

Comparaison de différentes armatures utilisées pour le renforcement du béton

Virginie PÉRIER

LUNAM Université, IFSTTAR, Bouguenais

Sylvain CHATAIGNER

LUNAM Université, IFSTTAR, Bouguenais

Anthony PRUVOST

LUNAM Université, IFSTTAR, Bouguenais

■ RÉSUMÉ

La principale pathologie des ouvrages en béton armé est due à la corrosion des armatures en acier et beaucoup de recherches se sont intéressées à l'utilisation d'armatures insensibles à la corrosion, comme les aciers inoxydables ou plus récemment des armatures composites à fibres longues et à matrice organique. Cet article compare les différentes solutions (acier carbone classique, acier inoxydable et armatures composites) d'un point de vue technique et environnemental. Au plan technique, les principaux codes de dimensionnement existants sont décrits et utilisés pour déterminer la quantité d'armatures nécessaire pour chacune des solutions. L'influence de certains paramètres clés pour le dimensionnement de structures en béton renforcées par armatures composites est discutée. Pour la comparaison environnementale, trois modèles de poutres en béton, armées avec les trois types d'armatures, ont été analysés en se limitant à la partie fabrication des matériaux et transports des matériaux sur site. Les phases de mise en œuvre sur site, de vie en œuvre et de fin de vie de l'ouvrage ne sont pas prises en compte dans les frontières de l'étude. Ce travail préliminaire ouvre de nombreuses perspectives pour proposer aux maîtres d'ouvrage des outils de prise de décision lors de la réalisation de nouvelles structures.

Comparison of various reinforcement bars used in concrete

■ ABSTRACT

The main pathology of reinforced concrete structures is due to the corrosion of steel bars used and much research has been devoted to the use of reinforcing bars insensitive to corrosion, like stainless steel or, more recently, composite reinforcements with long fibres or organic matrix. This paper compares the different solutions (classical carbon steel, stainless steel, composites) from a technical and environmental point of view. Technically speaking, the main existing design codes are described and used to determine the quantity of reinforcement bars needed for each solution. The influence of key parameters for the design of structures made of concrete reinforced using composite bars is discussed. For the environmental comparison, three model concrete beams, reinforced using the three types of reinforcing bars considered, were analysed. The analysis was restricted to the fabrication of materials and their transport to the construction site. The installation on site, the life and end-of-life of the structure were not included in the study. This preliminary work opens many perspectives to offer tools to structure owners for taking decisions when new structures are to be built.

1. INTRODUCTION

Le parc d'ouvrages d'art en béton armé est très important et la corrosion des armatures en acier en est la pathologie principale. Plusieurs solutions existent pour se prémunir contre ce phénomène. Ces solutions peuvent être classées en deux catégories : les mesures qui s'attachent à assurer une bonne protection des armatures par le béton d'enrobage (respect des enrobages, qualité du béton utilisé, etc.) et celles qui concernent directement les armatures utilisées (traitement de surface, choix de nouveaux types d'armatures, etc.). L'étude présentée dans cet article s'intéresse au choix

de nouveaux types d'armatures : armatures en acier inoxydable peu sensibles à la corrosion et armatures en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) (Drouin et al., 2011).

Cette étude s'articule en deux parties. La première s'intéresse au dimensionnement des structures en béton armé avec de nouveaux types d'armatures. Pour ce faire, une poutre modèle est dimensionnée avec différents types d'armatures, et les taux de renforcement déterminés selon les codes en vigueur sont comparés. Pour le cas des nouveaux types d'armatures, une partie est dédiée à l'étude de l'influence de différents paramètres sur le dimensionnement. On montre en particulier que, bien que certains codes de dimensionnement à l'étranger portent spécifiquement sur la réalisation de structures en béton armé avec armatures composites, la philosophie de conception de ce type de structures ne s'est pas encore adaptée à l'utilisation de ces nouveaux matériaux et qu'il reste de nombreuses pistes d'optimisation possibles.

La seconde partie porte sur le bilan environnemental des différentes solutions envisagées pour la fabrication de la poutre en béton armé. Les résultats présentés ici ne concernent que la fabrication de la poutre. Ils sont déterminés en utilisant un outil d'ACV (logiciel SimaPro) et en s'appuyant sur la base de données Ecoinvent. Malgré certaines incertitudes sur les données, ces résultats permettent une première comparaison des différents concepts. Il sera bien entendu important d'ajouter la partie « vie en œuvre » de la structure à ce bilan dans une étude additionnelle.

2. DIMENSIONNEMENT

■ 2.1. Choix de la structure et hypothèses

Il a été décidé d'étudier une poutre isostatique de dix mètres de portée, bi-appuyée à ses extrémités (figure 1). Le prédimensionnement permet de déterminer une section de hauteur $h = 625$ mm et de largeur $b = 312,5$ mm. La structure subit un chargement permanent de 5 kN/m et un chargement variable de 6 kN/m. Le béton utilisé pour les poutres est un C30/37 de classe environnementale XS1 (AFNOR, 2004). Celle-ci correspond à une exposition à l'air marin mais le béton n'a pas de contact direct avec l'eau de mer. Nous allons comparer six poutres entre elles, dont deux armées d'aciers.

Le dimensionnement vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant a été réalisé en appliquant l'Eurocode 2 (AFNOR, 2007) pour les poutres avec armatures en acier au carbone et en acier inoxydable. Pour les armatures en acier inoxydable, les recommandations de Cimbéton (Cimbéton, 2004) ont également été prises en compte. Les autres poutres ont été dimensionnées en appliquant le code Américain rédigé par l'ACI sur le sujet (ACI, 2006). Nous avons fait les hypothèses suivantes :

- la résistance du béton en traction est négligée ;
- la théorie des poutres est adoptée ;
- la déformation maximale du béton est de $3,5$ ‰ ;
- l'adhérence est parfaite entre les armatures et le béton.

■ 2.2. Caractéristiques des armatures étudiées

Les propriétés mécaniques des armatures utilisées nécessaires pour le dimensionnement ont été déterminées à l'aide de données des fournisseurs pour chacun des matériaux. Les données utilisées sont regroupées dans le tableau 1.

figure 1
Schéma de la poutre étudiée.

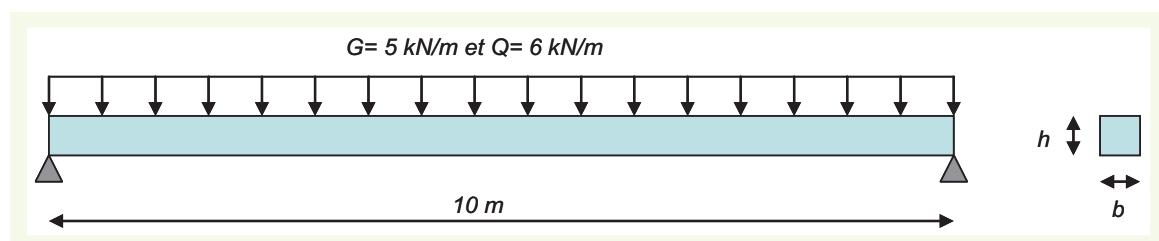


tableau 1
Propriétés mécaniques des
armatures étudiées.

Matériaux	Composite à fibres aramide	Composite à fibres de verre	Composite à fibres de carbone	Acier	Inox
Module d'Young longitudinal (GPa)	68,6	45,4	130	200	200
Contrainte ultime en traction (MPa)	1100	597	2300	500	500
Déformation maximale en traction longitudinale (-)	0,016	0,013	0,018	0,022	0,022

Il convient toutefois de relever des différences importantes entre les armatures composites et les armatures en acier, qui conditionnent le dimensionnement :

- les armatures composites ont un comportement élastique fragile, alors que les armatures en acier présentent de la ductilité. Afin de garantir un mode de rupture ductile, la plupart des codes de dimensionnement préconisent un sur-renforcement des structures en béton pour obtenir un mode de rupture en compression du béton. Le code de l'ACI préconise en outre l'utilisation d'un facteur de sécurité ϕ situé entre 0,55 et 1 afin de prendre en compte le caractère fragile des armatures composites à l'état limite ultime. On note que cette absence de ductilité de l'armature composite rend les opérations de pliage impossibles. La forme finale de l'armature (notamment pour les cadres d'effort tranchant) doit être réalisée avant réticulation de la matrice du composite en usine. Ceci implique la mise en œuvre de nouveaux procédés de fabrication et de contrôle, mais entraîne également une légère diminution des capacités ultimes des armatures, qui est prise en compte dans les codes de dimensionnement (FIB, 2007) ;
- les armatures composites sont anisotropes et présentent de faibles capacités en compression et en cisaillement. Il est donc courant de négliger la contribution à la compression de ces armatures, ainsi que leurs contributions par effet goujon à la résistance au cisaillement dans le cadre des renforts à l'effort tranchant ;
- les armatures composites ne sont pas sensibles à la corrosion. Dans ce cas, l'épaisseur d'enrobage n'est donc pas justifiée par la nécessité de protéger les armatures vis-à-vis de la carbonatation ou encore des chlorures mais bien par le besoin de diffuser les efforts de l'armature au béton. Elle peut également dans certains cas permettre de justifier le comportement de la structure à température élevée. De manière identique, la limite en termes de fissuration ne se justifie plus en termes de protection des armatures, mais bien en termes de protection du béton de peau vis-à-vis des phénomènes de gel-dégel, ou encore en termes de confort et d'esthétique. Les recommandations des guides de conception, bien que conservatives sur ces sujets, sont donc différentes pour les deux types d'armatures ;
- en revanche, le vieillissement des armatures composites dans certains milieux peut entraîner une diminution de leurs capacités ultimes. Le retour d'expérience est encore faible et les codes de dimensionnement suggèrent donc l'utilisation de coefficients de sécurité importants en fonction du type de fibre utilisé (ce coefficient est appelé C_c dans le guide de l'ACI).

■ 2.3. Résultats du dimensionnement conformément à l'Eurocode 2 et à l'ACI

Les résultats du dimensionnement, conforme aux guides de conception (AFNOR, 2007 et ACI, 2006), sont donnés dans le **tableau 2** pour le renforcement à la flexion et dans le **tableau 3** pour le renforcement à l'effort tranchant. La section réelle pour le dimensionnement en flexion correspond à des diamètres d'armatures proposés par les fournisseurs. Elle peut donc différer légèrement de la section nécessaire. En ce qui concerne le nombre d'armatures, les deux chiffres correspondent successivement au nombre d'armatures dans la nappe supérieure et dans la nappe inférieure (deux nappes d'armatures superposées sont en effet nécessaires). On notera que, pour toutes les armatures composites, le dimensionnement est conditionné par la limite d'ouverture de fissure du béton : c'est l'ELS (État limite de service) qui est donc dimensionnant, alors que, dans le cas des armatures en

Dimensionnement en flexion	Composite à fibres aramide	Composite à fibres de verre	Composite à fibres de carbone	Acier	Inox
Section nécessaire (mm ²)	4071	6381	2212	1221	1180
Section réelle (mm ²)	4071	6381	2212	1244	1244
Taux d'armatures ρ en %	2,29	3,58	1,24	0,71	0,71
Diamètre des armatures (mm)	24	25	16	12	12
Nombre d'armatures	(4 ; 5)	(6 ; 7)	(5 ; 6)	(5 ; 6)	(5 ; 6)
Espacement longitudinal (mm)	42	11	70	55	55
Caractère dimensionnant	Fissuration	Fissuration	Fissuration	ELU	ELU

tableau 2
Résultats
du dimensionnement
à la flexion.

Dimensionnement à l'effort tranchant	Composite à fibres aramide	Composite à fibres de verre	Composite à fibres de carbone	Acier	Inox
Diamètre des armatures utilisées (mm)	7	7	7	7	7
Nombre de cadres nécessaires	36	52	36	24	24
Espacement, en mm	280	190	290	420	430

tableau 3
Résultats
du dimensionnement
à l'effort tranchant.

acier, c'est l'état limite ultime (ELU). Le taux de renforcement est dans tous les cas supérieur pour les armatures composites. En revanche, on retiendra que la densité des armatures composites est 3 à 4 fois plus faible que celle des armatures en acier. Ceci peut faciliter la mise en œuvre des cages d'armatures et leur manipulation. Il convient de relever que, dans le cas de la poutre armée par des composites à fibres de verre, l'espacement entre les armatures est trop faible pour que la solution puisse être envisagée. Elle est cependant étudiée d'un point de vue théorique dans la partie suivante.

■ 2.4. Possibilités d'optimisation du dimensionnement avec des armatures composites

Les résultats du dimensionnement présentés dans le paragraphe précédent sont déterminés en suivant des codes existants reconnus mais relativement récents pour le cas des armatures composites. Ceux-ci vont bien entendu évoluer au fur et à mesure que le retour d'expérience et les connaissances sur ces matériaux augmenteront. Nous avons toutefois souhaité optimiser les solutions de dimensionnement en nous intéressant à l'ouverture maximale de fissures du béton, à l'influence du gain en épaisseur d'enrobage et à la possibilité de modifier le type de béton utilisé.

Lorsqu'on se penche sur les facteurs affectant le dimensionnement des poutres en béton armé avec armatures composites, on constate que ce sont les limites en service qui conditionnent le taux de renforcement. Dans notre cas, c'est l'ouverture maximale de la fissure qui était limitante. Elle est fixée dans le guide de l'ACI à 0,5 mm. Afin de pouvoir estimer l'influence de ce paramètre sur le dimensionnement, les relations reliant le pourcentage de renforcement et l'ouverture maximale de fissure ont été tracées sur la **figure 2** pour les trois armatures composites étudiées. On constate qu'il est possible de diminuer la quantité d'armatures en augmentant l'ouverture maximale de fissure jusqu'à une certaine limite au-delà de laquelle la flèche de la poutre devient dimensionnante. De façon cohérente, cette limite augmente avec la raideur de l'armature. Pour le cas des armatures composites à fibres de verre, augmenter la limite d'ouverture de fissure de 0,5 à 0,6 mm permet de diminuer de manière importante la quantité de renforcement nécessaire en flexion. C'est cette limite de 0,6 mm qui a donc été adoptée pour le dimensionnement optimisé.

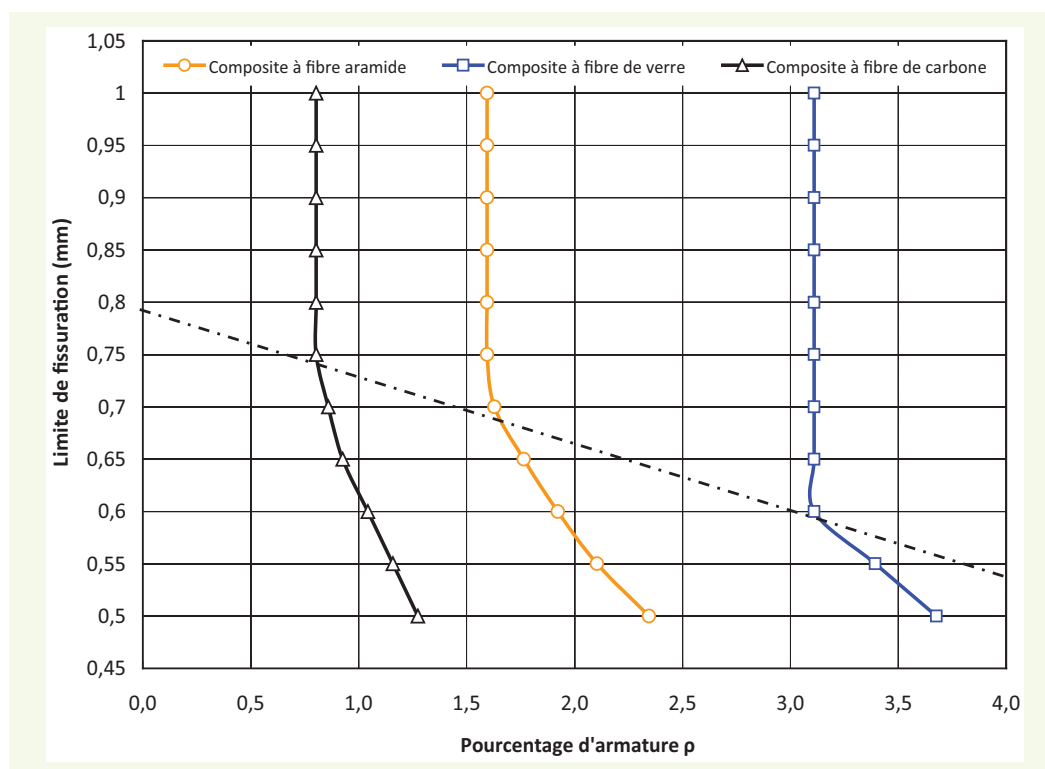


figure 2
Influence de l'ouverture de fissure sur la quantité de renforcement en flexion.

À première vue, un des avantages de l'utilisation des armatures composites concerne également la réduction de l'enrobage de béton nécessaire. Lorsqu'on utilise les procédures classiques de dimensionnement (adoption d'une hauteur de section puis détermination du bras de levier), il n'est pas possible de profiter de cet avantage. Nous avons donc adopté une procédure légèrement différente dans laquelle c'est le bras de levier qui est fixé. L'ajout de l'enrobage permet ensuite d'obtenir la hauteur de la poutre. Il est donc possible d'économiser une partie du béton. Ceci a été fait pour la poutre en béton armée avec des composites à fibres de verre, pour une limite d'ouverture de fissure de 0,6 mm. Il a été constaté que la quantité d'armatures nécessaire à la flexion diminuait de 8 %.

Enfin, on note que le béton d'enrobage dans le cas des armatures composites n'a pas le même rôle que dans le cas des armatures en acier. A priori, la carbonatation et la pénétration des ions chlorures ne dégradent pas ces nouveaux matériaux. Il est donc possible dans ce cas d'utiliser des bétons de moindre qualité en termes d'indicateurs de durabilité et donc des bétons contenant moins de ciment. Ceci permet des gains en ce qui concerne le bilan environnemental présenté dans la partie suivante.

3. ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

Cette étape a pour objectif de comparer les différentes poutres de béton armé d'un point de vue environnemental. Néanmoins, étant donné le manque de données sur les armatures à fibres de carbone, et d'aramide, seules les poutres armées avec des armatures en acier carbone, acier inoxydable et composite à fibres de verre seront traitées dans cette partie d'analyse du cycle de vie.

■ 3.1. Objectifs et champ d'étude

L'unité fonctionnelle de l'étude est de « franchir dix mètres sous un chargement constant ». Les limites du système d'étude, représentées sur la **figure 3**, sont les matières premières, les différents transports jusqu'au chantier de construction et la réalisation de la poutre. Afin de pouvoir réaliser l'inventaire de cette étude, l'étape du dimensionnement a permis d'obtenir les quantités des différents matériaux qui constituent les poutres, c'est-à-dire la masse de chacun des composants de la poutre : les armatures et le béton (**tableau 4**).

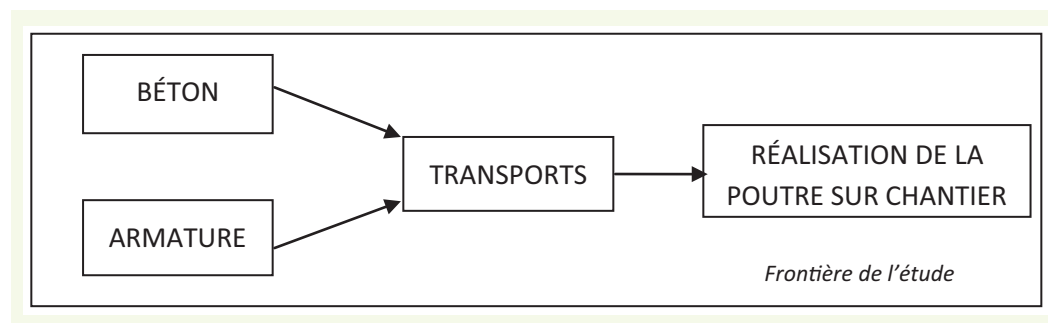


figure 3
Les frontières de l'étude.

tableau 4
Quantité des matières premières
($\rho_{\text{béton}} = 2200 \text{ kg/m}^3$).

Matériaux	Poutre Acier	Poutre Inox	Poutre PRFV
Béton (kg)	4267	4267	4163
Armature (kg)	103	103	131

Des hypothèses sur le transport jusqu'au chantier ont été faites. Pour le béton (CIMBETON, 2010), nous avons retenu une distance de 20 km. Pour les armatures, les distances ont été déterminées en calculant la moyenne des distances entre les capitales des différents pays d'importation et Paris, ce qui donne 686 km pour les armatures en acier et 1000 km pour les armatures composite.

■ 3.2. Frontières et Inventaire

Pour construire l'inventaire des poutres, nous avons utilisé des résultats de la littérature et des données de la base Ecoinvent (Ecoinvent centre, 2010). Certains processus ont été adaptés afin qu'ils correspondent au mieux à l'utilisation française.

Pour les armatures en acier, nous nous sommes appuyés sur l'article de Gomes et al. (2012), dans lequel les auteurs ont effectué un travail dans le cadre du groupe DIOGEN (Habert et al., 2011) afin d'obtenir des données sur les impacts environnementaux des armatures en acier représentatives du marché français. En France, la production d'armatures acier est faite à 98 % par la filière électrique et le reste par la filière fonte. Les billettes sont ensuite transformées en armatures par laminage à chaud suivi de laminage à froid ou d'étirage ou de trempe et revenu.

Pour les armatures en composite à fibres de verre, la modélisation a été réalisée à partir des données fibres de verre (« glass fibre ») et résine époxy (« epoxy resin ») disponibles dans Ecoinvent, auxquelles le processus de pultrusion a été ajouté sous la forme d'une consommation énergétique. Les étapes du cycle de vie incluses dans le processus « glass fibre » sont l'extraction des matières premières, le transport de celle-ci jusqu'à l'usine de fabrication et le processus de fabrication des fibres (figure 4).

De même que pour les armatures en acier, quelques hypothèses ont été faites sur les transports intermédiaires et sur le processus de fabrication des armatures : la pultrusion. Pour le transport, une distance de 600 km pour les fibres de verre et la résine a été appliquée. La pultrusion, quant à elle, a été modélisée par une consommation d'énergie électrique de 3,1MJ/kg d'armature (Young et al., 2009). Tous les processus d'énergie électrique sont modélisés par le processus « electricity, medium voltage, production UCTE ».

La modélisation du béton a été faite avec le processus « concrete exacting », pour le béton le plus proche de celui retenu pour le dimensionnement (classe environnementale XS1). Ce processus prend en compte les étapes de production de ciment, de granulats, d'eau de gâchage et enfin la production du béton, mais également tous les transports jusqu'à la centrale à béton et les matières premières.

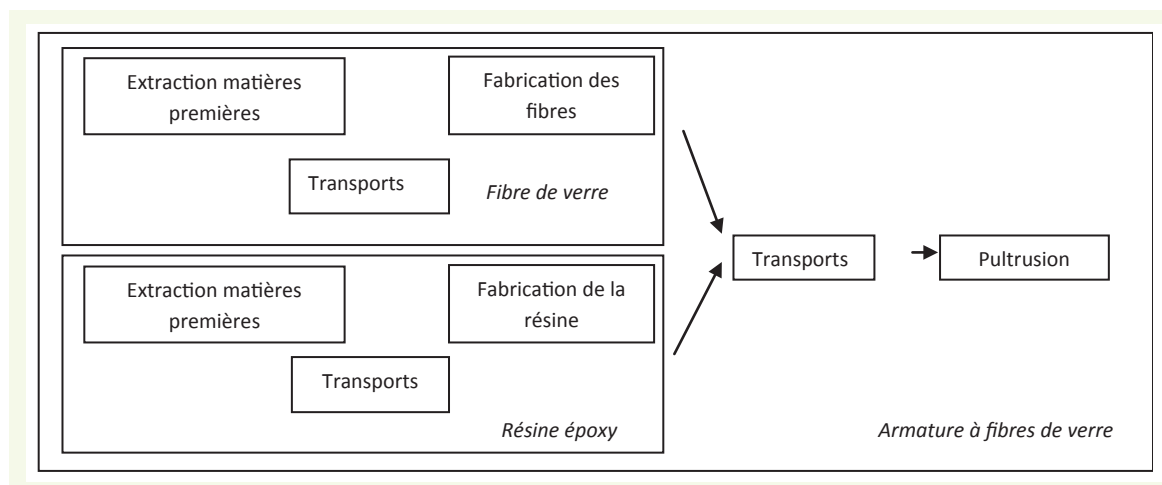


figure 4
Frontière des armatures à fibres de verre.

■ 3.3. Évaluation des impacts et interprétation

Pour cette étude, nous avons choisi d'utiliser la méthode CML 2000, Baseline, West Europe. La méthode comprend dix catégories d'impacts : la consommation des ressources abiotiques (I1), l'acidification (I2), l'eutrophisation (I3), le réchauffement climatique (I4), la diminution d'ozone stratosphérique (I5), la toxicité humaine (I6), l'écotoxicité des eaux douces (I7), l'écotoxicité des eaux marines (I8), l'écotoxicité du sol (I9) et la formation de photo-oxydant (I10). Les simulations des impacts potentiels sur l'environnement ont été faites avec le logiciel Simapro.

La **figure 5** permet de comparer les indicateurs obtenus pour les trois types de poutre. La poutre composite à fibres de verre est la plus polluante dans toutes les catégories d'impacts, à l'exception de deux. En effet, la poutre en acier carbone est la plus polluante pour l'écotoxicité terrestre et l'écotoxicité des eaux douces.

Chaque indicateur n'ayant pas le même impact sur l'environnement, il convient de normaliser les résultats obtenus afin de connaître les points les plus néfastes pour l'environnement. Cette étape de normalisation consiste à diviser chaque résultat par une référence. Les coefficients de normalisation sont ceux de la méthode CML, West Europe.

La **figure 6** correspond quant à elle à la comparaison normalisée des différentes poutres. Une catégorie d'impact est prépondérante dans les trois cas : l'écotoxicité des eaux marines.

Pour déterminer l'origine de la pollution en termes de flux, on s'intéresse aux différents flux inclus dans notre étude pour l'écotoxicité des eaux marines. L'origine de la pollution dépend de la poutre. Le béryllium est le flux le plus polluant pour la poutre composite à fibre de verre. Pour les poutres en acier carbone et acier inoxydable, ce sont le vanadium et le nickel, respectivement.

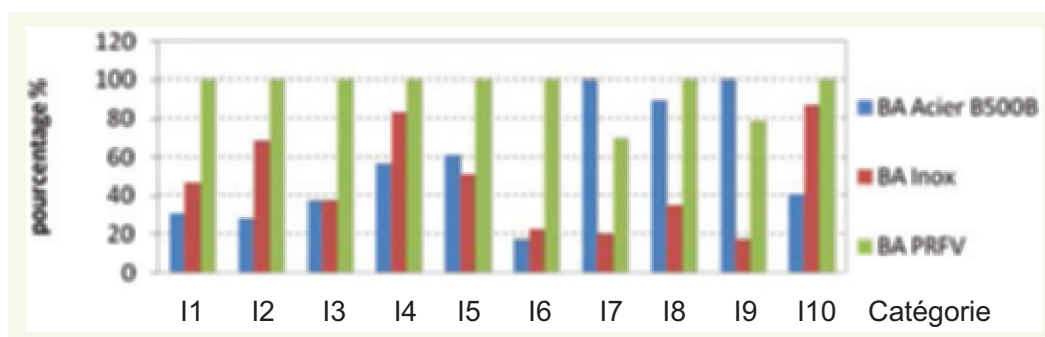


figure 5
Comparaison des impacts environnementaux pour les trois types de poutre.

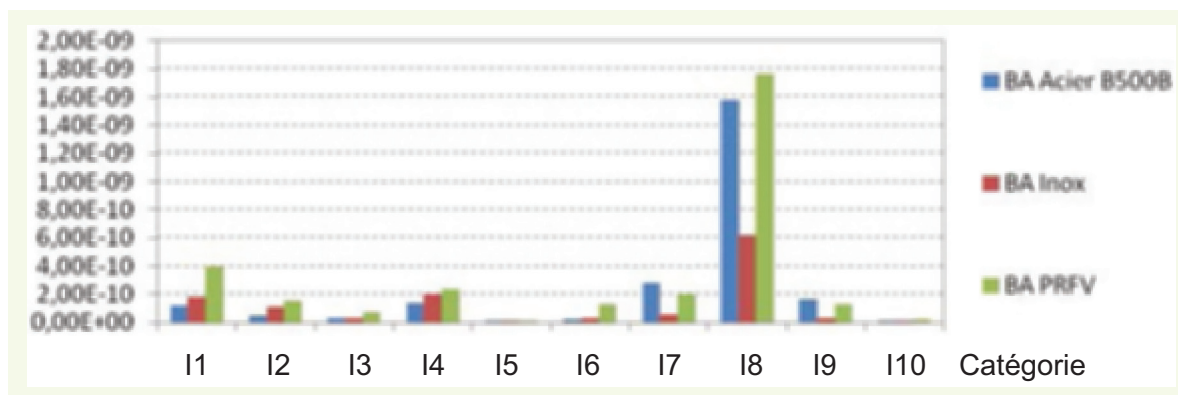


figure 6

Comparaison normalisée des impacts environnementaux pour les trois types de poutre.

Afin de déterminer où doivent se concentrer les différentes actions qui permettraient de réduire les impacts prépondérants, nous nous sommes intéressés à l'origine de la pollution d'un point de vue processus. De manière générale, quel que soit le type de poutre, les transports ont un impact sur l'environnement relativement faible.

L'interprétation des autres processus en fonction des poutres est la suivante :

- pour la poutre à armatures en acier carbone, les processus de fabrication de l'acier et du béton représentent sur l'ensemble des catégories d'impacts environ 50 % chacun (figure 7) ;
- pour la poutre à armatures en acier inoxydable, sur l'ensemble des catégories d'impacts, le processus de fabrication du béton domine légèrement. Le béton représente au minimum 30 % de la toxicité humaine et atteint près de 90 % de l'impact du réchauffement climatique (figure 8) ;
- pour la poutre à armatures composite à fibres de verre, nous constatons clairement que l'origine de la pollution pour toutes les catégories d'impact est majoritairement due aux armatures. La proportion des impacts dus aux armatures atteint 50 % au minimum pour la destruction de la couche d'ozone et environ 90 % au maximum pour la toxicité humaine (figure 9).

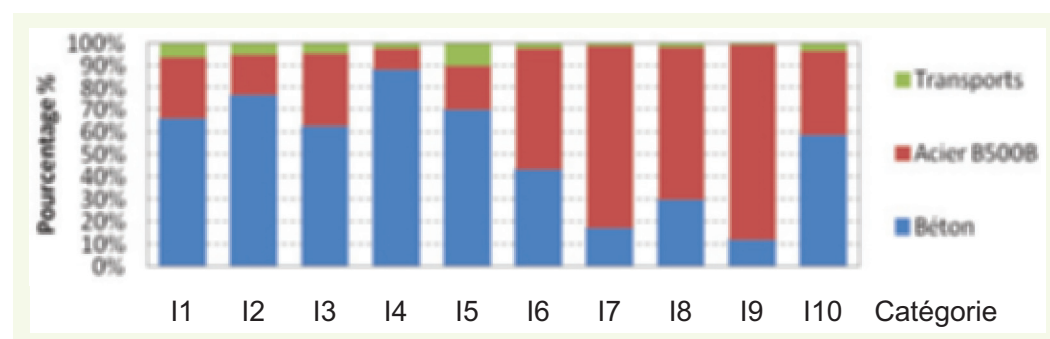


figure 7

Impacts des différents processus. Poutre avec armatures en acier carbone.

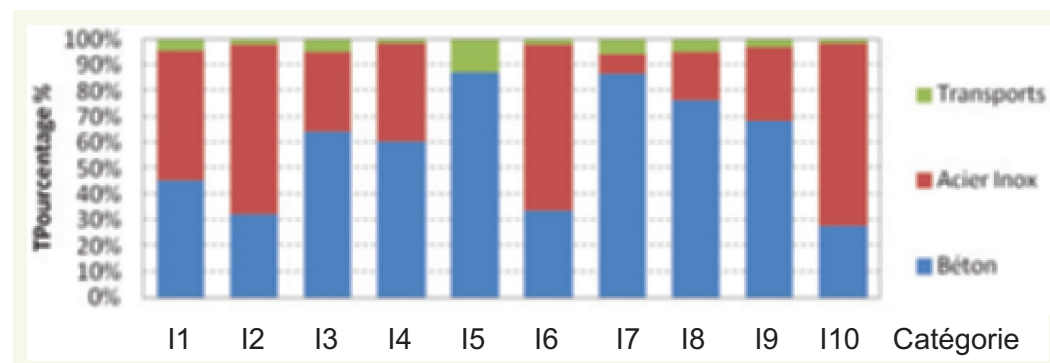
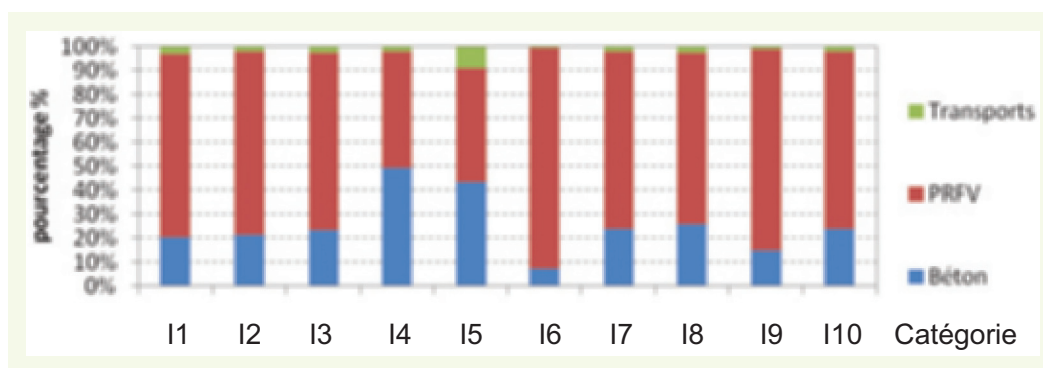


figure 8

Impacts des différents processus. Poutre avec armatures en acier inoxydable.

figure 9
Impacts des différents processus. Poutre avec armatures composites à fibres de verre.



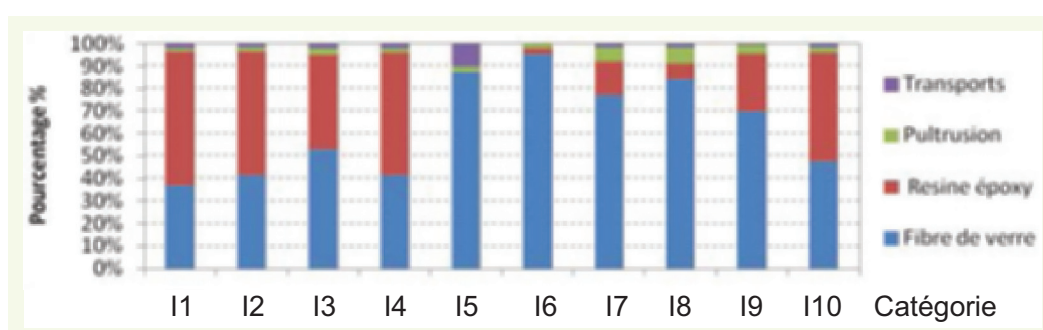
L'origine en termes de processus étant définie pour chaque poutre étudiée, une étude plus approfondie a été réalisée pour la poutre composite à fibres de verre afin de déterminer la source de la pollution des armatures. L'unité fonctionnelle est la production d'1 kg d'armatures composites à fibres de verre. L'interprétation de la **figure 10** permet d'affirmer que les fibres de verre sont la source principale de la pollution des armatures composites et donc de la poutre composite. Le transport et le procédé de fabrication des armatures représentent chacun une part faible de la pollution. Ces premiers résultats sont issus d'un modèle avec des frontières restreintes, se limitant à la fabrication de la poutre. Une étude intégrant la vie en œuvre de l'ouvrage, sa maintenance, ses réparations, sa fin de vie, etc., permettrait une comparaison plus fine des trois types de poutre. En effet, même si, dans cette étude, la poutre à armatures composites paraît la plus polluante, cette tendance pourrait être réduite ou modifiée grâce au fait que ce type de poutre aurait une maintenance plus faible et probablement une durée de vie plus longue. Une étude complémentaire sera donc nécessaire pour aborder ces points. Néanmoins, une réduction des impacts environnementaux peut déjà être réalisée en modifiant certains aspects du dimensionnement de la poutre avec armatures composites.

■ 3.4. Étude de sensibilité

Une étude de sensibilité aux hypothèses de transport a été effectuée en faisant varier les distances de transport de 100 à 1000 km pour les armatures en acier et de 10 à 1500 km pour les armatures composites.

La sensibilité au transport sur notre étude dépend de la catégorie d'impact. Nous avons une légère sensibilité au transport quelle que soit la poutre étudiée. L'influence des hypothèses de transport fait varier les résultats de 0,3 à 6 % en fonction des catégories d'impacts et de 1 à 7,4 % pour les poutres en acier carbone et en acier inoxydable, respectivement. En ce qui concerne la poutre composite à fibres de verre, nous avons une variation de 0,8 à 8 %. La variation maximale correspond à la catégorie d'impact « destruction de la couche d'ozone » car la part du transport dans cette catégorie d'impact est la plus importante.

figure 10
Impacts des différents processus. Armature composite à fibres de verre.



■ 3.5. Influence de l'optimisation du dimensionnement et de la modification du béton

Comme indiqué dans la première partie, l'utilisation de nouveaux matériaux permet d'envisager de nouvelles règles de conception, ce qui entraîne une modification des quantités de matériaux utilisés et donc des impacts sur l'environnement pour les poutres concernées.

Les armatures inoxydables et composites n'étant pas sensibles à certains agents agressifs comme les ions chlorure, un béton de classe « normale » peut être utilisé. Une étude environnementale identique à la première a donc été réalisée en modifiant seulement le processus de béton. Le processus utilisé, inclus dans Ecoinvent, est « béton normal » (concrete normal). Cette modification a deux conséquences. Tout d'abord, elle permet de réduire de manière générale les impacts liés aux deux poutres : acier inoxydable et composite (**tableau 5**). Cette diminution varie en fonction des catégories d'impacts car, comme vu précédemment, la part de pollution due au béton est différente en fonction des catégories d'impacts. Elle varie entre 3,4 % pour la toxicité humaine et 11,2 % pour la diminution d'ozone stratosphérique. Nous remarquons que la réduction d'impact est plus importante pour la poutre dont les armatures sont en acier inoxydable, ce qui est dû également à la part de pollution du béton. En effet, pour la poutre à armatures en acier inoxydable, l'origine des impacts environnementaux, en termes de processus, est principalement le béton. Par contre, pour la poutre à armatures composites, l'origine est l'armature composite. La deuxième conséquence est de diminuer les écarts entre les poutres à armatures en acier inoxydable et à armatures composites avec la poutre à armatures en acier carbone, car cette dernière reste inchangée. L'écart diminue plus pour la poutre à armatures en acier inoxydable car la réduction des impacts est plus importante que pour la poutre à armatures composites à fibres de verre.

La **figure 11** correspond aux résultats de la comparaison des indicateurs pour chacune des poutres, en ayant pris en compte à la fois le changement de béton et l'optimisation du dimensionnement présentée dans la première partie de cet article. L'allure du graphique est la même que pour la première étude environnementale. La poutre à armatures composite à fibres de verre est toujours de manière générale la plus néfaste pour l'environnement. Cependant, un changement de « classement » est apparu pour la catégorie d'impact écotoxicité des eaux marines : la poutre à armatures en acier carbone est devenue la plus polluante. Précédemment, il a été montré que les impacts environnementaux pour la poutre composite sont principalement dus aux armatures. Or l'augmentation de l'ouverture de fissure tolérée dans le béton et la diminution de la hauteur de la section permettent de réduire de l'ordre de 8 % la quantité d'armature. Cette réduction est la cause de ce changement de « classement ».

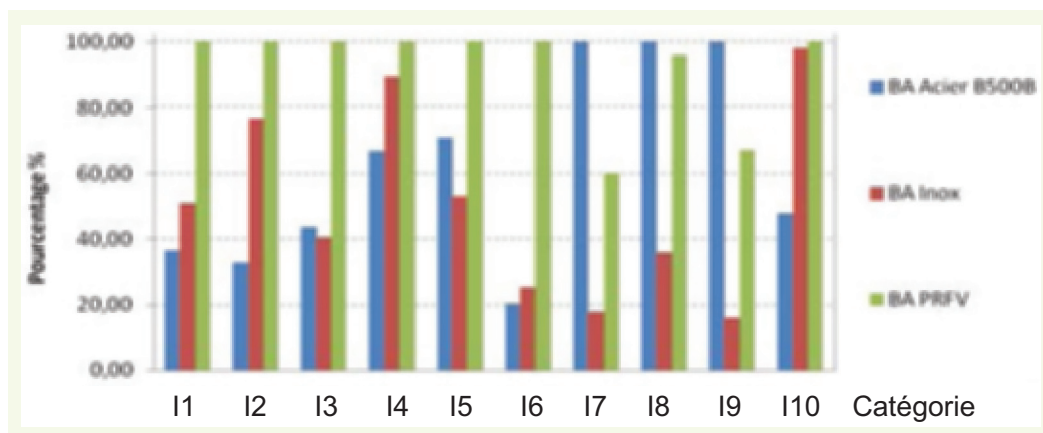
Comme pour l'étude de la modification du béton, nous retrouvons les mêmes conséquences, c'est-à-dire la réduction générale des impacts et une diminution des écarts entre poutre à armatures

Catégories d'impacts	Poutre Inox	Poutre Composite
La consommation des ressources abiotiques	6,6	3
L'acidification	4,4	2,9
L'eutrophisation	7,8	2,9
Le réchauffement climatique	8,9	7,2
La diminution d'ozone stratosphérique	11,2	5,6
La toxicité humaine	3,4	0,7
L'écotoxicité des eaux douces	9,5	2,6
L'écotoxicité des eaux marines	8,8	3
L'écotoxicité du sol	9,7	2,1
La formation de photo-oxydant	4,1	3,5

tableau 5

Variation des impacts avec la modification du type de béton (réduction en pourcentage).

figure 11
Comparaison des impacts environnementaux des trois poutres après optimisation du dimensionnement.



en acier inoxydable ou composites et poutre à armatures en acier classique. Celle-ci est plus ou moins importante en fonction de la catégorie d'impact. Pour la poutre à armatures en acier carbone classique, les résultats sont les mêmes que dans l'étude précédente car seul le type de béton a été modifié. Pour la poutre à armatures composite à fibres de verre, la réduction est plutôt constante, et vaut environ 15 % pour chacun des indicateurs. En ce qui concerne la poutre composite à armatures en acier inoxydable, la modification des paramètres permet de diminuer les valeurs des indicateurs de 2 à 12 %.

4. CONCLUSION

Le travail présenté dans cet article avait deux objectifs : comparer le dimensionnement de poutres de béton armé avec des armatures en acier ou des armatures composites et comparer les mêmes poutres d'un point de vue environnemental.

En utilisant les règles de dimensionnement actuelles, on remarque qu'il est nécessaire d'utiliser une quantité d'armatures composites plus importante que celle d'acier. Ceci est dû d'une part au choix sécuritaire d'un mode de rupture ductile, mais surtout à la souplesse des armatures composites et aux limites de service qui n'ont pas été réellement adaptées pour le moment aux structures en béton renforcées par armatures composites. Une réflexion a été ainsi menée sur le critère de fissuration du béton. Celle-ci a permis de montrer qu'on pouvait en augmentant légèrement les ouvertures maximales de fissures tolérées, diminuer la quantité d'armatures composites requise. Bien que des améliorations soient possibles, pour l'heure une solution avec armatures composites est plus onéreuse qu'une solution avec armatures acier à l'échelle d'un projet de génie civil lors de l'investissement initial. Cependant, il convient de noter que le coût des armatures représente en fait un coût marginal de l'ensemble d'un projet de génie civil, et surtout qu'il est très vraisemblable que des gains importants seront ensuite effectués sur l'ensemble de la vie de l'ouvrage puisque l'utilisation d'armatures moins sensibles à la corrosion devrait diminuer les coûts de maintenance et de réparation requis (Gremel, 2012).

La comparaison d'un point de vue environnemental menée dans la seconde partie a été effectuée à l'aide du logiciel Simapro en utilisant la méthode CML 2000. L'unité fonctionnelle de la comparaison est de franchir une portée de 10 mètres sous un chargement constant. Le principal résultat de notre comparaison est que la poutre à armatures composites à fibres de verre est la plus néfaste pour l'environnement, dans les limites de notre système. Cependant, les frontières de notre système sont très réductrices, puisqu'elles vont de l'extraction des matières premières jusqu'à la réalisation sur chantier. L'étude peut donc être améliorée en élargissant ces frontières afin d'incorporer les étapes d'utilisation, d'entretien, de réparation et de fin de vie. En effet, actuellement, la plupart des ouvrages en béton armé nécessite de nombreuses réparations notamment en raison de la corrosion des armatures.

L'étude environnementale a également permis de déterminer l'origine des impacts en termes de flux et de procédé ainsi que la ou les catégories(s) d'impact(s) les plus néfastes pour l'environnement. L'écotoxicité des eaux marines est la catégorie d'impact prépondérante pour les trois poutres étudiées. L'origine des impacts environnementaux pour cette catégorie d'impact provient principalement du béryllium, du vanadium et du nickel. Nous avons également déterminé l'origine de ces flux polluants. Pour la poutre à armatures composite et en acier carbone, la principale origine des impacts en termes de procédé est constituée par les armatures. Pour la poutre à armatures en acier inoxydable, l'origine principale est le béton. On notera, que dans le cas des armatures composites, il semble que ce soit la fibre de verre qui soit responsable de la majeure partie des flux sortants en ce qui concerne l'écotoxicité des eaux marines. L'utilisation de matériaux composites avec d'autres fibres pourrait donc permettre de réduire ces émissions, mais il existe encore à ce jour peu de données sur ces fibres alternatives (aramide, basalte, ...). Notre étude consistait aussi à optimiser le dimensionnement des poutres en prenant en compte les gains en enrobage, la possibilité d'utilisation d'un béton moins performant, et la prise en compte d'une limite d'ouverture de fissure plus importante, ce qui permet de réduire les flux sortants de 15 %. Il sera important d'étendre ce travail en intégrant les phases de vie en œuvre et de démolition de l'ouvrage, ainsi que des matériaux composites avec fibres alternatives.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI (2006).** ACI 440.1R-06, Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. 44 pages.
- AFNOR (2004).** NF EN 206-1, Béton, Partie 1, spécification, performances, production et conformité.
- AFNOR (2007).** NF EN 1992-x Eurocode 2, Calcul des structures en béton.
- CIMBÉTON (2004).** Collection technique CT, Béton armé d'Inox, T81, 85 pages.
- CIMBÉTON (2010).** Collection technique CT, Analyse de cycle de vie d'un pont en béton, T87, 153 pages.
- DROUIN B., LATOUR G., MOHAMED H.M. (2011).** More than 10 years successful field applications of FRP bars in Canada, CDCC'11, Durability and sustainability of fibre reinforced polymer (FRP) composites for construction and rehabilitation. Proceedings on CD-Rom, Quebec, Canada, 6 pages.
- ECOINVENT CENTRE, SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2010).** Ecoinvent database v2, Ecoinvent reports n°1-25.
- FIB (2007).** Bulletin 40, FRP reinforcement in RC structures. Fédération Internationale du Bâtiment, 160 pages.
- GOMES F., BRIÈRE R., HABERT G., FÉRAILLE A., LASVAUX S., TESSIER C. (2012).** Environmental evaluation of reinforced steel sold on the French market. International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, Nantes, juillet 2012, RILEM Proceedings PRO 86, pp. 256-264.
- GREMEL D., KOCH R. (2012).** Holistic approach to reduce the costs of bridge decks using frp rebar, <http://www.ktc.uky.edu>, 8 pages.
- HABERT G., TARDIVEL Y., TESSIER C. (2011).** DIOGEN : base de données d'impacts environnementaux des matériaux pour les ouvrages de génie civil, Annales du BTP, Vol. 3, pp. 46-54.
- SONG Y.S., YOUN J.R., GUTOWSKI T.G. (2009).** Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. Composites: Part A, Vol.40, pp. 1257-1265.

ERRATUM du numéro 279 de BLCPC

- page 25 erronée,

$$\omega_o^2 \leq \min_{r,s,t} \frac{\int_{\Omega} \mu \left(\left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial z} \right)^2 \right) dx dz}{\int_{\Omega} \rho \Psi_2^2(x,z) dx dz} \quad (12)$$

Veillez lire :

$$\omega_o^2 \leq \min_{r,s,t} \frac{\int_{\Omega} \mu \left(\left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi_2}{\partial z} \right)^2 \right) dx dz}{\int_{\Omega} \rho \Psi_2^2(x,z) dx dz} \quad (12)$$

- page 61 erronée,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{jauge}^T(t) &= \frac{1}{l} \left(\int_{z_{bas}}^{z_f(t)} \alpha(\theta(z,t) - \theta_i) dz + \int_{z_f(t)}^{z_{haut}} (\alpha(\theta(z,t) - \theta_i) + \varepsilon_{gonflement}(S_r)) dz \right) \\ &= \frac{1}{l} \int_{z_{bas}}^{z_{haut}} \alpha(\theta(z,t) - \theta_i) dz + \varepsilon_{gonflement}(S_r) \frac{z_{haut} - z_f(t)}{l} \end{aligned}$$

En termes de vitesse de déformation, on en déduit :

$$\frac{d\varepsilon_{jauge}^T(t)}{dt} = \frac{\alpha}{l} \int_{z_{bas}}^{z_{haut}} \frac{f\theta}{ft}(z,t) dz + \varepsilon_{gonflement}(S_r) \frac{v_f}{l} = \alpha \frac{d\bar{\theta}}{dt} + \varepsilon_{gonflement}(S_r) \frac{v_f}{l}$$

Veillez lire :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{jauge}^T(t) &= \frac{1}{l} \left(\int_{z_{bas}}^{z_f(t)} \alpha(\theta(z,t) - \theta_i) dz + \int_{z_f(t)}^{z_{haut}} (\alpha(\theta(z,t) - \theta_i) + \varepsilon_{gonflement}(S_r)) dz \right) \\ &= \frac{1}{l} \int_{z_{bas}}^{z_{haut}} \alpha(\theta(z,t) - \theta_i) dz + \varepsilon_{gonflement}(S_r) \frac{z_{haut} - z_f(t)}{l} \end{aligned}$$

En termes de vitesse de déformation, on en déduit :

$$\frac{d\varepsilon_{jauge}^T(t)}{dt} = \frac{\alpha}{l} \int_{z_{bas}}^{z_{haut}} \frac{\partial \theta}{\partial t}(z,t) dz + \varepsilon_{gonflement}(S_r) \frac{v_f}{l} = \alpha \frac{d\bar{\theta}}{dt} + \varepsilon_{gonflement}(S_r) \frac{v_f}{l}$$