une expertise. Tout d'abord, il est important de préparer la surface du béton en la nettoyant et en la débarrassant de toute saleté ou de tout revêtement existant. Ensuite, un adhésif spécifique à base de résine est appliqué sur la surface du béton. Une fois que l'adhésif est sec, les feuilles de fibre de carbone sont découpées à tailles appropriées et appliquées sur la surface en utilisant une pression ferme pour assurer une adhérence maximale. Les feuilles de fibre de carbone peuvent également être stratifiées pour une résistance supplémentaire si nécessaire. Une fois que la fibre de carbone est en place, une couche de finition est appliquée pour protéger la surface et assurer une finition esthétique.

Application et exemples de projets utilisant la fibre de carbone pour le renforcement du béton

Il existe de nombreuses applications et exemples de projets utilisant la fibre de carbone pour le renforcement du béton. Par exemple, dans le domaine de la construction des ponts, la fibre de carbone peut être utilisée pour renforcer les poutres et les colonnes, augmentant ainsi leur résistance et leur durabilité. De même, dans les projets de rénovation et de préparation des bâtiments, la fibre de carbone peut être utilisée pour renforcer les murs, les planchers et les fondations, améliorant ainsi leur capacité à résister aux charges et aux contraintes. De plus, la fibre de carbone peut également être utilisée dans la construction de tunnels, de barrages et d'autres structures nécessitant une grande

résistance et durabilité. En résumé, l'utilisation de la fibre de carbone pour le renforcement du béton offre de nombreuses possibilités et avantages dans le domaine de la construction.

3/Fibre aramide

Définition :

L'aramide (dont le nom chimique est para phénylène-téréphtalamide ou PPD-T) est une **fibre chimique et synthétique**, apparue dans les années 1960. Chimiquement, il s'agit de polymères thermoplastiques (d'origine pétrochimique) constitués de noyaux aromatiques, séparés par des groupes amides.

Les fibres d'aramide sont constituées de filaments jaunes d'une dizaine de microns de diamètre assemblés en fils. Le diamètre des fibres d'aramide est compris entre 12 et 15 µm. Les aramides sont d'une grande légèreté et ont des propriétés mécaniques et thermiques exceptionnelles. Certains types d'aramides présentent une excellente résistance à la traction, la chaleur et la rupture.

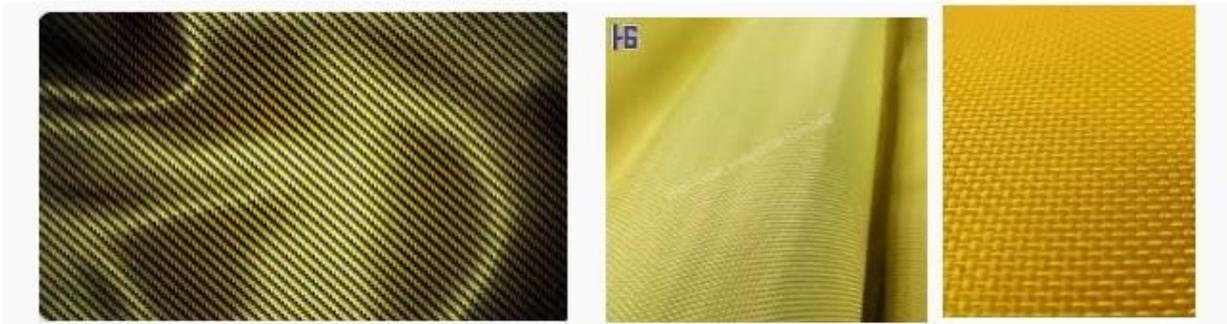


Figure 35 :fibre aramide

Différents types de fibre d'aramide

Fabrication des fibres d'aramide :

Les fibres d'aramide sont des fibres organiques artificielles obtenus en trois étapes :

- Étape de polymérisation: réaction des diamines aromatiques et de dichlorure d'acides aromatiques
- Mise en solution du polymère dans de l'acide sulfurique
- Filage par voie humide avec coagulation dans l'eau
- Traitement thermique et étirage (Pour les fibres à haut modules)

Il existe dans le commerce plusieurs type d'aramide qui se différencient on note :

- Les para-aramides
- Les méta-aramides
- Les copolymères des para-amides

Ces matériaux existent soit sous la forme de filaments continus , de fibre coupées (de 40 à 80 mm), de fibres courtes (2 à 15 mm) ou de pulpe jusqu'à 3mm

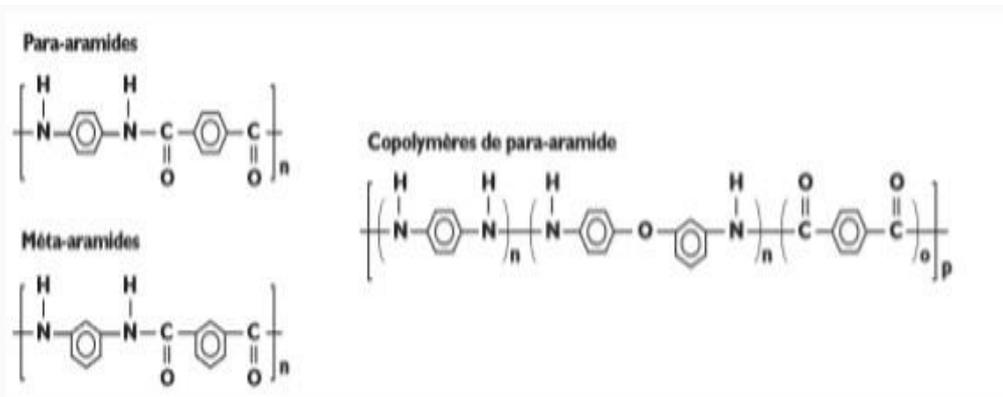


Figure 36 : formule chimique des fibres aramide

Caractéristiques physiques :

Les fibres de Kevlar ont comme propriétés d'allier la légèreté, la ténacité, la stabilité chimique et thermique. Elles supportent des températures élevées pouvant aller jusqu'à 300°C. De plus, les fibres présentent une bonne stabilité dimensionnelle et à haute température, elles ne se rétractent, ne fondent pas, mais carbonisent

Propriétés mécaniques de Kevlar

La résistance à la traction du Kevlar est comprise entre environ 2,6 et 4,1 GPa. C'est plus que le double de celui des fibres classiques. La rupture en traction de ces fibres commence aux extrémités des fibrilles et se propage par rupture en cisaillement entre les fibrilles.

	Densité g/cm ³	Module de Traction GPa	Résistance A la traction GPa	Allongement à La traction %
Kevlar 29	1,44	83	3,6	4
Kevlar 49	1,44	131	3,6	2,8
Kevlar 129	1,47	186	3,4	2,0

Tableau 21 :propriétés mécaniques du KEVLAR

En tension, le kevlar se comporte élastiquement, et en compression, il présente un comportement non linéaire et ductile. Il présente un rendement aux déformations en compression de 0,3 à 0,5 %. Les fibres d'aramide sont réputées pour leur ténacité et leur tolérance générale aux dommages. Le Kevlar 29 a le module le plus bas et la ténacité la plus élevée et un allongement à la traction d'environ 4 % . Le module de traction et la résistance du Kevlar 29 est à peu près comparables à ceux de la fibre de verre (S ou E), alors que sa densité est presque la moitié de celle du verre. C'est l'avantage, de fibre de Kevlar pour des applications où on veut un poids plus léger .

Application du Kevlar

Ce polymère est utilisé dans de nombreux domaines pour sa tolérance élevée aux chocs et à l'usure :

- industrie aéronautique et aérospatiale
- automobile de compétition
- industrie textile : renfort de vêtements et voiles de bateau
- matériel sportif : snowboard, ski, escrime, raquettes ou cordage.

Il existe différents types de Kevlar, dont la résistance plus ou moins grande trouve des applications différentes dans l'industrie.

Le kevlar ordinaire est principalement utilisé pour le renforcement des pneus et d'autres caoutchoucs. Le **kevlar 29** possède différentes applications industrielles : fabrication de câbles, de casques et de gilets pare-balle, doublure de freins, renforcement des coques de bateaux.

Le **kevlar 49**, qui présente la plus grande résistance à la traction de tous les aramides, sert au renforcement de coques et à la fabrication de certaines pièces d'avions et de cadres de vélos.

Procédés de fabrication des composites à matrice polymère

Les processus de fabrication des composites évoluent très rapidement pour s'adapter aux volumes de production, géométries complexes et aux exigences de qualité. Historiquement, les premiers procédés de production des composites à matrice organique étaient le moulage par contact et le moulage par pulvérisation. Aujourd'hui, ces procédés sont rarement utilisés pour les composites à matrice organique à cause de leurs faibles taux de production et de la variabilité de la qualité des pièces finales. Les procédés de fabrication les plus utilisées aujourd'hui sont par la voie humide, ou procédés LCM (Liquid Composite Molding), regroupent : le procédé par injection (RTM) et les procédés par infusion (LRI).

Le procédé par injection (RTM)

Le procédé RTM classique correspond au moulage par injection de résine dans un moule rigide et fermé. Ce procédé est relativement similaire aux procédés standards d'injection de pièces en plastique à la différence près que le moule n'est initialement pas vide, mais contient un renfort fibreux sec. Dans ce procédé, l'écoulement de la résine à travers le renfort fibreux est généralement orienté dans le plan des nappes de fils (renfort). Après réticulation totale de la résine, la pièce finale peut être démoulée.

Les avantages

Les principaux avantages du RTM résident dans l'utilisation d'un moule totalement clos induisant un bon contrôle dimensionnel des pièces fabriquées. Ce contrôle de la géométrie implique également une bonne maîtrise macroscopique du taux volumique de fibres et des propriétés mécaniques directement liées.

Une régulation de la pression permet d'avoir une bonne gestion des vitesses d'écoulement et ainsi une meilleure maîtrise des paramètres du procédé.

Les inconvénients

Le principal inconvénient provient du coût des moules, limitant l'utilisation à de grandes séries. L'augmentation de la taille des pièces induit une augmentation des efforts et il est parfois difficile de garantir une bonne étanchéité et une faible déformation des moules. Pour les pièces complexes de grandes dimensions, il apparaît également des difficultés de remplissage du moule (zones sèches).

Il est possible de résoudre ces problèmes en utilisant une stratégie d'injection adaptée mais ces études sont généralement longues et coûteuses en plus de nécessiter de nombreux essais .

Moulage par infusion (LRI)

Le moulage par infusion est un procédé moderne de mise en œuvre des matériaux composites. Elle consiste à la mise sous vide, dans un moule fermé par une bâche, des renforts secs qui sont imprégnés par la suite avec l'arrivée de résine qui est aspirée par la dépression créée dans le moule. Cette technologie autorise la réalisation de pièces monolithiques (faible et forte épaisseur), pseudo sandwich et sandwich

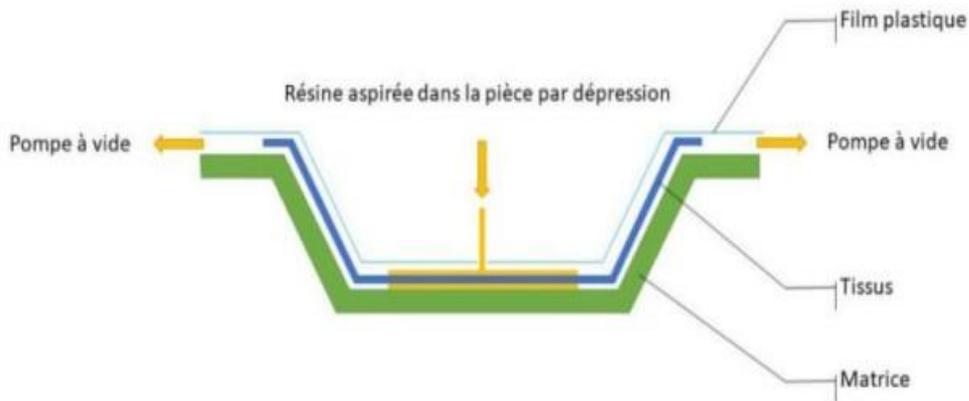


Figure 37 : projection par RTM

Les avantages

– L'infusion de la résine est le plus souvent réalisée dans l'épaisseur dans le but d'optimiser les distances parcourues et les temps de fabrication. De plus, cette stratégie d'élaboration réduit très largement les problèmes de zones sèches pouvant être observés en RTM sur des pièces de grandes dimensions.

Les pièces ainsi créées présentent une meilleure homogénéité ainsi des taux volumiques de fibres proches de 60% (objectif visé pour les composites dits hautes performances).

– L'utilisation d'un demi-moule, en plus d'être un gain financier, permet d'être plus polyvalent en offrant la possibilité de réaliser des pièces de différentes épaisseurs avec le même outillage .

Inconvénients

– Tout comme le procédé RTM, le développement de ces procédés sur des pièces de formes complexes engendre une mise au point délicate et actuellement principalement basée sur une approche expérimentale par essais/erreurs. L'ensemble de la préforme étant sous vide, une attention particulière doit être apportée aux fuites pour garantir une qualité de pièces parfaite ainsi qu'un bon état de surface (pour éviter les gradients de propriétés et les zones sèches).

–La prévision de l'épaisseur finale d'une pièce composite est un peu complexe.

Chapitre III

Application des règlements aux dalles mixtes avec Tôle en profilés

Définition de la dalle mixte :

Une dalle mixte comporte une tôle mince profilée en acier conçue pour développer une collaboration structurale efficace avec le béton du plancher qu'elle va recevoir. Les dalles mixtes sont tout indiquées pour les applications dans les bâtiments en acier où elles peuvent, moyennant une connexion, développer une action composite avec les poutres de plancher en acier.

Une dalle mixte est une dalle dans laquelle des plaques nervurées en acier sont utilisées initialement comme coffrage permanent et collaborent ensuite structurellement avec le béton durci pour agir comme armatures de traction dans le plancher fini. On peut également définir une dalle comme une dalle constituée d'une tôle d'acier nervurée, profilée à froid, recouverte d'une dalle de béton comportant des armatures (un treillis d'armature). De telles dalles sont utilisées dans les structures porteuses de plancher composées de poutrelles métalliques. Dans ce mode de construction, la tôle nervurée a plusieurs fonctions

Types de tôles profilées en composites :

Les tôles profilées assurent diverses fonctions :

- Elles offrent une surface de travail lors de la construction
- Elles servent de coffrage lors du bétonnage du plancher
- Elles jouent le rôle d'armature inférieure pour le béton de la dalle

Une très grande variété de tôles profilées existe sur le marché. Ces tôles se distinguent à la fois par leur forme, leur hauteur, l'entre-axe de leurs nervures, le raidissage de leurs parois, leur mode de recouvrement entre tôles et la manière dont l'action composite avec le béton est assuré

- Cette grande variété dans les tôles profilées permet de satisfaire la plupart des domaines à couvrir dans la construction des bâtiments à ossature métallique. Elle permet en particulier de satisfaire facilement les critères :

- * d'isolation phonique,
- * de protection contre le feu,
- * de portée maximale et de charge maximale.

Disposition :

L'épaisseur des tôles profilées varie de 0,75 mm à 1,5 mm; en pratique, on la choisit généralement entre 0,75 mm et 1,2 mm. Pour des raisons de protection vis-à-vis de la corrosion, les deux faces des tôles profilées sont habituellement galvanisées; la charge totale en zinc (pour les deux faces) est de l'ordre de 275 g/m². Ceci correspond à une épaisseur moyenne de zinc d'environ 20 µm sur chacune des faces de la tôle. Les goujons à tête peuvent être soudés au travers des tôles profilées, moyennant certaines précautions mentionnées plus haut. En pratique, on fait référence à des tôles de "faible" hauteur et à des tôles de "grande" hauteur. La hauteur des premières varie de 16 mm à 100 mm; elles autorisent des portées allant de 3,6 m (tôles non étayées) à 6,5 m (tôles étayées). Avec les tôles de

ANALYSE DES SOLLICITATIONS

L'application de méthodes linéaires d'analyse convient pour les états limites de services ainsi que pour les états limites ultimes. Lorsque des charges concentrées ponctuelles ou linéaires parallèles à la portée de la dalle, doivent être supportées par celle-ci, il est permis de les considérer comme réparties sur une largeur b_m mesurée juste au-dessus des nervures des tôles, comme indiqué sur la figure 39, et obtenue par la formule suivante :

$$b_m = b_p + 2(h_c + h_f) \quad (1.1)$$

Où

b_p est la largeur de la charge concentrée perpendiculairement à la portée de la dalle, h_c est l'épaisseur de la dalle au-dessus des nervures de la tôle profilée et h_f est l'épaisseur des finitions éventuelles.

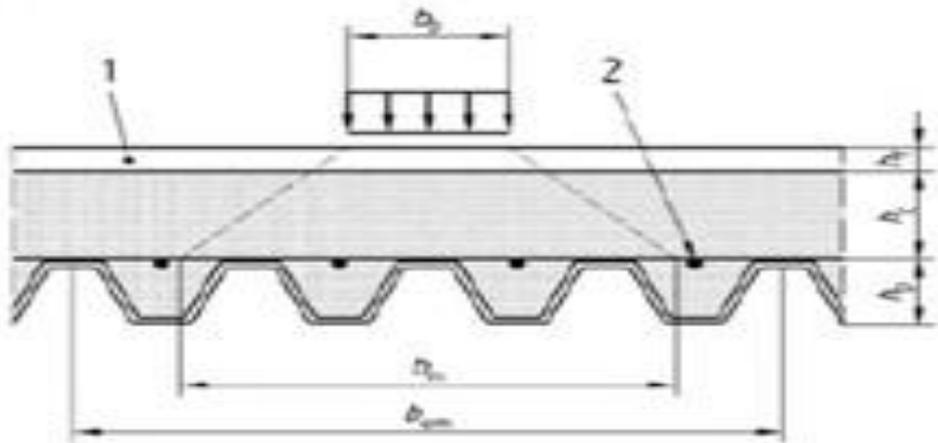


Figure 39 : Répartition de charge concentrée

(a) Pour le cisaillement longitudinal et la flexion :

- Pour les travées à appuis simples et les travées de rives de dalles continues :

$$b_{em} = b_m + 2L_p \left[1 - \frac{L_p}{L} \right] \leq \text{largeur de la dalle} \quad (1.2)$$

- Pour les travées intermédiaires de dalles continues :

$$b_{em} = b_m + 1.33L_p \left[1 - \frac{L_p}{L} \right] \leq \text{largeur de la dalle} \quad (1.3)$$

- (b) Pour le cisaillement vertical :

$$b_{ev} = b_m + L_p \left[1 - \frac{L_p}{L} \right] \leq \text{largeur de la dalle} \quad (1.4)$$

Où :

L_p est la distance mesurée entre le centre de la charge et l'appui le plus proche et L est la longueur de la travée.

Afin d'assurer la répartition des charges ponctuelles ou linéaires sur la largeur considérée comme participante, une armature transversale doit être placée au dessus de la tôle. Cette armature transversale doit être calculée conformément à l'Eurocode 2 pour les moments fléchissant transversaux. Il est permis d'utiliser une armature transversale forfaitaire si les charges d'exploitation caractéristiques ne dépassent pas les valeurs suivantes :

- Charges concentrée : 7,5kN
- Charge répartie : 5,0 kN/m²

Il convient que cette armature transversale forfaitaire ait une aire de section d'au moins 0,2% De l'aire du béton situé au dessus des nervures et qu'elles s'étende sur une largeur d'au moins b_{em}

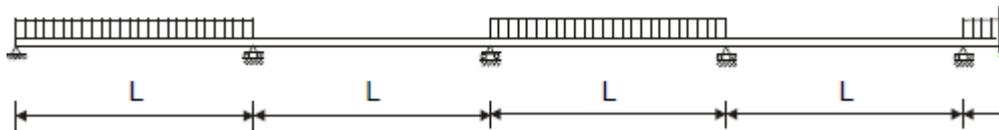


Figure 40 :chargement de la dalle

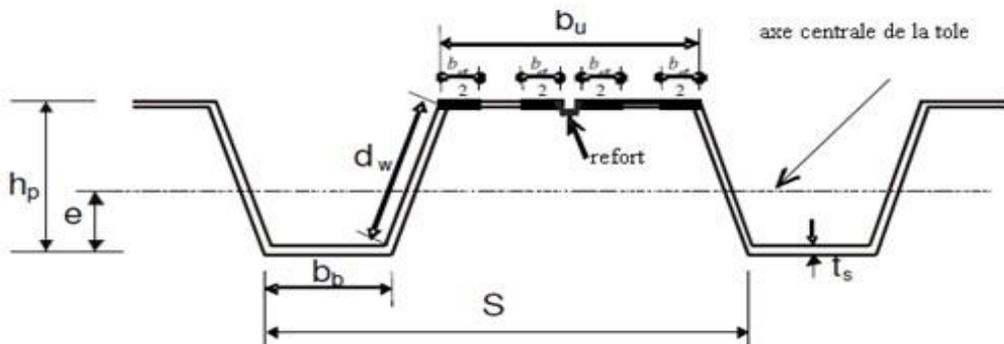


Figure 41 : section efficace de la tôle

e est le centre de gravité de la section efficace de la tôle ;

$$e = \frac{h_p [(2b_{eff} - t_s) + (d_w - t_s)]}{b_b + 2b_{eff} + 2d_w}$$

b_{eff} est la largeur efficace de la tôle ;

$$b_{eff} = \frac{857t_s}{b\sqrt{f_{yp}}} \left[1 - \frac{187t_s}{\sqrt{f_{yp}}} \right] \leq \frac{b_u - 15}{2} \quad (1.8)$$

I_{eff} est le moment d'inertie de la section efficace de la tôle ;

$$I_{eff} = \frac{b}{S} \left\{ t_s \left[b_b e^2 + 2b_{eff} (h_p - t_s - e)^2 + \frac{2d_w h_p^2}{12} + 2d_w \left(\frac{h_p}{2} - \frac{t_s}{2} - e \right)^2 \right] \right\} \quad (1.9)$$

h_p est la hauteur de la tôle.

$$W_{eff.t} = \frac{I_{eff}}{h_p - \frac{t_s}{2} - e} \quad (1.10)$$

$$W_{eff.b} = \frac{I_{eff}}{e} \quad (1.11)$$

VERIFICATION DE LA DALLE MIXTE

Etat limite ultime

La résistance d'une dalle mixte doit être suffisante pour supporter les charges admises et pour garantir qu'aucun état limite ultime n'est atteint, sur la base de l'un des modes de ruine présentés à la

- Section critique I (Flexion) due à la résistance à la flexion $M_{p,Rd}$
- Section critique II (Cisaillement longitudinal) due à la résistance au cisaillement longitudinal $V_{l,Rd}$
- Section critique III (Cisaillement vertical et poinçonnement) due à la résistance au cisaillement vertical $V_{v,Rd}$

- Flexion

La résistance à la flexion $M_{p,Rd}$ d'une section transversale quelconque doit être déterminée par la théorie plastique mais en prenant la limite d'élasticité de calcul de l'élément structural en acier (tôle) égale à $\frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}}$. On ne tiendra compte de la contribution de la tôle en composite pour la vérification de la résistance à la flexion sous moment négatif sur appui intermédiaire que si cette tôle est continue . elle est déterminée par la formule suivante :

$$M_{p,Rd} = N_{cf}(d_p - 0.5x) \quad (1.12)$$

A_p la section efficace de la tôle en composite en traction

d_p la distance entre le haut de la dalle et le centre de gravité de la section efficace de la tôle

x la hauteur du bloc de contrainte pour le béton, obtenu par

$$x = \frac{N_{cf}}{b \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c}} \quad (1.13)$$

b représente la largeur de la section transversale considérée.

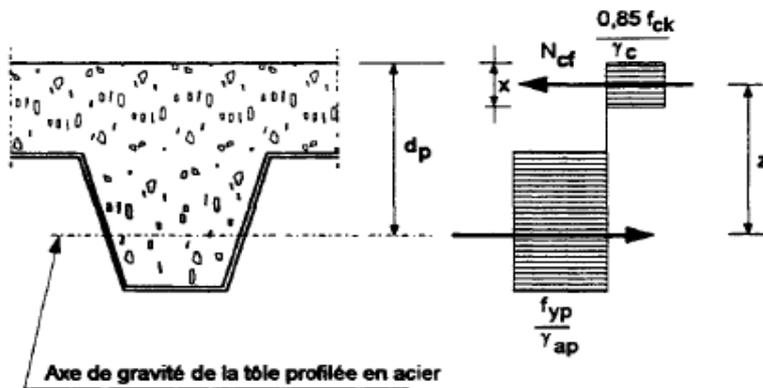


Figure 42 : Répartition des contraintes pour la flexion positive si l'axe neutre est situé au-dessus de la tôle

On calcule la résistance à la flexion positive d'une dalle mixte dont l'axe neutre est situé dans la tôle par mesure de simplification, de la façon suivante (en négligeant le béton situé dans les nervures) :

$$M_{p,Rd} = N_{cf}z + M_{pr} \quad (1.14)$$

Où

$$z = h_t - 0.5h_c - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{\frac{A_p f_{yp}}{\gamma_{ap}}} \quad (1.15)$$

M_{pr} est le moment résistant plastique de la tôle, obtenu par :

$$M_{pr} = 1.25M_{pa} \left[1 - \frac{N_{cf}}{\frac{A_p f_{yp}}{\gamma_{ap}}} \right] \leq M_{pa} \quad (1.16)$$

$$N_{cf} = h_c b \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1.17)$$

Et : M_{pa} est la valeur de calcul de la résistance à la flexion de la section transversale efficace de la tôle ;

h_t : Hauteur totale de la tôle ;

e : Distance entre le centre de gravité de la section efficace de la tôle et sa sous face ;

e_p : Distance entre l'axe neutre plastique de la section efficace de la tôle et sa sous face.

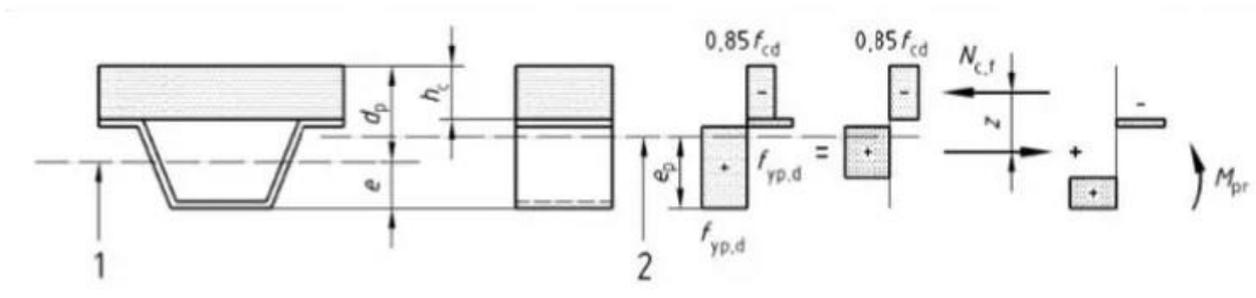


Figure 43 : Répartition des contraintes pour la flexion positive si l'axe neutre est situé dans la tôle en composite

- *Cisaillement longitudinal :*

$$V_{L.Rd} = b d_p \frac{m \frac{A_p}{b L_s} + k}{\gamma_{VS}} \quad (1.18)$$

Où b , d_p et L_s sont en mm

A_p est en mm^2

m et k sont en N/mm^2

L_s est la portée de cisaillement

m et k sont les valeurs de calcul pour les coefficients empiriques obtenus à partir d'essais

γ_{VS} est égal à 1.25

Pour le calcul, il convient de prendre L_s égale aux valeurs suivantes :

- $L/4$ pour une charge uniforme appliquée sur la totalité de la longueur de la travée ;
- La distance entre la charge appliquée et l'appui le plus proche pour deux charges égales et disposées symétriquement ;
- Pour les autres dispositions de charges, y compris une combinaison de charges concentrées asymétriques et réparties, il convient de procéder à une évaluation basée sur des mesures d'essais ou par calculs approchés.

La portée de cisaillement $L/4$ pour une charge uniformément répartie s'obtient en mettant en équation l'aire située sous le diagramme de l'effort tranchant pour la charge uniformément répartie et celle résultant d'un système de deux charges ponctuelles symétriques, les deux chargements ayant la même valeur. Ces deux cas sont illustrés dans la figure 1.12.

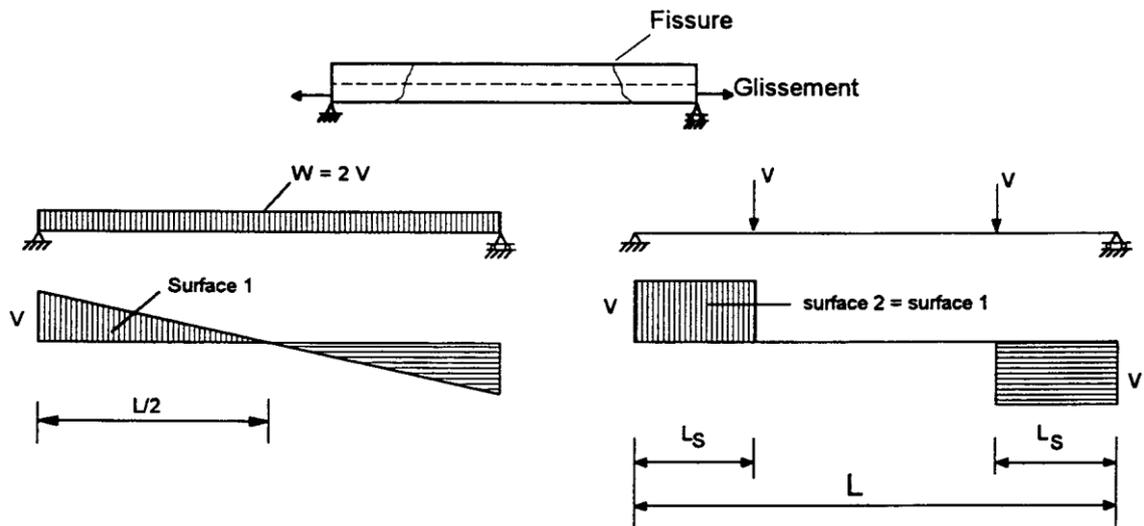


Figure 44 :Portée de cisaillement

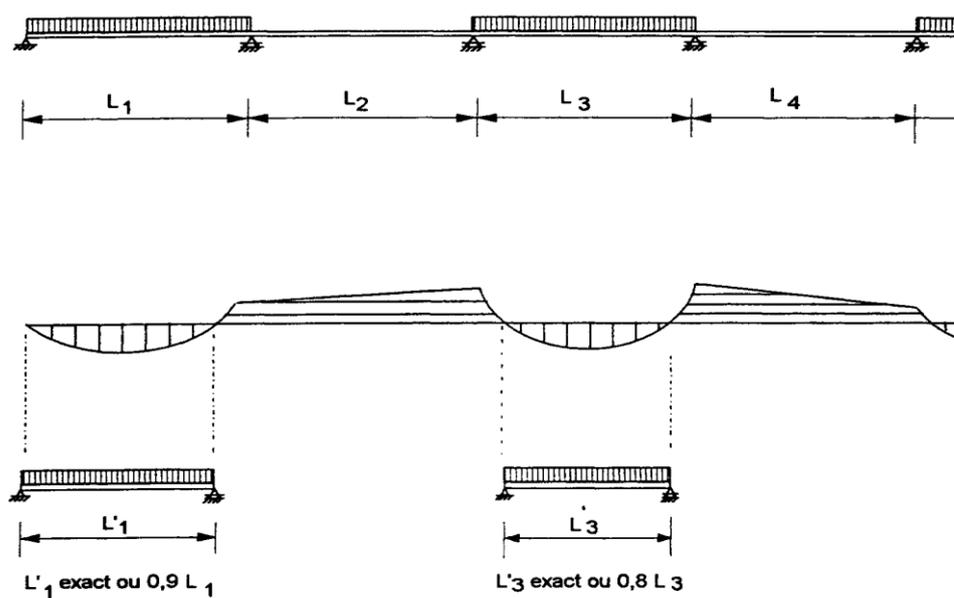


Figure 45 : Portée simple équivalente pour la détermination de la résistance au cisaillement

Méthode m-k

La méthode la plus utilisée permettant de prédire la résistance ultime au cisaillement longitudinal d'une dalle mixte est celle qui a été développée aux Etats-Unis, elle figure dans de nombreuses normes et règlements y compris dans l'Eurocode 4. Cette méthode semi-empirique consiste sur la base d'au moins six essais de dalles en poutre simple, à déterminer deux coefficients m et k

Si la méthode m-k est utilisée, il convient de démontrer que l'effort tranchant de calcul maximal V_{Ed} pour une largeur de dalle b n'est pas supérieur à la résistance au cisaillement de calcul $V_{1,Rd}$.

Pour les dimensionnements, il convient de prendre pour valeur de L_s :

- L/4 pour une charge uniforme appliquée sur la totalité de la travée
- la distance entre la charge appliquée et l'appui le plus proche pour deux charges égales et disposées symétriquement
- pour d'autres dispositions de charges y compris une combinaison de charges ponctuelles asymétriques et réparties, il convient d'effectuer une évolution basée sur des résultats d'essais ou sur le calcul approché suivant : on prend la portée de cisaillement égale au moment maximal divisé par l'effort tranchant maximal sur l'appui relatif à la travée considérée

$$L_s = \frac{M_{max, appui}}{V_{max, appui}}$$

Lorsque la dalle mixte est calculée comme continue, il est permis d'utiliser une portée isostatique équivalente pour la détermination de la résistance. il convient de prendre la longueur de portée égale

$$\text{à : } L_e = \begin{cases} 0,8 L \\ 0,9 L \end{cases}$$

0,8 L : pour les travées intermédiaires

0,9 L : pour les travées de rive

$$L_c = \frac{L_e}{4}$$

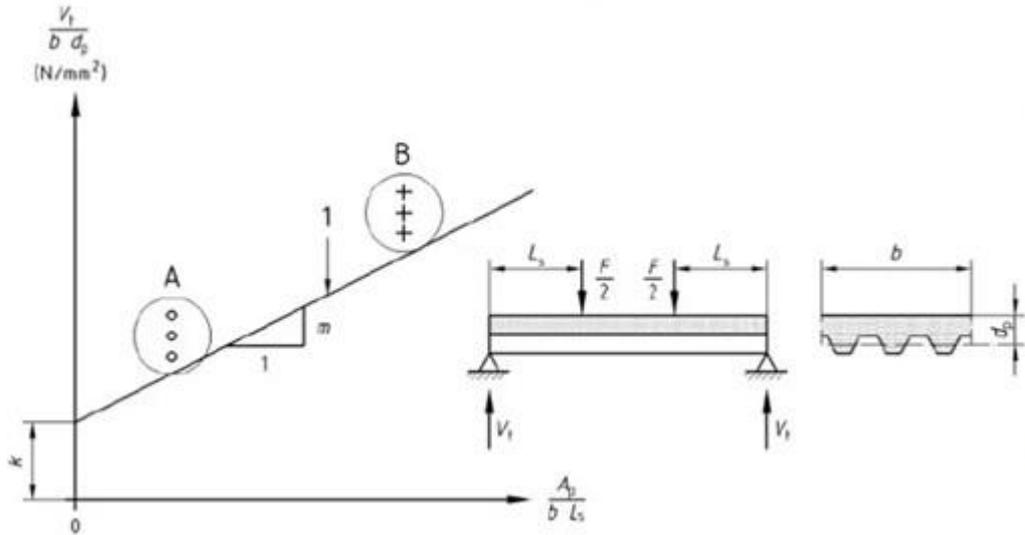


Figure 46 :Evaluation des résultats d'essai

Méthode de la connexion partielle pour les dalles mixtes

La méthode de la connexion partielle est autorisée comme alternative à la méthode $m-k$. Il convient de n'utiliser cette méthode de la connexion partielle que pour les dalles possédant un comportement ductile. Il est permis d'utiliser la méthode d'assemblage de la connexion partielle pour justifier les contributions d'un ancrage d'extrémité et d'une armature supplémentaire, à condition que les essais complémentaires aient démontré la validité de cette méthode. La résistance au cisaillement horizontal au niveau des interfaces armature-béton doit être déterminée au moyen d'essais effectués.

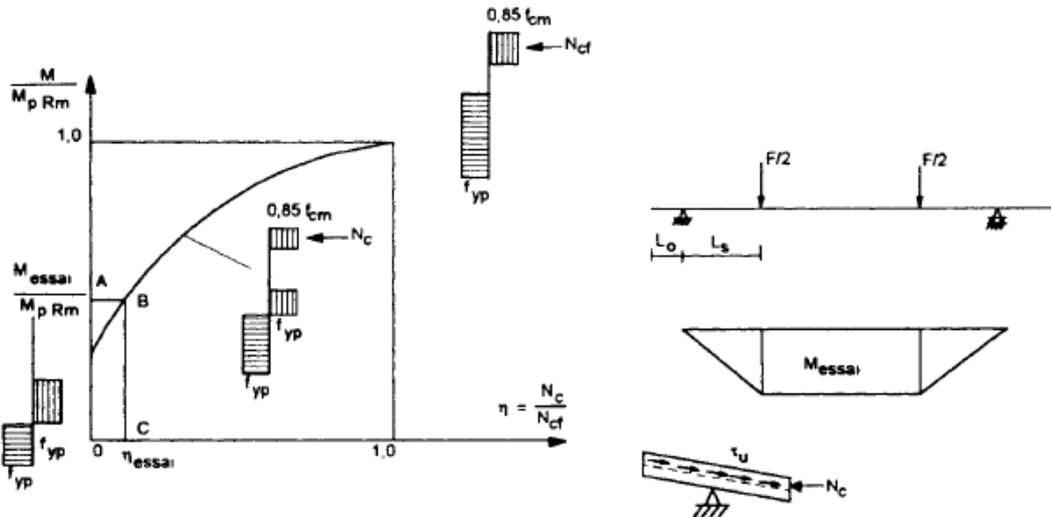


Figure 47 :Détermination du degré de connexion à partir du moment expérimental (M_{essai})

Il y a lieu de déterminer $M_{p.Rm}$ et N_{cf} au moyen de valeurs mesurées pour les dimensions et les résistances au lieu de valeurs de calcul. Les relations ci-après permettent de calculer la relation entre M et N_c :

$$M = N_c \times z + M_{pr} \quad (1.19)$$

Où

$$z = h_t - 0.5x - e_p + (e_p - e) \frac{N_c}{A_p f_{yp}} \quad (1.20)$$

$$x = \frac{N_{cf}}{b \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c}} \quad (1.21)$$

A partir des charges maximales appliquées, il est possible de déterminer le moment fléchissant M au niveau de la section transversale sous la charge ponctuelle due à la charge appliquée, au poids propre de la dalle et des poutres d'entretoisement. La branche A→B→C de la Figure 1.18 permet alors d'obtenir une valeur η pour chaque essai et une valeur τ_u à partir de la formule suivante :

$$\tau_u = \frac{\eta N_{cf}}{b(L_s + L_0)} \quad (1.22)$$

Où L_0 est la longueur du porte-à-faux.

Pour la vérification de la résistance au cisaillement longitudinal, on peut utiliser les valeurs de calcul des résistances des matériaux. Avec la résistance de calcul au cisaillement $\tau_{u,Rd}$, il est possible de déterminer le diagramme de calcul en interaction partielle (Figure 1.19). Dans ce diagramme, la résistance à la flexion M_{Rd} d'une section transversale située à une distance L_x est obtenue par la formule suivante :

$$L_{sf} = \frac{N_{cf}}{b \tau_{u,Rd}} \quad (1.23)$$

Pour $L_x \geq L_{sf}$, la connexion est totale ; donc la grandeur déterminante est la résistance à la flexion (ruine par flexion). Pour $L_x < L_{sf}$, la connexion est partielle ; donc la grandeur déterminante est la résistance au cisaillement longitudinal.

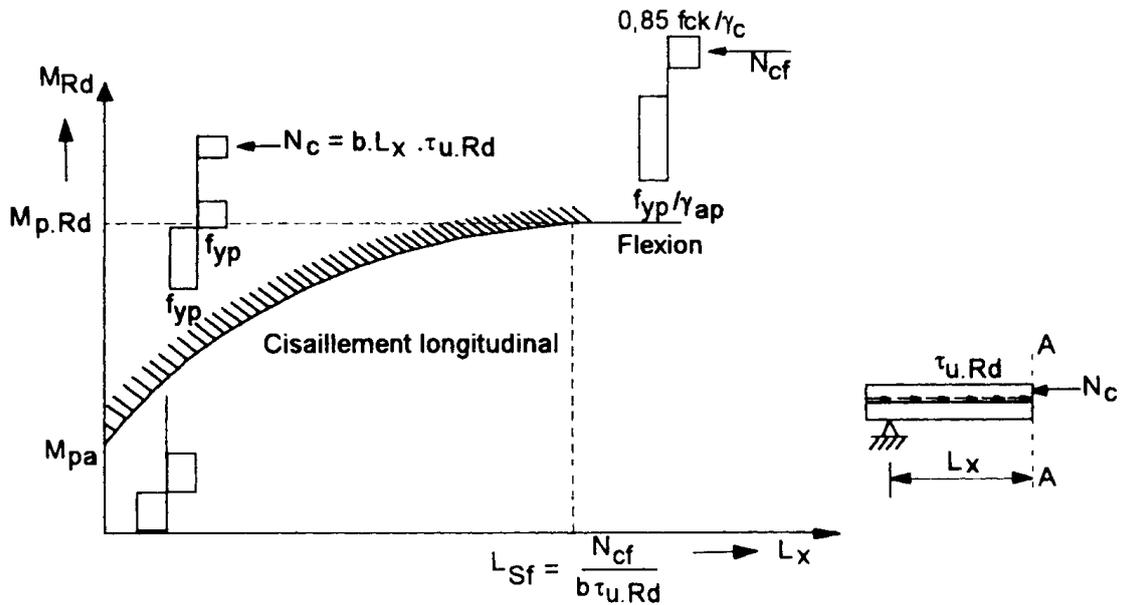


Figure 48 : Diagramme de calcul en interaction partielle

Au niveau d'une section transversale quelconque, il y a lieu de ne pas avoir une valeur du moment fléchissant de calcul M_{Sd} supérieure à la résistance de calcul M_{Rd} . La méthode de vérification est illustrée par la figure 1.20 pour deux dalles avec différents types de chargement et de portée.

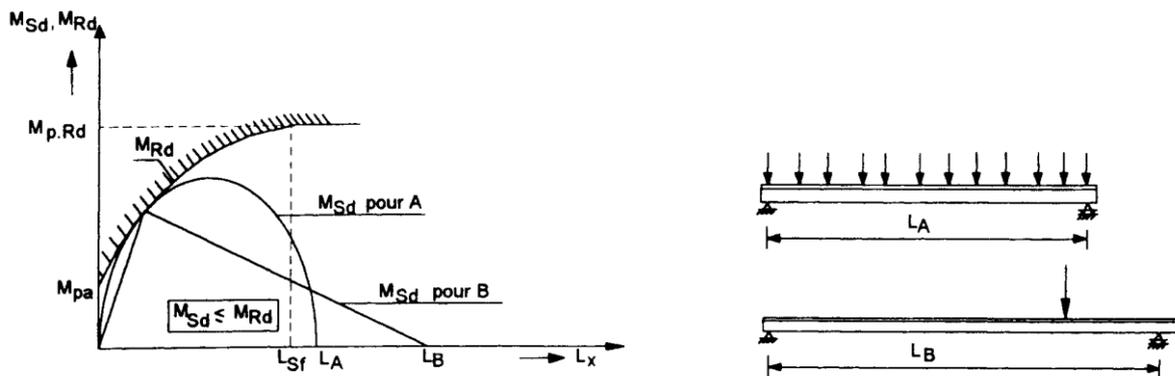


Figure 49 : Méthode de vérification

Pour la vérification des dalles mixtes avec encrage d'extrémité, il est possible de déterminer la résistance au cisaillement horizontal d'un ancrage d'extrémité par au moins trois essais complémentaires. Pour chaque essai, il convient de déterminer la valeur de η . La résistance de l'ancrage d'extrémité est déduite par la formule suivante :

$$V_l = \eta N_{cf} - \tau_{um} b (L_s + L_o) \quad (1.24)$$

Où τ_{um} est la valeur moyenne du τ_u déterminée par les essais effectués avec la même tôle mais sans ancrage d'extrémité.

Il y a lieu de prendre la résistance caractéristique de l'ancrage d'extrémité égale à la valeur minimale obtenue à partir de la totalité des essais réduite de 10%. La valeur de calcul V_{ld} est la résistance caractéristique V_{lk} divisée par $\gamma_v = 1.25$. Pour la détermination du diagramme de calcul en interaction partielle, il est permis de tenir compte de la contribution de l'ancrage d'extrémité en modifiant N_c de la façon suivante :

$$N_c = bL_x\tau_{u.Rd} + V_{ld} \quad (1.25)$$

Cela entraîne un décalage du diagramme fondamental dans le sens L_x sur une distance $\frac{V_{ld}}{V_{ld}}$

Dans le cas où l'on tient compte d'une armature inférieure supplémentaire, la modification du diagramme de calcul en connexion partielle et en calculant M_{Rd} est exprimée de la façon suivante (Figure 2.22) :

$$M_{Rd} = N_p z_1 + M_{pr} + N_{as} z_2 \quad (1.26)$$

Où

$$N_{as} = \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_s} \quad (1.27)$$

$$z_2 = d_s - 0.5x \quad (1.28)$$

$$z_1 = h_t - 0.5x - e_p + (e_p - e) \frac{N_p}{\frac{A_p f_{yp}}{\gamma_{ap}}} \quad (1.29)$$

$$x = \frac{N_p + N_{as}}{b \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c}} M_{pr} = 1.25 M_{pa} \left[1 - \frac{N_p}{\frac{A_p f_{yp}}{\gamma_{ap}}} \right] \leq M_{pa} \quad (1.30)$$

A_s est l'aire d'armature inférieure totalement ancrée à l'intérieure de la largeur b .

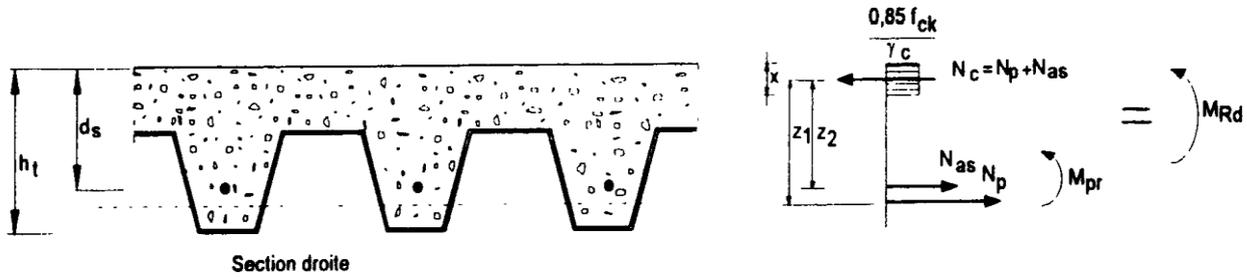


Figure 50 :Contribution d'une armature longitudinale supplémentaire

Il est possible de démontrer la validité de la méthode de connexion partielle pour des dalles mixtes avec armatures supplémentaire à partir de trois essais complémentaires effectués. Pour chaque essai, il convient de calculer le moment maximum théorique M_{pr} par l'utilisation de dimensions et résistances mesurées ;

$$N_p = b(L_s + L_0)\tau_{um} \quad (1.31)$$

Où τ_{um} est la valeur moyenne de τ_u déterminée par les essais effectués avec la même tôle mais sans armature supplémentaire.

La méthode de la connexion partielle est supposée valide si aucune résistance à la flexion obtenue à partir des essais n'est inférieure de plus de 10% à la valeur théorique.

- *Effort tranchant*

On devra déterminer la résistance à l'effort tranchant $V_{V.Rd}$ d'une dalle mixte sur une largeur égale à l'entraxe des nervures au moyen de l'équation suivante :

$$V_{V.Rd} = b_0 d_p \tau_c \quad (1.32)$$

$$\tau_c = k_1 k_2 \tau_{Rd} \quad (1.33)$$

Où : b_0 est la largeur moyenne des nervures de béton

$$b_0 = \frac{b_t + b_b}{2} \quad (1.34)$$

τ_{Rd} La résistance de base au cisaillement, à prendre :

$$\tau_{Rd} = 0.25 f_{ck} / \gamma_c \quad (1.35)$$

$$k_1 = (1.6 - d_p), k_2 = \left[1.2 + \frac{40t_s(b_b + d_w)}{\left(\frac{b_t + b_b}{2}\right)(h_t + e)} \right] \leq 2 \quad (1.36)$$

d_p est la distance entre le haut de la dalle et le centre de gravité de la section efficace de la tôle ;

$$d_p = h_t - e \quad (1.37)$$

e est le centre de gravité de la section efficace de la tôle ;

$$e = \frac{h_p[(2b_{eff} - t_s) + (d_w - t_s)]}{b_b + 2b_{eff} + 2d_w} \quad (1.38)$$

b_{eff} est la largeur efficace de la tôle ;

$$b_{eff} = \frac{857t_s}{b\sqrt{f_{yp}}} \left[1 - \frac{187t_s}{\sqrt{f_{yp}}} \right] \leq \frac{b_u - 15}{2} \quad (1.39)$$

Etat limite de service

Il convient que la flèche de la tôle sous sont poids propre plus du béton frais, mais à l'exclusion des charges de construction, ne dépasse pas $L/300$.

$$\delta_{dalle\ mixte} \leq L/300$$

Chapitre IV

Vérification des sections de la tôle profilé

INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de calculer les dimensions optimale pour une tôle en composite tout en s'appuyant sur le règlement EUROCODE 4 tout en respectant les conditions de chargement imposés qui doivent être justifiés pour au constructeur de trouver l'aspect économique et le matériaux le plus résistant tout en restant dans l'intervalle de sécurité .on a proposé les facteurs de sécurités suivants :

- Béton : $\gamma_c = 1.5$
- Armature de renfort $\gamma_s = 1.15$
- Tôle profilée $\gamma_p = 1.1$

Pour les constituants de la dalle mixte, on a conservé les mêmes matériaux proposés au deuxième chapitre (tableau 2.1).

CONDITIONS DE CHARGEMENT

Selon, la réglementation le poids propre de la tôle profilée est donné par relation :

$$g_p = 78.5 \times A_p \quad (4.1)$$

Poids propre de la dalle en béton est exprimé par :

$$g_c = 23 \times A_c \quad (4.2)$$

Les charges de construction sont :

$$q_{m1} = 1.5 \frac{kN}{m^2} \quad (4.3)$$

De même pour les charges de finitions

$$q_{m2} = 1.0 \frac{kN}{m^2} \quad (4.4)$$

Une série de charges imposées peut être proposée :

$$Q = (2.0; 4.0; 6.0 \text{ kN/m}^2) \quad (4.5)$$

Les charges données aux équations (4.1) à (4.5) sont des charges séparées, dont chacune a une action spécifique. La tôle profilée et la dalle se trouvent sous des sollicitations complexes. Pour la tôle, les résultantes des charges en état limite ultime et l'état limite de service sont exprimées :

➤ Etat limite ultime

$$q_{d1} = 1.3(g_p + g_c + q_{m1}) \quad (4.6)$$

➤ Etat limite de service

$$q_{d2} = g_p + g_c \quad (4.7)$$

➤ Etat limite ultime

$$q_{d3} = 1.3(q_{m2} + g_p + g_c) + 1.6Q \quad (4.8)$$

➤ Etat limite de service

$$q_{d4} = q_{m2} + g_p + g_c + Q \quad (4.9)$$

ACTIONS INTERNES

Pour la tôle profilée soumise à un chargement de flexion, le moment pour une dalle simplement appuyée est donné par :

$$M_{sd} = \frac{q_{d1} l^2}{8} \quad (4.10)$$

$$M_{Rd} = W_{eff} f_{yd} \quad (4.11)$$

Avec :

$$f_{yd} = \frac{f_{yp}}{\gamma_p} \text{ et } W_{eff.b} = \frac{I_{p.eff}}{e}$$

La flèche est exprimée par :

$$w_{act} = \frac{5}{384} \times \frac{q_{d2} l^4}{E_p I_{p.eff}} \quad (4.12)$$

Pour la condition $w_{all} = \frac{l}{180} \leq 20$

Le moment de flexion d'une dalle simplement appuyée

$$M_{sd} = \frac{q_{d3} l^2}{8} \quad (4.13)$$

$$M_{pl} = N_p \times z \quad (4.14)$$

Avec :

$$N_p = \frac{f_{yp}}{\gamma_p} A_p$$

Pour la dalle, la condition du cisaillement longitudinal est exprimée par :

$$V_u \leq V_l \quad (4.15)$$

Avec :

$$V_l = \frac{z}{\gamma(E_p I_{p.eff} + E_{c.eff} I_{c.eff})} \times \frac{q_{d3} l^2}{8} \times \left(1 - \frac{4(ch(0.5\lambda l) - 1)}{\lambda^2 l^2 ch(0.5\lambda l)} \right) \quad (4.16)$$

$$V_{ud} = \frac{q_{d3} \times l}{2} \quad (4.17)$$

V_{ud} est l'effort tranchant maximal ;

V_{ld} est le cisaillement longitudinal maximal.

L'effort tranchant est vérifié par la condition :

$$V_u \leq V_r \quad (4.18)$$

Avec :

$$V_u = \frac{q_{d3} \times l}{2} \quad (4.19)$$

$$V_r = b_0 d_p \tau_c \quad (4.20)$$

Où

V_u est l'effort tranchant maximal ;

V_r est la résistance à l'effort tranchant ;

b_0 est la largeur moyenne des nervures de béton ;

τ_c est la contrainte de cisaillement limite.

La flèche d'une dalle mixte simplement appuyée est déjà définie au chapitre précédent comme suite :

$$w_{act} = \frac{5q_{d4}l^4}{384E_{eff}I_{eff}} + \frac{q_{d4}}{\lambda^4 D} \left(\frac{1}{ch(0.5\lambda l)} + \frac{\lambda^2 l^2}{8} - 1 \right) \quad (4.21)$$

Pour la condition $w_{all} = l/300$

VERIFICATION DES SECTIONS

*Vérification des tôles profilées en composite
utilisées comme coffrage*

A l'état limite ultime, la condition vérifiant le moment de flexion est exprimée par :

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \quad (4.22)$$

Ou bien :

$$\frac{1.3 \left[\left(\left(78.5t_s + \frac{0.55}{s} \right) \times \left(\frac{b_b + b_u + 2d_w}{s} \right) \right) + 19 \left(h_c + \frac{0.5(b_b + b_t)h_p}{s} \right) + q_{m1} \right]}{8} \leq \quad (4.23)$$

$$\frac{\frac{b}{S} \left(\frac{1}{12} b_b t^3 + b_b t (e - 0.5t)^2 + \frac{1}{12} b_u t^3 + b_u t (h_p - e - 0.5t)^2 + 2 \left(\frac{1}{12} d_w t h_p^2 + d_w t (0.5h_p - e)^2 \right) \right)}{e} \left(\frac{f_{yp}}{\gamma_p} \right)$$

Où :

$$b_u = s - b_t \quad ; \quad d_w = \sqrt{\left(h_p^2 + \left(\frac{b_t - b_b}{2} \right)^2 \right)} \quad (4.24)$$

A l'état limite de service, la condition vérifiant la flèche est assurée par la condition :

$$w_{act} \leq w_{all} \quad (4.25)$$

Ou bien :

$$\frac{5}{384} \frac{E_p b \left[\left(\left(78.5t_s + \frac{0.55}{s} \right) \times \left(\frac{b_b + b_u + 2d_w}{s} \right) \right) \right]^4}{S \left(\frac{1}{12} b_b t^3 + b_b t (e - 0.5t)^2 + \frac{1}{12} b_u t^3 + b_u t (h_p - e - 0.5t)^2 + 2 \left(\frac{1}{12} d_w t h_p^2 + d_w t (0.5h_p - e)^2 \right) \right)} \leq \frac{l}{180} \leq 20mm \quad (4.26)$$

Vérification de la dalle mixte

La même chose est faite pour la dalle mixte, ou la condition vérifiant le moment de flexion à l'état limite ultime est donnée par :

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \quad (4.27)$$

ou bien

$$\begin{aligned} & \frac{(1.3q_{m2} + 1.6Q)l^2}{8} \\ & \leq \frac{f_{yp}}{\gamma_p} t_s \frac{(b_b + b_u + 2d_w)}{s} \\ & \times \left(h_t - e - 0.5 \frac{\frac{f_{yp}}{\gamma_p} t_s + \frac{(b_b + b_u + 2d_w)}{s}}{b \frac{0.85f_{ck}}{\gamma_c}} \right) \quad (4.28) \end{aligned}$$

La condition vérifiant le cisaillement longitudinal est assurée par la condition :

$$V_u \leq V_l \quad (4.29)$$

Ou bien :

$$\begin{aligned} & \frac{(1.3q_{m2} + 1.6Q) \times l}{2} \leq \\ & \frac{\left(h_t - e - 0.5 \frac{\frac{f_{yp}}{\gamma_p} t_s + \frac{(b_b + b_u + 2d_w)}{s}}{b \frac{0.85f_{ck}}{\gamma_c}} \right) (1.3q_{m2} + 1.6Q)l^2}{\gamma(E_p I_{p.eff} + E_c I_{c.eff})} \frac{1}{8} \\ & \times \left(1 - \frac{4(ch(0.5\lambda l) - 1)}{\lambda^2 L^2 ch(0.5\lambda l)} \right) \quad (4.30) \end{aligned}$$

Où α , γ et λ sont déjà exprimées aux chapitres 2 et 3.

Pour l'effort tranchant, on doit vérifier la condition :

$$V_u \leq V_r \quad (4.31)$$

$$\frac{(1.3q_{m2} + 1.6Q) \times l}{2} \leq b_0 d_p \tau_c \quad (4.32)$$

Où

$$b_0 = \frac{b_t + b_b}{2} \quad (4.33)$$

$$\tau_c = k_1 k_2 \tau_{Rd} \quad (4.34)$$

$$k_1 = (1.6 - d_p) \quad (4.35)$$

$$k_2 = \left[1.2 + \frac{40t_s(b_b + d_w)}{\left(\frac{b_t + b_b}{2}\right)(h_t + e)} \right] \leq 2 \quad (4.36)$$

$$d_p = h_t - e \quad (4.37)$$

$$\tau_{Rd} = \frac{0.25f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4.38)$$

A l'état limite de service, la condition vérifiant la flèche est assurée par :

$$w_{act} \leq w_{all} \quad (4.39)$$

Ou bien

$$\frac{5(q_{m2} + Q)l^4}{384E_{eff}I_{eff}} + \frac{(q_{m2} + Q)}{\lambda^4 D} \left(\frac{1}{ch(0.5\lambda L)} + \frac{\lambda^2 l^2}{8} - 1 \right) \leq \frac{l}{300} \quad (4.40)$$

Avec :

$$D = \frac{(q_{m2} + g_p + g_c + Q)}{(E_p I_{p,eff} + E_c I_{c,eff})} - \frac{(q_{m2} + g_p + g_c + Q)}{E_{eff} I_{eff}} \quad (4.41)$$

APPLICATIONS

La présente application concerne, la détermination des principales caractéristiques géométriques de la dalle et de la tôle profilée en fonction du chargement imposé, de la longueur de la dalle et de l'épaisseur de la tôle profilée. En se servant des cinq équations offrant les conditions de la flèche, du moment de flexion, de l'effort de tranchant et le cisaillement longitudinal à l'état limite de service et l'état limite ultime pour la dalle et la tôle profilée.

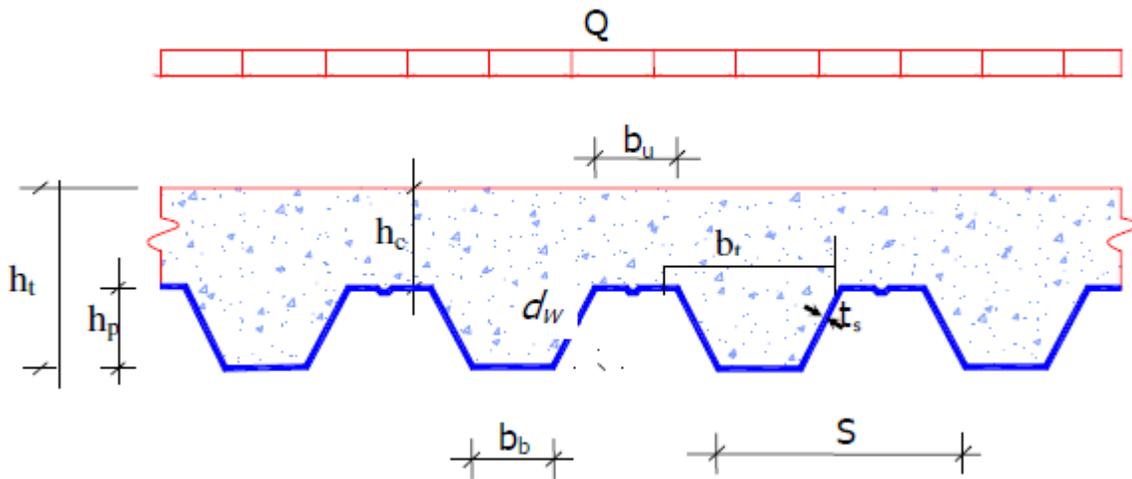
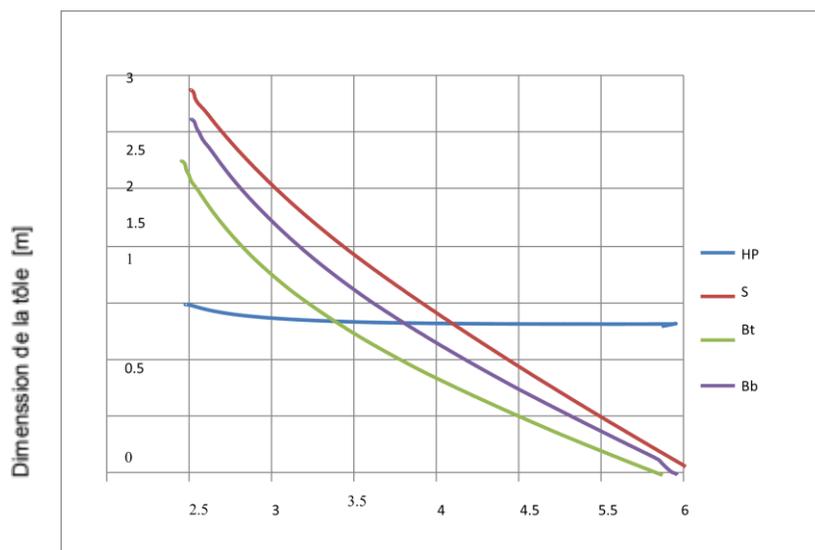


Figure 51 : Dimensions de la tôle profilée



Longueur de la dalle (m)

Figure 52 :Variation des dimensions de la tôle sous une charge imposée $Q=4.0 \text{ kN/m}^2$.

92

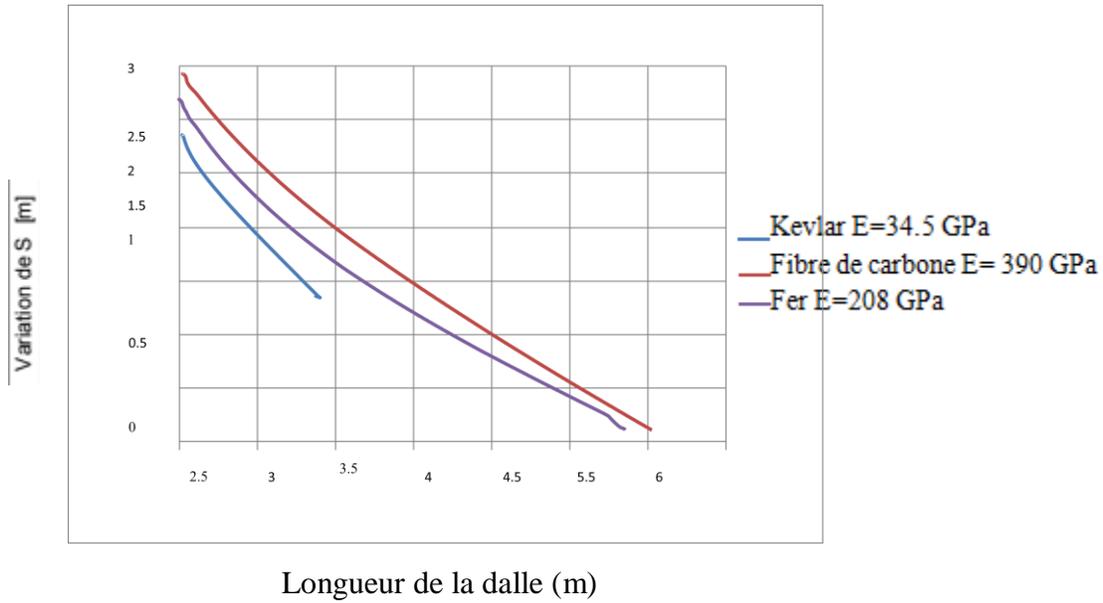


Figure 53 :Variation de S en fonction du matériau de la tôle (kevlar ; fibre de carbone et fer)

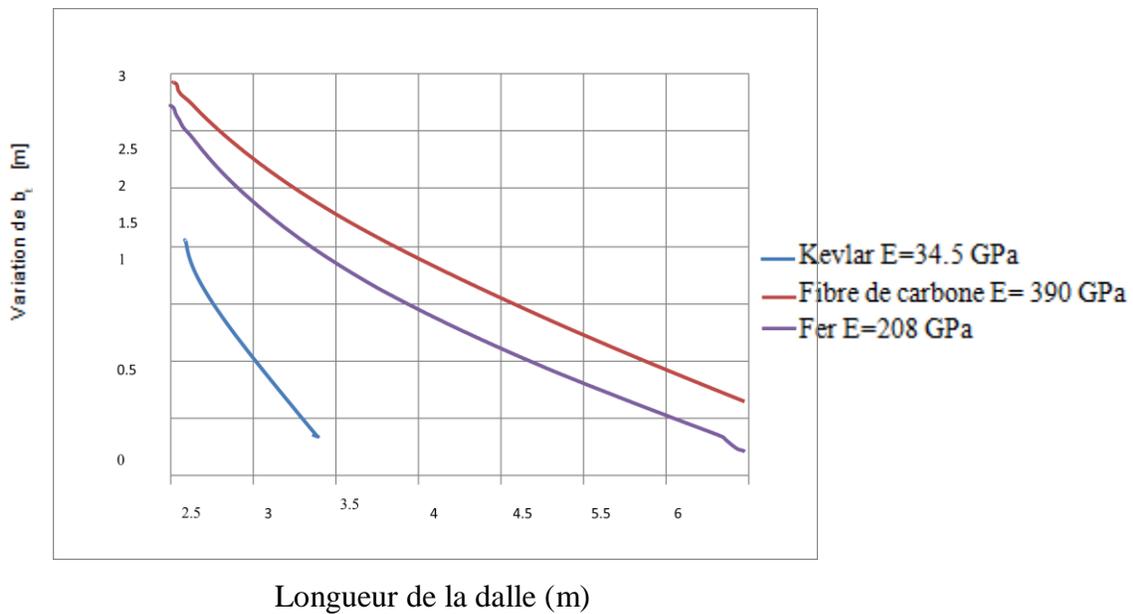


Figure 54 :Variation de b_t en fonction du matériau de la tôle (kevlar ; fibre de carbone et fer)

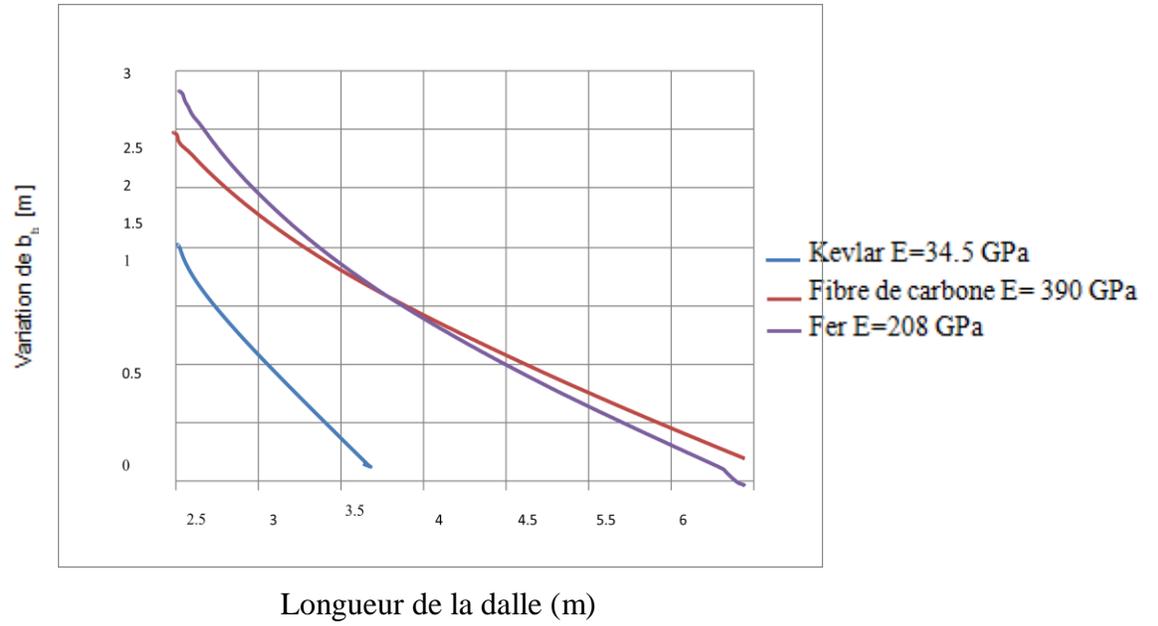


Figure 55 : Variation de b_b en fonction du matériau de la tôle (kevlar ; fibre de carbone et fer)

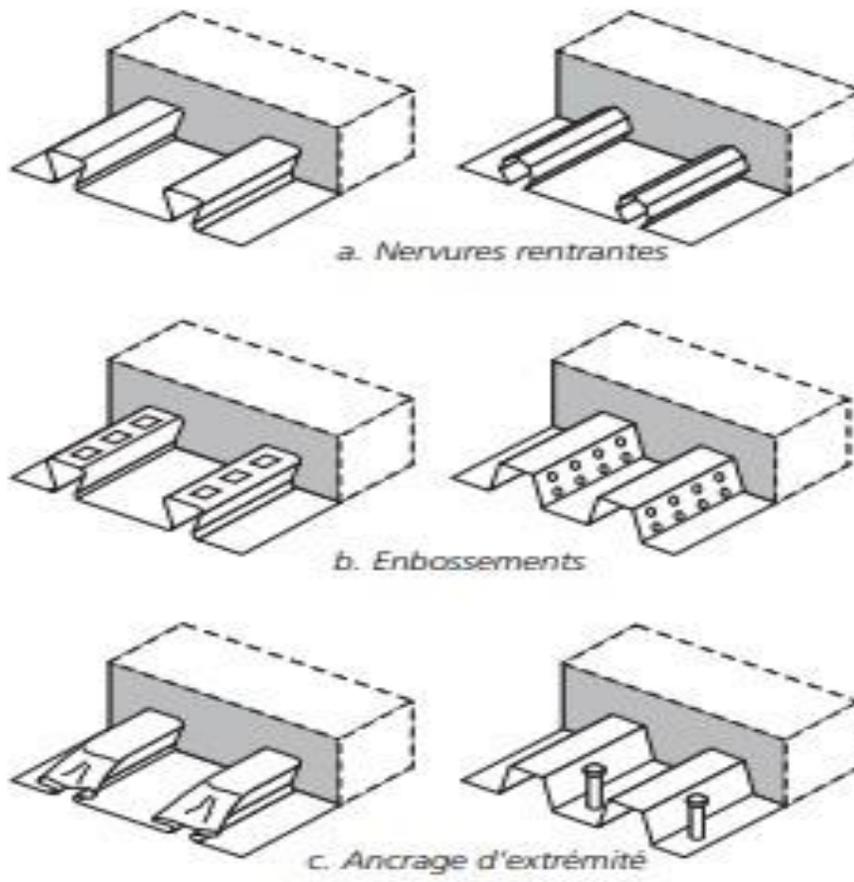


Figure 56 :Types de tôles profilées

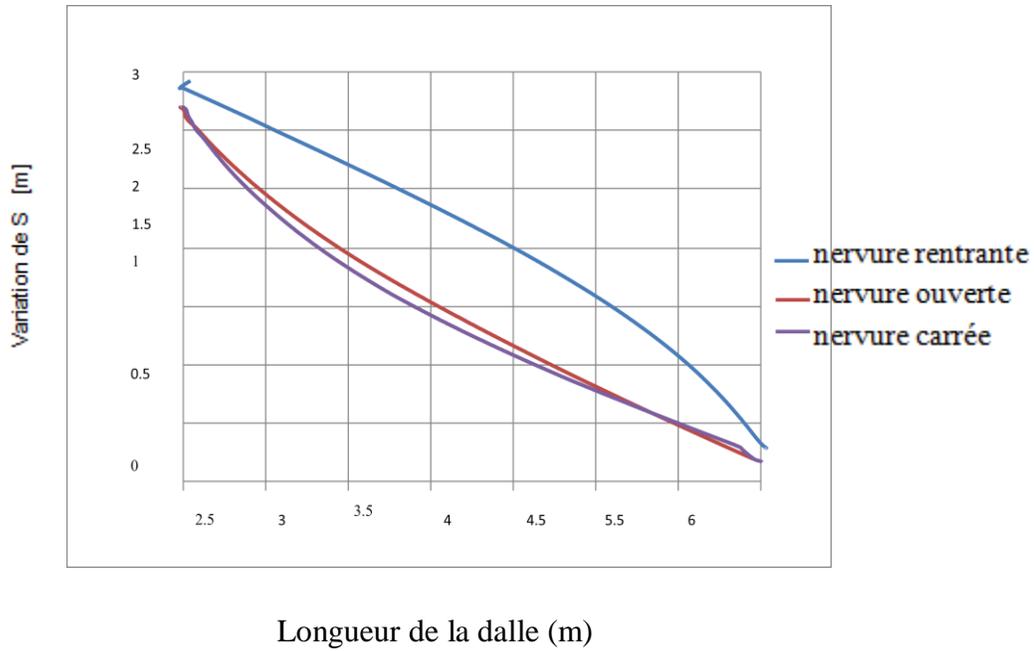


Figure 57 : Variation de S en fonction des formes de nervures

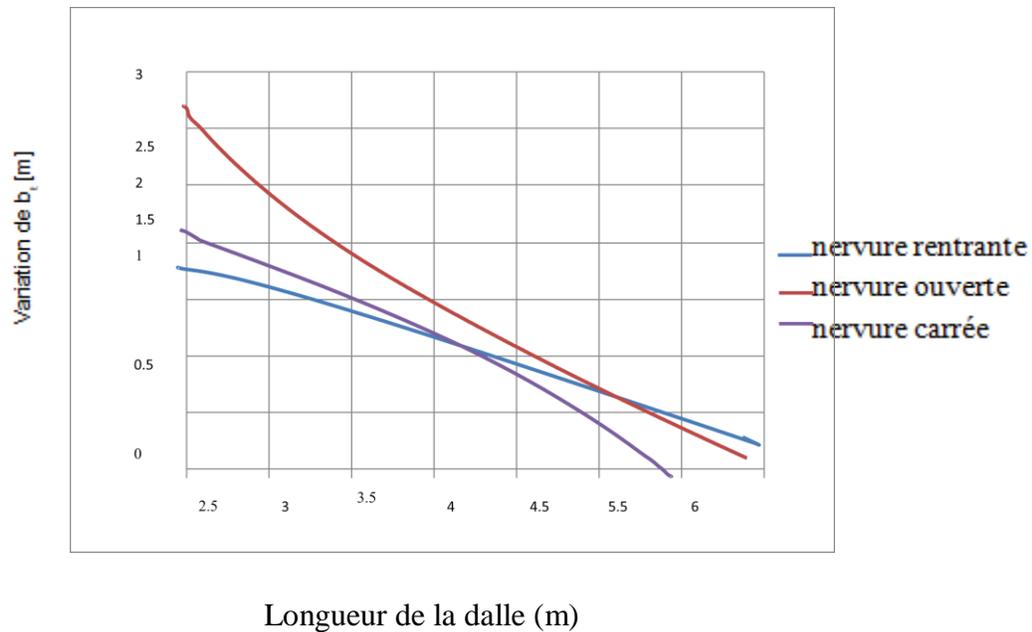


Figure 58 : Variation de b_t en fonction des formes de nervures

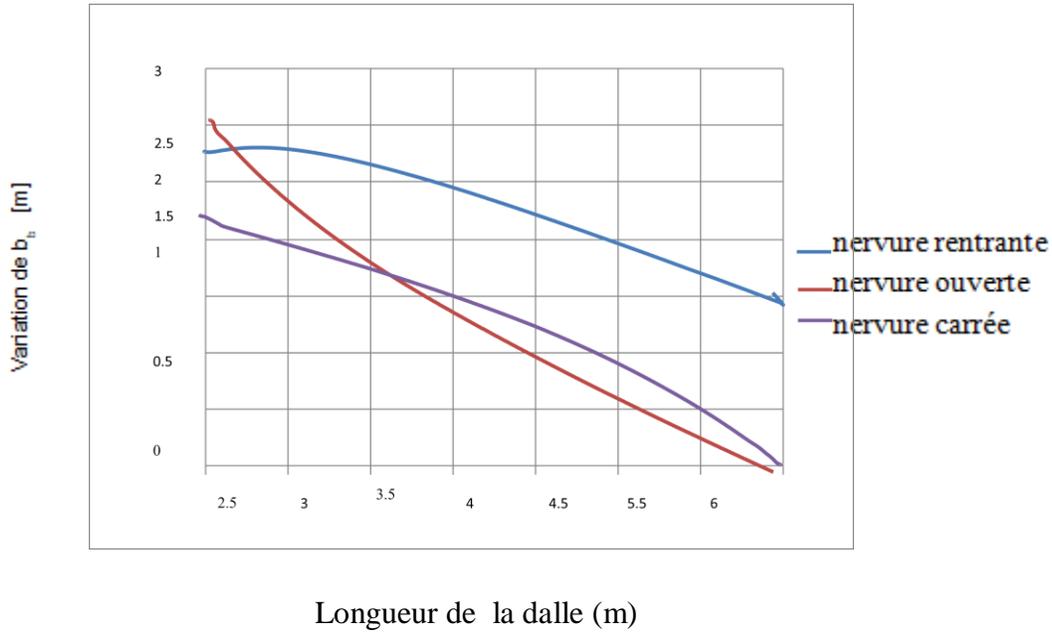


Figure 59 : Variation de b_b en fonction des formes de nervures

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La principale motivation d'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des structures est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques.

Les matériaux composites présentent aussi une quasi-insensibilité à la fatigue en comparaison des matériaux métalliques qui nécessitent en maintenance un suivi régulier de la propagation des fissures de fatigue dans les pièces de structure.

De plus, les matériaux composites ne sont pas sujet à la corrosion. Cependant, ils nécessitent une bonne isolation électrique lors des assemblages avec des pièces en alliage léger entre le composite et le métal pour éviter la corrosion galvanique de l'aluminium si la fibre de renfort est en carbone.

Les techniques de fabrication des matériaux composites permettent l'obtention de formes complexes directement par moulage avec possibilité de réaliser en une seule pièce un ensemble, qui en métal nécessiterait plusieurs sous-éléments. Cela permet de réduire les coûts d'assemblage de façon importante. De par la structure et les procédés de fabrication des composites, les concepteurs de pièces composites peuvent positionner dans une pièce la matière aux endroits où elle est nécessaire et aligner les fibres de renfort dans les directions des efforts de la pièce. Pour retirer tout le bénéfice de l'utilisation des composites sur une structure, il est donc impératif au niveau du bureau d'étude de disposer d'une filière complète composite pour concevoir les pièces en fonction du matériau et du procédé de mise en œuvre le plus adapté .

C'est ce que nous avons constaté dans ce travail que les matériaux composites varie selon la nature du matériau et leur résistance vis-à-vis de la tôle selon les normes de l'Eurocode 4 .

Référence Bibliographique

www.rapid-direct.com (thermoplastique et thermodurcissable)

www.fiberdowels.com (fibre de verre vs acier)

www.separk.fr (les propriétés de la résine époxydique)

<http://epoxy.europe.eu> (les époxy un coup d'œil)

<http://PSLS.ws> (making epoxy resin)

www.these.fr (synthèse caractérisation et développement des résines)

<http://ENSCN.fr> (synthèse des résines phénoliques bio-sourcées)

<https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/> (résines époxy réticulées par des polyamines : structure et propriétés)

<https://www.rtprototype.com> (resin definition,properties)

https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-sets/epoxy-resin#google_vignette

<https://www.resinlibrary.com/product/epoxy-laminating-resin>

UMMTO.DZ (effet de la contrainte thermique diélectrique de la résine époxyde utilisée dans l'isolation des machines électriques)

<https://www.pascalrosier.com> (résine et mousse polyuréthane)

Université Tiaret (polycope de cours « les composites »)

www.texonic.com (propriété des fibres)

Université Tiaret (polymère et composite)

www.technoform.com (polyamide)

Université Biskra (généralité sur les matériaux composites)

<https://ecomposite.fr/difference> entre roving et mat)

www.tolser.com (fiber of glass)

www.beetonprovincial.com (béton renforcé de fibres)

www.finalmaterial.com (fibre aramide)

www.Toray-cfe.com (Fibres de carbone)

<http://perso-crans.org> (matériaux composites)

<https://www.epsilon-composite.com> (matériaux composites et fibre de carbone)

<https://www.infosteel.be> (construction mixte acier-béton)

<https://www.dupontdenemours.fr> (fibre kevlar)

<https://www.protolabs.com> (thermoplastique vs thermodurcissable : que se passé t'il sous l'action de la chaleur)

<https://www.scribd.com/document/438105494/les-fibres-de-verre-docx>

http://www.strres.org/fichier-utilisateur/fichiers/matinee_technique/27_11_2013_diagnostic_des_chlorures_bernard_quenee_lem.pdf

<https://www.amp-composite.com> (les composites)

<http://fsm.univ-tiaret.dz> (les composites)

<https://eduscol.education.fr> (matériaux composites et structures composites)

<https://doc.lerm.fr> (pathologie la corrosion des armatures)

<https://www.scribd.com/document/436222833/Chapitre-1-Les-Pathologies-Du-Beton>

<https://www.mcours.net/cours/pdf/hassbg/hassbgli159.pdf>

<https://www.over-view.fr/2017/11/les-pathologies-du-beton>

<http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/3050/1/TH.M.GC.FR.2020.31.pdf>

<http://dspace.univ-tebessa.dz> (modélisation de l'attaque des chlorures dans le beton en presence d'incertitudes en utilisant le code « fib34 »)

<https://coursexosup.blogspot.com/2015/06/ciments.html>

<https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/SB-OA-2014-2.pdf>

<https://gm.univ-batna2.dz> (Liants et bétons)

<https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/9536/1/eprint9536.pdf>

<http://elearning.univ-djelfa.dz> (élaboration des fibres de verre et optique)

<https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>

<https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/pdf/CT-B51-2.pdf>
<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-calcul-du-dosage-du-beton>

analysis of deflection of composite slabs with profiled sheeting up to the ultimate moment (J.VALIVONIS G.MARCIUKAITIS B.JONAITIS)

analysis of longitudinal shear behaviour for composite steel and concrete slabs (J.VALIVONIS G.MARCIUKAITIS B.JONAITIS)