



HAL
open science

Développement d'un procédé frugal de démoulage in situ des parois de coffrage – Etude des signatures fonctionnelles des parois de coffrage

Nicolas Spitz

► **To cite this version:**

Nicolas Spitz. Développement d'un procédé frugal de démoulage in situ des parois de coffrage – Etude des signatures fonctionnelles des parois de coffrage. Autre [cond-mat.other]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2019. Français. NNT : 2019ENAM0001 . tel-02490399

HAL Id: tel-02490399

<https://pastel.hal.science/tel-02490399>

Submitted on 25 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Matériaux – Génie civil ”

présentée et soutenue publiquement par

Nicolas SPITZ

Le 09 janvier 2019

**DEVELOPPEMENT D'UN PROCÉDE FRUGAL DE DEMOULAGE IN
SITU DES PAROIS DE COFFRAGE – ETUDE DES SIGNATURES
FONCTIONNELLES DES PAROIS DE COFFRAGE**

Directeur de thèse : **Mohamed EL MANSORI**

Co-encadrement de la thèse : **Nicolas CONIGLIO et Alex MONTAGNE**

Jury

Mme Chafika DJELAL, Professeur, LGCgE-EA4515, Université d'Artois

Mme Caroline RICHARD, Professeur, LMR-EA2640, Université François-Rabelais de Tours

M. Minh-Tan DO, Docteur chercheur, EASE, IFSTTAR

M. Zachary GRASLEY, Professeur, Civil Engineering, Texas A&M University

M. Eyad MASAD, Professeur, Civil Engineering, Texas A&M University

M. Mohamed EL MANSORI, Professeur, MSMP-EA7350, Arts et Métiers ParisTech

M. Nicolas CONIGLIO, Maître de Conférences, MSMP-EA7350, Arts et Métiers ParisTech

M. Alex MONTAGNE, Maître de Conférences, MSMP-EA7350, Arts et Métiers ParisTech

M. Patrick MICHENEAU, Directeur Industriel, SATECO

Présidente

Rapporteuse

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

**T
H
È
S
E**

*A ma mère,
A mon père,
A ma sœur,
A mon frère.*

Remerciements

Ce mémoire est le fruit de trois riches et passionnantes années de travail. C'est grâce à la contribution et aux compétences de nombreuses personnes que celui-ci a pu être abouti. Je voudrais les remercier ici.

En premier lieu, je tiens à remercier Patrick MICHENEAU pour m'avoir partagé son savoir-faire et pour son suivi industriel sans que ce projet de recherche n'aurait pu être accompli.

Merci à Mohamed EL MANSORI pour la confiance qu'il m'a accordé tout au long de ce travail et de m'avoir enrichi de sa grande expérience en tant que directeur de thèse. Merci également à mes deux encadrants Nicolas CONILGIO et Alex MONTAGNE pour leur appui scientifique et leurs pertinents conseils.

Je remercie ensuite l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et d'avoir accepté de l'évaluer lors de la soutenance.

Je souhaite également remercier tous les membres du laboratoire MSMP de m'avoir accueilli pendant ces trois années ainsi que pour leur aide quotidien. Merci à Sabeur MEZGHANI pour avoir contribué aux résultats interférométriques. Un grand merci à Dominique LOGIE pour la réalisation du dispositif de l'essai d'adhérence. Merci à Jacques BORRA, Pascal CHALAGIRAUD et Jean-Philippe MARTIN pour leurs compétences techniques et les services rendus. Merci à Jean-François MATHIEU pour les cours d'arts martiaux imprévisibles. Merci à Fabrice GUITTONNEAU pour son dévouement pour la microscopie électronique à balayage. Merci à Grazyna CAUQUIL pour son habilité administrative. Merci également à l'équipe fonderie toujours partante pour un bon repas et un bon café. Enfin, merci aux autres membres du corps enseignant pour leur contribution tout au long de ce travail de recherche.

Par ailleurs, je tiens à remercier le département génie civil de l'IUT de Béthune et en particulier Laurent LIBESSART pour son soutien inépuisable lors des essais de frottement.

Je souhaite également remercier tous les doctorants de « l'open space » qui ont participé à l'animation et que j'ai eu le plaisir de côtoyer pendant ces trois années. Merci à Benjamin GUILLOT, Hazem MUBARAK, Céline CAGNA, Hadrien WEIL, Maxime GELINEAU, Clément MAUDUIT, François GODET, Antonin SANITAS, Saptarshee MITRA, Mohamed KBIBOU, Stéphane BESSONNET et à Benjamin LEVY sans qui l'ambiance au travail n'aurait jamais été aussi chaleureuse et conviviale. Un message particulier à Mr. SANITAS fraîchement docteur qui a permis de rendre ces années formidables et inoubliables.

Mes derniers remerciements s'adressent à mes proches amis et ma famille qui m'ont continuellement soutenu et encouragé pendant tant d'années. Pour finir, merci infiniment à mes parents qui ont toujours cru en moi, je les embrasse tendrement.

Table des matières

Table des matières	1
Introduction générale	5
0.1 Références	8
1 Etat de l'art des interactions béton-coffrage	9
1.1 Introduction	11
1.2 Le béton dans les coffrages verticaux	11
1.2.1 Réalisation d'un voile vertical en béton	11
1.2.2 Définition du béton	12
1.2.3 Définition d'un coffrage	13
1.2.4 Défauts induits par les interactions du béton avec le coffrage	14
1.3 Frottement du béton à l'état frais contre les parois coffrantes	15
1.3.1 Mécanismes de frottement du béton à l'état frais	15
1.3.2 Influence de la formulation et mise en œuvre du béton	17
1.3.3 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante	19
1.4 Adhérence du béton durci contre les surfaces coffrantes	22
1.4.1 Physique de l'adhérence du béton	22
1.4.2 Caractéristiques de l'interface béton-coffrage	24
1.4.3 Caractérisation expérimentale de l'adhérence du béton	27
1.4.4 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante	29
1.5 Solutions industrielles limitant les interactions béton-coffrage	34
1.5.1 Huiles de décoffrage	34
1.5.2 Revêtements polymères imperméables	36
1.5.3 Revêtements perméables	37
1.6 Bilan et problématique	38
1.7 Références	39
2 Matériaux et approches expérimentales	47
2.1 Introduction	48
2.2 Bétons employés	48
2.2.1 Compositions des bétons	48
2.2.2 Propriétés des composants	48
2.2.3 Caractérisation expérimentale des bétons frais	50
2.3 Peaux coffrantes étudiées	51
2.3.1 Caractérisation microscopique de la surface des peaux coffrantes	52
2.3.2 Caractérisation des signatures physico-chimiques des peaux coffrantes	53
2.3.3 Caractérisation des signatures topographiques des parois de coffrage	56
2.3.4 Caractérisation des signatures surfaciques mécaniques des surface coffrantes	58
2.4 Caractérisation tribologique de l'interface béton-peau coffrante	60
2.4.1 Description du tribomètre	60
2.4.2 Paramètres d'essais	60
2.4.3 Procédure d'essais	61

2.5	Caractérisation de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes	61
2.5.1	Appareil de mesure	62
2.5.2	Paramètres expérimentaux	62
2.5.3	Méthode expérimentale	63
2.5.4	Analyses post-mortem	63
2.6	Conclusion	65
2.7	Références	66
3	Analyse des signatures surfaciques des peaux coffrantes	69
3.1	Introduction	70
3.2	Analyses micrographiques des peaux coffrantes	70
3.3	Signatures topographiques des peaux coffrantes	74
3.4	Signatures physico-chimiques des peaux coffrantes	77
3.4.1	Caractérisation de la composition chimique surfacique des peaux coffrantes	77
3.4.2	Etude de la mouillabilité de surface des peaux coffrantes	84
3.5	Signatures mécaniques des peaux coffrantes	87
3.5.1	Détermination de la dureté surfacique des peaux coffrantes	87
3.5.2	Caractérisation du rayage des peaux coffrantes	88
3.6	Conclusion	98
3.7	Références	99
4	Caractérisation des frottements du béton contre les peaux coffrantes lors du coulage	101
4.1	Introduction	102
4.2	Mesure de la force tangentielle	102
4.3	Etude de la contrainte de frottement interfaciale béton-peau coffrante	102
4.4	Caractérisation topographique des peaux coffrantes suite aux essais tribologiques	105
4.4.1	Caractérisation qualitatif de la dégradation des peaux coffrantes	105
4.4.2	Quantification de l'usure par interférométrie optique	106
4.4.3	Caractérisation de l'usure de parois coffrantes utilisées sur site	109
4.5	Conclusion	112
4.6	Références	113
5	Caractérisation de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes lors du décoffrage	115
5.1	Introduction	116
5.2	Élaboration de l'essai d'adhérence béton-coffrage	116
5.2.1	Hypothèses initiales	116
5.2.2	Conception du dispositif expérimental	117
5.2.3	Estimation de la déformation par simulation numérique	122
5.2.4	Fabrication du dispositif d'essai d'adhérence	124
5.3	Méthodologie de l'essai d'adhérence	128
5.4	Validation expérimentale de l'essai d'adhérence	129
5.5	Étude de la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes lors du décoffrage	131
5.5.1	Détermination des contraintes de rupture interfaciale béton-peaux coffrantes	131
5.5.2	Analyses surfaciques des peaux coffrantes suite aux essais d'adhérence	132
5.6	Conclusion	139
5.7	Références	140
6	Impact des signatures surfaciques de la peau coffrante sur l'interface béton-coffrage	141
6.1	Introduction	142
6.2	Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante sur les frottements du béton	142
6.3	Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante sur l'adhérence du béton	144
6.4	Identification des signatures surfaciques fonctionnelles des peaux coffrantes	148
6.5	Conclusion	150
6.6	Références	151

Conclusion générale	153
A Compléments	I
A.1 Signatures topographiques des peaux coffrantes	I
A.2 Signatures physico-chimiques des peaux coffrantes	III
A.3 Schémas techniques des composants du dispositif de l'essai d'adhérence	III
A.4 Adhérence du béton sur les peaux coffrantes	XIII
A.5 Références	XIV
B Liste des acronymes	XV
C Glossaire	XVII
D Liste des symboles	XIX
E Liste des figures	XXI
F Liste des tableaux	XXV

Introduction générale

Contexte actuel

Le béton est un élément indispensable dans le monde de la construction et du bâtiment. Il est largement utilisé pour sa fluidité et sa très bonne tenue en compression lors de sa mise en œuvre. Du fait de son faible coût économique et de son utilisation pratique, le béton est disponible en masse partout. La formulation des bétons est cependant en évolution permanente pour répondre aux demandes de l'industrie du bâtiment (exigences architecturales, durabilité élevée, mise en place facilitée...) et des normes environnementales (réduction de la toxicité des produits).

Lors des opérations de réalisation de **voiles** verticaux en béton armé, des outils appelés **banches** permettent de créer, par assemblage, des moules garantissant le maintien du béton en forme, le temps que sa prise soit effective (de 15 heures à 72 heures en fonction de la formulation du béton). Ce dernier a cependant la particularité d'adhérer sur de nombreuses surfaces, notamment sur la surface coffrante des **banches** ce qui engendre des défauts esthétiques du **parement** lors de la phase de décoffrage. Pour pallier ce problème d'adhérence, en amont du coulage du béton, les compagnons procèdent au nettoyage puis au huilage par pulvérisation de la face coffrante des **banches**. En plus de limiter le contact intime entre la peau coffrante et le béton, cette couche d'huile réduit également les frottements du béton lors du coulage.

Néanmoins, ces actions de préparation de surface sont chronophages, polluantes, génératrices de déchets qu'il convient d'éliminer ou recycler et consommatrices de produits lubrifiants. De plus, la fiabilité du procédé de l'huilage est limitée en raison de la durée d'efficacité réduite des agents et des intempéries qui réduisent le maintien des huiles sur les peaux coffrantes. Également, la robustesse de ce procédé est restreinte due à la mise en œuvre in-situ sur les chantiers de construction.

Le choix de ces agents de démoulage est effectué en fonction de la nature du coffrage et des conditions de coulage du béton. Il existe principalement 2 familles en activité : les huiles minérales d'origine pétrochimique et les agents chimiques de démoulages à base végétales et/ou de synthèse provenant du savoir-faire de l'oléochimie. La première famille est très répandue pour le huilage des **banches** en raison de la maîtrise de ses formulations, cependant ce type d'huile n'est pas biodégradable et est nocif pour l'homme. La seconde catégorie est apparue pour répondre aux préoccupations environnementales avec des formulations bien plus biodégradables. Les risques d'emploi pour l'homme ont également considérablement diminué.

On déplore une faible fiabilité de ce procédé en raison des contraintes suivantes : les produits de décoffrage ont une durée d'efficacité réduite (notamment en raison de leur oxydation), les intempéries (notamment la pluie qui lessive l'huile appliquée sur la surface coffrante), les aléas du chantier (mauvaises et non-respect des conditions d'utilisation de ces huiles) qui amènent des répercussions sur le cycle d'utilisation de la **banche**, les difficultés d'obtenir des surfaces propres (présence résiduelle fine de béton sur la paroi coffrante due aux coulages précédents) et sèches (impossibilité d'appliquer une huile sur une surface mouillée) et enfin l'application de film d'huile d'épaisseur non constante (application par pulvérisation).

Problématique industrielle

Un enjeu réside dans la mise en œuvre de procédés de démoulage frugaux sur les parois des coffrages et ce afin de répondre à des exigences de prestations client de plus en plus contraignantes dans l'industrie du **bâtiment et des travaux publics (BTP)**. La levée de ces verrous confèrera une compétitivité assurée dans un contexte concurrentiel assez rude. Pour ce faire, il est nécessaire de maîtriser les processus de nettoyage des interfaces béton/paroi et de développer des moyens de contrôle de la qualité du démoulage en tenant compte des différentes variables liées aux innovations matériaux et au design imposé par l'esthétique des **parements**.

Le développement d'un tel procédé de décoffrage nécessite une compréhension fine de la physique de l'adhérence béton/paroi et de la technologie de décoffrage de référence par huilage afin de pouvoir traduire, en critères physiques quantifiables (topographies, interfaces et intégrité des **parements**), l'impact des différents paramètres du procédé sur la qualité finale spécifiée et requise par le produit. La définition de cet outil de quantification devra inclure le couple coût/valeur pour un procédé simple et fiable qui s'inscrit dans le développement de la technologie de décoffrage dans le domaine « ingénierie des **parements** en béton ».

C'est dans ce contexte que des solutions alternatives au procédé d'huilage ont déjà été développées [1–3]. Afin d'acquérir une compétitivité technico-économique supérieure par rapport à ces solutions de décoffrage, les nouvelles alternatives ne doivent pas seulement limiter l'adhérence du béton mais doivent en plus respecter plusieurs conditions que voici :

- permettre un décoffrage propre et facile sans endommagement ;
- contribuer à la production de **parements** sans défauts (minimiser le micro-bullage, la décoloration) ;
- résister aux frottements du béton ;
- s'adapter aux diverses formulations du béton ;
- être indépendant des conditions climatiques ;
- être robuste pendant un nombre de coulages imposés ;
- se conformer aux directives écologiques ;
- s'adapter à la chaîne de production de coffrages.

Structuration du manuscrit

Dans le but de répondre à ces objectifs, ce travail qui se consacre à la détermination des fonctionnalités idéales de surface pour limiter les interactions du béton contre les coffrages sera décomposé en cinq chapitres. Dans le chapitre 1, un état de l'art détaille les mécanismes agissant à l'interface entre le béton et les coffrages. Il permet de dresser un bilan des solutions industrielles actuelles et de soulever les verrous scientifiques et technologiques propres à la réalisation de structures bétonnées. Le chapitre 2 présente les méthodes et outils expérimentaux utilisés dans ce travail. Dans le chapitre 3, les signatures surfaciques des peaux coffrantes sont caractérisées afin de déterminer les signatures fonctionnelles relatives aux interactions du béton. Dans le chapitre 4, les phénomènes de frottement du béton lors du remplissage des coffrages sont étudiés expérimentalement. Finalement, dans le chapitre 5, un essai d'adhérence du béton à l'échelle du laboratoire est conçu pour caractériser la propension à l'adhérence lors du décoffrage. L'ensemble de ces résultats aboutit à une meilleure compréhension des mécanismes établissant l'interface béton/coffrage. Les fonctionnalités des peaux coffrantes influençant les interactions avec le béton sont étudiées et quantifiées dans le chapitre 6. Les conclusions qui émanent de ces travaux, complétées de nouvelles pistes de développement, viennent terminer ce mémoire.

0.1 Références

- [1] Geoplast®, “Geopanel, the universal panel for walls,” *Document technique*, 2014. 6
- [2] Zemdrain®, “Nappes de coffrage anti-bullage à perméabilité contrôlée,” *Document technique*, 2017.
- [3] N. Goudjil, “Développement d’un nouveau procédé de décoffrage basé sur la polarisation du béton – Etude de l’aspect des parements en béton,” *Thèse de doctorat, Université d’Artois*, 2012. 6

Chapitre 1

Etat de l'art des interactions béton-coffrage

Sommaire

1.1 Introduction	11
1.2 Le béton dans les coffrages verticaux	11
1.2.1 Réalisation d'un voile vertical en béton	11
1.2.2 Définition du béton	12
1.2.2.1 Liant hydraulique	12
1.2.2.2 Granulats	13
1.2.2.3 Eau de gâchage	13
1.2.2.4 Adjuvants	13
1.2.3 Définition d'un coffrage	13
1.2.3.1 Peaux coffrantes métalliques	14
1.2.3.2 Peaux coffrantes en bois	14
1.2.4 Défauts induits par les interactions du béton avec le coffrage	14
1.2.4.1 Classification des défauts	14
1.2.4.2 Origine des défauts	15
1.3 Frottement du béton à l'état frais contre les parois coffrantes	15
1.3.1 Mécanismes de frottement du béton à l'état frais	15
1.3.2 Influence de la formulation et mise en œuvre du béton	17
1.3.3 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante	19
1.4 Adhérence du béton durci contre les surfaces coffrantes	22
1.4.1 Physique de l'adhérence du béton	22
1.4.1.1 L'ancrage mécanique	23
1.4.1.2 Les effets capillaires	23
1.4.1.3 L'adhésion chimique	23
1.4.1.4 Les forces électrophysiques	24
1.4.1.5 Autres phénomènes physico-chimiques	24
1.4.2 Caractéristiques de l'interface béton-coffrage	24
1.4.3 Caractérisation expérimentale de l'adhérence du béton	27
1.4.4 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante	29
1.4.4.1 Influence de la signature physico-chimique	29
1.4.4.1.1 Cas des peaux métalliques	29
1.4.4.1.2 Cas des peaux en polymère	32
1.4.4.2 Influence de la signature topographique	33
1.5 Solutions industrielles limitant les interactions béton-coffrage	34
1.5.1 Huiles de décoffrage	34
1.5.2 Revêtements polymères imperméables	36

1.5.3 Revêtements perméables	37
1.6 Bilan et problématique	38
1.7 Références	39

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, une revue littéraire est conduite sur les interactions du béton dans le cadre des coffrages sur les sites de construction. Dans un premier temps, les principaux acteurs mis en jeu lors de la fabrication de structures bétonnées sont détaillés. Les phénomènes de frottement et les mécanismes d'adhérence du béton au coffrage sont ensuite présentés en s'appuyant sur les effets du béton et de la peau coffrante. Pour finir, les solutions industrielles actuellement employées pour minimiser l'adhérence du béton contre le coffrage sont décrites en mettant en avant leurs avantages et inconvénients. Cet état de l'art permettra d'identifier les verrous scientifiques et industrielles afin de définir les différents axes de recherches de ce travail.

1.2 Le béton dans les coffrages verticaux

Dans cette première partie, la conception de **voiles** verticaux en béton est initialement détaillée en s'appuyant sur les étapes fondamentales de la mise en œuvre du béton. Le béton et ses constituants ainsi que le coffrage sont définis par la suite. Finalement, les défauts esthétiques visibles sur les **parements** induits par l'interaction du béton contre les coffrages sont détaillés.

1.2.1 Réalisation d'un **voile** vertical en béton

Le but de cette section est de décrire brièvement le processus de confection d'un **voile** en béton afin d'avoir une meilleure approche des phénomènes physico-chimiques intervenant à l'interface béton-coffrage. La figure 1.1 schématise les étapes de réalisation d'un **voile** vertical en béton.

Une structure bétonnée est généralement réalisée en trois principales étapes : le coffrage, le coulage du béton et enfin le décoffrage. L'étape initiale est la mise en place des deux parties coffrantes. Celles-ci doivent être précisément positionnées et à l'aplomb du plancher sous risque de ne pas supporter les efforts engendrés par la pression du béton coulé ultérieurement. Habituellement, sur la majorité des coffrages, un nettoyage des peaux coffrantes suivi d'un huilage par pulvérisation est réalisé préalablement pour éviter l'accrochage du béton et obtenir un **parement** propre lors du retrait des **banches**. Les fournisseurs d'agents décoffrant recommandent également de racler l'excès d'huile [1]. Bien que cette dernière étape soit souvent négligée par les compagnons car considérée contraignante, elle permet de minimiser les défauts esthétiques des **parements**. Dans le cas de **voile** en béton armé, un **ferrailage** est installé à l'intérieur du coffrage afin de fortifier la structure bétonnée. La distance entre le treillis métallique et la **banche** est ajustée de façon à respecter l'enrobage des **armatures** (figure 1.1a). Le coulage du béton peut se faire selon deux procédés distincts : le coulage par gravité ou le coulage à la pompe [2]. La première méthode consiste à verser le béton à l'état frais depuis le haut du coffrage où le béton peut être coulé à travers une goulotte pour éviter la **ségrégation** du milieu. Celui-ci étant placé à plusieurs dizaines de centimètres du fluide coulé précédemment, cela permet de former un **voile** couches par couches (figure 1.1b). Cette opération est plus adéquate pour les **parements** de grande hauteur. La seconde se pratique directement à partir de la bétonnière. Un tuyau démarré de l'engin est immergé dans le béton à l'état frais et la coulée se fait de manière continue et homogène. En générale, la vitesse de remplissage du béton dans les coffrages est plus élevée en coulant à la pompe qu'en coulant par gravité. Par conséquent, la pression sur les parois coffrantes peut être supérieure. La vitesse de coulage ainsi que la pression engendrée sur les parois par le béton à l'état frais sont deux paramètres à prendre compte, notamment pour des **voiles** de grandes hauteurs. Après avoir versé le béton entre les **banches**, l'opération suivante consiste à le vibrer dans le but de le répartir uniformément dans le coffrage [2]. Cette vibration peut être interne, via une aiguille vibrante d'une quarantaine de centimètres plongée dans le béton encore à l'état frais. Dans des cas complexes, il existe aussi un procédé de vibration externe qui dépend fortement de la nature de la peau coffrante. Pour les bétons très fluides, la vibration est déconseillée afin d'éviter la séparation des granulats de la pâte de ciment et former par conséquent un **parement** hétérogène. Après durcissement du béton (figure 1.1c), la dernière étape consiste à retirer les coffrages pour libérer le béton. Ceux-ci sont premièrement basculés vers l'arrière dans le but d'évacuer l'eau qui s'est accumulée contre la peau

coffrante pendant le durcissement du béton et d'éviter un effet de succion trop important. Cette opération ne doit jamais être faite prématurément pour ne pas engendrer de défauts supplémentaires [3] (figure 1.1d). Une pellicule de ciment peut être visible sur la surface coffrante après décoffrage, qu'il faut rapidement retirer pour retrouver un état propre pour la prochaine coulée. C'est en fait la peau du ciment qui s'est détachée du voile lors du décoffrage.

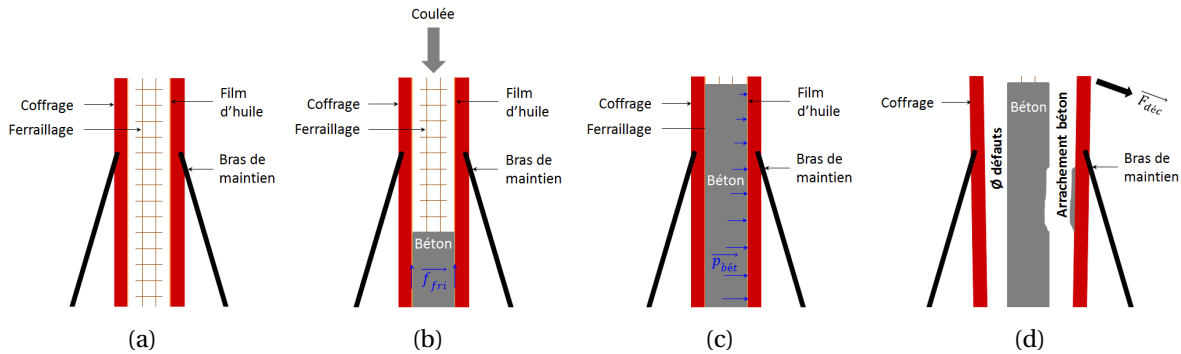


FIGURE 1.1 – Etapes de conception d'un voile vertical en béton armé : (a) Mise en place des coffrages, (b) Coulage du béton par gravité, (c) Durcissement du béton après vibration, (d) Décoffrage du voile.

La description des étapes de conception d'un voile vertical a permis d'implanter le contexte actuel. Par la suite, les principaux acteurs mis en jeu sont décrits : le béton et le coffrage.

1.2.2 Définition du béton

Initialement, lors de sa mise en œuvre, le béton se présente sous forme liquide puis au cours du temps durcit du fait de la réaction du ciment avec l'eau. Solide, le béton possède une importante résistance mécanique. Cette facilité de mise en place ainsi que ces bonnes performances mécaniques font du béton, un matériau très employé dans le domaine du BTP.

Le béton est un mélange considéré comme un milieu bi-phasé composé d'un squelette granulaire de sable et de gravillons (60-80 %) et d'une matrice fluide qui constitue la pâte de ciment. Cette dernière contient le ciment avec ses éventuelles additions calcaires ainsi que l'eau de gâchage. Divers adjuvants peuvent également compléter la formulation des bétons. Par la suite, les différents composants du béton sont détaillés.

1.2.2.1 Liant hydraulique

Le ciment Portland se présente sous la forme d'une poudre minérale fine. Ce liant hydraulique est produit à partir d'un mélange d'environ 80 % de calcaire, composé majoritairement de carbonate de calcium (CaCO_3), de 20 % d'argile (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ...) et d'une faible proportion de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Après broyage et traitement thermique, la poudre finale contient une forte quantité de silicates de calcium (Ca_3SiO_5 et Ca_2SiO_4) et une proportion plus faible de produits provenant des oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Pour un ciment ordinaire Portland, les grains de ciment ne dépassent généralement pas 80 μm de diamètre et 50 % sont inférieurs à 15 μm [4-6]. Ceux-ci sont classés dans la catégorie des fines selon la norme XP P18-540 [7]. L'hydratation du ciment est un processus complexe impliquant une succession de mécanismes intermédiaires [8]. En présence d'eau, les constituants anhydres du ciment vont réagir chimiquement et former des produits dits "hydratés", formant la pâte de ciment. Le durcissement de cette pâte permettra la transformation du mélange fluide en un corps solide. L'hydratation des silicates va également libérer des ions Ca^{2+} et OH^- responsables des pH élevés de la solution interstitielle de la pâte de ciment (pH entre 12,5 et 13,5 selon la présence et la quantité d'autres éléments alcalins [8]). Certains composés sont incorporés dans le mélange lors de la fabrication des ciments. Généralement sous la forme de poudres fines (fillers, cendres volantes...), ces additions calcaires permettent de combler les interstices de la matrice fluide mais également de diminuer la quantité de ciment nécessaire pour la confection d'un béton jusqu'à 35 % [9] et donc de

diminuer les coûts de fabrication. Inertes vis-à-vis du ciment, elles participent également aux remplissages des espaces laissés par les granulats plus grossiers. Des pigments fabriqués à base d'oxydes métalliques naturels peuvent être ajoutés pour modifier la teinte d'origine : entre 0,5 % pour des teintes claires et 5 % pour les plus foncées [10].

1.2.2.2 Granulats

L'ajout de granulats contribue à améliorer la tenue mécanique du béton par rapport à un simple mélange eau-ciment. De faible coût, ils proviennent principalement de roches naturelles et sont inertes vis-à-vis du ciment et de l'eau. Dans la préparation des bétons, les agrégats pris en compte sont généralement des sables et des gravillons de plus grosses dimensions. D'après la norme NF EN 12620+A1 [11], les sables pour béton sont définis inférieurs à 4 mm et les plus gros granulats peuvent atteindre 45 mm. La porosité et le coefficient d'absorption des granulats sont des paramètres importants pour le calcul de l'eau nécessaire pour la confection des bétons [12]. La forme des granulats est définie par un coefficient d'aplatissement. La forme et la texture des granulats influent d'avantage sur les propriétés du béton à l'état frais que du béton durci [13]. Une géométrie inadéquate pourra favoriser la **ségrégation** du béton frais [14]. La répartition et la continuité en taille des granulats sont contrôlées par des mesures granulométriques avec des tamis normés. La propreté [14] et la rugosité des éléments [15] influent sur l'adhérence granulats-pâte de ciment. Les sables sont également définis par un module de finesse qui joue sur la maniabilité du béton. La granulométrie et la quantité de granulats sont déterminées selon la fonction du béton voulu, c'est-à-dire selon les caractéristiques physico-mécaniques désirées.

1.2.2.3 Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients indispensables dans la confection du béton. L'eau de gâchage est définie comme l'eau totale nécessaire à la confection du béton incluant l'eau adsorbée (pénétration superficielle) dans les pores des granulats les plus fins qui ne participe pas aux réactions d'hydratation du ciment. Lors de son ajout dans le reste du mélange, le liquide va remplir deux fonctions principales [4] : une fonction physique qui va conférer au béton une meilleure **ouvrabilité** (c'est à dire rendre le béton plus fluide) et une fonction chimique liée au développement des mécanismes d'hydratation engendrant un durcissement du béton. Le rapport eau sur ciment $\frac{E}{C}$ (parfois mentionné $\frac{E}{L}$ dans le cas où des fillers sont rajoutés au liant) est un paramètre important dans la confection d'un béton. La quantité d'eau introduite dans le mélange a une influence sur les propriétés du béton, à la fois esthétiques et mécaniques.

1.2.2.4 Adjuvants

Généralement, des adjuvants sont ajoutés dans les formulations des bétons pour modifier leurs caractéristiques. Il existe de nombreux adjuvants qui peuvent être classés en trois principales familles selon la norme NF 934-2+A1 [14, 16]. Les premiers regroupent les plastifiants et les réducteurs d'eau qui vont augmenter l'**ouvrabilité** des bétons à l'état frais. Dans le cas des **bétons autoplaçants (BAP)**, l'ajout de **superplastifiant (SP)** rend les bétons extrêmement fluides et ces derniers ne doivent plus être vibrés. Ensuite, il y a ceux qui accélèrent ou retardent la prise du béton. Et enfin, les derniers affectent particulièrement les propriétés du béton (entraîneurs d'air, hydrofuges, résistants au gel par exemple). Le dosage de ces produits est effectué par rapport à la masse de ciment.

1.2.3 Définition d'un coffrage

Sur les sites de construction, les plus grands éléments de coffrage utilisés pour la réalisation de **voiles** verticaux en béton sont appelés **banches**. Ceux-ci sont constitués d'une peau ou paroi coffrante maintenue par une ossature rigide et indéformable [17]. Étant donné que le béton est en contact direct avec la peau du coffrage, l'aspect du **parement** réalisé est le négatif de la surface de la paroi coffrante [10]. Le choix de cette peau dépend donc de l'état final de l'ouvrage que l'on veut obtenir.

De nos jours, différents matériaux sont utilisés pour réaliser la paroi coffrante tels que les métaux ou le bois.

1.2.3.1 Peaux coffrantes métalliques

Les peaux coffrantes métalliques sont utilisées pour des formes simples de coffrages. Celles en acier sont très répandues sur les chantiers pour leur robustesse, leur longue durée d'utilisation et leur grande résistance en pression [18, 19]. Elles se trouvent sous forme de tôles d'épaisseur comprise entre trois et dix millimètres. La surface de ces peaux coffrantes est généralement imperméable ce qui permet d'obtenir un aspect lisse, uniforme et régulier du **parement** en béton [10, 17, 19]. Cependant, ces peaux métalliques doivent être traitées et protégées de la rouille pour ne pas provoquer de défauts esthétiques sur les ouvrages [20]. Des surfaces coffrantes en aluminium peuvent être employées mais elles présentent de fortes tendances à la corrosion chimique [21] et doivent donc être revêtues d'un vernis époxydique protecteur [20].

1.2.3.2 Peaux coffrantes en bois

Les parois coffrantes en bois peuvent être constituées de planches en bois massif non traité ou sous forme de plaques de contreplaqué couramment revêtu d'un film imperméable [10]. L'utilisation de planches en bois permet la confection de coffrages de formes complexes [17]. Cependant, le bois absorbant l'eau [19], les coffrages sont rapidement déformés et non réutilisables [20]. Pour limiter ce problème, on utilise des plaques de contreplaqué recouvertes d'une couche protectrice imperméable [17]. Il existe une grande variété de revêtements qui se présente principalement sous la forme de composés polymériques : bakélite, polyéthylène, polyester, etc. [22]. Ces différents traitements permettent d'obtenir généralement des **parements** lisses, satinés ou brillants. La variété du bois (bouleau, pin, peuplier) et la nature du film protecteur influent sur l'esthétique finale et la durée de vie des panneaux coffrants.

1.2.4 Défauts induits par les interactions du béton avec le coffrage

De nos jours, l'apparence finale des **parements** en béton est devenue un critère de sélection pour la réalisation d'ouvrage. La grande diversité des bétons permet d'exprimer une multitude d'aspects et de teintes [3]. De plus, les **parements** bruts de décoffrage permettent une réduction du temps et des coûts de traitement des surfaces après décoffrage. Par conséquent, la surface des **parements** doit être d'excellente qualité et exempte de défauts esthétiques. Dans cette partie, les défauts visuels des **parements** ainsi que leurs origines rapportées dans la littérature sont présentés.

1.2.4.1 Classification des défauts

Les défauts d'apparence sont nombreux et la littérature est abondante sur ce sujet [1, 9, 10, 17, 18, 23–26]. Les principales irrégularités esthétiques des **parements** peuvent être classés en deux catégories : les défauts de texture (arrachement, bullage, nid de granulats, vide de compaction) et les défauts de teinte (modification de la couleur et apparition de tâches). Ces derniers sont généralement moins importants que les défauts de texture qui demandent une restauration plus contraignante. Cependant, dans le cadre des **parements** brutes de décoffrage, ces défauts deviennent problématique.

La formation de ces défauts débute dès la mise en place du béton à l'intérieur des coffrages, causés par des phénomènes de friction engendrés à l'interface béton-coffrage [1, 18, 27]. Ils subsistent ensuite jusqu'au décoffrage du **voile** où l'adhérence du béton peut mener à la dégradation des **parements** mais également à la détérioration des peaux coffrantes.

L'arrachement du béton lors du décoffrage est un des défauts de texture principalement dû à l'adhérence du béton à la peau coffrante. En générale, une pellicule de ciment peut être visible sur la surface coffrante après décoffrage, c'est en fait la peau du ciment qui s'est détachée du **voile** lors du décoffrage [24]. L'arrachement est généralement superficiel [28], ce qui va créer seulement un défaut

esthétique plutôt homogène du **parement**. Un léger poussierage est alors présent sur le coffrage qui sera nettoyable sans effort à l'eau. Dans certains cas, l'arrachement peut être plus profond si l'adhérence du béton contre le coffrage est supérieure à la résistance en traction du béton en volume. Par conséquent, en plus d'un défaut esthétique, il y a un risque d'amorce de fissure qui pourrait considérablement affaiblir la robustesse de la structure. Également, une forte adhérence béton-paroi peut engendrer des nids de graviers assez conséquents [18, 24]. Une plus faible température de durcissement [29] ou un excès d'agent décoffrant [27] peuvent provoquer une augmentation de l'arrachement du béton. Dans les cas où le béton a fortement adhéré à la paroi des **banches**, l'entretien des coffrages pourrait nécessiter des opérations de nettoyage plus longue et contraignante.

1.2.4.2 Origine des défauts

Les origines des imperfections de surface des **parements** sont nombreuses : caractéristiques du béton [27], propriétés et application des agents décoffrants [17, 23, 25], parois coffrante [10]. Toutes les irrégularités de surface des peaux coffrantes seront retrouvées sur le **parement** du béton. De plus, une surface coffrante absorbante aura tendance à former des **parements** plus sombres [17], et une peau non absorbante d'avantage de bullage à la surface des **parements** [27]. Des tâches de rouille peuvent être présentes à la surface des **parements** si la peau coffrante est mal entretenue et corrodée [17]. Pour finir, les conditions de coulage (vibration [18, 24], durée du durcissement [10, 23], température [28, 29] et la pression [1]) ont aussi une influence sur la formation de défauts. Le frottement du béton contre la paroi coffrante peut causer le bullage et la variation de teinte du **parement** due à la migration des fines vers la peau coffrante [1, 18]. Au moment de la prise du béton frais, une vibration trop forte ou le déversement des couches suivantes peuvent engendrer des mouvements de glissement entre le coffrage et le béton suffisants pour cisailer la couche à l'interface béton-paroi [24]. Ce phénomène engendrera un désordre structurel irréversible pendant la suite du durcissement du béton. Également, une mauvaise étanchéité entre des panneaux coffrants peut provoquer une perte d'eau aux joints causant d'important nids de cailloux [17]. Au final, les défauts de **parement** peuvent être engendrés par une multitude de causes et de phénomènes qui convient de connaître afin de pouvoir limiter ces imperfections.

Les frottements générés contre le coffrage lors de la coulée du béton apparaissent comme une source de perturbation à l'interface béton-coffrage. Ce phénomène est donc étudié en détail par la suite.

1.3 Frottement du béton à l'état frais contre les parois coffrantes

La mise en œuvre du béton à l'état frais dans les coffrages peut engendrer une dégradation allant de l'usure de la peau coffrante jusqu'à la rupture du coffrage si la pression du béton est trop forte. D'autres défauts de **parements** peuvent être engendrés par un frottement sévère du béton contre les parois coffrantes. Les signatures surfaciques de la surface coffrante jouent un rôle dominant dans les frottements du béton.

Cette partie passe en revue les études tribologiques du béton à l'état frais en contact avec la paroi coffrante. Des milieux granulaires semblables au béton sont également retenus, telle que l'argile [30–32]. Leurs similarités au niveau des particules fines en milieu aqueux a permis une étude plus approfondie dans le cadre d'une paroi rugueuse, c'est pourquoi nous intégrons ces travaux à la bibliographie. Dans un premier temps, les mécanismes à l'origine du frottement contre le coffrage sont décrits.

1.3.1 Mécanismes de frottement du béton à l'état frais

Le frottement du béton frais contre le coffrage durant le coulage joue un rôle important. Le comportement rhéologique du béton frais et les caractéristiques de la peau coffrante impactent sur le comportement tribologique de l'interface béton-**banche**.

Le comportement rhéologique du béton a été étudié [33–36] et les propriétés d'écoulement du béton frais sont liées à ses caractéristiques propres. Ces études ont démontré que le béton à l'état frais se comportait comme un fluide non-newtonien où sa viscosité varie en fonction de la contrainte de cisaillement appliquée. Le béton à l'état frais se comporte comme un fluide non-newtonien et thixotropique [34]. En effet, au repos et à l'état liquide, la pâte de ciment coagule puis sous l'action d'une contrainte de cisaillement la suspension de particules de ciment et l'eau se dispersent provoquant une baisse de la viscosité du milieu. A l'arrêt du mouvement dynamique, le béton à la particularité de recoaguler et de revenir à son état initial démontrant son caractère thixotropique.

Lors du déversement du béton par le haut dans les coffrages, le frottement engendré par le béton contre la peau agit de façon favorable en réduisant la poussée du béton contre les parois ce qui permet de réduire le dimensionnement des coffrages [4, 27, 37]. De plus, les couches supérieures n'exercent plus d'effort sur les couches inférieures ayant débutées leur prise [38]. Cependant, la succession des coulages dans les coffrages engendre une dégradation progressive de la paroi [39]. Ici, le frottement béton-paroi est considéré statique car le béton déversé en couche subit un glissement relatif vis-à-vis du coffrage. Différents modèles ont été avancés pour estimer la poussée et le frottement du béton contre les coffrages.

Dans le cas de frottements de pâtes d'argile contre des surfaces métalliques, un dispositif de tribométrie avait été conçu par Djelal [31] dans le cadre de sa thèse. Les résultats ont démontré deux principaux phénomènes à l'interface. Après application de la pression de contact, l'eau et les particules de kaolin diffusent jusqu'à la paroi métallique due à la consolidation de l'argile [30]. Dans le cas du béton frais, une couche lubrifiante (couche limite) est formée au voisinage de la paroi coffrante, constituée d'eau et des plus petites fines provenant du ciment [1, 39–41]. En effet, les particules les plus grosses poussent les particules les plus fines contre la paroi pour combler les espaces à la surface et la concentration de fluide varie à l'approche de la paroi. Ce phénomène est appelé l'effet de paroi [4, 42]. L'augmentation du pourcentage de fines à l'interface est provoquée par une hausse de la pression de contact et/ou du volume de pâte du béton [4]. En parallèle, une diminution de la concentration solide est observée proche de la paroi pendant la mise en œuvre [42, 43]. Ce phénomène diminue avec la rugosité de la paroi qui piège les particules dans ses aspérités comme schématisé sur la figure 1.2 alors qu'avec une surface lisse, la rugosité est négligeable devant la taille des particules solides. Le second phénomène correspond au comportement mécanique des fines qui varient selon l'état de surface de la peau coffrante. La présence d'eau contre la peau coffrante permet un degré de liberté plus important des particules au voisinage de la surface que celles dans l'argile [27, 31].

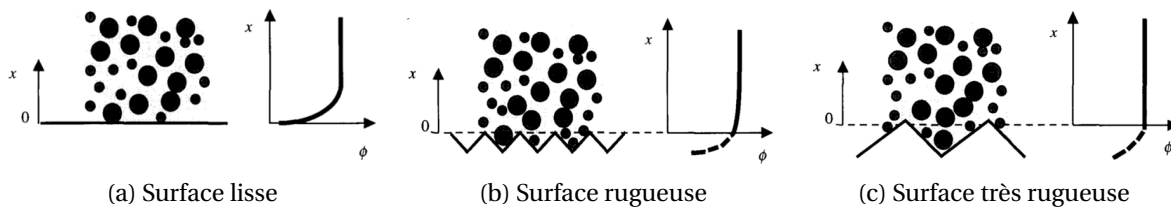


FIGURE 1.2 – Profils de concentration solide des particules Φ au voisinage d'une paroi selon différentes échelles de rugosité [43].

Basé sur le dispositif de Djelal [30, 31] et Beaumel [32] le tribomètre plan/plan qui a été mis au point par Vanhove [27, 39, 44] consiste à faire glisser une peau coffrante métallique en contact avec deux cylindres de béton à l'état frais maintenue hermétiquement sous pression (figure 1.3). Grâce à ce nouveau tribomètre, l'influence de la pression de contact, de la vitesse de coulage et de la composition du béton a pu être étudiée.

Par ailleurs, les études sur l'interface béton-coffrage [4, 40, 41, 45, 46] ont montré que les frottements du béton frais contre la peau coffrante étaient généralement de type Coulomb où la contrainte de friction à l'interface τ_f est proportionnelle à la pression normale du béton P_b selon l'équation 1.1 :

$$\tau_f = \mu_b \cdot P_b \quad (1.1)$$

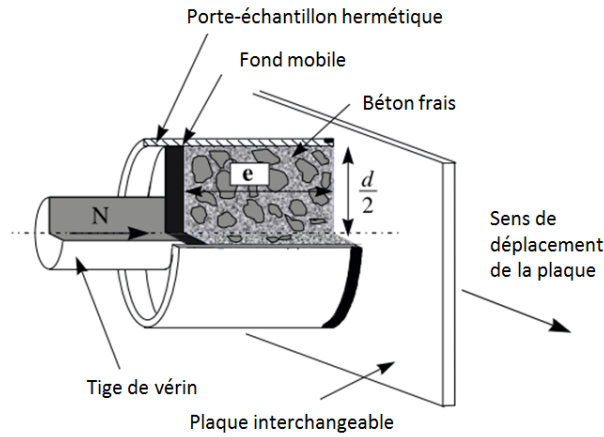


FIGURE 1.3 – Principe du tribomètre développé par Vanhove [27].

où μ_b est égale au coefficient de frottement du béton sur la peau coffrante.

Cependant, certaines études [1, 27, 39, 47] ont observées le contraire notamment avec des bétons autoplaçant où la contrainte de frottement varie de façon non linéaire avec la pression. Basé sur la théorie et le modèle des milieux granulaires ensilés de Janssen [48, 49], Vanhove [27, 44, 50] a développé un modèle afin de prédire la pression P_b exercée par les BAP (valable également pour les bétons ordinaires) contre les coffrages pendant le coulage et celle-ci est estimée selon l'équation suivante :

$$P_b = \frac{\rho_b \cdot g \cdot e_c \cdot l_c - \tau_0 (2 \cdot e_c + 2 \cdot l_c)}{f_i \cdot \mu_b (2 \cdot e_c + 2 \cdot l_c) (1 - \sin \phi_b)} \cdot (1 - \exp(-\frac{f_i \cdot \mu_b (2 \cdot e_c + 2 \cdot l_c) (1 - \sin \phi_b)}{e_c \cdot l_c} h_b)) \quad (1.2)$$

où ρ_b est la masse volumique du béton ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), g l'accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), e_c la distance entre les deux coffrages (m), l_c la largeur des coffrages (m), τ_0 le seuil de cisaillement du béton (Pa), f_i un coefficient de frottement intergranulaire, ϕ_b l'angle de frottement interne du béton ($^\circ$) et h_b la hauteur de béton coulé (m).

Le seuil de cisaillement τ_0 d'un béton décrit la capacité de mouvement des grains. En dessous de cette valeur, le béton frais se comporte comme un solide immobile. Ce seuil est dépendant de la fluidité du béton et dans le cas des BAP, celui-ci peut être estimé d'après l'équation [1] :

$$\tau_0 = \frac{\rho_b g}{11740} (808 - D_b) \quad (1.3)$$

avec D_b l'étalement du béton (mm) déterminé après un essai d'Abrams [51].

Le modèle précédemment décrit est complexe à mettre en œuvre, notamment en raison du grand nombre de paramètres pris en compte et de la difficulté à les mesurer ou estimer. De plus, celui-ci a été établi d'après des comportements granulaires solides et continus tandis que le béton est un milieu aqueux discontinu où les particules sont de l'ordre du micromètre [50].

Connaissant à présent les phénomènes à l'origine du frottement du béton, les approches expérimentales mesurant la friction à l'interface béton-coffrage vont être discutés dans la section suivante.

1.3.2 Influence de la formulation et mise en œuvre du béton

Beaucoup de travaux se sont intéressés aux frottements du béton frais contre le coffrage en fonction de la composition du béton et de la vitesse de coulée. Divers appareils de frottement ont été conçu pour étudier le comportement tribologique du béton à l'état frais à l'interface béton-paroi [27, 52–56]. L'ajout d'huile sur les parois coffrantes réduit le frottement du béton contre la paroi jusqu'à 46 % avec des formulations végétales [40]. Cependant, dans le cadre de ce travail, c'est l'impact des signatures surfaciques des parois coffrantes qui est recherchées. Par conséquent, les études présentées par la suite concernent uniquement les frottements exercés à sec contre des parois sans ajout

d'huile.

Les résultats ont montré en grande majorité que les frottements du béton à sec augmentaient avec la pression de contact béton-paroi où la hausse de la pression entraîne une migration des fines vers la couche limite jusqu'à compression totale de celle-ci contre la paroi. A partir d'une pression critique, la couche limite commence à diffuser de la surface de la paroi coffrante vers le béton dans des zones moins sollicitées et le frottement béton-paroi devient granulaire [27, 39].

La figure 1.4 montre l'évolution de la contrainte de frottement du béton pour quatre volumes de pâte différents. L'augmentation du volume de pâte d'un béton entraîne une augmentation de la contrainte de friction. A des faibles pressions de contact de 30 kPa, les contraintes restent autour de 10 kPa quelle que soit la proportion de pâte. A 90 kPa, un béton à 34 % de pâte (C4) entraîne une augmentation de 1,7 fois de la contrainte par rapport à un béton à 28 % de pâte (C1) [41]. Avec un béton à plus fort pourcentage de pâte, la quantité de fines près de la paroi est plus importante. La pression entraîne un encombrement de particules dans la couche limite qui devient donc plus rigide d'où une augmentation des frottements [4].

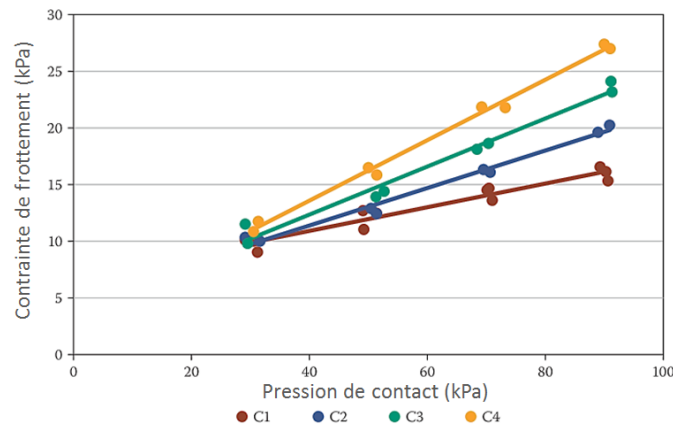


FIGURE 1.4 – Evolution de la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi en fonction de la pression de contact pour quatre compositions de béton standard [41].

L'ajout de SP dans la formulation d'un béton diminue les contraintes de frottement à l'interface [4, 41, 46]. Avec un BAP, la contrainte de frottement τ_f peut diminuer de 25 kPa à 15 kPa dans le cas où la pression atteint 90 kPa comme indiquée sur la figure 1.5. Le superplastifiant disperse les particules de ciment en s'adsorbant à leur surface, ce qui les empêche de s'agglomérer. Par conséquent, la condensation des fines dans la couche limite est moins importante et celle-ci devient plus déformable, ce qui provoque une diminution des frottements à l'interface.

L'importance de la vitesse de coulage sur les frottements du béton a également été étudiée [27, 39, 44]. La rugosité de la peau coffrante est montrée comme le paramètre prépondérant. La vitesse de glissement d'une paroi lisse de $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ n'a pas d'effet sur la contrainte de frottement quels que soient le béton et la pression de contact parce que la faible rugosité de la paroi empêche les fines de se loger dans les aspérités de surface [39]. De plus, la pression exercée sur les grains en contact avec la paroi est très supérieure devant la contrainte appliquée à ceux-ci pendant le déplacement de la peau coffrante. Lorsque la rugosité augmente à $1,6 \mu\text{m}$, la vitesse de déplacement va avoir une influence sur la friction du béton. La figure 1.6 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour différents bétons employés. Avec des BAP (courbes 1 et 2 de la figure 1.6), la contrainte de frottement décroît fortement et non linéairement avec la vitesse lorsque la pression est élevée. A 200 kPa, une vitesse de $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ engendre une chute de la contrainte de 45 % par rapport à une vitesse inférieure à $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ [27]. Avec des bétons standards (courbes 3 et 4 de la figure 1.6), le comportement est inverse. Les frottements augmentent à de faibles vitesses jusqu'à atteindre un seuil autour de 35 kPa équivalent à des vitesses de $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ puis diminuent. Avec une

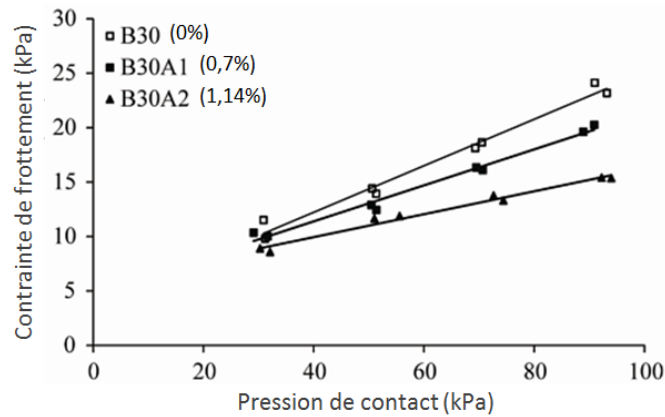


FIGURE 1.5 – Evolution de la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi en fonction de la pression de contact selon le dosage en SP [46].

paroi rugueuse, il existe une vitesse critique où les grains se déplacent tellement vite qu'ils ne peuvent plus être piégés dans les aspérités de la paroi. Par conséquent, la contrainte de friction a tendance à être stable à des vitesses supérieures à la vitesse critique [27].

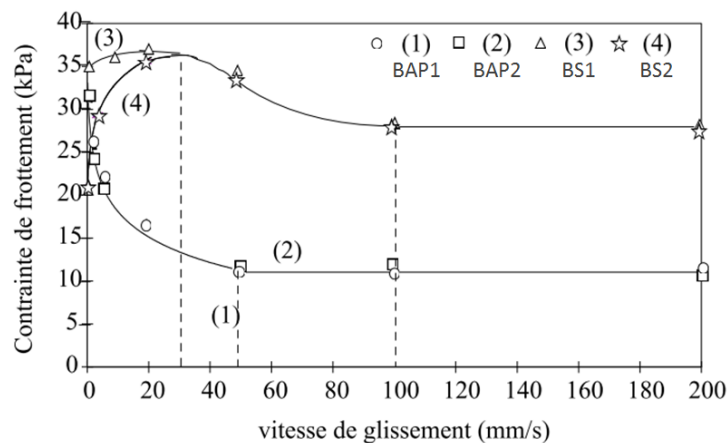


FIGURE 1.6 – Evolution de la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi en fonction de la vitesse de glissement pour une pression de 200 kPa et un rugosité de peau coffrante R_a égale à $1,6 \mu\text{m}$ [27].

Le temps joue également un rôle sur les frottements du béton à l'interface. En général, en dessous de 30 minutes après confection du béton, la contrainte de friction augmente lentement quel que soit le béton [27]. Au-delà, les bétons standards montrent une forte augmentation de la contrainte causée par la prise du béton qui augmente la viscosité plastique du milieu. Avec des BAP, la contrainte est stable jusqu'à 90 minutes. Ce phénomène est causé par la présence de superplastifiant qui retarde l'hydratation du béton.

Dans cette section, l'influence de la composition du béton (volume de pâte et addition de SP) et des "conditions de coulée" (pression, vitesse et temps) sur les frottements du béton contre la paroi coffrante ont été discutées. Cependant, les frottements du béton à l'interface sont également impactés par les caractéristiques surfaciques de la paroi, ce qui a été étudié par la suite.

1.3.3 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante

Dans la section précédente, les principaux facteurs qui peuvent influencer les frottements du béton à l'interface béton-paroi ont été décrits. Les phénomènes de frottement à l'interface sont principalement régis par les propriétés de la couche limite. La pression engendre une compression de cette couche qui tend à migrer vers le béton jusqu'au frottement des granulats. Le volume de pâte et

le dosage en SP détermine la quantité de fines présente dans cette couche. La vitesse de glissement affecte les mouvements des fines et le contact fines-paroi.

Concernant, l'influence des signatures surfaciques de la paroi coffrante sur les frottements du béton, Vanhove et Djelal [27, 39] ont étudié les phénomènes intervenant à l'interface entre des peaux coffrantes métalliques et un béton autoplaçant aux caractéristiques similaires à celles rencontrées sur chantier. Deux rugosités de $0,3 \mu\text{m}$ et $1,6 \mu\text{m}$ ont été retenues. Les résultats tribologiques ont montré que la variation du coefficient de frottement n'était pas monotone quelle que soit la rugosité de la peau coffrante. Des résultats similaires avaient été trouvés par Djelal [30] dans le cas de frottement argile-paroi. Sur la figure 1.7, deux comportements ont été déterminés avec une pression optimale minimisant le frottement estimée à 110 et 140 kPa pour des rugosités de $1,6$ et $0,3 \mu\text{m}$ respectivement. Le coefficient de frottement est supérieur avec la peau coffrante de rugosité $1,6 \mu\text{m}$ [27].

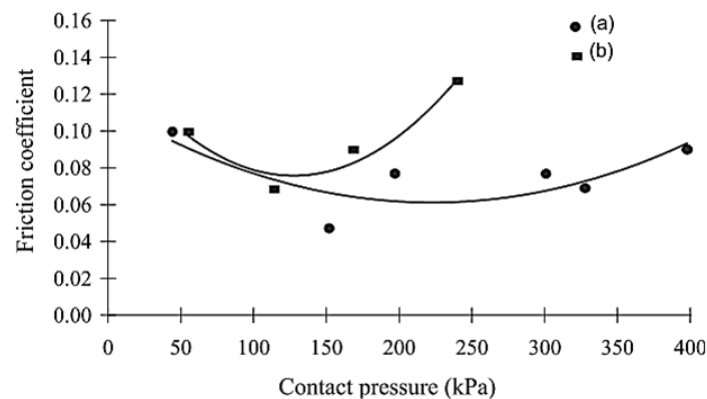


FIGURE 1.7 – Evolution du coefficient de frottement d'un BAP en fonction de la pression de contact pour une vitesse de glissement de $2,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (a) $R_a = 0,3 \mu\text{m}$, (b) $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ [39].

Lorsque la pression du béton P_b est inférieure à la pression critique, de plus faibles contraintes de frottement sont observées car le glissement de la peau coffrante provoque un cisaillement dans la couche limite. En dessous de cette pression critique, la rugosité de la peau coffrante semble ne pas agir sur le comportement interfacial du béton. Dans les deux cas, en dessous de 110 kPa, des coefficients de frottement similaires ont été mesurés (figure 1.8a). Avec une paroi plus rugueuse, une partie de la couche limite s'incruste dans les aspérités ce qui peut justifier une pression de contact limite plus faible (figure 1.8c). Au-delà de la pression optimale, le béton adopte un comportement granulaire [39, 47] où les granulats les plus grossiers viennent au contact de la paroi et la couche limite migre vers l'intérieur du volume de béton ce qui a pour effet d'augmenter les frottements à l'interface béton-paroi lors du cisaillement (figures 1.8b et 1.8d). L'augmentation plus rapide de la contrainte de frottement pour une peau coffrante rugueuse est provoquée par le frottement des granulats contre les aspérités de la surface de la peau coffrante. En effet, la présence de pics engendre la rotation des granulats et par conséquent provoque une dissipation d'énergie. Après plus de 70 coulées simulées, le frottement des gros grains contre la peau coffrante de rugosité R_a initiale égale à $1,6 \mu\text{m}$ a provoqué un élargissement et un approfondissement des aspérités. La rugosité R_a finale a augmenté de plus de 20 % s'élevant à $2 \mu\text{m}$.

Les mêmes phénomènes à l'interface béton-paroi sont observés avec des bétons traditionnels fluidifiés et non adjuvés. Au dessus d'une pression limite, les contraintes de frottements sont plus élevées avec une peau coffrante plus rugueuse [27]. Les pressions critiques déterminées pour des bétons traditionnels sont plus faibles que pour des bétons autoplaçants. En effet, l'interface béton-paroi présente une meilleure lubrification avec des bétons plus fluides ce qui se traduit par une résistance au déplacement de la peau coffrante plus faible.

Les modèles de la figure 1.8 proposés par Vanhove [27, 39] pour définir les phénomènes intervenant à l'interface entre le béton frais et les peaux coffrantes s'appuient sur les mécanismes déterminés

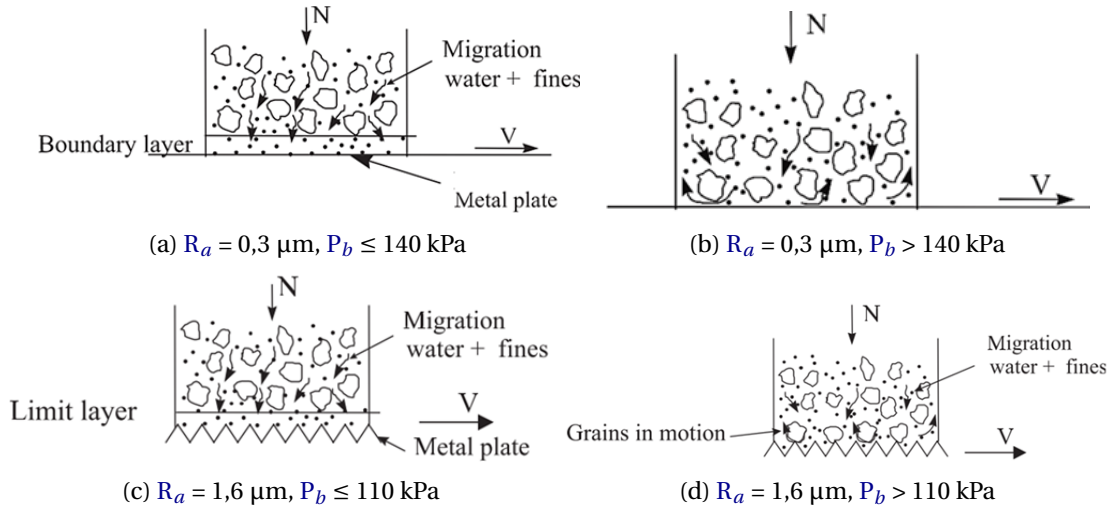


FIGURE 1.8 – Représentations schématiques de l’interface béton-peau acier. Détermination des pressions limites pour des rugosités de peau coffrante de 0,3 et 1,6 μm respectivement [39].

par Djelal [30, 31] dans le cadre de ses travaux sur l’extrusion des pâtes d’argile. L’influence de la rugosité des parois a également été observée sur les frottements à l’interface argile-paroi grâce à des essais tribologiques plan-plan [31]. La figure 1.9 montre qu’avec des conditions expérimentales très variées (proportions en eau, vitesse de glissement et pression de contact), les courbes présentent une rugosité critique à 1,2 μm où les contraintes tangentielles sont minimales. Cette valeur est du même ordre de grandeur que le diamètre moyen des particules de kaolin ϕ_k (1 μm). Également, pour des parois de rugosité très faible ou très importante, les contraintes de frottements à l’interface sont similaires. Au-delà de 20 μm , la rugosité de la paroi impacte faiblement sur le frottement de la pâte d’argile.

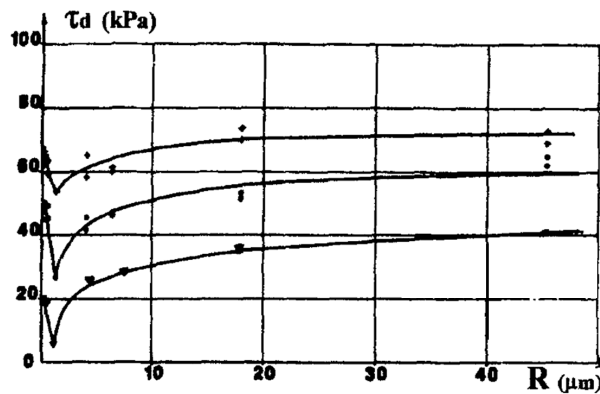


FIGURE 1.9 – Evolution de la contrainte de frottement de trois pâtes d’argile de compositions différentes mais de taille de grains identique ($\phi_k = 1,0 \mu\text{m}$) en fonction de la rugosité R_t de la paroi [30].

Pour avoir une meilleure compréhension du comportement dynamique des particules de kaolin au contact d’une paroi mobile, Djelal [30, 31] a construit un dispositif analogique simple dans lequel les particules de kaolin sont simulées par des disques indéformables de diamètre ϕ_k et la rugosité R_t de la paroi par des plaquettes placées perpendiculairement sur un support mobile. Des masses métalliques situées au dessus des disques imposent la pression de contact, le tout dans une enceinte fermée. Le montage est placé sur un tribomètre pour provoquer le cisaillement à l’interface. La figure 1.10 schématise trois cas étudiés en fonction de la rugosité de la peau coffrante. La rugosité critique déterminée par des essais tribologiques (figure 1.9) a été représentée par des intervalles entre plaquettes et une hauteur des plaquettes identiques au diamètre et à l’épaisseur des disques respectivement. C’est dans le cas n°2 (figure 1.10b) où la contrainte de frottement a été trouvée minimale. En effet, les premiers disques comblent les espaces à la surface de la peau coffrante ce qui va empêcher la rotation des disques suivants normalement piégés dans les rainures. L’interface est donc

ordonnée et le frottement mesuré est alors attribué aux frottements entre particules. Si la rugosité est éloignée de la rugosité critique, autant plus petite (figure 1.10a) que plus grande (figure 1.10c), l'interface est désordonnée et la contrainte de frottement est plus élevée due à la rotation plus abondante des disques. Par conséquent, pour diminuer la force de frottement, il faut réduire l'énergie nécessaire à la rotation des particules piégées dans les irrégularités de la paroi.

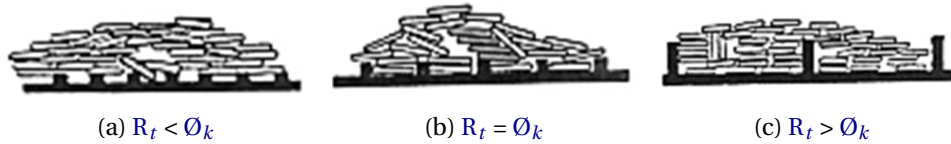


FIGURE 1.10 – Représentation des particules de kaolin sur une paroi en fonction de sa rugosité R_t [31].

Cependant, dans le cas du béton frais, la taille et la géométrie des particules de ciment sont différentes des particules de kaolin ce qui rend l'observation des phénomènes à l'interface délicate. De plus, le ciment présente une granulométrie plus dispersée de 1 à 100 μm que le kaolin. Toutefois, l'augmentation des frottements du béton contre une paroi rugueuse peut être justifiée par la rotation des grains de ciment entraînés par les pics de la paroi.

Cette partie a présenté un état de l'art sur la friction du béton à l'interface béton-coffrage. Les mécanismes à l'origine de ce phénomène ont été décrits, puis différents outils et modèles permettant l'étude des frottements ont été discutés. L'influence de la formulation des bétons et des conditions de mise en œuvre sur les frottements du béton a été fortement caractérisée dans les travaux tribologiques. En revanche, l'effet du coffrage sur la friction du béton a été peu étudié hormis la signature topographique des parois qui a été la seule caractéristique prise en compte. Par conséquent, il y a un besoin d'effectuer de nouveaux travaux tribologiques soulignant l'impact de l'ensemble des signatures surfaciques de la peau coffrante.

Les frottements du béton sur le coffrage émergent lors de la coulée du béton frais. Après durcissement de ce dernier, des phénomènes d'adhérence surviennent à l'interface béton-paroi coffrage. Ceux-ci sont étudiés par la suite.

1.4 Adhérence du béton durci contre les surfaces coffrantes

Dans cette section, les mécanismes responsables de l'adhérence du béton sur les coffrages sont premièrement décrits. Ensuite, les principaux tests existants pour caractériser cette adhérence sont présentés. Les influences des caractéristiques du béton, de sa mise en œuvre et des signatures surfaciques de la paroi coffrante sont finalement exposées.

1.4.1 Physique de l'adhérence du béton

Avant de détailler les phénomènes présents à l'interface béton-coffrage, les notions d'adhésion et d'adhérence sont explicitées. L'adhésion est la formation d'un lien provoquée par l'ensemble des phénomènes physico-chimiques à l'échelle atomique lorsque deux matériaux sont mis en contact intime. Quant à l'adhérence celle-ci implique, en plus de l'adhésion, la morphologie de chacune des deux surfaces dont le contact peut créer des imbrications des aspérités les unes dans les autres. Dans ce dernier cas, la séparation des deux solides nécessitera à la fois la rupture des liaisons d'adhésion et la déformation des aspérités pour extirper chaque solide des zones d'imbrication [57].

Le cas des coffrages est particulier car cela concerne un contact évolutif dans le temps entre un solide (paroi des **banches**) et un fluide durcissant (béton). L'adhérence du béton à l'état frais contre une paroi coffrante est contrôlée par quatre principaux phénomènes physico-chimiques : l'ancrage

mécanique, l'effet capillaire, l'adhésion chimique ainsi que les forces électrophysiques. Ces phénomènes sont détaillés individuellement par la suite.

1.4.1.1 L'ancrage mécanique

L'ancrage mécanique est provoqué par l'incrustation du béton frais dans les aspérités de la paroi coffrante [23, 24, 58, 59]. La grande fluidité de la pâte de ciment facilite son étalement et la pénétration des fines. Au durcissement du béton, il en résulte un assemblage à interface tridimensionnelle et irrégulière (figure 1.11). Ce phénomène mécanique est directement lié à la quantité de fines qui peut s'incruster dans les aspérités de la rugosité et aux propriétés de mouillage de la paroi coffrante [58]. Avec une paroi hydrophobe et présentant des aspérités profondes le mode de mouillage de type Cassie-Baxter est favorisé et par conséquent l'eau et les particules ne peuvent pénétrer dans les irrégularités de la surface coffrante en raison de bulles d'air piégées dans les vallées [60]. Cependant, la présence d'un film d'eau à la surface des coffrages bloque la progression des fines dans les défauts [23, 24, 61] qui sera importante dans le cas de parois poreuses.

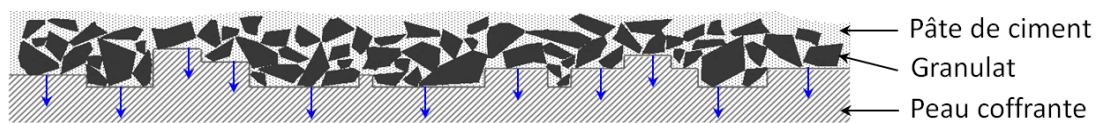


FIGURE 1.11 – Représentation schématique de l'ancrage mécanique [23].

1.4.1.2 Les effets capillaires

La figure 1.12 schématise les forces de capillarité à l'interface béton-coffrage qui sont développées par la formation d'une fine couche d'eau sur la paroi coffrante [18, 23, 59, 61]. Leur action est généralement très forte au début et diminue avec l'hydratation du béton pendant son durcissement. La liaison entre la pâte de ciment et le coffrage est plus solide avec des parois lisses et imperméables [23, 28, 61]. Au contraire, les peaux coffrantes absorbantes ou drainantes [62], rugueuses [63] et très hydrophobes [63] réduisent l'accumulation d'eau à la surface des coffrages. Cela signifie qu'avec une paroi hydrophobe, l'ancrage mécanique et les effets capillaires sont limités.

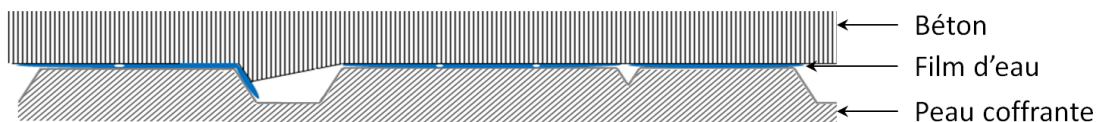


FIGURE 1.12 – Représentation schématique des effets capillaires [23].

1.4.1.3 L'adhésion chimique

Lors d'un contact intime en présence d'humidité, le béton frais peut réagir chimiquement avec la paroi coffrante notamment si celles-ci sont métalliques [58, 59, 63–65]. Dans le cas des aciers au carbone, la passivation de l'acier par le béton entraîne la formation d'oxyde de fer stables qui vont protéger le métal de la corrosion [66]. Un phénomène similaire est observé avec le plomb, cependant la formation d'oxyde de plomb décompose d'avantage le métal [67]. Avec des surfaces coffrantes en zinc ou en aluminium, l'attaque du béton peut être plus importante [67, 68] avec la formation de zinate de calcium [64, 65] et d'aluminate de calcium [69] respectivement qui vont dégrader la peau coffrante avec un dégagement gazeux d' H_2 . Dans ce cas, la liaison béton-coffrage est alors améliorée par la création d'une interphase tridimensionnelle [64] comme indiquée sur la figure 1.13. Certains métaux tels que le cuivre, le chrome, le nickel et leurs alliages [67, 68] sont chimiquement stables vis-à-vis du béton et aucune corrosion métallique n'a lieu. Cependant, la carbonatation du béton (formation de $CaCO_3$) [66] ou la présence de chlorures de calcium [67] dans le béton entraîne la corrosion des métaux même non ferreux due à une importante diminution du pH .

Certaines parois à base de polymère possèdent également une meilleure affinité chimique avec le béton frais. Des résidus de silicone [63] sont transférés à la surface du béton et des micro-arrachements du béton peuvent être induits.

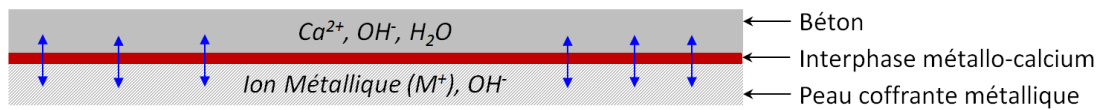


FIGURE 1.13 – Représentation schématique de l'adhésion chimique.

1.4.1.4 Les forces électrophysiques

En plus de ces trois phénomènes décrits précédemment, la formation d'une double couche électrique peut engendrer des interactions physiques de faible intensité avec des liaisons électriques [18] ou hydrogènes [59], notamment dans le cas d'un coffrage métallique dû à la présence d'ions (figure 1.14). Macroscopiquement, le courant ne peut se déplacer à l'interface car le béton est un diélectrique mais il présente à l'échelle atomique des éléments chargés. Lors de la coulée du béton, les frottements qu'il provoque sur la peau coffrante réorganisent les ions présents à l'interface [58]. De ce fait, une double couche électrique est formée par les liaisons électriques avec une énergie de liaison de l'ordre de 1 à 40 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Ces liens augmentent au fur et à mesure que la friction du béton sur la paroi métallique croît [58, 59].

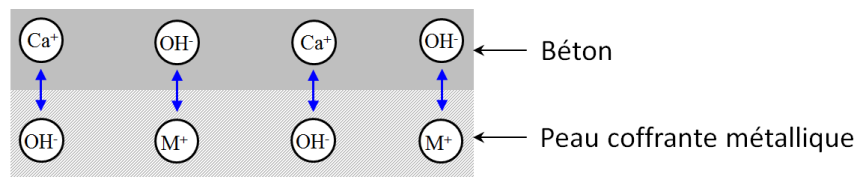


FIGURE 1.14 – Représentation schématique des forces électrochimiques [18].

1.4.1.5 Autres phénomènes physico-chimiques

D'autres interactions physiques telles que l'effet de paroi et l'absorption influencent le contact à l'interface entre le béton et la paroi coffrante. L'effet de paroi est dû à la distribution des particules à la surface d'un solide. L'arrangement spatial d'éléments sphériques sur une surface plane et rigide engendre un volume de vide à l'interface proportionnel à la taille des particules [70]. Des phénomènes d'absorption sont également présents selon la nature de la paroi coffrante. Le bois étant très absorbant, celui-ci réduit la quantité d'eau à l'interface béton-coffrage. Le cas contraire est observé pour des parois imperméables comme l'acier. L'eau ne pouvant être évacuée, il est conseillé de minimiser le rapport $\frac{E}{C}$ [18].

Dans le cas des coffrages, l'interface béton-peau coffrante est régie par l'ensemble des phénomènes décrits précédemment. Par conséquent, il est difficile de quantifier l'influence propre à chaque phénomène par une étude expérimentale ou par simulation. Cependant, des suppositions peuvent être faites dans le cadre des coffrages et celles-ci seront proposées par la suite en fonction des moyens de caractérisation et des paramètres mis en jeu.

1.4.2 Caractéristiques de l'interface béton-coffrage

La caractérisation de l'adhérence du béton aux coffrages réside premièrement dans la compréhension de la formation de l'interface béton-paroi. Lors de la mise en place du béton dans les coffrages, ce dernier s'organise en couches spécifiques qui dépendent de la taille des différents granulats. Cette organisation est le résultat d'une combinaison de divers phénomènes comme l'effet de

paroi, la sédimentation et l'absorption [18]. Ceux-ci sont principalement provoqués par la gravité, la vibration du béton, la diffusion de la matière et l'hydratation du ciment au cours du durcissement du béton [71]. Le béton peut être divisé schématiquement en trois zones [4, 71, 72] comme indiqué sur la figure 1.15, qui sont en se rapprochant du coffrage :

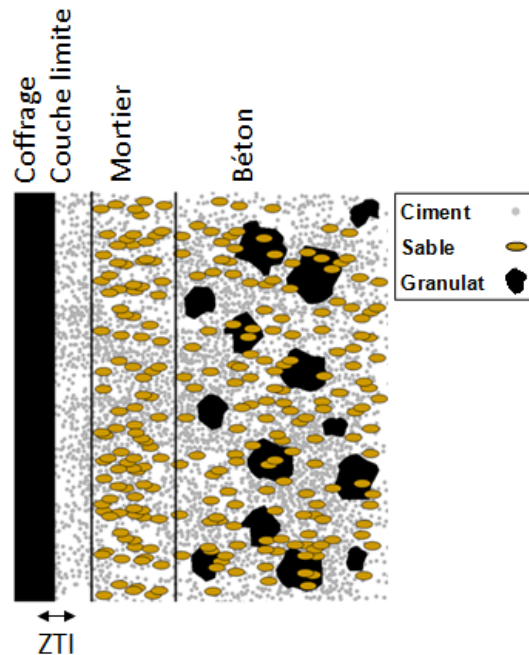


FIGURE 1.15 – Représentation schématique des couches au voisinage du coffrage [4].

- le béton en masse, de composition identique à celui coulé;
- une couche similaire à celle d'un mortier où le diamètre maximal des grains est inférieur à 5 mm (définition d'un sable [7]);
- une couche dite « limite » composée strictement de ciment et d'eau. Selon la composition du béton, des additifs calcaires et des adjuvants sont présents. Dans cette zone, la dimension maximale des grains est de 80 μm (définition des fines [7]) du fait des poudres utilisées. Après décoffrage du béton, cette couche limite constitue ce qu'on appelle généralement le béton de peau.

Également, au contact intime de la paroi coffrante, une **zone de transition interfaciale (ZTI)** est observée au **microscope électronique à balayage (MEB)** (figure 1.16). Cependant, cette zone est souvent assimilée à la couche limite et la différenciation est parfois ambiguë. La ZTI se présente comme une région discontinue et irrégulière pouvant atteindre jusqu'à 70 μm au voisinage de l'acier [73–75].

La figure 1.17 présente l'évolution de la quantité de phase hydratée CaOH_2 au contact d'une barre d'acier. Par **diffraction des rayons X (DRX)**, une forte quantité de CaOH_2 est quantifiée à l'interface béton-métal [64, 74]. En effet, peu de temps après le contact entre la barre et le béton à l'état frais, une forte quantité d'eau est adsorbée par l'acier et augmente localement le ratio $\frac{E}{C}$. À l'inverse de l'absorption, l'eau ne pénètre pas dans l'acier mais crée un film à sa surface [23]. Cette nouvelle région favorise la diffusion des ions Ca^{2+} provenant de la pâte de ciment vers l'acier [64]. Cette forte proportion d'hydroxyde de calcium à l'interface a également été remarquée sur le faciès de rupture béton-acier présenté sur la figure 1.18, où de nombreux cristaux hexagonaux de CaOH_2 sont observés au MEB [75]. Le taux d'hydroxyde à l'interface augmente avec le temps de durcissement où la réaction d'hydratation du béton continue jusqu'à 28 jours. Cette augmentation de phase hydratée s'accompagne également d'une élévation de la porosité à l'interface [74, 75]. À l'inverse, avec un ratio $\frac{E}{C}$ plus faible, la quantité de CaOH_2 au contact de l'acier diminue.

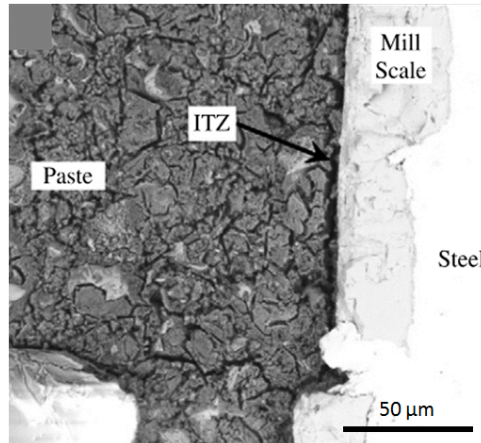


FIGURE 1.16 – Micrographie MEB de la ZTI [75].

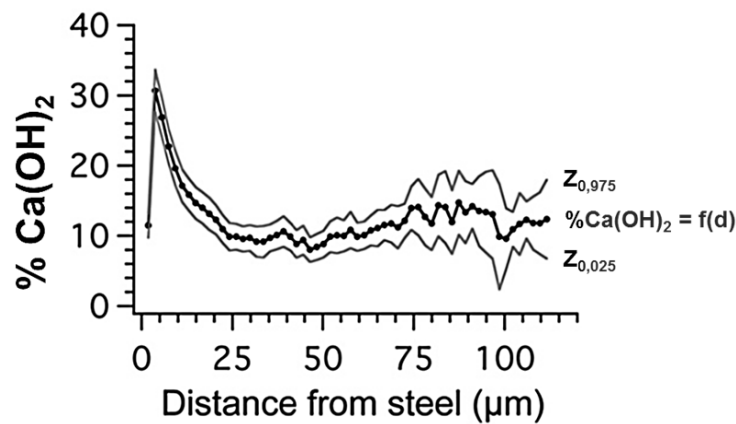


FIGURE 1.17 – Évolution du pourcentage de Ca(OH)_2 à l'interface béton-acier à 28 jours avec un ratio $\frac{E}{C}$. Les lignes inférieure et supérieure indiquent l'intervalle de confiance à 95 % [74].

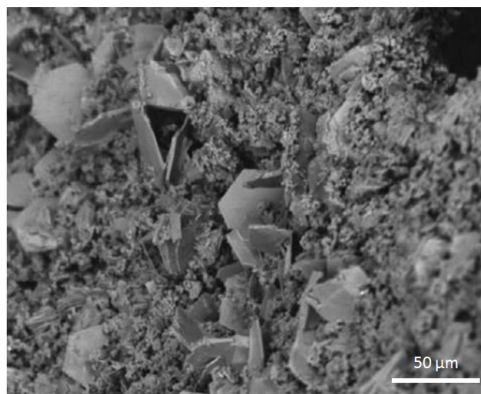


FIGURE 1.18 – Microstructure du faciès de rupture béton-acier avec observation de cristaux de CaOH_2 [75].

Les propriétés mécaniques de la ZTI sont hétérogènes et tendent à être plus faibles que celles du béton. La figure 1.19 représente la variation du module élastique du béton au voisinage de l'acier caractérisé par microindentation. A l'approche du métal, le module diminue jusqu'à atteindre des valeurs minimales à 10-30 µm de l'interface représentant la ZTI [73]. Des mesures de microdureté ont montré un comportement similaire au module élastique où celle-ci décroît par deux dans la ZTI atteignant 200 MPa. Cette chute critique des caractéristiques mécaniques de la zone de transition peut être aussi reliée à l'augmentation de la porosité à l'interface [75]. Avec une augmentation de fines ou une diminution d'eau dans la formulation du béton, les propriétés mécaniques de la ZTI s'homogénéisent [73]. Dans les travaux de nanoindentation d'Allison et al. [75], cette réduction critique

du module élastique de la ZTI est également observable à plus petite échelle. Une chute du module de l'acier de 200 GPa à 5-10 GPa dans la ZTI et 10-30 GPa dans la pâte de ciment a été caractérisé, montrant de nouveau que cette zone de transition est une zone de fragilité lors de sollicitations mécaniques.

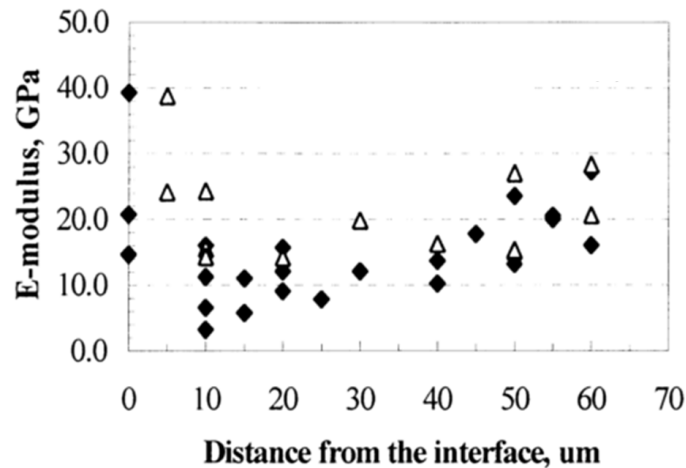


FIGURE 1.19 – Évolution du module élastique à la ZTI au voisinage de l'interface béton-acier déterminé par microindentation [73].

L'adhérence entre le béton et la paroi coffrante est contrôlée par cette zone de transition interfaciale. Les caractéristiques de cette région impactent directement la force de liaison du béton au coffrage. Une modification de la chimie accompagnée d'une baisse des propriétés mécaniques entre le béton et une paroi coffrante est recommandée pour réduire l'adhérence entre les eux [75].

Après avoir décrit les propriétés interfaciales béton-coffrage, les moyens de caractérisation de l'adhérence ainsi que l'impact du béton et des signatures surfaciques de la peau sont présentées dans les paragraphes suivants.

1.4.3 Caractérisation expérimentale de l'adhérence du béton

Dans le domaine du génie civil, l'adhérence du béton est un sujet qui reste très étudié à ce jour. En fonction de la configuration du béton et du substrat en contact, divers tests ont été développés. Dans la littérature, la force de liaison entre le béton et le substrat a été ainsi principalement quantifiée par des essais d'arrachement [76–84], de pliage [85–88] et de tirage [58, 64]. Les deux premiers essais sont généralement employés pour caractériser l'adhérence entre une barre de renforcement et le béton.

Les essais de pliage sont utilisés dans le cadre de poutre de béton armée où la résistance en flexion de la structure est étudiée. Concernant les essais d'arrachement, c'est la résistance au cisaillement d'une barre ancrée dans le béton qui est caractérisée. Dans ce cas, la contrainte de rupture interfaciale en cisaillement τ_{ri} peut être initialement calculée suivant :

$$\tau_{ri} = \frac{F_{ri}}{p_a \cdot l_a} \quad (1.4)$$

avec F_{ri} la force nécessaire pour rompre l'interface béton-barre en cisaillement, p_a et l_a respectivement le périmètre et la longueur de la barre ancrée. Cependant, la contrainte de cisaillement est grandement dépendante de la géométrie de la barre [89] et son calcul peut être plus complexe si le profil de la barre présente des nervures.

Enfin, les derniers essais de tirage sont ceux qui se rapprochent le plus de la configuration des coffrages. Un effort de traction verticale est exercé pour séparer le béton d'une peau coffrante simi-

laire à une peau coffrante. Par conséquent, la contrainte de rupture interfaciale en traction σ_{ri} est simplement déterminée selon l'équation :

$$\sigma_{ri} = \frac{F_{ri}}{S_c} \quad (1.5)$$

avec F_{ri} la force maximale pour rompre l'interface béton-peau coffrante en traction et S_c la surface de contact.

Les caractéristiques du béton telles que le ratio $\frac{E}{C}$ [74, 80], les additifs polymères [59, 80] et les substituants calcaires [80] modifient l'interface béton-substrat. Les adjuvants polymères ajoutés dans la composition du béton pour modifier ces propriétés diffusent vers la surface de l'acier et améliorent la liaison entre la pâte de ciment et le métal [73, 80]. Des études ont par ailleurs montré que l'augmentation du ratio $\frac{E}{C}$ pouvait, soit améliorer [80], soit détériorer [74] l'adhérence du béton sur l'acier. Cette ambiguïté montre que le rapport $\frac{E}{C}$ ne peut pas, indépendamment, contrôler l'interface. La formation d'un film d'eau à l'interface diminue la quantité de vide interfacial du fait de la fluidité du béton plus élevée qui comblerait les espaces [79, 80]. Des travaux sur l'interface béton-coffrage ont également observé que l'arrachement du béton peut être partiellement évité par condensation d'une couche d'eau sur la paroi coffrante [28], par l'ajout d'un revêtement polymère [22, 58] ou par pulvérisation d'agents démoulant sur la peau avant le coulage du béton. En particulier, la famille d'huile [61, 90], la température extérieure [91] et le mode [92] de pulvérisation sont des paramètres importants.

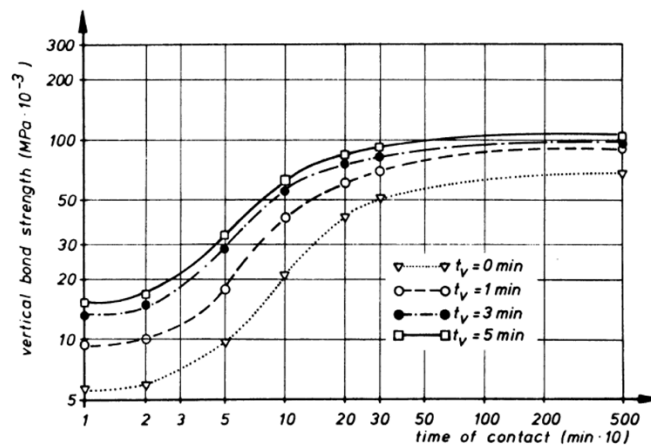


FIGURE 1.20 – Influence du temps de vibration t_v et du temps de durcissement sur la force de liaison acier-mortier [58].

La figure 1.20 présente l'évolution de la force d'adhérence mortier-acier en fonction des conditions de mise en œuvre du mortier. La vibration de la matrice cimentaire réduit la quantité de porosité à l'interface ce qui entraîne une augmentation de la pénétration des particules de ciment dans les aspérités de la paroi et donc une adhérence mécanique plus élevée [58]. L'effet de la vibration est d'avantage visible avec des temps de contact plus faibles. Une vibration du béton pendant 5 minutes provoque une hausse de l'adhérence béton-acier d'environ 30 % après 1 jour de durcissement par rapport à un béton non vibré. Les vibrations mécaniques renforcent un régime de mouillage de type Wenzel [61] du coffrage par le béton frais, probablement en raison du mouvement Brownien de la pénétration des particules de ciment dans les aspérités du coffrage. Ce régime de mouillage est également accompagné d'une amélioration de la liaison béton-coffrage [58] due à une meilleure accroche mécanique et une plus grande surface de contact [60]. Également, la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ augmente avec des durées de durcissement du béton plus longues [74] qui conduisent à une augmentation de la force de liaison mortier-acier de 0,19 à 0,49 MPa pour des durées de durcissement de 1 à 3 jours, respectivement [58]. Cependant, la contraction du béton pendant son durcissement facilite aussi la rupture de la liaison et par conséquent diminue l'adhérence à l'interface. La quantité de contraction dépend des propriétés physico-minéralogiques du ciment et des conditions de durcissement [58].

Dans le cadre des coffrages, les essais de décollement effectués entre le béton et différentes peaux coffrantes métalliques ont révélés des zones de rupture à l'interface à la fois cohésives et adhésives [64]. La rupture cohésive dépend en partie de la qualité du ciment car la rupture se localise dans le volume de béton [58] alors que celle adhésive dépend davantage des caractéristiques de la ZTI et des signatures de la peau coffrante. Cependant, ces deux modes de rupture sont interconnectés car une meilleure cohésion du béton favorisera une rupture adhésive de l'interface si la résistance à la rupture de la ZTI est faible. Dans ce travail de recherche, c'est ce mode de rupture qui est convoitée indépendamment des caractéristiques du béton. Néanmoins, une rupture adhésive de l'interface béton-paroi peut provoquer des forces d'adhérence plus élevées que lors d'une rupture cohésive en raison d'importants phénomènes capillaires provoqués par la présence d'eau à l'interface.

Dans la littérature, l'adhérence du béton a grandement été quantifiée à travers différents dispositifs mécaniques. Des efforts de rupture interfaciale ont été mesurés en soulignant l'influence des caractéristiques du béton et de sa mise en œuvre. L'impact de la surface de contact sur la liaison avec le béton sera étudié par la suite.

1.4.4 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante

Le choix du coffrage pour la réalisation de structures bétonnées est important. Les signatures surfaciques des parois de coffrage gouvernent fortement les mécanismes d'adhérence à l'interface béton-coffrage. De plus, leurs caractéristiques sont critiques pour la qualité du parement car l'état de surface des parois sera partiellement transféré à la surface du béton. Dans cette section, l'effet des signatures physico-chimiques et topographiques de la peau coffrante sont discutées en recherchant celles minimisant l'adhérence du béton.

1.4.4.1 Influence de la signature physico-chimique

La signature physico-chimique des parois coffrantes est associée à la nature chimique et les propriétés de mouillage surfaciques. Dans un premier temps, le cas des peaux coffrantes métalliques ou polymères est étudié.

1.4.4.1.1 Cas des peaux métalliques

Des essais d'arrachement de barres de renforcement plates et lisses ont démontré que l'adhésion chimique était le mécanisme principal qui contrôlait l'interface béton-barre [93]. La figure 1.21 représente les courbes d'effort en fonction de la longueur déplacée pour deux sortes d'acier. Pour une même longueur d'ancrage, la contrainte de rupture interfaciale en cisaillement τ_{ri} est réduite d'environ 30 % avec une barre en acier inoxydable. Le chrome en proche surface est chimiquement stable au contact du béton [68] contrairement au fer de l'acier carbone qui forme des oxydes de fer [8] apportant une résistance plus élevée à la rupture en cisaillement [79]. De plus, la surface de ces aciers révélait des microrugosités qui améliorent la liaison barre-béton par ancrage mécanique [94].

Cependant, des résultats contradictoires ont été trouvés par Montgomery et al. [64] où la contrainte de rupture en traction σ_{ri} lors d'essais de tirage était 5 fois supérieure pour une peau coffrante en acier inoxydable, mesurée à 0,15 MPa. Cette divergence pourrait être due à la différence de modes de sollicitation de l'interface ainsi qu'à la topographie des surfaces, non caractérisée dans les deux études. Pour un acier nu, A.Mazkewitsch et al. [58] ont trouvé une contrainte d'adhérence de 0,185 MPa, nettement plus élevée que celle trouvée par Montgomery [64] à 0,03 MPa mais qui reste dans le même ordre de grandeur.

Les aciers recouverts d'une couche de zinc tendent à avoir une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment et avoir une adhérence renforcée [64, 78, 87, 88]. Par rapport à une surface brute d'acier, la contrainte de rupture pour rompre la liaison béton-zinc augmente de 5 à 15 % dans le cas de barres d'armature [78], de 40 % avec des essais de pliage de poutre armée [88] et est 8 fois supérieure lors de tirage plan béton-acier galvanisé [64]. Ce type de revêtement est très étudié pour diminuer

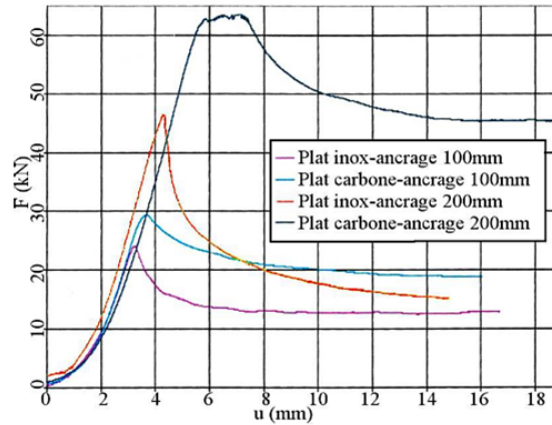


FIGURE 1.21 – Courbes force-déplacement des essais d'arrachement pour des aciers plats lisses inoxydables et au carbone [93].

la corrosion des barres d'acier dans le cas du béton armé. L'augmentation de l'adhérence entre le béton et le zinc est causée par la formation d'hydrozincate de calcium $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CaHZn) à l'interface béton-métal [64, 65]. La figure 1.22 présente une micrographie MEB des cristaux de CaHZn formés à la surface d'une barre en acier.

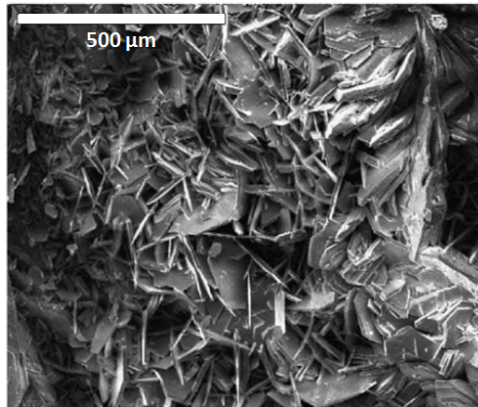
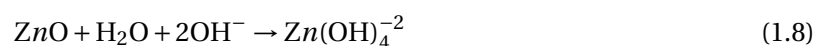


FIGURE 1.22 – Micrographie MEB de cristaux de CaHZn formés après 6 jours d'immersion dans une solution alcaline [95].

La calorimétrie a prouvé la réaction chimique entre les hydroxydes de zinc et les hydroxydes de calcium lors de l'hydratation du ciment contenant du zinc [96]. Le zinc est un métal amphotère stable sur une large gamme de pH (6-12,2). A un pH supérieur à 12,2, la dissolution de la couche de zinc et l'évolution de l'hydrogène ont lieu produisant une corrosion continue du métal [97]. La présence de Ca^{2+} dans l'électrolyte interstitiel du béton induit une passivation supplémentaire du métal. Un pH supérieur à 13,3 [65, 95] est la limite de la capacité de passivation du fer galvanisé. Lorsque le pH du béton est supérieur à la limite de passivation, la dissolution du zinc s'accompagne d'une libération d'hydrogène (figure 1.23). Le béton crée de l'hydrozincate de calcium avec la peau coffante galvanisée suivant potentiellement l'ordre des réactions suivantes [65, 97] :



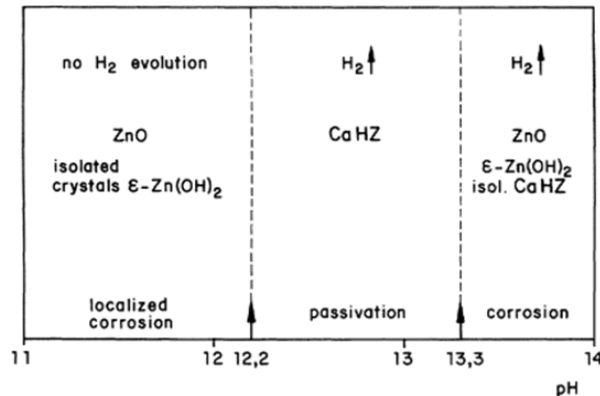
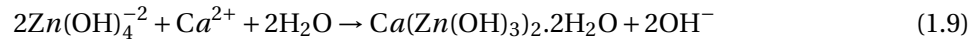


FIGURE 1.23 – Comportement de l'acier galvanisé immergé dans une solution contenant des Ca^{2+} en fonction du pH [65].

La contrainte de rupture béton-zinc et la quantité d'hydroxyzincate formé à l'interface sont également impactée par la durée d'hydratation de la pâte de ciment [65]. Après 1 jour de durcissement, une interphase d'environ $1 \mu\text{m}$ se développe entre le béton et le zinc. A partir d'1 mois, la formation et diffusion des CaHZn dans la pâte de ciment provoque une interphase de 3 à $4 \mu\text{m}$ d'épaisseur avec une plus forte quantité de CaHZn détectée par DRX. Par conséquent, la liaison entre la surface zinguée et le béton est améliorée.

Cependant, des comportements contraires sont également observés avec des liaisons béton-acier affaiblies par la présence de zinc à l'interface [65, 98]. La force de liaison de barres d'acier galvanisé ancrées dans un béton de ratio $\frac{E}{C}$ égale à 0,4 est inférieure de 5 à 10 % par rapport à celle de l'acier nu [98]. De plus, pour des temps de durcissement du béton équivalents à 1 et 28 jours, la contrainte de cisaillement interfaciale τ_{ri} diminue de 6 à 5 MPa. Actuellement, il est difficile de déterminer si la présence de zinc améliore ou détériore l'interface béton-acier. En effet, les interactions entre le zinc et le béton sont fortement dépendantes des caractéristiques de ce dernier et la prévision du comportement interfaciale est difficile.

L'addition d'éléments métalliques dans le revêtement galvanique a été étudiée dans le but d'améliorer la résistance à la corrosion du zinc en milieu alcalin basique. L'ajout d'aluminium (Al) dans le revêtement de zinc limite la création du composé CaHZn . En effet, l'aluminium et le zinc semblent être chimiquement liés entre eux et par conséquent une interface énergétiquement plus faible avec moins de liaisons chimiques potentielles avec le calcium est formée. La résistance à la rupture diminue à 0,01 MPa au lieu de 0,23 MPa sans Al [64] et la rupture est principalement adhésive avec décohésion à l'interface des deux solides. Cependant, les peaux en aluminium nues sont généralement non recommandées sur site en raison de l'attaque chimique du ciment [20, 69]. Des revêtements anticorrosion à base de phosphate de zinc déposés sur des barres de renforcement en acier sont utilisés pour améliorer la liaison avec le béton [94]. Les essais d'arrachement ont montré une augmentation de la contrainte d'adhérence jusqu'à 74 % avec des films de phosphate Zn-Ca. L'ajout de calcium dans le revêtement améliore l'affinité chimique avec la pâte de ciment.

Les couches de conversion contenant des chromates [99], du cérium (Ce) [95, 100–103] ou du lanthane (La) [104, 105] ont été efficaces pour protéger les aciers galvanisés de l'oxydation dans les bétons alcalins. Alors que les chromates sont aujourd'hui évités pour leur toxicité, les sels de terres rares sont des alternatives prometteuses. Pour Liebau et *al.* [106], l'immersion des barres d'armature galvanisées dans des solutions alcalines favorise la formation d'un film d'hydroxyde de zinc bien que pour un $\text{pH} > 12,9$, le principal produit anodique soit l'ion zincate soluble ZnO^{2-} . Cependant, en présence d'ions Ca^{2+} , la précipitation des cristaux d'hydroxyzincate de calcium $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2$ a lieu,

conduisant à la passivation du zinc. Lorsque les barres d'**armature** galvanisées pré-traitées dans la solution de nitrate de cérium sont immergées dans les milieux alcalins, un film épais de conversion de $\text{Ce}(\text{OH})_3$ (couche externe) et de Ce_2O_3 (couche interne) est formé sur la surface des barres de zinc. La présence de la couche de conversion du cérium retarde l'apparition de la corrosion dans les solutions alcalines ($\text{pH} = 13,2$) contenant des ions calcium mais seulement pour un temps limité [95]. La figure 1.24 présente la surface d'une barre d'acier galvanisée traitée au cérium après immersion dans une solution alcaline. Au bout d'un jour d'immersion, l'acier zingué commence déjà à se corroder et à 6 jours, des cristaux de CaHZn sont très largement observés. De même, l'immersion de l'acier galvanisé dans la solution de nitrate de lanthane entraîne la formation d'oxyde de lanthane La_2O_3 et d'hydroxyde $\text{La}(\text{OH})_3$ et de petites quantités de $\text{Zn}(\text{OH})_2$ et ZnO [95, 107] sur la surface galvanisée, qui maintient les valeurs de potentiel cathodique et retarde ainsi la corrosion dans les solutions alcalines contenant du calcium (pas de formation de cristaux de CaHZn) [95].

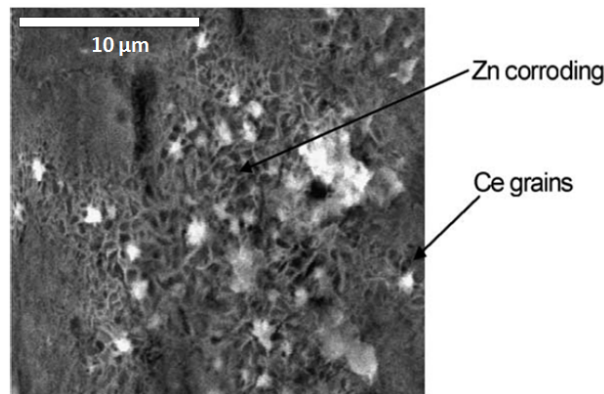


FIGURE 1.24 – Micrographie MEB de l'acier galvanisé traité au cérium après 1 jour d'immersion dans une solution alcaline [95].

Dans le cadre des surfaces en acier, l'ajout éléments métalliques ou le dépôt de couches de conversion est souvent employé afin d'améliorer ou réduire l'interface béton-acier. Cependant, l'utilisation de polymère est également une solution pour modifier le contact avec le béton.

1.4.4.1.2 Cas des peaux en polymère

Les revêtements époxydes ont été étudiés pour isoler le béton des **armatures** métalliques, ce qui entraîne l'amélioration de la résistance à la corrosion des barres d'acier. Le comportement de l'époxyde avec le béton est plutôt ambigu. L'ajout d'époxyde peut améliorer [81, 108] ou détériorer [81, 85, 86, 88] la liaison béton-**armature**. Dans le second cas, la surface trop plate et trop lisse des revêtements époxydes par rapport à une barre d'acier brute et rugueuse diminuerait l'adhérence du béton [94]. La contrainte de cisaillement τ_{ri} pour retirer une barre d'un bloc en béton chute de 7,43 MPa pour une barre d'**armature** en acier à 6,52 MPa recouverte d'époxyde mais peut également augmenter jusqu'à 10 MPa si l'époxyde contient des charges d'oxydes [81]. Avec des essais de cisaillement plan/plan, l'amélioration de la liaison béton-acier est observée en insérant une couche adhésif d'époxyde sur l'acier passant de 0,8 MPa à 5,1 MPa [108].

Les polymères efficaces pour abaisser la propension à l'adhérence du béton incluent les silicones [63, 109], les fluoroplastiques [58] et les polymères de type "Bakelite" [58]. Ces polymères sont hydrophobiques et réduisent fortement la propension à l'adhérence du béton jusqu'à 90 % par rapport à un acier nu [58]. Cependant, même la surface des peaux polymère peut avoir une affinité chimique avec la pâte de ciment [63, 109]. Avec des moules en **polyoxyméthylène** (POM), la surface du béton démoulée présente des microarrachements. L'utilisation de surfaces en **polychlorure de vinyle – ou polyvinyl chloride – (PVC)** induisent des surfaces plus lisses et moins poreuses. Cependant, la rugosité des moules en PVC ($R_a = 0,8 \mu\text{m}$) était plus élevée que celle des surfaces en POM ($R_a = 0,7 \mu\text{m}$).

Par conséquent, l'ancrage mécanique n'est pas le mécanisme principal pour le POM, et donc ces légers arrachements du béton ont été causés par une meilleure affinité chimique. Avec des moules en polydiméthylsiloxane (PDMS), cette affinité chimique est observée par la présence d'un transfert de particules de 5 à 10 μm à la surface du béton (figure 1.25). Les peaux en PDMS sont très hydrophobes avec un angle de contact de 140° avec l'eau [109] ce qui empêche la formation du film d'eau continu interfacial et diminue fortement les effets capillaires à l'interface.

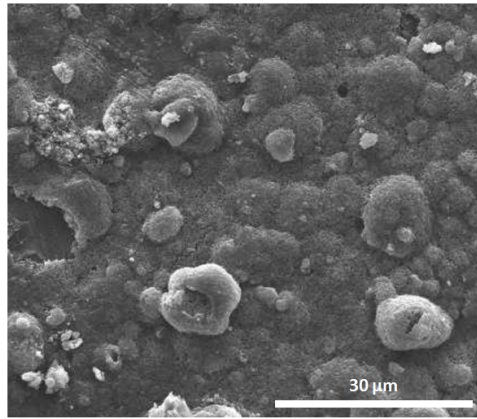


FIGURE 1.25 – Micrographie MEB de la surface d'un béton décoffré avec un moule en PDMS [63].

Parmi les théories d'adhésion, le concept d'adhérence entre surfaces conduite thermodynamiquement est l'un des plus pertinents pour les applications de coffrage. De nombreux travaux ont considéré que l'intensité de l'adhérence est principalement déterminée par l'énergie de surface de la paroi. L'énergie de surface du matériau du moule a une influence significative sur l'adhérence d'un liquide solidifiant sur le moule, comme cela a été observé dans d'autres domaines tel que l'alimentation [110]. Un peau coffrante à haute énergie de surface n'est généralement pas favorable à la fabrication du coffrage. C'est pourquoi l'utilisation d'huiles de décoffrage ou de revêtements polymères est courante.

En plus de la signature physico-chimique d'une peau coffrante, ses caractéristiques topographiques induisent également un effet sur l'adhérence du béton.

1.4.4.2 Influence de la signature topographique

Dans la littérature, peu de travaux se sont véritablement intéressés à l'impact de la signature topographique des parois de coffrage sur l'adhérence du béton. Pourtant, la rugosité des parois détermine en partie la capacité du béton à s'ancrer mécaniquement à la surface des coffrages et donc à adhérer. Néanmoins, il a été montré que l'augmentation de la rugosité d'un acier par décapage à l'acide améliore l'adhérence du béton avec une contrainte σ_{ri} de 0,03 à 0,52 MPa par rapport au même acier brut [64]. Ce résultat est potentiellement dû à une plus grande proportion de particules de ciment piégées dans les aspérités de la peau et donc d'un ancrage mécanique plus important. Par conséquent, un régime de mouillage de type Cassie-Baxter induit par la signature topographique devrait réduire la force de liaison en évitant l'ancrage mécanique [60]. Dans le cas de barre d'armature, un comportement similaire a été observé avec des barres nervurées où l'ancrage mécanique est le mécanisme principal gouvernant le cisaillement à l'interface. En effet, le béton ancré mécaniquement entre les nervures bloque le déplacement de la barre et l'adhérence du béton est assurée par la résistance en traction du béton coincé dans les aspérités de la barre [76, 77]. Des essais de pliage de poutres bétonnées ont montré qu'avec des barres nervurées, la liaison béton-barre était plus élevée de 40 % par rapport à une barre lisse [88].

Dans cette partie, l'adhérence du béton a été passée en revue dans le cadre de travaux sur les coffrages. L'ensemble des phénomènes physico-chimiques responsables de l'adhérence ainsi que leurs

origines ont été dans un premier temps décrits. Différents essais mécaniques ont déjà été développés afin de quantifier la liaison entre le béton et un substrat. Il a été montré que l'adhérence du béton est fortement impactée par la formulation et la mise en œuvre de ce dernier. Concernant l'effet des peaux coffrantes, les travaux se sont majoritairement intéressés sur leurs compositions chimiques en négligeant les autres signatures surfaciques. Cependant, par extrapolation, nous pouvons supposer que l'adhérence soit évitable avec une rugosité contrôlée de la paroi, suffisamment faible pour éviter l'ancrage mécanique et suffisamment élevée pour éviter les forces capillaires. Également, il existe actuellement très peu d'outils instrumentés permettant de mesurer précisément la propension à l'adhérence du béton relative aux coffrages. Par conséquent, un nouvel essai à l'échelle du laboratoire doit être conçu afin de pallier ce manque d'outil. Par ailleurs, l'analyse de l'influence des signatures surfaciques des parois sur l'adhérence du béton doit être complétée.

Regardons à présent ce que l'industrie exploite comme solution pour limiter l'adhérence du béton dans le cas des coffrages.

1.5 Solutions industrielles limitant les interactions béton-coffrage

Pour la réalisation de voiles verticaux en béton, l'utilisation de coffrage nu, c'est-à-dire avec la peau coffrante directement en contact avec le béton n'est pas conseillée. Par conséquent, afin d'éviter toutes interactions avec le béton, des solutions doivent être appliquées sur les parois des banches. Actuellement, trois issues industrielles existent pour réduire le frottement et l'adhérence du béton contre les coffrages qui sont les huiles de décoffrage, les matériaux polymères imperméables et les revêtements perméables. Ces catégories sont décrites par la suite en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

1.5.1 Huiles de décoffrage

De nos jours, les agents lubrifiants sont très largement employés sur les sites de construction. Ces produits sont pulvérisés sur les peaux coffrantes avant chaque coulage pour bloquer le contact entre le béton et le coffrage. Cependant, ces huiles sont généralement peu respectueuses de l'environnement et toxiques d'où des restrictions environnementales imposées [20, 25]. Également, leur application sur les parois coffrantes demande de respecter des protocoles stricts et contraignants [91, 92].

La fonction principale d'un agent démoulant est de permettre un décoffrage propre et facile sans endommager la surface du parement et celles des coffrages [21]. Pour cela, il doit minimiser le contact intime entre le béton et la paroi coffrante. La création d'une couche séparatrice à l'interface limite la pénétration des fines dans les aspérités de la tôle ce qui diminue l'ancrage mécanique. De plus, ses propriétés chimiques réduisent la capacité de la tôle à être mouillée et par conséquent atténuent les forces de capillarité [4, 18]. Enfin, de par son effet lubrifiant, les frottements sont réduits à l'interface pendant le coulage du béton [4, 23]. Les huiles de décoffrage doivent également répondre à des critères tels que : protéger les peaux coffrantes de la corrosion, résister à la vibration du béton et améliorer l'état esthétique du voile. Le choix d'un agent décoffrant est dépendant de l'état et de la nature de la peau coffrante [21]. Les conditions atmosphériques (pluie, soleil, vent) influent également sur les propriétés des huiles [25]. Par conséquent, leur application doit être contrôlée et régulière.

La figure 1.26 présente l'interface créée entre le coffrage et le béton lors de la présence d'une couche d'huile. Au contact du béton et de la banche, le lubrifiant crée une interface complexe qui peut être décomposée en différents milieux distincts qui interagissent entre eux [4, 9]; qui en s'éloignant du coffrage sont :

- La paroi coffrante;
- La couche d'huile : minérale, végétale ou synthétique;
- Un film de savon qui s'est formé sur la couche d'huile;

- Une zone émulsionnée qui résulte de la réaction entre la **solution interstitielle (SI)** du béton et l'huile;
- La **SI** contenant des ions Ca^{2+} et OH^- provenant du ciment. Elle peut également contenir les adjuvants du béton;
- Le béton frais avec ses différentes régions.

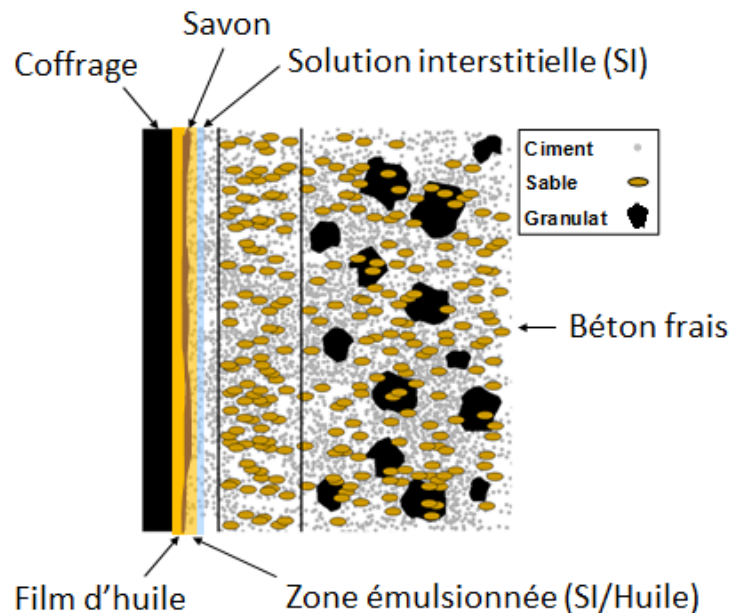


FIGURE 1.26 – Schématisation de l'interface béton-huile-paroi [4].

Les produits décoffrants peuvent être catégorisés en trois principales familles chimiques : les formulations minérales, végétales et synthétiques [20, 21, 25, 91, 92, 111]. Les premières sont des mélanges d'hydrocarbures (composés organiques formés à partir de carbone et d'hydrogène) et de composés beaucoup plus complexes de par leur structure moléculaire, qui sont dangereux pour l'homme et l'environnement. Les seconds agents proviennent d'une science plus écologique, l'oléochimie. Créés à partir d'huile naturelle, ils sont principalement constitués d'esters (de formule RCOOR') [40]. Et la troisième gamme de produits décoffrants, les huiles synthétiques [20], sont formées depuis des composés chimiques artificiels. Avec l'utilisation de parois spécifiques en contreplaqué bakéliné, l'application de cire ou de laque [21] est recommandée. Celles-ci agissent comme un film plastique protecteur et imperméable [20]. Ces produits montrent de meilleurs résultats (moins de porosité sur les parements) comparés aux huiles de décoffrage standards mais étant plus chers, ils restent souvent limités à certains ouvrages d'art (ponts, tunnels) [111].

Généralement, en plus des hydrocarbures ou des esters qui constituent principalement la base des agents démoulants minéraux et végétaux respectivement, des acidifiants sous forme d'acides gras sont ajoutés à la formulation des produits [91]. En milieu basique, ces acides gras réagissent avec les hydroxydes de calcium du béton pour former des carboxylates de calcium de forme $[\text{Ca}^{2+}, \text{ROO}^-]$. Dans le cas des formulations végétales, ces produits sont également formés par la saponification des esters par les hydroxydes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [40]. Les carboxylates constituent le savon présent à l'interface [46]. Les propriétés tensioactives de ce savon permettent la séparation du béton de l'huile lors du décoffrage [90]. La présence des esters dans les huiles végétales apporte un effet chimique supplémentaire à l'interface béton-huile-paroi avec une structuration de l'interface [40] (figure 1.27a) contrairement aux produits minéraux qui agissent principalement comme des barrières hydrophobes (1.27b).

Les agents démoulant sont généralement appliqués sous forme de films fins et continus (de l'ordre du micromètre [9]) à l'aide d'un pulvérisateur haute pression qui offre une rapidité et une efficacité de mise en œuvre. La répartition des huiles sur le coffrage peut varier selon le type de buse utilisée

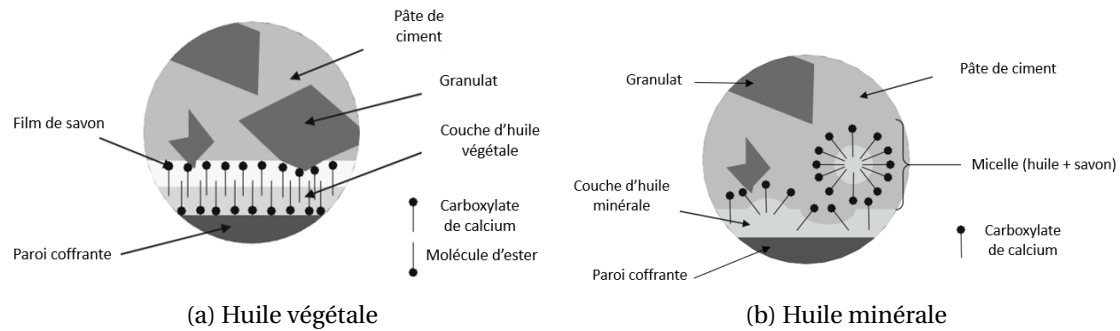


FIGURE 1.27 – Organisation de l'interface béton-huile-coffrage selon la nature chimique de l'huile [40].

(buse conique ou plate), mais également selon la pression. La distance de pulvérisation par rapport à la paroi a également une influence significative sur la répartition [4, 91]. Les huiles végétales forment des couches moins régulières que les huiles minérales en raison de leur viscosité plus élevée [40]. Les agents décoffrants doivent être raclés après pulvérisation pour répartir le film de façon plus régulière et enlever le surplus d'huile pour éviter d'engendrer des défauts de **parement** [1].

La pulvérisation d'huile sur les parois coffrantes est majoritairement employée sur site. Cependant, d'autres solutions alternatives à ces lubrifiants sont parfois utilisées telles l'application de revêtements polymères.

1.5.2 Revêtements polymères imperméables

Pour éviter l'adhérence du béton lors du décoffrage, des revêtements polymères peuvent également être employés. Pour les revêtements les plus fins, inférieurs au millimètre, ceux-ci sont directement collés sur les parois des coffrages. A l'opposé, les plus épais dépassant le centimètre sont généralement fixés au coffrage et constitue pleinement la peau coffrante [19]. Les polymères sont globalement hydrophobes et par conséquent un film d'eau se crée entre le béton et le revêtement, ce qui va limiter le contact intime entre la pâte de ciment et le coffrage [18]. Cependant, l'eau stockée à la surface du coffrage aura tendance à augmenter les effets capillaires à l'interface. Leur réutilisation est généralement moindre [18] notamment pour les revêtements fins et ceux-ci sont plus facilement dégradables [19] comparés aux peaux en acier nues en raison d'une résistance aux conditions climatiques (ultra-violets et gamme de température) ainsi que de caractéristiques mécaniques en usure plus faibles.

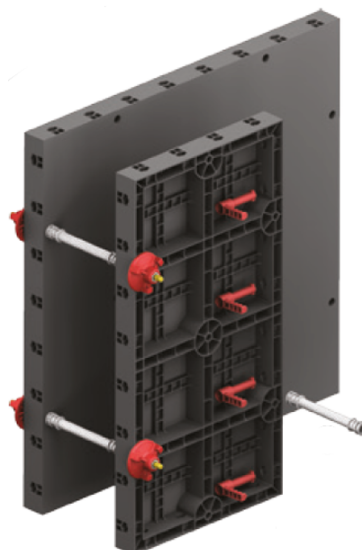


FIGURE 1.28 – Coffrage 120 x 60 x 8 cm³ en polymère acrylonitrile butadiène styrène (ABS) de Geoplast® [112].

Par ailleurs, pour la réalisation de parements à motifs ou de moulures, certaines parois coffrantes sont réalisées à partir de matériaux élastomères [10, 63] ou thermoplastiques [17]. Certains industriels proposent également des coffrages conçus entièrement en plastique [17]. Les plus connus sont fabriqués à partir d'ABS (figure 1.28). Ce type de coffrages offrent l'avantage d'être plus légers et donc plus facilement manipulables par rapport aux coffrages à peaux métalliques. Cependant, la grande déformabilité des polymères contraint à concevoir des coffrages à dimensions réduites. Par conséquent, ceux-ci ne sont pas utilisables pour des ouvrages de grande hauteur où la pression provoquée par le béton est plus élevée.

1.5.3 Revêtements perméables

La troisième catégorie de solution limitant les interactions avec le béton concerne les coffrages à perméabilité contrôlée (CPF) [62, 113–115]. Anciennement, ce type de coffrage était sous la forme d'une toile tissée très absorbante. De nos jours, ils se présentent plutôt comme une membrane composée d'une face drainante qui permet l'évacuation de l'eau et l'air à l'interface béton-paroi et d'une face filtrante retenant les particules fines du liant. Celle-ci contient généralement des pores de diamètre compris entre 0,2 et 20 µm [113].

La réduction de l'eau à la surface du béton pendant sa vibration (figure 1.29) permet d'obtenir des parements lisses avec très peu de porosité apparente par rapport à une peau métallique [62, 115]. De plus, les bétons coulés avec des CPF montrent des parements chimiquement et mécaniquement plus résistants [114]. Cependant, l'absorption excessive d'eau des CPF rend leur réutilisation très largement inférieures par rapport à des coffrages conventionnels [113, 114]. De plus, leur coût excessif les limite à des ouvrages très spécifiques [18, 113].

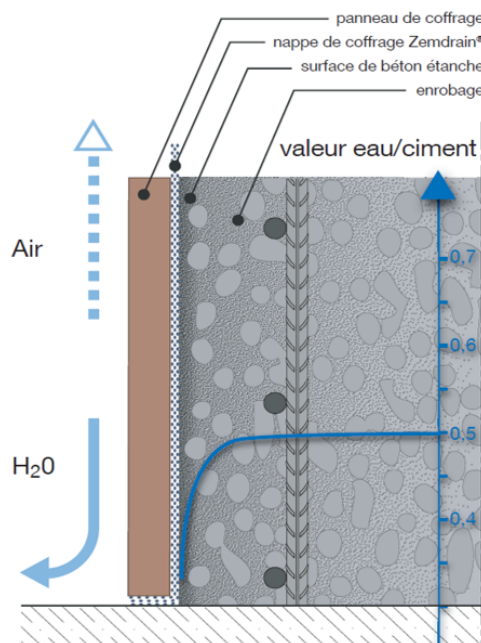


FIGURE 1.29 – Diminution du rapport $\frac{E}{C}$ à l'interface béton-coffrage avec une nappe de décoffrage Zemdrain® [116].

Actuellement, l'industrie du BTP propose divers moyens pour protéger les parois de coffrage du frottement et de l'adhérence du béton. Bien que le huilage des peaux coffrantes reste très employé, ce procédé présente encore de nombreuses contraintes opérationnelles. Par conséquent, d'autres solutions industrielles ont été développées afin de pallier ces contraintes. Néanmoins, ces nouvelles solutions manquent encore de robustesse et de fiabilité sur le long-terme. C'est dans ce cadre que ces travaux de recherche ont été réalisés.

1.6 Bilan et problématique

Ce chapitre a présenté un état de l'art de l'ensemble des interactions béton-coffrage dans le cas de la réalisation de voiles verticaux. Dans un premier temps, le procédé employé sur site pour la fabrication de ces structures a été décrit en soulignant les étapes susceptibles de favoriser les interactions entre le béton et la paroi de coffrage. Par la suite, les phénomènes de frottement et d'adhérence du béton ont été étudiés individuellement. Concernant la caractérisation de la friction du béton contre les coffrages, les travaux antérieurs ont montré que la composition de ce dernier ainsi que les conditions de coulée influençaient significativement les frottements à l'interface. Cependant, l'impact des signatures surfaciques des parois de coffrage sur ce phénomène a été très peu étudié et par conséquent, il y a un manque de données dans la littérature. En ce qui concerne les études sur l'adhérence du béton, celles-ci se concentrent majoritairement à la caractérisation de l'interface dans le cas de barres de renforcement où l'augmentation de l'adhérence est recherchée. En effet, dans le cadre des coffrages, il n'existe actuellement pas d'essai spécifique à l'échelle du laboratoire permettant de quantifier ce phénomène. De plus, dans les travaux qui se sont consacrés à l'adhérence béton-coffrage, uniquement la force de rupture interfaciale a été mesurée. Cependant, la mesure seule de cet effort n'est pas un moyen adéquat pour quantifier totalement l'adhérence du béton sur un coffrage. Dans le cas de peaux coffrantes très lisses et hydrophobes [18], des phénomènes de capillarité engendrent une forte adhérence du béton sans provoquer l'arrachement de celui-ci. Au final, l'adhérence du béton contre les banches reste un sujet ouvert, notamment dans l'identification des signatures surfaciques de la paroi coffrante qui éviteraient l'adhérence du béton sans pulvérisation d'agent décoffrant. Pour conclure ce chapitre, les solutions industrielles actuellement existantes ont été définies et discutées une par une. Le huilage qui est encore très employé donne des résultats convenables mais reste archaïque. Sa répétabilité et ses coûts d'utilisation importants demandent une amélioration de ce processus. Pour les revêtements perméables, leur non-réutilisation reste un problème majeur malgré des performances très hautes. Quant aux revêtements polymères imperméables, leurs caractéristiques mécaniques freinent leur utilisation.

Dans le but de déterminer de nouvelles solutions alternatives à celles actuellement employées, plusieurs objectifs devront être atteints. Les solutions proposées d'après les interactions béton-coffrage devront non seulement être résistantes aux frottements du béton mais également limiter l'adhérence du béton. Ainsi, les signatures surfaciques des peaux coffrantes étudiées seront tout d'abord caractérisées (chapitre 3). Les phénomènes de friction seront étudiés au moyen d'un tribomètre plan/plan déjà conçu et nombreusement utilisé dans le domaine du génie civil (chapitre 4). Finalement, un nouveau dispositif mécanique représentatif des décoffrages sur chantier sera spécialement développé dans le chapitre 5 afin de caractériser la contrainte de rupture interfaciale entre le béton et les peaux coffrantes. Au final, la corrélation entre les phénomènes de friction et d'adhérence du béton à l'interface avec les signatures surfaciques des parois coffrantes pourra être effectuée (chapitre 6). En outre, la mise à bout de ses objectifs permettra de lever les verrous scientifiques et technologiques.

1.7 Références

- [1] C. Djelal, Y. Vanhove, P. De Caro, and A. Magnin, "Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork," *Materials and Structures*, vol. 35, pp. 470–476, 2002. [11](#), [14](#), [15](#), [16](#), [17](#), [36](#)
- [2] W. Pillard, "Béton hydraulique - Mise en œuvre - Bétonnage et serrage," *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 1–19, 2016. [11](#)
- [3] W. Pillard, "Béton hydraulique - Mise en œuvre - Démoulage et parements," *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 1–19, 2016. [12](#), [14](#)
- [4] S. Bouharoun, "Comportement tribologique des huiles de décoffrage à l'interface béton/coffrage - Influence de la formulation du béton," *Thèse de doctorat, Université d'Artois*, 2011. [12](#), [13](#), [16](#), [18](#), [25](#), [34](#), [35](#), [36](#), [XXI](#), [XXII](#)
- [5] C. F. Ferraris, V. A. Hackley, A. I. Aviles, and C. E. Buchanan, "Analysis of the ASTM Round-Robin Test on Particle Size Distribution of Portland Cement : Phase II," *National Institute of Standards and Technology Report*, vol. 6883, pp. 1–60, 2002.
- [6] C. F. Ferraris, V. A. Hackley, and A. I. Avilés, "Measurement of particle size distribution in Portland cement powder : analysis of ASTM round robin studies," *Cement, concrete, and aggregates*, vol. 26, no. 2, pp. 1–11, 2004. [12](#)
- [7] AFNOR, "Granulats : Définition, conformité, spécifications," *XP P 18-540*, 1997. [12](#), [25](#)
- [8] B. Huet, "Comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté . Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport," *Thèse de doctorat, INSA Lyon*, p. 196, 2017. [12](#), [29](#)
- [9] L. Libessart, "Influence de la composition des agents de démoulage à l'interface coffrage-béton : impact sur l'esthétique des parements en béton," *Thèse de doctorat, Université d'Artois*, 2006. [12](#), [14](#), [34](#), [35](#)
- [10] CimBéton, "T49 : La maîtrise esthétique des parements en béton," *Collection Technique*, 2005. [13](#), [14](#), [15](#), [37](#)
- [11] AFNOR, "Granulats pour béton," *NF EN 12620 +A1*, 2008. [13](#)
- [12] C. B. Biryondeke, F. Ngapgue, and G. O. Musangi, "Etude du coefficient d'absorption d'eau des granulats d'origine volcanique de Goma et son influence dans la formulation du béton," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 15, no. 1, pp. 141–152, 2016. [13](#)
- [13] A. Backelandt, "Etude des mécanismes d'adhésion à l'interface résine/ciment en vue de la réparation des ouvrages de génie civil," *Thèse de doctorat, INSA Lyon*, 2005. [13](#)
- [14] Cimbéton, "G10 : Les constituants des bétons et des mortiers," *Collection Technique*, 2005. [13](#)
- [15] T. D. Nguyen, "Etude de la zone d'interphase "granulats calcaires poreux-pâte de ciment" : Influence des propriétés physico-mécaniques des granulats ; Conséquence sur les propriétés mécaniques du mortier," *Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*, 2013. [13](#)
- [16] AFNOR, "Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage," *NF 934-2+A1*, 2012. [13](#)
- [17] Cimbéton, "G11 : Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques, tome 2," *Collection Technique*, pp. 1–135, 2013. [13](#), [14](#), [15](#), [37](#)

- [18] M. Martin, "Etude de la texture de la surface coffrée des parements verticaux en béton," *Thèse de doctorat, Université Laval*, 2007. 14, 15, 23, 24, 25, 34, 36, 37, 38, XXI
- [19] G. Boschung, "Les coffrages métalliques," *Rapport technique/domaine du bâtiment*, pp. 1–8, 2013. 14, 36
- [20] B. Courtois and P. Serre, "Produits de démoulage des bétons, Compositions, dangers, mesure de prévention," *Aide-mémoire technique ED*, vol. 6017, 2007. 14, 31, 34, 35
- [21] "Produits de décoffrage," *Bulletin du ciment*, vol. 47, no. 19, 1979. 14, 34, 35
- [22] M. K. Hurd, "High-performance plywoods for concrete forming," *Concrete Construction*, p. 202, 1997. 14, 28
- [23] "L'adhérence du béton au coffrage," *Bulletin du ciment*, vol. 38, no. 8, 1970. 14, 15, 23, 25, 34, XXI
- [24] "Décollement de la pellicule de ciment," *Bulletin du ciment*, vol. 37, no. 22, 1969. 14, 15, 23
- [25] "Produits de décoffrage," *Bulletin du ciment*, vol. 61, no. 15, 1993. 15, 34, 35
- [26] "Soufflure à la surface de béton," *Bulletin du ciment*, vol. 44, no. 10, 1976. 14
- [27] Y. Vanhove, "Contribution à l'étude du frottement d'un béton autoplaçant contre une surface métallique - Application aux poussées contre les coffrages," *Thèse de doctorat, Université d'Artois*, 2001. 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, XXI
- [28] N. Goudjil, "Développement d'un nouveau procédé de décoffrage basé sur la polarisation du béton – Etude de l'aspect des parements en béton," *Thèse de doctorat, Université d'Artois*, 2012. 14, 15, 23, 28
- [29] N. Goudjil, Y. Vanhove, C. Djelal, and H. Kada, "Development of a new demoulding process based on concrete polarization," *15th International Conference on Experimental Mechanics*, pp. 1–16, 2012. 15
- [30] C. Djelal, "Designing and perfecting a tribometer for the study of friction of a concentrated clay-water mixture against a metallic surface," *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 34, pp. 51–58, 2001. 15, 16, 20, 21, XXI
- [31] C. Djelal, "Analyse du phénomène de frottement des mélanges eau-argile concentrés contre des surfaces métalliques," *Thèse de doctorat, INSA Rennes*, 1991. 16, 21, 22, XXI
- [32] C. Beaumel, "Extrusion des pâtes d'argiles," *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble*, 1998. 15, 16
- [33] P. F. G. Banfill, "The rheology of fresh mortar," *Magazine of Concrete Research*, no. 154, pp. 13–21, 1991. 16
- [34] J. E. Wallevik, "Thixotropic investigation on cement paste : Experimental and numerical approach," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 132, pp. 86–99, 2005. 16
- [35] P. Bartos, "Fresh concrete : properties and tests," *Elsevier*, 1992.
- [36] C. Ferraris, F. D. Larrard, N. Martys, S. Mindess, J. Skalny, and A. C. Society, "Fresh concrete rheology : recent developments," *Materials Science of Concrete VI*, pp. 215–241, 2001. 16
- [37] K. El Cheikh, "Étude de l'interface milieu granulaire – paroi rugueuse par approches expérimentale et numérique – Application aux bétons," *Thèse de doctorat, Université d'Artois et Ecole nationale supérieure des Mines Douai*, 2015. 16

- [38] “Pression du béton frais sur les coffrages,” *Bulletin du ciment*, vol. 27, no. 17, 1959. 16
- [39] C. Djelal, Y. Vanhove, and A. Magnin, “Tribological behaviour of self compacting concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 821–828, 2004. 16, 17, 18, 20, 21, XXI
- [40] C. Djelal, P. De Caro, L. Libessart, I. Dubois, and N. Pébère, “Comprehension of demoulding mechanisms at the formwork/oil/concrete interface,” *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 571–581, 2008. 16, 17, 35, 36, XXII
- [41] S. Bouharoun, “Friction behaviour of fresh concrete in the vicinity of formwork,” *Journal of the South African institution of civil engineering*, vol. 55, no. 3, pp. 10–17, 2013. 16, 18, XXI
- [42] Y. Vanhove, C. Djelal, G. Schwendenmann, and P. Brisset, “Study of self consolidating concretes stability during their placement,” *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 101–108, 2012. 16
- [43] P. Coussot and C. Ancey, “Rhéophysique des pâtes et des suspensions,” *EDP sciences*, 1999. 16, XXI
- [44] Y. Vanhove, C. Djelal, and A. Magnin, “A device for studying fresh concrete friction,” *Cement, concrete, and aggregates*, vol. 26, no. 2, pp. 35–41, 2004. 16, 17, 18
- [45] S. Bouharoun, P. De Caro, I. Dubois, C. Djelal, and Y. Vanhove, “Effect of a superplasticizer on the properties of the concrete/oil/formwork interface,” *Construction and Building Materials*, 2013. 16
- [46] S. Bouharoun, Y. Vanhove, C. Djelal, P. De Caro, and I. Dubois, “Interactions between superplasticizer and release agents at the concrete/formwork interface,” *Materials Sciences and Applications*, vol. 3, pp. 384–389, 2012. 16, 18, 19, 35, XXI
- [47] C. Djelal, Y. Vanhove, and L. Libessart, “Analysis of friction and lubrication conditions of concrete / formwork interfaces,” *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 18–30, 2016. 17, 20
- [48] H. A. Janssen, “Investigations of pressure of grain in silo,” *Vereins Eutscher Ingenieure Zeitschrift*, vol. 39, pp. 1045–1049, 1895. 17
- [49] M. Sperl, “Experiments on corn pressure in silo cells - Translation and comment of Janssen’s paper from 1895,” *Granular Matter*, vol. 8, no. 2, pp. 59–65, 2006. 17
- [50] Y. Vanhove and C. Djelal, “Friction mechanisms of fresh concrete under pressure,” *International Journal of Chemical Engineering and Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 67–81, 2013. 17
- [51] AFNOR, “Essai pour béton frais,” *NF EN 12350*, 2009. 17
- [52] N. Bleschik, “Les propriétés mécaniques et la rhéologie des bétons,” *Minsk*, 1977. 17
- [53] Y. Tanigawa, H. More, K. Tsutsi, and Y. Kurokawa, “Constitutive law and yield conditions of fresh concrete,” *Transaction of the Japan Concrete Institute*, vol. 9, pp. 47–54, 1987.
- [54] H. Fujiwara and S. Nagataki, “Study on self-compactibility of high-fluidity concrete,” *Proceedings of the first RILEM Symposium*, pp. 167–174, 1999.
- [55] T. Proske, “Formwork pressure asserted by self-compacting concrete,” *Thèse de doctorat, Université technique de Darmstadt*, 2007.
- [56] S. H. Kown, Q. T. Phung, H. Y. Park, J. H. Kim, and S. P. Shah, “Experimental Study on Effect of Wall Friction on Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete,” *6th International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Montreal, Canada*, pp. 773–782, 2010. 17

- [57] A. Lamure, "Cours : Adhésion et adhérence des matériaux," *INP Toulouse*, p. 57, 2007. [22](#)
- [58] A. Mazkewitsch and A. Jaworski, "The adhesion between concrete and formwork," *In Adhesion between polymers and concrete/Adhésion entre polymères et béton*, Springer, pp. 67–72, 1986. [23](#), [24](#), [27](#), [28](#), [29](#), [32](#), [XXI](#)
- [59] J. Mlodecki, "Adhesion forces of polymer modified concrete and plain concrete to steel in moulds and in reinforced concretes," *In Adhesion between polymers and concrete/Adhésion entre polymères et béton*, Springer, pp. 55–63, 1986. [23](#), [24](#), [28](#)
- [60] P. De Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré, *Capillarity and wetting phenomena : drops, bubbles, pearls, waves*. Springer Science & Business Media, 2003. [23](#), [28](#), [33](#)
- [61] L. Libessart, P. De Caro, C. Djelal, and I. Dubois, "Correlation between adhesion energy of release agents on the formwork and demoulding performances," *Construction and Building Materials*, vol. 76, pp. 130–139, 2015. [23](#), [28](#)
- [62] J. Liu, C. Miao, C. Chen, J. Liu, and G. Cui, "Effect and mechanism of controlled permeable formwork on concrete water adsorption," *Construction and Building Materials*, vol. 39, pp. 129–133, 2013. [23](#), [37](#)
- [63] M. Horgnies, "Tribologie des bétons à ultra-haute performance - Propriétés de surface et revêtements de protection," *Techniques de l'ingénieur*, 2012. [23](#), [24](#), [32](#), [33](#), [37](#), [XXII](#)
- [64] D. Montgomery and A. Samarin, "Adhesion between concrete and treated or untreated flat metal surfaces," *MRS Proceedings, Cambridge University Press*, vol. 114, 1987. [23](#), [25](#), [27](#), [29](#), [30](#), [31](#), [33](#)
- [65] A. D. Wilson, J. W. Nicholson, and H. Prosser, "Surface Coatings-2," *Elsevier applied science London and New-York*, 1988. [23](#), [30](#), [31](#), [XXII](#)
- [66] C. Ployaert, "La Corrosion des armatures des bétons armés et précontraints," *Fédération de l'Industrie Cimentière Belge*, p. 15, 2008. [23](#)
- [67] S. Freedman, "Corrosion of nonferrous metals in contact with concrete," *Modern Concrete*, vol. 36, pp. 1–3, 1970. [23](#)
- [68] "Le ciment et les métaux non ferreux," *Bulletin du ciment*, vol. 16-17, no. 6, pp. 1–6, 1948. [23](#), [29](#)
- [69] CSTB, CEBTP, VERITAS, CETEN_APAVE, SOCOTEC, NORISKO_Construction, SNFA, and QUALICONSULT, "Comportement de l'aluminium et ses alliages utilisés dans le bâtiment en contact avec le plâtre ou le ciment ainsi que d'autres matériaux," *Fiche technique N°40 - Indice A*, pp. 1–2, 2008. [23](#), [31](#)
- [70] F. D. Larrard, "Structures granulaires et formulation des bétons," *Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées*, vol. OA 34, p. 414 p., 2000. [24](#)
- [71] P. C. Kreijger, "The skin of concrete composition and properties," *Matériaux et Construction*, vol. 17, no. 4, pp. 275–283, 1984. [25](#)
- [72] S. J. Desouza, R. D. Hooton, and A. A. Bickley, "A field test for evaluating high performance concrete covercrete quality," *Canadian Journal Of Civil Engineering*, vol. 25, pp. 551–556, 1998. [25](#)
- [73] W. Zhu and P. J. M. Bartos, "Application of depth-sensing microindentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 1299–1304, 2000. [25](#), [26](#), [27](#), [28](#), [XXI](#)

- [74] A. T. Horne, I. G. Richardson, and R. M. D. Brydson, "Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, pp. 1613–1623, 2007. [25](#), [26](#), [28](#), [XXI](#)
- [75] P. G. Allison, R. D. Moser, C. A. Weiss, P. G. Malone, and S. W. Morefield, "Nanomechanical and chemical characterization of the interface between concrete, glass-ceramic bonding enamel and reinforcing steel," *Construction and Building Materials*, 2012. [25](#), [26](#), [27](#), [XXI](#)
- [76] A. Hamouine and M. Lorrain, "Etude de la résistance à l'arrachement de barres enrobées dans du béton de hautes performances," *Materials and Structures*, vol. 28, no. 10, pp. 569–574, 1995. [27](#), [33](#)
- [77] W. Yeih, R. Huang, J. J. Chang, and C. C. Yang, "Pullout test for determining interface properties between rebar and concrete," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 57–65, 1997. [33](#)
- [78] A. Cheng, R. Huang, J. K. Wu, and C. H. Chen, "Effect of rebar coating on corrosion resistance and bond strength of reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 5, pp. 404–412, 2005. [29](#)
- [79] X. Fu and D. D. L. Chung, "Linear correlation of bond strength and contact electrical resistivity between steel rebar and concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 7, pp. 1397–1402, 1995. [28](#), [29](#)
- [80] X. Fu and D. D. L. Chung, "Effects of water-cement ratio, curing age, silica fume, polymer admixtures, steel surface treatments, and corrosion on bond between concrete and steel reinforcing bars," *ACI Materials Journal*, vol. 95, pp. 725–734, 1998. [28](#)
- [81] J.-j. Chang and W.-c. Yeih, "The effects of particle shape on bond strength improvement of epoxy particle coating composites," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 153–160, 2001. [32](#)
- [82] H. Stang, Z. Li, S. P. Shah, Member, and ASCE, "Pullout problem : stress versus fracture mechanical approach," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 116, no. 10, pp. 2136–2150, 1990.
- [83] H. W. Reinhardt, J. Blaauwendraad, and E. Vos, "Prediction of bond between steel and concrete by numerical analysis," *Matériaux et Construction*, vol. 17, no. 100, pp. 311–320, 1984.
- [84] A. S. Ezeldin and P. N. Balaguru, "Characterization of bond between fiber concrete and reinforcing bars using nonlinear finite element analysis," *Computers and Structures*, vol. 37, no. 4, pp. 569–584, 1990. [27](#)
- [85] C. J. Hester, S. Salamizavaregh, D. Darwin, and S. L. McCabe, "Bond of Epoxy-Coated Reinforcement : Splices," *ACI Structural Journal*, no. 90, 1993. [27](#), [32](#)
- [86] O. C. Choi, H. Hadje-Ghaffari, D. Darwin, and S. L. McCabe, "Bond of epoxy-coated reinforcement : Bar parameters," *ACI Materials Journal*, vol. 88, no. 2, pp. 207–217, 1991. [32](#)
- [87] B. Tutikian, T. Hilgert, and J. Howland, "Adherence comparison of concrete with unprotected steel and hot galvanized steel," *Structures and Materials Journal*, vol. 7, pp. 314 – 320, 2014. [29](#)
- [88] O. A. Kayyali and S. R. Yeomans, "Bond and slip of coated reinforcement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 219–226, 1995. [27](#), [29](#), [32](#), [33](#)
- [89] Z. P. Bazant and S. Sener, "Size effect in pullout tests," *ACI Materials Journal*, vol. 85, no. 5, pp. 347–351, 1988. [27](#)

- [90] L. Libessart, C. Djelal, and P. De Caro, "Influence of the type of release oil on steel formwork corrosion and facing aesthetics," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 391–401, 2014. [28](#), [35](#)
- [91] G. Baty and R. Reynolds, "Release Agents-How they work," *Concrete International*, vol. 19, no. 9, pp. 52–54, 1997. [28](#), [34](#), [35](#), [36](#)
- [92] C. Djelal, A. Y. Vanhove, A. D. Chambellan, and A. P. Brisset, "Influence of the application method of release agents on thickness of mould oils," *Materials and Structures*, 2009. [28](#), [34](#), [35](#)
- [93] T. S. Phan, "Modélisation numérique de l'interface acier-béton : Application au comportement des structures en béton renforcées par des aciers plats crantés," *Thèse de doctorat, Université de Paris Est*, 2012. [29](#), [30](#), [XXI](#)
- [94] M. M. Jalili, S. Moradian, and D. Hosseinpour, "The use of inorganic conversion coatings to enhance the corrosion resistance of reinforcement and the bond strength at the rebar/ concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 233–238, 2009. [29](#), [31](#), [32](#)
- [95] M. Sánchez, M. C. Alonso, P. Cecílio, M. F. Montemor, and C. Andrade, "Electrochemical and analytical assessment of galvanized steel reinforcement pre-treated with Ce and La salts under alkaline media," *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, no. 3, pp. 256–266, 2006. [30](#), [31](#), [32](#), [XXI](#), [XXII](#)
- [96] G. Arliguie and J. Grandet, "Etude par calorimétrie de l'hydratation du ciment Portland en présence de zinc," *Cement and Concrete Research*, vol. 15, no. 5, pp. 825–832, 1985. [30](#)
- [97] A. Macias and C. Andrade, "Corrosion of galvanized steel in dilute Ca(OH)₂ solutions (pH 11.1-12.6)," *British Corrosion Journal*, vol. 22, no. 3, 1987. [30](#)
- [98] L. Maldonado, O. Quiroz-Zavala, and L. Díaz-Ballote, "Bond between galvanized steel and concrete prepared with limestone aggregates," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 57, no. 6, pp. 305–313, 2010. [31](#)
- [99] M. F. Montemor, A. M. Simões, and M. G. S. Ferreira, "Composition and behaviour of cerium films on galvanised steel," *Progress in Organic Coatings*, vol. 43, no. 4, pp. 274–281, 2001. [31](#)
- [100] M. F. Montemor, A. M. Simões, and M. G. S. Ferreira, "Composition and corrosion behaviour of galvanised steel treated with rare-earth salts : The effect of the cation," *Progress in Organic Coatings*, vol. 44, no. 2, pp. 111–120, 2002. [31](#)
- [101] W. Trabelsi, P. Cecilio, M. G. Ferreira, and M. F. Montemor, "Electrochemical assessment of the self-healing properties of Ce-doped silane solutions for the pre-treatment of galvanised steel substrates," *Progress in Organic Coatings*, vol. 54, no. 4, pp. 276–284, 2005.
- [102] K. Aramaki, "Preparation of chromate-free, self-healing polymer films containing sodium silicate on zinc pretreated in a cerium(III) nitrate solution for preventing zinc corrosion at scratches in 0.5 M NaCl," *Corrosion Science*, vol. 44, no. 6, pp. 1375–1389, 2002.
- [103] K. Aramaki, "Self-healing mechanism of an organosiloxane polymer film containing sodium silicate and cerium (III) nitrate for corrosion of scratched zinc surface in 0.5 M NaCl," *Corrosion Science*, vol. 44, no. 7, pp. 1621–1632, 2002. [31](#)
- [104] A. L. Rudd, C. B. Breslin, and F. Mansfeld, "The corrosion protection afforded by rare earth conversion coatings applied to magnesium," *Corrosion Science*, vol. 42, no. 2, pp. 275–288, 2000. [31](#)
- [105] S. Bernal, F. J. Botana, J. J. Calvino, M. Marcos, J. A. Pérez-Omil, and H. Vidal, "Lanthanide salts as alternative corrosion inhibitors," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 225, no. 1-2, pp. 638–641, 1995. [31](#)

- [106] F. Liebau and A. Amel-Zadeh, "The crystal structure of Ca (Zn₂(OH)₆2H₂O) – a retarder in the setting of Portland cement," *Kristall und Technik*, vol. 7, no. 1-3, pp. 221–227, 1972. 31
- [107] B. R. Hinton and L. Wilson, "The corrosion inhibition of zinc with cerous chloride," *Corrosion Science*, vol. 29, no. 8, 1989. 32
- [108] J. F. Berthet, I. Yurtdas, Y. Delmas, and A. Li, "Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011. 32
- [109] M. Horgnies, P. Willieme, and O. Gabet, "Influence of the surface properties of concrete on the adhesion of coating : Characterization of the interface by peel test and FT-IR spectroscopy," *Progress in Organic Coatings*, vol. 72, no. 3, pp. 360–379, 2011. 32, 33
- [110] E. L. Keijbets, J. Chen, E. Dickinson, and J. Vieira, "Surface energy investigation of chocolate adhesion to solid mould materials," *Journal of Food Engineering*, 2009. 33
- [111] I. R. Hart, "Concrete release agents, associated materials and surface finishes," *Concrete*, vol. 28, no. 2, pp. 33–34, 1994. 35
- [112] Geoplast®, "Geopanel, the universal panel for walls," *Document technique*, 2014. 36, XXII
- [113] P. G. Malone, "Use of Permeable Formwork in Placing and Curing Concrete," *High-Performance Materials and Systems Research Program*, no. October, p. 43, 1999. 37
- [114] L. Basheer, S. V. Nanukuttan, and P. A. M. Basheer, "The influence of reusing 'Formtex' controlled permeability formwork on strength and durability of concrete," *Materials and Structures*, vol. 41, no. 8, pp. 1363–1375, 2008. 37
- [115] C. Chen, J. Liu, G. Cui, and J. Liu, "Effect of controlled permeable formwork on the improvement of concrete performances," *Procedia Engineering*, vol. 27, no. 2011, pp. 405–411, 2012. 37
- [116] Zemdrain®, "Nappes de coffrage anti-bullage à perméabilité contrôlée," *Document technique*, 2017. 37, XXII

Chapitre 2

Matériaux et approches expérimentales

Sommaire

2.1	Introduction	48
2.2	Bétons employés	48
2.2.1	Compositions des bétons	48
2.2.2	Propriétés des composants	48
2.2.2.1	Granulats	49
2.2.2.2	Ciment et filler calcaire	50
2.2.3	Caractérisation expérimentale des bétons frais	50
2.3	Peaux coffrantes étudiées	51
2.3.1	Caractérisation microscopique de la surface des peaux coffrantes	52
2.3.2	Caractérisation des signatures physico-chimiques des peaux coffrantes	53
2.3.2.1	Détermination de la composition chimique surfacique	53
2.3.2.2	Étude de la mouillabilité de la surface des peaux coffrantes	53
2.3.3	Caractérisation des signatures topographiques des parois de coffrage	56
2.3.4	Caractérisation des signatures surfaciques mécaniques des surface coffrantes	58
2.3.4.1	Essai de nanoindentation	58
2.3.4.2	Test de rayage	59
2.4	Caractérisation tribologique de l'interface béton-peau coffrante	60
2.4.1	Description du tribomètre	60
2.4.2	Paramètres d'essais	60
2.4.3	Procédure d'essais	61
2.5	Caractérisation de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes	61
2.5.1	Appareil de mesure	62
2.5.2	Paramètres expérimentaux	62
2.5.3	Méthode expérimentale	63
2.5.4	Analyses post-mortem	63
2.6	Conclusion	65
2.7	Références	66

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, les matériaux étudiés ainsi que l'ensemble des méthodes expérimentales utilisées dans ce travail sont décrits. Tout d'abord, les formulations des bétons employés et les différents moyens de contrôle sont présentés. Par la suite, les peaux coffrantes étudiées et les moyens de caractérisation des signatures surfaciques sont détaillés. Une fois la surface des peaux analysées, des essais de frottement béton à l'aide d'un tribomètre plan/plan sont effectués afin de déterminer les fonctionnalités tribologiques des peaux coffrantes étudiées. Puis, dans le but de caractériser l'adhérence du béton contre les parois de coffrage, un dispositif simulant le décoffrage sur site est entièrement développé. Au final, les signatures fonctionnelles des peaux réduisant les phénomènes d'adhérence ont pu être déterminées.

2.2 Bétons employés

Cette section présente les bétons employés dans ce travail pour la caractérisation du frottement et de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes étudiées. Les constituants composant les bétons ainsi que les outils de caractérisation des bétons frais sont décrits par la suite.

2.2.1 Compositions des bétons

Dans le but de déterminer la signature tribologique et la signature adhésive des parois coffrantes, deux formulations de bétons sont sélectionnés. Leurs compositions sont choisies en fonction de leurs représentativités sur site pour la réalisation de voiles verticaux. De plus, des travaux antérieurs sur la friction du béton au coffrage avaient utilisés des bétons de formulations similaires, ce qui a permis une comparaison des résultats plus adaptée.

Le tableau 2.1 présente les compositions des bétons employés. Le premier béton (B32) est un béton ordinaire non adjuvanté possédant 32 % de pâte qui est un des plus hauts volumes de pâte pouvant être rencontrés sur site. Le second (BAP36) est un béton autoplaçant beaucoup plus fluide en raison de l'ajout de superplastifiant. Dans ce travail, les deux bétons employés possèdent des formulations très variées. La détermination des signatures fonctionnelles des peaux coffrantes régissant les frottements et l'adhérence du béton à l'interface béton-coffrage doit être indépendante des caractéristiques de ce dernier. Le nouveau procédé de démoulage in-situ recherché devra être indépendant des caractéristiques du béton.

Composants	Béton	
	B32	BAP36
Volume de pâte (%)	32	36
Ciment CEM I 52,5 CE CP2 NF (kg.m^{-3})	265	350
Filler calcaire (kg.m^{-3})	28	133
Sable 0/4 (kg.m^{-3})	792	789
Gravillons concassés 4/8 (kg.m^{-3})	271	-
Gravillons concassés 6/20 (kg.m^{-3})	734	-
Gravillons concassés 4/12,5 (kg.m^{-3})	-	822
Superplastifiant Viscocrete Tempo 9 (l)	-	3,3
Eau (l)	201	181
Eau/Liant	0,57	0,37

TABLEAU 2.1 – Formulations des bétons.

2.2.2 Propriétés des composants

Afin d'obtenir des bétons normés, la distribution granulaire des granulats et des poudres est analysée et les résultats sont décrits ci-dessous.

2.2.2.1 Granulats

Les granulats sont passés à différents tamis selon la norme NF EN 933 [1] et les masses de passant sont retenues. La figure 2.1 représente les courbes granulométriques du sable ainsi que des gravillons utilisés pour la confection des bétons. Ces courbes permettent de déterminer l'homogénéité et la répartition du squelette granulaire des bétons étudiés.

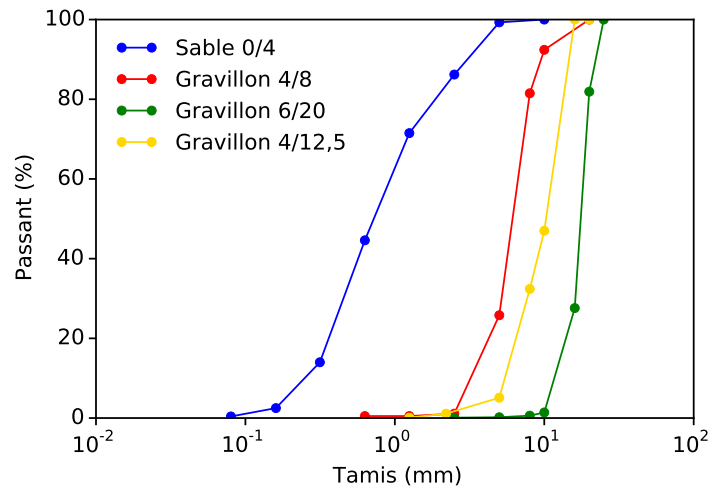


FIGURE 2.1 – Courbes granulométriques des granulats utilisés.

A partir des courbes granulométriques, le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c des granulats sont déterminés d'après la norme XP P94-041 [2]. Ces coefficients sont calculés à partir des diamètres de tamis à 10, 30 et 60 % de passant respectivement notés d_{10} , d_{30} et d_{60} .

Le coefficient d'uniformité C_u caractérise la répartition en taille des éléments. La granulométrie est dite étalée si $C_u \geq 2$ et serrée si $C_u \leq 2$. Il est défini par :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.1)$$

Le coefficient de courbure C_c caractérise la continuité en tailles des éléments. Un coefficient de courbure compris entre 1 et 3 correspond à un matériau bien gradué où sa continuité est bien répartie. En dehors de cet intervalle, le matériau est mal gradué, c'est-à-dire avec une continuité mal répartie. Le coefficient de courbure C_c est défini selon l'équation suivante :

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (2.2)$$

Pour le sable, son module de finesse MF est calculé pour caractériser sa finesse suivant la norme NF EN 12620+A1 [3]. Le module de finesse MF est déterminé suivant l'équation :

$$MF = \frac{\sum \text{refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5)}}{100} \quad (2.3)$$

Un sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 1,8 et 3,2. Un module de finesse trop faible nécessitera une augmentation du dosage de l'eau due à l'absorption des plus gros grains. Au contraire, si un sable manque de fines, le béton sera plus difficile à mettre en œuvre.

Le tableau 2.2 résume les caractéristiques mesurées des granulats. Les granulats utilisés présentent de légères discontinuités granulaires mais sont toutefois acceptables pour la confection des bétons.

Paramètre	Granulat			
	Sable 0/4	Gravillon 4/8	Gravillon 4/12,5	Gravillon 6/20
Coefficient d'uniformité (C_u)	3,8	2,0	2,1	1,5
Coefficient de courbure (C_c)	0,9	1,2	0,9	1,2
Module de finesse (MF)	2,8	-	-	-

 TABLEAU 2.2 – C_u , C_c et MF des granulats utilisés pour la confection des bétons.

2.2.2.2 Ciment et filler calcaire

Dans ce travail de recherche, le ciment utilisé comme liant hydraulique est un CEM I 52,5 provenant des usines CALCIA. Concernant le filler calcaire, il s'agit du BETOCARB-MQ fourni par la société OMYA. Celui-ci est incorporé dans les bétons pour diminuer le dosage en ciment et participer également au remplissage des interstices laissées entre les granulats. La figure 2.2 montre les distributions en taille des particules de ciment et de filler. Les analyses granulométriques des deux matériaux sont faites dans une précédente thèse [4] par granulométrie laser. Les mêmes analyses sont considérées dans ce travail étant donné les similitudes entre les poudres utilisées dans les deux thèses.

La figure 2.2a révèle que le ciment utilisé possède une taille de grains maximale de 60 μm . L'histogramme associé montre que les grains de diamètre 20 μm sont les plus présents dans le ciment avec un pourcentage de 3,4 % et que 80 % des particules du ciment sont inférieures à cette valeur. La courbe granulométrique de la figure 2.2b associée au filler calcaire montre que les grains ont un diamètre maximal de 80 μm . Le pourcentage de passant cumulé au-delà de cette valeur n'est pas significatif.

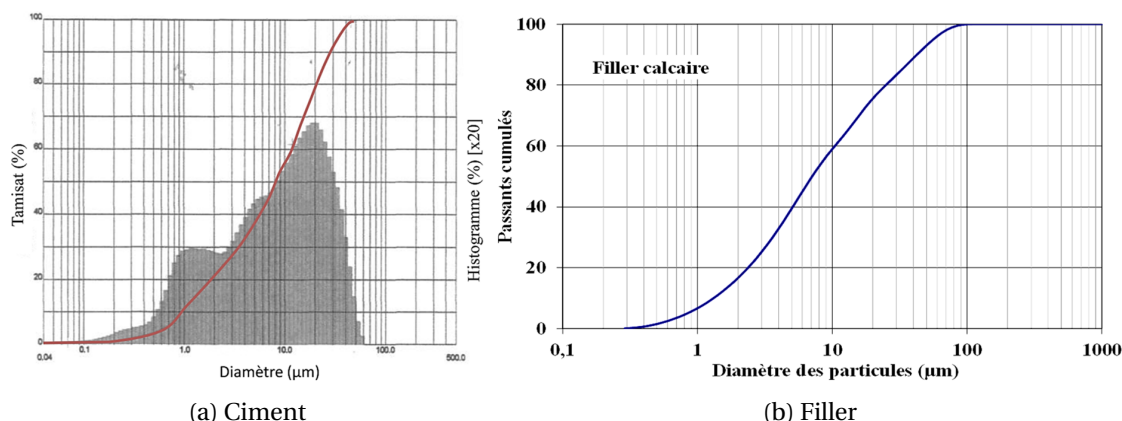


FIGURE 2.2 – Distributions de la taille des grains de ciment et de filler [4].

Après avoir caractérisé les principaux constituants qui forment les deux bétons employés, la partie suivante est consacrée aux moyens de contrôle des bétons frais.

2.2.3 Caractérisation expérimentale des bétons frais

Le mode de **malaxage** du béton est défini selon la norme NF P 18-404 [5] et la procédure appliquée est présentée sur la figure 2.3. Dans le cas du BAP36, le **SP** est ajouté simultanément avec les 2/3 d'eau restant. Les 10 minutes d'arrêt après l'ajout des granulats et du premier tiers d'eau permettent au sable d'absorber l'eau incorporée.

Pour les essais tribologiques, les bétons sont confectionnés par gâchées de 20 litres à l'aide d'un malaxeur à bétons. Tandis que pour les tests d'adhérence, les bétons sont mélangés manuellement sans malaxeur par gâchées de 7 litres.

Afin de vérifier la conformité des bétons, l'**ouvrabilité** à l'état frais est mesurée par des essais d'affaissement pour les bétons ordinaires (B32) ou d'étalement pour les bétons autoplaçants (BAP36).

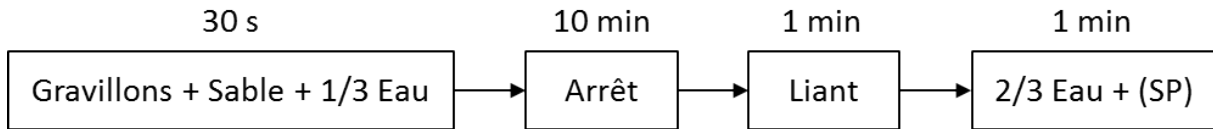


FIGURE 2.3 – Mode de malaxage des bétons

L'**ouvrabilité** est mesurée à l'aide d'un cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350 [6]. Les valeurs d'affaissement S_b ou d'étalement D_b sont directement reliées à une classe de béton selon la norme NF EN 206 [7].

L'essai d'affaissement consiste à remplir un cône de 300 mm de haut de béton en 3 couches piquées 25 fois chacune puis à retirer le moule verticalement et régulièrement. La figure 2.4a montre l'affaissement du béton à travers le cône formé suite au retrait du moule. L'affaissement correspond à la différence de hauteur entre le haut du moule et le sommet du béton. Dans cette étude, pour les bétons ordinaires B32, les affaissements S_b recherchés étaient compris entre 12 et 14 cm. Cela représente des bétons très plastiques de classe S3 [7].

Pour les BAP, la fluidité à l'état frais est mesurée via un essai d'étalement. Celui-ci reprend le principe précédent du cône d'Abrams mais ici, c'est le diamètre de la galette qui est mesuré comme indiqué sur la figure 2.4b. Pour les essais tribologiques, l'étalement D_b moyen des BAP36 était de 700 ± 15 mm ce qui classe le BAP36 en catégorie SF2, la catégorie la plus courante pour la réalisation de voiles verticales.

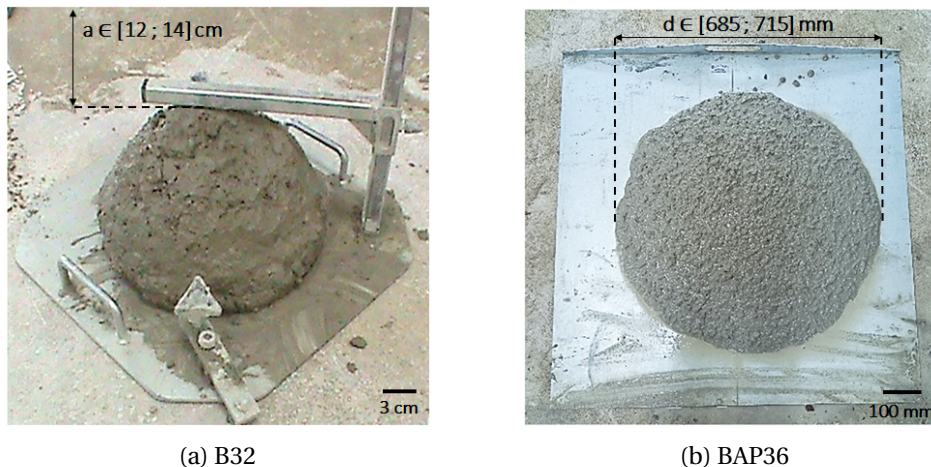


FIGURE 2.4 – Mesure de l'**ouvrabilité** des bétons utilisés.

Dans cette section, les formulations et les caractéristiques principales des bétons employés sont décrites. Deux bétons de consistance très différentes sont utilisés pour caractériser les interactions béton-coffrage lors des essais de frottements et d'adhérence. Par la suite, les diverses peaux coffrantes étudiées ainsi que les outils de caractérisation des signatures surfaciques sont détaillés.

2.3 Peaux coffrantes étudiées

Pour avoir une représentation générale du comportement du béton à l'interface béton-coffrage, plusieurs peaux coffrantes sont étudiées. Dans ce travail de recherche, les surfaces coffrantes étudiées sont des produits industriels et celles-ci sont représentés dans le tableau 2.3 où les nomenclatures ne sont pas fournies pour des raisons de confidentialité. Les deux dernières colonnes du tableau présentent les campagnes d'essais effectuées en fonction des parois. Deux peaux coffrantes métalliques (PMr1 et PMr2) sont initialement étudiées car elles sont couramment utilisés comme paroi coffrante sur les sites de construction. Un revêtement coffrant métallique (RMf) et cinq revête-

ments coffrants polymères sont également étudiés. Ces références sont choisies pour leur composition chimique. Parmi les revêtements polymères, trois se présentent sous la forme de film auto-adhésif (RPa1', RPa1'' et RPa2) et deux sous la forme de produits à appliquer au pinceau (RPf1 et RPf2). Au cours de ce travail de recherche, la référence initiale du revêtement coffrant RPa1 a été modifiée, par conséquent, deux références auto-adhésifs RPa1' et RPa1'' sont retenues.

Nom	Nature	Forme	Tribologie	Adhérence
PMr1	Métal	Peau de référence	✓	✓
PMr2	Métal	Peau de référence	✓	✓
RMf	Métal	Revêtement fluide	-	✓
RPa1'	Polymère	Revêtement auto-adhésif (modèle 1)	✓	-
RPa1''	Polymère	Revêtement auto-adhésif (modèle 2)	-	✓
RPa2	Polymère	Revêtement auto-adhésif	-	✓
RPf1	Polymère	Revêtement fluide	-	✓
RPf2	Polymère	Revêtement fluide	-	✓

TABLEAU 2.3 – Liste des peaux coffrantes étudiées.

Les échantillons de peaux métalliques PMr1 et PMr2 sont découpés initialement par laser sur des tôles de 5 mm d'épaisseur. Ceux du RMf proviennent de tôles épaisses de 2 mm. Par la suite, ces échantillons sont redimensionnés au moyen d'une tronçonneuse à disque. Pour la caractérisation des revêtements polymères, ceux-ci sont appliqués sur les peaux coffrantes métalliques, soit directement collés pour les revêtements auto-adhésifs, soit à l'aide de pinceaux à poils fins pour les revêtements fluides. La découpe de tous les échantillons est effectuée à différentes positions afin de fournir une population de coupons statistiquement significative. Pour chaque analyse, les peaux coffrantes Cette partie est consacrée à la caractérisation des signatures physico-chimiques des peaux coffrantes. Dans cette étude, cette signature est reliée à la composition chimique et aux propriétés de mouillage des surfaces coffrantes. Ces deux caractéristiques sont étudiées individuellement dans les paragraphes suivants. Au préalable, les échantillons de peaux coffrantes sont nettoyés dans un bac à ultrasons, lavés à l'éthanol puis séchés à l'air chaud afin de retirer les impuretés coincées en surface.

D'après l'étude bibliographique du chapitre 1, il a été montré que la topographie, la composition chimique ainsi que les propriétés de mouillage de la paroi coffrante influencent les interactions avec le béton. Par conséquent, les signatures topographiques et physico-chimiques des différentes peaux coffrantes sont caractérisées. Également, la signature mécanique est étudiée afin de déterminer la robustesse des parois de coffrage. Les divers moyens de caractérisation des signatures surfaciques sont définis dans la partie suivante.

2.3.1 Caractérisation microscopique de la surface des peaux coffrantes

Avant de déterminer les signatures surfaciques des parois étudiées, des observations microscopiques sont initialement effectuées. La coupe transversale des peaux coffrantes est observée afin d'identifier la présence de couches superficielles.

Certains échantillons de peaux sont préalablement recouverts d'une couche de nickel afin de les protéger des détériorations induites par le polissage mécanique. Ceux-ci sont immergés dans une solution de placage au nickel sans électrode à une température comprise entre 71°C et 82°C avec un taux de dépôt de 10 $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$. Après nickelisation, les échantillons sont enrobés dans de la bakélite chargée à 150°C et à 75 bar pendant 9 minutes. Par la suite, un polissage automatisé des sections transversales est réalisé. Des disques diamantés de granulométrie 120 à 2000 sont premièrement employés, suivi de disques en feutre et de suspensions diamantées base eau de 3 et 1 μm respectivement pour un polissage de finition.

Les premières observations optiques sont effectuées avec un stéréomicroscope Leica MZ6. Cet appareil a permis l'examen des surfaces coffrantes à faible grossissement jusqu'à fois 40. Pour des

agrandissements plus élevés de 50 à 1000, le microscope Aristomet de Leica est employé. Enfin, le microscope électronique à balayage JSM-7001F de JEOL est utilisé sous vide poussé (environ 10^{-4} Pa) avec une énergie du faisceau d'électrons comprise entre 10 ou 15 kV à une distance de travail de 10 mm. Grâce à la détection des électrons secondaires, des informations topographiques de la surface des peaux coffrantes sont également collectées.

2.3.2 Caractérisation des signatures physico-chimiques des peaux coffrantes

En parallèle des observations optiques et microscopiques, des analyses chimiques et des essais de mouillage sont effectués afin de déterminer les signatures physico-chimiques des peaux coffrantes.

2.3.2.1 Détermination de la composition chimique surfacique

Pour les composés métalliques, leurs phases cristallographiques sont déterminées à l'aide du diffractomètre à rayons X Siemens D500. Une anode de chrome de longueur d'onde $\lambda_{CrK\alpha}$ égale à 0,228970 nm sous un rayonnement de 40 kV et 30 mA est utilisée. Un filtre arrière au vanadium est ajouté pour absorber les radiations $K\beta$ du chrome. La largeur du faisceau de rayons bombardés sur l'échantillon était d'environ 2 mm. Les analyses sont effectuées dans une gamme d'angles de 40 à 160°. La détection des pics est effectuée selon les angles de diffraction $2\theta_B$ d'après la loi de Bragg.

En couplage avec les observations MEB, la *spectroscopie rayons X à énergie dispersive – ou energy dispersive X-ray spectrometry – (EDS)* est employée au moyen d'un analyseur X-Max d'Oxford Instruments de surface de détection égale à 20 mm². Cette technique a l'avantage d'obtenir une semi-quantification de la composition élémentaire de la surface sur quelques micromètres de profondeur en comparaison à la DRX classique. Les spectres EDS sont analysés avec le logiciel INCA.

En ce qui concerne la détermination de la composition chimique des revêtements polymères, l'*analyse thermogravimétrique (ATG)*, la *calorimétrie différentielle à balayage – ou differential scanning calorimetry – (DSC)* et la *spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier – ou fourier transform infraRed spectroscopy – (FTIR)* sont employées.

Les thermogrammes ATG sont obtenus à l'aide d'un analyseur thermogravimétrique TGA Q500 de TA Instruments. Les échantillons de masse égale à 4,2 mg sont chauffés jusqu'à 900°C avec une vitesse de 20°C.min⁻¹ sous un flux de 50 ml.min⁻¹ d'azote.

La caractérisation par DSC est effectuée sur un calorimètre DSC Q10 de TA Instruments sur un échantillon de 3 mg chauffé à 10°C.min⁻¹ de -80°C à 190°C et sous un débit de 50 ml.min⁻¹ d'azote. La cristallinité en fraction massique (χ_c) est déterminée par la relation suivante :

$$\chi_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^{circ}} \quad (2.4)$$

où ΔH_f est l'enthalpie de fusion de l'échantillon analysé déterminée au pic de fusion endothermique et ΔH_f^{circ} est l'enthalpie de fusion du matériau 100 % cristallin.

Les analyses FTIR sont réalisées sur un spectromètre Frontier de Perkin Elmer dans des modes de transmission et de réflexion *réflectance totale atténuée – ou attenuated total reflection – (ATR)*. Les échantillons étaient en contact avec un cristal de diamant-ZnSe. Quatre balayages par mode sont enregistrés sur la gamme 4000–600 cm⁻¹ avec une résolution spectrale de 4 cm⁻¹.

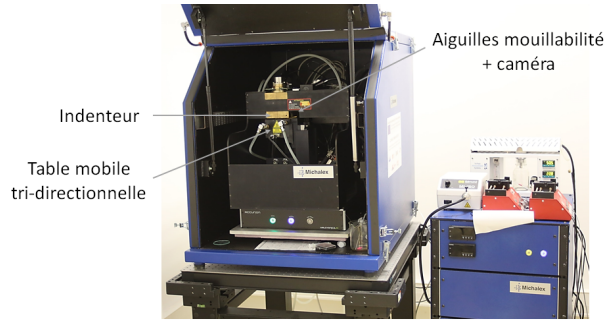
2.3.2.2 Étude de la mouillabilité de la surface des peaux coffrantes

Les principes de l'adhésion thermodynamique et de l'énergie de surface sont appliqués dans le but d'établir des relations entre le travail thermodynamique d'adhésion et la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes. Les énergies de surface des peaux coffrantes sont mesurées à l'aide du Morphoscan de Michalex Tribometrix (figure 2.5) au moyen de la méthode de la goutte sessile selon la norme AFNOR EN 828 [8]. Les gouttes sont déposées dans un environnement à 22 ± 1°C et à une humidité relative de 54 ± 2 %. Les peaux coffrantes sont nettoyées à l'aide d'ultrasons et

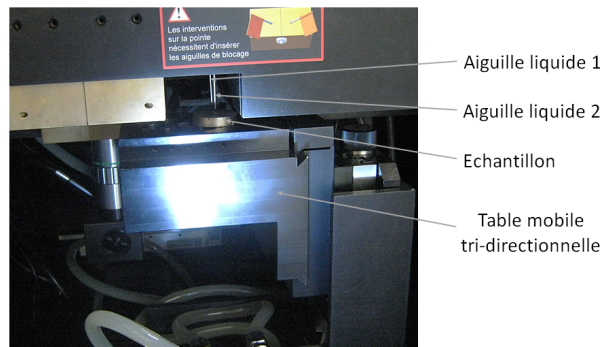
d'éthanol. Deux liquides, l'eau désionisée et le glycérol, sont utilisés avec les caractéristiques données dans le tableau 2.4. Une seringue de diamètre intérieur de 4,6 mm munie d'une aiguille de 0,8 mm de diamètre extérieur est utilisée pour déposer les gouttelettes. La longueur capillaire K est donnée par [9] :

$$K = \sqrt{\frac{\gamma_{LV}}{\rho \cdot g}} \quad (2.5)$$

où γ_{LV} est la tension superficielle du liquide, ρ la masse volumique du liquide et g l'accélération gravitationnelle.



(a) Vue d'ensemble



(b) Dispositif de mouillabilité

FIGURE 2.5 – Morphoscan de Michalex Tribometrix.

Les gouttelettes ont un rayon de $1,8 \pm 0,2$ mm, plus petit que la longueur capillaire de l'eau (2,7 mm) et du glycérol (2,3 mm), de sorte que la gravité est négligeable. L'état statique des gouttelettes sur la surface de la peau est enregistré sous la forme d'une image de 720 x 480 pixels et ce dix secondes après le dépôt de la goutte. L'avancement des angles de contact est mesuré avec une précision de $\pm 2^\circ$ en utilisant le programme de traitement d'image open source ImageJ. Les gouttes avec un diamètre inférieur à 1 mm ne sont pas prises en compte en raison de la résolution de la caméra trop faible pour mesurer un angle de contact. Dix gouttelettes de chaque liquide sont déposées à divers endroits sur les peaux pour obtenir une valeur moyenne arithmétique des angles de contact. Les angles gauches et droits sont utilisés pour déterminer l'énergie de surface des peaux coffrantes étudiées.

Liquide	Tension superficielle (mN.m ⁻¹)	Composante dispersive (mN.m ⁻¹)	Composante polaire (mN.m ⁻¹)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Longueur capillaire (m)
Eau déionisée	72.80	21.80	51.00	1000	0.0027
Glycérol	63.40	37.00	26.40	1260	0.0023

TABLEAU 2.4 – Propriétés des liquides de référence utilisés.

Pour calculer l'énergie de surface des peaux coffrantes, on considère une surface solide S sur laquelle est déposée une goutte de liquide L , le tout enveloppé d'une phase gazeuse G . Les interactions

entre le liquide et le solide sont caractérisées par la forme de la goutte défini par l'angle de contact θ à l'équilibre suivant la figure 2.6

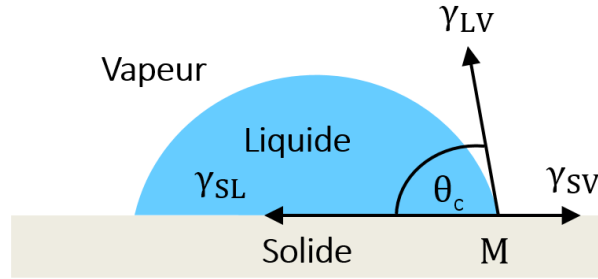


FIGURE 2.6 – Goutte de liquide en équilibre sur une surface.

L'équilibre des forces au point M sur l'axe horizontal (ligne triple solide-liquide-vapeur) est donnée par la relation de Young [10] :

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cdot \cos\theta_c \quad (2.6)$$

avec : θ_c = angle de contact liquide-solide (= angle de mouillage),

γ_{SV} = énergie superficielle libre de la surface du corps solide,

γ_{SL} = énergie interfaciale de la surface de corps solide en contact avec le liquide,

γ_{LV} = tension superficielle du liquide en équilibre avec la phase gazeuse.

La valeur de l'angle de contact θ_c permet de donner l'affinité du liquide pour le solide. Arbitrairement, il est considéré que si cet angle est inférieur à 90° , la surface du solide est hydrophile. A l'inverse, la surface est considérée hydrophobe si une goutte d'eau forme un angle supérieur à 90° .

Selon Owens et Wendt [11] et Fowes [12], l'énergie interfaciale γ_{SL} entre la surface d'un corps solide et une goutte de liquide est la somme des deux tensions de superficielles γ_{SV} et γ_{LV} , réduite par les interactions dispersives et polaires présentes à leurs frontières. Ces interactions sont décrites comme étant la double somme des valeurs moyennes géométriques des composantes de tension dispersées $\sqrt{\gamma_{SV}^d \gamma_{LV}^d}$ et polaires $\sqrt{\gamma_{SV}^p \gamma_{LV}^p}$ des phases individuelles, indiquée d'après l'équation ci-dessous :

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - 2(\sqrt{\gamma_{SV}^d \gamma_{LV}^d} + \sqrt{\gamma_{SV}^p \gamma_{LV}^p}) \quad (2.7)$$

La substitution γ_{SL} de la relation de Young (Eq. 2.6) et le réarrangement de la formule ci-dessus sous la forme générale d'un polymère de degré 1 : $y = a \cdot x + b$, mène à la formule suivante :

$$\frac{(1 + \cos\theta_c)\gamma_{LV}}{2\sqrt{\gamma_{LV}^d}} = \gamma_{SV}^p \sqrt{\frac{\gamma_{LV}^p}{\gamma_{LV}^d}} + \sqrt{\gamma_{SV}^d} \quad (2.8)$$

En sachant que $\gamma_{SV} = \gamma_{SV}^d + \gamma_{SV}^p$ [11, 12], avec γ_{SV}^d = composante dispersive, γ_{SV}^p = composante polaire, on peut remonter à l'énergie superficielle libre de la surface des peaux coffrants.

Les équations qui viennent d'être établies sont valables pour des surfaces supposées planes, uniformes et avec un angle de mouillage à l'équilibre. Cependant plusieurs défauts peuvent causer des perturbations de la goutte de liquide : la rugosité, les capillaires et l'hétérogénéité chimique qui provoque une différence de polarité [13].

En négligeant l'aspect d'ancrage mécanique et en supposant que l'adhésion est seulement due aux forces de Van der Waals, il est possible de calculer une énergie d'adhésion entre un liquide et la surface d'un solide. Cette énergie d'adhésion peut être comparée au travail à fournir pour séparer les deux matériaux par unité de surface. Cependant, cette énergie ne représente pas une relation

solide/solide mais elle peut donner des informations sur la capacité de l'eau à adhérer à la surface des peaux coffrantes. Le travail d'adhésion W_a est calculé suivant l'équation ci-dessous :

$$W_a = 2\sqrt{\gamma_{SV}^d \gamma_{LV}^d} + 2\sqrt{\gamma_{SV}^p \gamma_{LV}^p} \quad (2.9)$$

En plus des caractéristiques physico-chimiques, les signatures topographiques des parois de coffrage impactent également les phénomènes présents à l'interface béton-coffrage. De ce fait, la méthode d'analyse topographique est définie par la suite.

2.3.3 Caractérisation des signatures topographiques des parois de coffrage

La topographie des peaux coffrantes est observée à l'aide de l'interféromètre optique (IO) à lumière blanche NT3300 de VEECO. Cette technique basée sur la réflexion de la lumière a l'avantage d'être sans contact et donc non destructive de la surface analysée. Les mesures topographiques sont réalisées sur des régions de $4 \times 4 \text{ mm}^2$ à 2052×2052 points espacés de $1,9 \mu\text{m}$ le long des directions X et Y. Pour des peaux coffrantes rugueuses, le mode d'interférométrie à balayage vertical est préféré. Pour chaque peau de coffrage, dix analyses sont effectuées à différentes régions et sur différents coupons. Les différents paramètres de rugosité surfaciques retenus sont listés dans le tableau 2.5 et proviennent des normes ISO 25178-2 [14] et -3 [15].

Paramètre	Symbole	Équation
S_a	Rugosité arithmétique moyenne	2.10
S_q	Rugosité quadratique moyenne	2.11
S_{dr}	Rapport de surface interfaciale développée	2.12
V_{mp}	Volume de matière des pics	2.13
V_{vc}	Volume de vide à cœur	2.14
V_{vv}	Volume de vide des vallées	2.15

TABLEAU 2.5 – Paramètres de rugosité retenus.

Le premier paramètre S_a est le paramètre international pour caractériser la rugosité moyenne d'une surface et il est défini par :

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (2.10)$$

avec $z(x,y)$ la valeur des hauteurs ou profondeurs selon les directions x et y.

Ce paramètre est souvent corrélé avec la rugosité quadratique moyenne S_q calculé d'après l'équation suivante :

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)|^2 dx dy} \quad (2.11)$$

Un des paramètres hybrides retenus est le rapport de surface interfaciale développée S_{dr} (équation 2.12). Il permet de quantifier un taux de rugosité par rapport à une surface parfaitement plane est lisse.

$$S_{dr} = \frac{A_{réelle} - A_{projetée}}{A_{projetée}} \quad (2.12)$$

Les trois derniers paramètres sont des paramètres de volume déterminés d'après la courbe d'Abbott - Firestone montrée sur la figure 2.7. Celle-ci représente la distribution d'amplitude cumulée en fonction de la profondeur de coupe. D'après des valeurs de taux de portance définies par la norme ISO 25178-3 [15], le volume de matière des pics (V_{mp}), le volume de vide à cœur (V_{vc}) et le volume de vide des vallées (V_{vv}) peuvent être déterminés selon les équations :

$$V_{mp} = k \int_{0\%}^{10\%} [Smc(q) - Smc(10)] dq \quad (2.13)$$

$$V_{vc} = k \int_{10\%}^{100\%} [Smc(10) - Smc(q)] dq - k \int_{80\%}^{100\%} [Smc(80) - Smc(q)] dq \quad (2.14)$$

$$V_{vv} = k \int_{80\%}^{100\%} [Smc(80) - Smc(q)] dq \quad (2.15)$$

où k est une constante de conversion des volumes dans les unités requises.

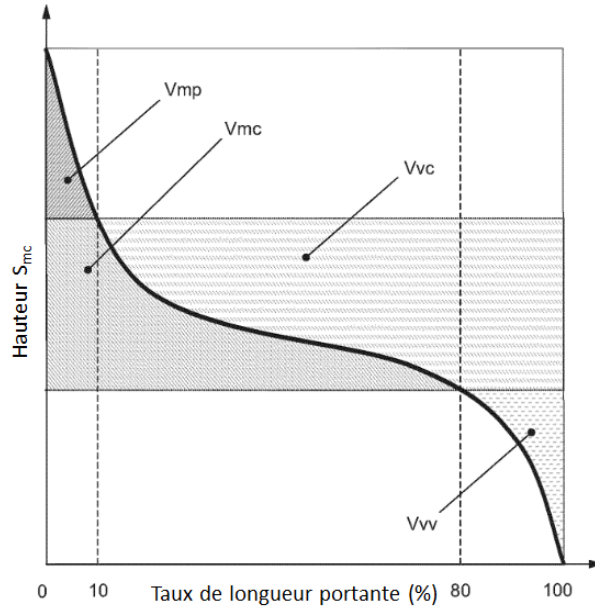


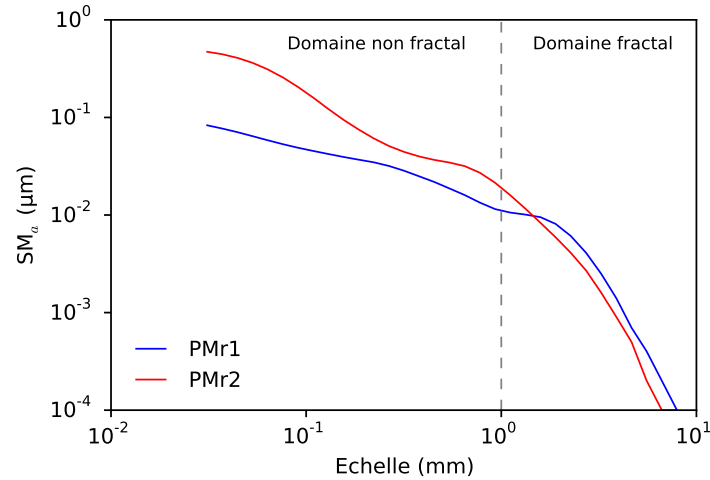
FIGURE 2.7 – Courbe de taux de longueur portante [14].

Au préalable, une caractérisation multi-échelle des surfaces des peaux coffrantes est également faite à l'aide des premières données interférométriques. Cette technique décrit les fonctionnalités des surfaces à diverses longueurs d'onde qui les composent. Les profils de rugosité des surfaces coffrantes sont échantillonnés en composantes fréquentielles de $3 \cdot 10^{-2}$ à 8 mm^{-1} en utilisant l'approche de décomposition des ondelettes continues [16]. Ce procédé peut être équivalent à un microscope mathématique multi-échelle, où la dilatation/compression d'une ondelette ou de l'ondelette mère Ψ représenterait les résolutions. Les résultats de cette décomposition ont permis d'identifier les différentes échelles des composantes topographiques après transformation en ondelettes inverse 2D. Cette caractérisation multi-échelle a permis de déterminer une échelle d'analyse pertinente afin d'obtenir des résultats topographiques cohérents.

Afin de déterminer une échelle d'analyse caractéristique des signatures de rugosité, le paramètre SM_a est pris en compte pour les deux échantillons de référence. Celui-ci quantifie la moyenne arithmétique des hauteurs de la surface et est défini selon la relation suivante :

$$SM_a = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} |z(n, m)| \quad (2.16)$$

La figure 2.8 représente le spectre multi-échelle de rugosité SM_a des peaux coffrantes PMR1 et PMR2. Les courbes révèlent des surfaces fractales avec un changement de pente à une échelle d'environ 1 mm. Au-dessus de cette valeur critique, les courbes montrent les domaines fractals des deux peaux où le paramètre SM_a devient indépendant de l'échelle d'analyse. Par conséquent, les mesures interférométriques en $4 \times 4 \text{ mm}^2$ sont justifiées.


 FIGURE 2.8 – Spectres de rugosité SM_q pour les deux échantillons de référence.

Afin de déterminer la propension à l'adhérence du béton sur les parois de coffrage, leurs signatures physico-chimiques et topographiques sont identifiées aux moyens de différentes approches décrites précédemment. Dans le but de déterminer la robustesse surfacique des peaux aux frottements, une caractérisation mécanique est effectuée en amont.

2.3.4 Caractérisation des signatures surfaciques mécaniques des surface coffrantes

Dans un premier temps, la signature mécanique des peaux coffrantes est caractérisée localement par des essais de nanoindentation afin de remonter à la dureté de surface des parois. Secondement, des tests de rayage sont réalisés pour déterminer la résistance au rayage des peaux coffrantes.

2.3.4.1 Essai de nanoindentation

La dureté des surfaces coffrantes est caractérisée avec le Morphoscan de Michalex Tribometrix équipé d'une pointe diamant Berkovich. Les chargements sont effectués à une vitesse de déformation constante de $0,05 \text{ s}^{-1}$ jusqu'à une charge maximale de 150 mN pour la peau métallique PMr1 et de 5,5 mN pour le revêtement polymère RPa1'. Pour éviter l'influence du substrat, les empreintes sont réalisées avec une profondeur de pénétration inférieure à 10 % de l'épaisseur des revêtements polymères. Également, pour ne pas modifier la surface des peaux aucune préparation impliquant mécaniquement la surface n'est effectuée. Seulement, un nettoyage préalable aux ultrasons et à l'éthanol est réalisé au préalable.

Les courbes de chargement en fonction du déplacement sont analysées à l'aide de la méthode Oliver et Pharr [17, 18]. Sur la figure 2.9, h_f correspond à la profondeur résiduelle de l'empreinte après décharge, h_{max} à la profondeur maximal de l'empreinte et P_{max} au chargement maximum appliqué. S est la rigidité de contact totale calculée par la pente de la courbe de décharge au sommet qui dépend de la rigidité S_i de l'indenteur et de la rigidité S_m de la machine suivant l'équation :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_m} \quad (2.17)$$

avec $S_m = 1 \text{ nm/mN}$.

La dureté H est ainsi déterminée par le rapport suivant :

$$H = \frac{P_{max}}{A_p(h_{c_{max}})} \quad (2.18)$$

où $A_p(h_{c_{max}})$ correspond à l'aire de contact projetée au pic de chargement calculée par $A_p(h_{c_{max}}) = 24,5 \cdot h_{c_{max}}^2$ pour un indenteur Berkovich parfait. La profondeur de contact maximale se détermine par la relation suivante :

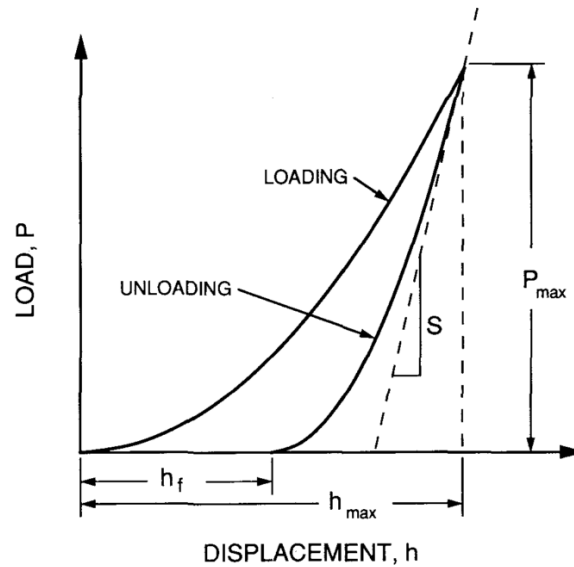


FIGURE 2.9 – Représentation schématique d'une courbe de force-déplacement.

$$h_{c_{max}} = h_{max} - \epsilon \cdot \frac{P_{max}}{S_i} \quad (2.19)$$

avec un facteur d'interception ϵ égal à 0,75 pour un indenteur pyramidal.

2.3.4.2 Test de rayage

Les tests de rayage sont réalisés avec le Scratch Tester Millenium 200 de TriboTechnic (figure 2.10). Un indenteur Rockwell C en diamant avec un rayon hémisphérique de 200 μm est utilisé. Trois rayures espacées de 2 mm sont faites par peau coffrante. Les tests sont effectués à force progressive de 0 à 100 N avec un taux de chargement de 200 $\text{N} \cdot \text{min}^{-1}$ et une vitesse de rayage égale à 40 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, soit des rayures de 20 mm de long. Les profondeurs des rayures sont mesurées suite aux essais à l'aide de l'interféromètre optique NT 3300 décrit précédemment. Les forces normales critiques sont déterminées en identifiant une modification soudaine de la force tangentielle ou de la profondeur de rayure au cours de l'essai.

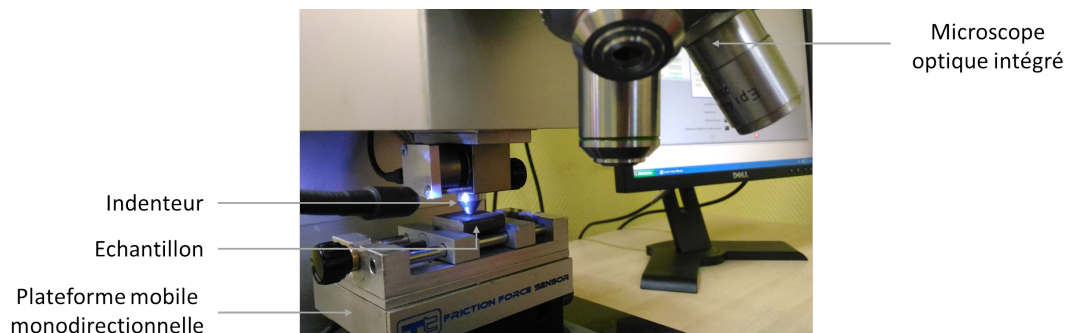


FIGURE 2.10 – Scratch Tester Millenium 200 de TriboTechnic.

Dans ce travail de recherche, les signatures topographiques, physico-chimiques et mécaniques de différentes peaux coffrantes sont identifiées. Cette première partie est consacrée à la description des différents moyens de caractérisation de ces signatures. Dans la section suivante, les outils dynamiques mettant en œuvre le béton sont détaillés, à savoir les essais tribologiques et les tests d'adhérence.

2.4 Caractérisation tribologique de l'interface béton-peau coffrante

Lors de la coulée du béton frais à l'intérieur des *banches*, celui-ci engendre des frottements contre la paroi des coffrages et cause la dégradation de celle-ci. Par conséquent, une campagne tribologique est réalisée afin de quantifier le phénomène et l'usure provoquée par les frottements. Les objectifs de l'étude tribologique portent sur l'influence des signatures surfaciques des parois en contact avec le béton ainsi que sur l'effet des caractéristiques des bétons employés. Ici, les caractéristiques du tribomètre et les conditions expérimentales sont présentées.

2.4.1 Description du tribomètre

Le tribomètre utilisé pour la campagne tribologique du béton frais a été mis au point par Y.Vanhove durant son doctorat [19]. Le dispositif conçu s'était inspiré d'un premier modèle novateur élaboré par C.Djelal [20] lors de ses travaux sur le frottement des pâtes d'argile lors de leur extrusion. Les essais tribologiques ont été réalisés au laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE-EA 4515) de l'Université d'Artois.

La figure 2.11 décrit le principe du tribomètre employé qui consiste à faire glisser deux échantillons de béton frais compressés contre une peau coffrante de $180 \times 474 \text{ mm}^2$ imitant la peau coffrante d'une *banche*. Cela permet de simuler la coulée du béton à l'intérieur des coffrages sur les sites de construction. Le béton est placé à l'état frais dans deux porte-échantillons étanches à fond mobile de 120 mm de diamètre comme indiqué sur la figure 2.11. La pression est exercée par un vérin pneumatique puis transmise au béton par un piston raccordé au fond mobile des porte-échantillons. Le béton est donc compressé contre les peaux coffrantes. Le moteur accouplé à une vis sans fin permet le glissement de la paroi métallique contre le béton frais. Avec ce tribomètre, la vitesse de bétonnage est simulée par la vitesse de déplacement de la paroi. La pression appliquée simule alors la poussée du béton exercée contre les coffrages.

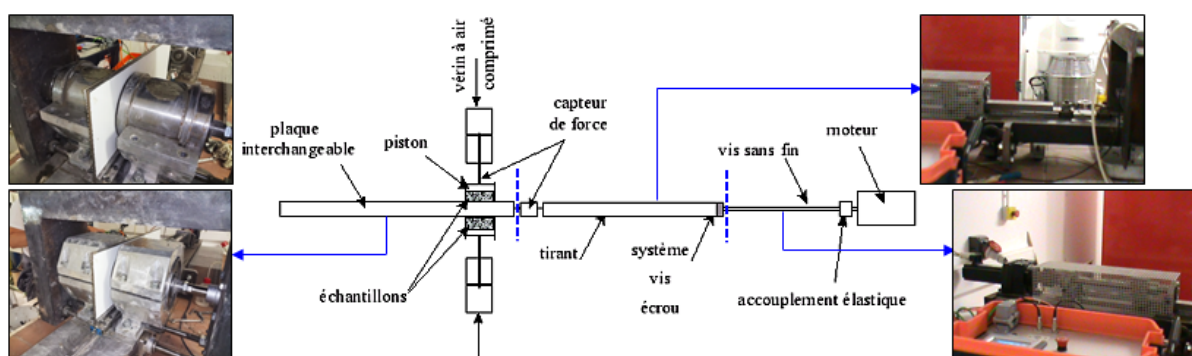


FIGURE 2.11 – Schéma de principe du tribomètre plan/plan [19].

Après avoir présenté les caractéristiques du tribomètre, les paramètres d'essais et la procédure expérimentale sont détaillés.

2.4.2 Paramètres d'essais

Pour l'étude tribologique du béton frais, les deux formulations B32 et BAP36 présentées dans le tableau 2.1 en début de chapitre sont testées. Le premier béton B32 est un béton standard à haut volume de pâte et ses caractéristiques le rendent généralement "agressif" en terme de frottement. A l'inverse, le second béton choisi est un béton autoplaçant et son extrême fluidité à l'état frais provoque une friction "douce" contre le coffrage. Les pressions de contact du béton prises en compte sont 60, 80 et 110 kPa. Cette gamme de pression est sélectionnée en cohérence avec les poussées mesurées sur site. Les deux premières (60 et 80 kPa) sont des pressions relativement faibles qui sont présentes pour des coffrages peu élevés. La troisième retenue (110 kPa) sera considérée comme la

pression critique, sachant que sur site les coffrages sont limités à des poussées maximales autour de 120 kPa. Pour la vitesse de glissement de la peau coffrante, une seule est adoptée à $0,83 \text{ mm.s}^{-1}$, ce qui correspond à la vitesse moyenne de coulée du béton sur chantier de 3 m.h^{-1} .

Concernant les peaux coffrantes, trois références sont testées dans cette campagne tribologique (tableau 2.3). Parmi eux, les deux peaux métalliques PMr1 et PMr2 car celles-ci sont couramment employées sur sites. Dans le but de caractériser l'influence des signatures surfaciques sur les frottements du béton à l'interface, la troisième peau coffrante choisie est de nature polymère en raison de leur propriétés tribologiques généralement plus faibles que les métaux. Par choix de facilité de mise en place et en raison des meilleurs résultats en rayage, le revêtement auto-adhésif de référence RPa1' est finalement pris en compte. Pour chaque essai, une nouvelle peau coffrante est utilisée afin de ne pas perturber la mesure de frottement suivante.

2.4.3 Procédure d'essais

La force tangentielle mesurée pendant un essai contre une paroi coffrante F_{mes} est la somme de deux composantes de friction. La première d'entre elles est la force de frottement engendrée par le système d'étanchéité des porte-échantillons à vide contre la peau coffrante en contact F_v . Celle-ci doit être mesurée avant pour chaque essai car elle est fonction du serrage des porte-échantillons. Cette force à vide doit être faible pour ne pas parasiter la mesure du frottement du béton frais pendant l'essai mais suffisamment élevée pour éviter la fuite de la laitance à la jonction béton-peau coffrante. La seconde composante est la réelle force de friction tangentielle produite par le béton frais contre la peau coffrante testée. Celle-ci est équivalente à $2.F_b$ car partagée entre les deux porte-échantillons. Par conséquent :

$$F_{mes} = F_v + 2.F_b \quad (2.20)$$

ce qui peut être traduit par,

$$F_b = \frac{F_{mes} - F_v}{2} \quad (2.21)$$

La contrainte de frottement du béton τ_f est calculée en divisant la force de frottement F_b par la surface de l'échantillon en contact avec la paroi coffrante S_c selon l'équation :

$$\tau_f = \frac{F_b}{S_c} \quad (2.22)$$

où $S_c = \frac{\pi.d^2}{4}$ avec un diamètre des porte-échantillons $d = 120 \text{ mm}$.

Les premières études dynamiques mettant en œuvre le béton sont effectuées sur les frottements de ce dernier contre les coffrages. Une campagne tribologique est réalisée à l'aide d'un tribomètre plan/plan dont le principe est décrit ci-dessus. L'objectif de cette campagne est de déterminer l'impact de la friction sur les signatures surfaciques des peaux coffrantes. La procédure appliquée ainsi que les conditions expérimentales sont également définies dans cette partie. La seconde étude dynamique concerne l'adhérence du béton sur les coffrages et la méthode de caractérisation du phénomène est détaillée dans la section suivante.

2.5 Caractérisation de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes

A la suite des essais tribologiques, les mécanismes d'adhérence à l'interface béton-coffrage sont étudiés au moyen d'un dispositif simulant le décoffrage du béton. Celui-ci est conçu et développé en s'inspirant du procédé de décoffrage actuellement employé sur site. Le développement et la conception du dispositif d'adhérence seront présentés dans le chapitre 5. Dans cette section les conditions expérimentales et les protocoles permettant de caractériser et de quantifier l'adhérence du béton sont décrits.

2.5.1 Appareil de mesure

Afin de mesurer des efforts de décoffrage, le nouveau dispositif d'adhérence est conçu autour d'une machine de traction 1185 d'Instron (figure 2.12). Le tableau 2.6 présente les capacités maximales de la machine considérées pour la conception de l'essai mécanique. La cellule de force placée dans la traverse du haut de l'appareil possède une incertitude de mesure sur l'effort d'environ 0,25 % de 1 kN à 100 kN. En-dessous de la valeur minimale, l'incertitude n'est pas connue. Avec ce modèle de machine, c'est la traverse du bas qui se déplace au contraire de celle du haut qui reste immobile. Aucun extensomètre externe n'est utilisé dans la configuration de l'essai.



FIGURE 2.12 – Machine de traction 1185 d'Instron.

Paramètre machine	Capacité maximale
Largeur d'une éprouvette	500 mm
Hauteur d'une éprouvette	1500 mm
Masse d'une éprouvette	100 kg
Cellule de force	100 kN

TABLEAU 2.6 – Capacités maximales admissibles de la machine de traction 1185 d'Instron.

Par la suite, les paramètres expérimentaux mis en jeu et la méthodologie appliquée sont présentés.

2.5.2 Paramètres expérimentaux

Les peaux coffrantes qui sont caractérisées en adhérence sont listées dans le tableau 2.3. Pour caractériser l'adhérence du béton et identifier les signatures fonctionnelles des parois de coffrage, seulement une formulation de béton est retenue pour réaliser les essais d'adhérence. C'est dans le but de rester cohérent avec les essais tribologiques et d'étudier une fonction de transfert que le béton B32 est sélectionné. Contrairement au BAP36, le B32 est plus facile à manipuler en raison de sa fluidité plus faible. Cependant, des modifications ont dû être faites par rapport au B32 confectionné pour les tests tribologiques (tableau 2.1), néanmoins la composition du béton est restée similaire. Le ci-

ment utilisé est devenu un ciment CEM I 52,5 R CE CP2 NF provenant toujours du même fournisseur. Celui-ci est plus performant en compression mais reste très similaire en composition. Les granulats 4/8 et 6/20 sont remplacés par des granulats 2/6 et 6,3/16 respectivement. Le squelette granulaire du B32 avec cette nouvelle formulation reste uniforme et homogène.

Les efforts de tirage attendus pour séparer le béton des peaux coffrantes étant faibles, aucune condition de préchargement n'est appliquée. Une vitesse de tirage faible est imposée à $0,05 \text{ mm.s}^{-1}$ afin d'assurer la perpendicularité et l'axialité du dispositif. Un pas de mesure de 100 ms est choisi. Un minimum de trois essais est réalisé pour chaque peau coffrante et les valeurs aberrantes sont rejetées en utilisant le test de Grubbs [21].

2.5.3 Méthode expérimentale

Pendant les essais d'adhérence, l'effort de tirage est pris en compte en fonction du déplacement de la traverse. Après traitement des courbes force-déplacement (la méthodologie sera détaillée dans le chapitre 5), la force maximale obtenue est considérée comme la force de rupture F_{ri} de l'interface entre le béton et la peau coffrante en contact. L'adhérence du béton est premièrement quantifiée en termes de contrainte de rupture interfaciale σ_{ri} calculée suivant l'équation :

$$\sigma_{ri} = \frac{F_{ri}}{S_c} \quad (2.23)$$

où S_c correspond à l'aire de contact béton-surface coffrante.

2.5.4 Analyses post-mortem

Dans le but d'identifier les mécanismes dominants responsables de l'adhérence du béton en fonction des signatures de la peau coffrante, des analyses surfaciques des éprouvettes sont effectuées après les essais de tirage. Les efforts de rupture interfaciale seront également justifiés.

La figure 2.13 présente le traitement d'image effectué à l'aide du logiciel libre Image J. Pour la prise de photo, la sensibilité de l'appareil est placée au minimum pour éviter la formation de bruit sur les clichés. Un seuil de luminosité (en rouge) est défini afin de quantifier le pourcentage de béton accroché p_{ba} sur la surface des peaux coffrantes. La région extérieure au cercle rouge n'est pas prise en compte car la présence de béton est due à une fuite de laitance en raison de problèmes étanchéité aux bords.

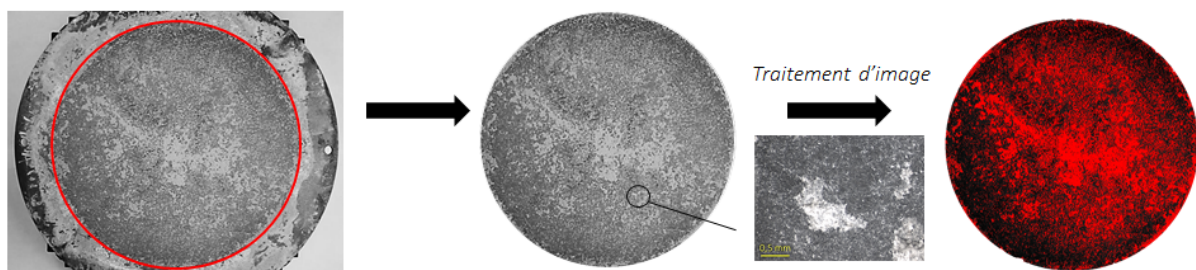


FIGURE 2.13 – Analyse quantitative de béton accroché sur les éprouvettes après les essais de tirage.

En plus de la quantification de béton accroché sur les peaux coffrants, des observations et analyses chimiques locales sont réalisées par microscopie électronique à balayage (paragraphe 2.3.1). Pour la caractérisation de l'interface entre le béton et les peaux coffrantes, des coupons de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ sont découpés directement sur les éprouvettes testées par jet d'eau. Ce procédé montre un faciès de découpe plus propre par rapport au disquage. Les coupons sont ensuite enrobés dans de la résine acrylique à froid afin de ne pas dégrader l'interface béton-peau. Pour finir, un pré-polissage

manuel à l'eau est réalisé pour rattraper la planéité des échantillons. Des disques en carbure de silicium de granulométrie 400 à 2000 sont utilisés pour éviter d'effriter le béton.

Actuellement, il n'existe pas d'essai à l'échelle du laboratoire représentatif des décoffrages sur site. Par conséquent, un nouveau test est développé permettant ainsi de caractériser et de quantifier la propension à l'adhérence du béton dans le cadre des coffrages. La dynamique de l'essai est mis au point au moyen d'une machine d'essai mécanique dans le but de mesurer des efforts de décoffrage. Des analyses post-mortem complémentaires sont présentées afin d'identifier les mécanismes responsables de l'adhérence du béton ainsi que les signatures fonctionnelles des surfaces coffrantes.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a premièrement présenté les bétons employés lors des essais dynamiques ainsi que les peaux coffrantes étudiées où le choix des matériaux pour ce travail de recherche a été justifiés. Pour les bétons, la répétabilité dans leur fabrication est contrôlée grâce à des essais d'**ouvrabilité** normés. Par la suite, l'ensemble des moyens de caractérisation des surfaces coffrantes est décrit. Pour déterminer leurs signatures physico-chimiques, des techniques de **DRX** et **EDS** sont utilisées pour les peaux coffrantes métalliques. Concernant les revêtements coffrants en polymère, des analyses thermiques sont réalisées pour identifier la chimie de surface. En complément, l'adhésivité superficielle des peaux est quantifiée par la méthode de la goutte sessile. Les caractéristiques topographiques et les paramètres de rugosité sont ensuite mesurés au moyen d'un interféromètre optique. Finalement, des essais de nanoindentation et des tests de rayage permettent de déterminer les signatures mécaniques des surfaces coffrantes.

Les interactions béton-coffrage sont étudiées à travers deux essais dynamiques, à savoir des essais tribologiques du béton frais et des tests d'adhérence sur parois de coffrage. Les premiers essais simulant la coulée du béton à l'intérieur des **banches** permettront de remonter à des contraintes de frottement interfaciale. Avec les tests d'adhérence, ce sont les contraintes de rupture interfaciale béton-coffrage qui sont quantifiées. Grâce aux essais dynamiques mettant en action le béton, la détermination des signatures surfaciques fonctionnelles des peaux coffrantes régissant l'interface béton-coffrage pourra être effectuée.

Les équipements de caractérisation surfacique étant présentés dans ce chapitre, le suivant est consacré à l'étude des signatures des surfaces coffrantes.

2.7 Références

- [1] AFNOR, “Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats,” *NF EN 933*, 2012. 49
- [2] AFNOR, “Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide.,” *XP P94-041*, 1995. 49
- [3] AFNOR, “Granulats pour béton,” *NF EN 12620 +A1*, 2008. 49
- [4] S. Bouharoun, “Comportement tribologique des huiles de décoffrage à l’interface béton/coffrage - Influence de la formulation du béton,” *Thèse de doctorat, Université d’Artois*, 2011. 50, XXII
- [5] AFNOR, “Essais d’étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes,” *NF P 18-404*, 1981. 50
- [6] AFNOR, “Essai pour béton frais,” *NF EN 12350*, 2009. 51
- [7] AFNOR, “Béton - Spécification, performances, production et conformité,” *NF EN 206*, 2014. 51
- [8] AFNOR, “Adhésifs - Mouillabilité - Détermination par mesurage de l’angle de contact et de l’énergie superficielle libre de la surface solide,” *NF EN 828*, 2013. 53
- [9] P. De Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré, *Capillarity and wetting phenomena : drops, bubbles, pearls, waves*. Springer Science & Business Media, 2003. 54
- [10] T. Young, “An Essay on the Cohesion of Fluids,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 95, no. 1805, pp. 65–87, 1805. 55
- [11] D. K. Owens and R. C. Wendt, “Estimation of the surface free energy of polymers,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 13, no. 8, pp. 1741–1747, 1969. 55
- [12] F. M. Fowkes, “Attractive forces at interfaces,” *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 56, no. 12, pp. 40–52, 1964. 55
- [13] L. Courard, “Evaluation of thermodynamic properties of concrete substrates and cement slurries modified with admixtures,” *Materials and Structures*, vol. 35, no. April, pp. 149–155, 2002. 55
- [14] AFNOR, “Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : surfacique - Partie 2 : termes, définitions et paramètres d’états de surface,” *NF EN ISO 25178-2*, 2012. 56, 57, XXII
- [15] AFNOR, “Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : surfacique Partie 3 : Opérateurs de spécification,” *NF EN ISO 25178-3*, 2012. 56
- [16] H. Zahouani, S. Mezghani, R. Vargiolu, and M. Dursapt, “Identification of manufacturing signature by 2D wavelet decomposition,” *Wear*, vol. 264, no. 5-6, pp. 480–485, 2008. 57
- [17] W. Oliver and G. Pharr, “Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation : Advances in understanding and refinements to methodology,” *Journal of Materials Research*, vol. 19, no. 01, pp. 3–20, 2004. 58
- [18] W. C. Oliver and G. M. Pharr, “An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments,” *Journal of Materials Research*, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583, 1992. 58
- [19] Y. Vanhove, “Contribution à l’étude du frottement d’un béton autoplacant contre une surface métallique - Application aux poussées contre les coffrages,” *Thèse de doctorat, Université d’Artois*, 2001. 60, XXII

- [20] C. Djelal, "Designing and perfecting a tribometer for the study of friction of a concentrated clay-water mixture against a metallic surface," *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 34, pp. 51–58, 2001. [60](#)
- [21] F. E. Grubbs, "Sample criteria for testing outlying observations," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 21, no. 1, pp. 27–58, 1950. [63](#)

Chapitre 3

Analyse des signatures surfaciques des peaux coffrantes

Sommaire

3.1 Introduction	70
3.2 Analyses micrographiques des peaux coffrantes	70
3.3 Signatures topographiques des peaux coffrantes	74
3.4 Signatures physico-chimiques des peaux coffrantes	77
3.4.1 Caractérisation de la composition chimique surfacique des peaux coffrantes	77
3.4.1.1 Peaux coffrantes métalliques	78
3.4.1.2 Peaux coffrantes polymères	82
3.4.2 Etude de la mouillabilité de surface des peaux coffrantes	84
3.5 Signatures mécaniques des peaux coffrantes	87
3.5.1 Détermination de la dureté surfacique des peaux coffrantes	87
3.5.2 Caractérisation du rayage des peaux coffrantes	88
3.5.2.1 Comportement mécanique des peaux coffrantes au rayage	88
3.5.2.2 Modèles mécaniques de rayage	95
3.6 Conclusion	98
3.7 Références	99

3.1 Introduction

Il a été montré dans l'état de l'art du chapitre [?] que l'interface béton-coffrage est en partie contrôlée par les signatures surfaciques des parois coffrantes lors de la mise en œuvre du béton. De ce fait, afin de caractériser la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes ainsi que leurs résistances aux frottements, leurs signatures surfaciques sont étudiées dans ce chapitre au moyen des différents outils de caractérisation décrits dans le chapitre [?]. Premièrement, l'analyse des signatures topographiques et physico-chimiques permettra de d'estimer la capacité du béton à adhérer sur les parois coffrantes. Par la suite, des essais de rayage couplés à la nanoindentation permettront de caractériser la résistance mécanique des surfaces coffrantes afin d'identifier leurs signatures mécaniques. Au final, la détermination de l'ensemble des signatures surfaciques des peaux coffrantes permettra une meilleure compréhension générale des phénomènes interfaciaux béton-coffrage.

3.2 Analyses micrographiques des peaux coffrantes

Avant d'analyser les signatures surfaciques des peaux coffrantes, des observations micrographiques sont principalement réalisées sur l'ensemble des coupes transversales dans le but de quantifier la présence de couches à la surface des parois coffrantes.

La figure 3.1 présente les micrographies de la surface et de la tranche de la peau coffrante PMr1 obtenues par microscopie électronique à balayage. La figure 3.1a révèle une surface hétérogène présentant des aspérités apparentes de l'ordre du micromètre. Cette microrugosité est souvent observée sur ce genre de métaux [1]. Sur la coupe transversale de la peau présentée sur la figure 3.1b, deux couches irrégulières sont aperçues, qui sont une sous-couche interne de 7,6 μm d'épaisseur proche du substrat métallique et une sous-couche externe de 3,8 μm en proche surface. A la jonction des deux couches, un dépôt discontinu de nickel est observée par contraste chimique (zones claires), ce qui induit une surface poreuse de la peau PMr1. Cette porosité peut être à l'origine des fissures visibles sur la sous-couche externe.

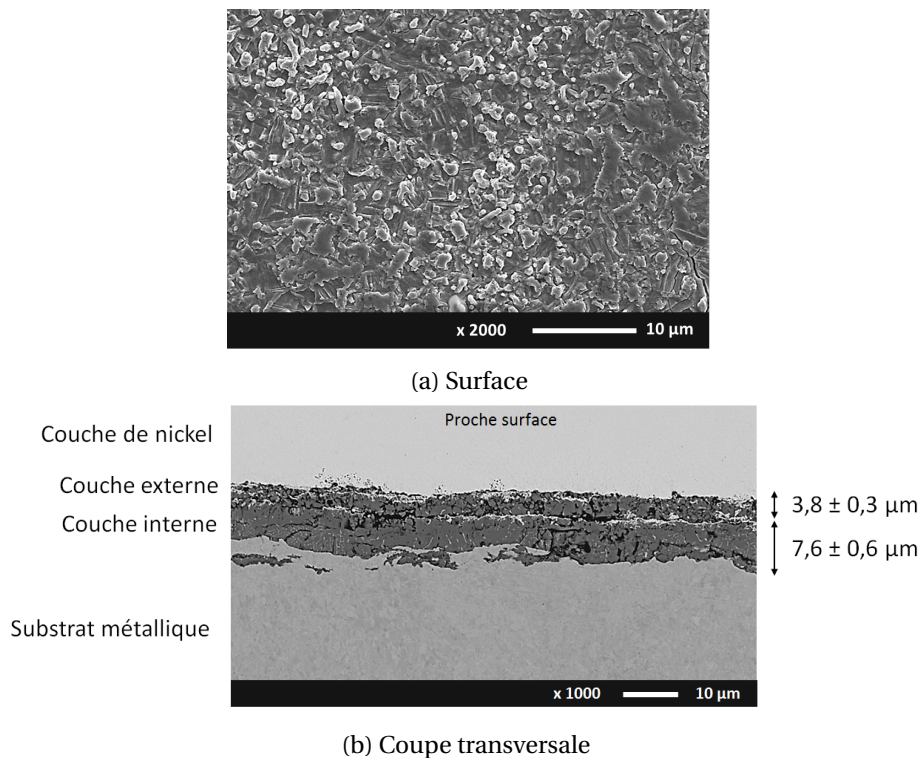


FIGURE 3.1 – Micrographies de la peau coffrante PMr1.

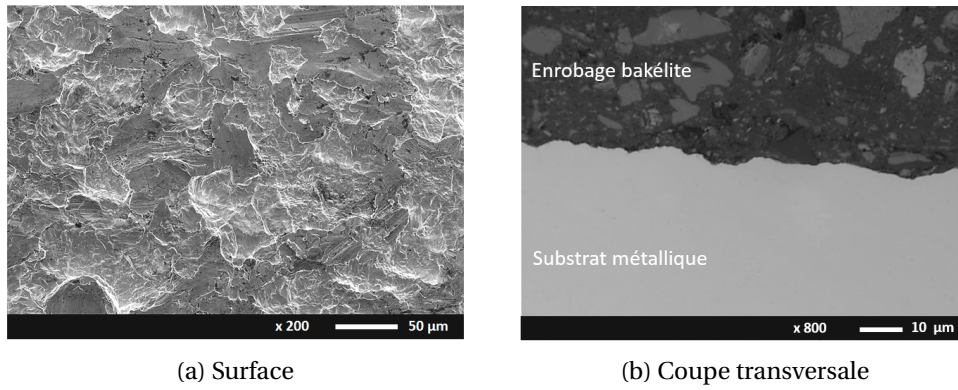


FIGURE 3.2 – Micrographies de la peau coffrante PMr2.

La seconde peau coffrante de référence PMr2 montre une surface plus irrégulière que la première peau PMr1. La surface affiche des plateaux de plusieurs centaines de micromètres de largeur (figure 3.2a). Sur la coupe transversale de la figure 3.2b, aucune couche n'est visible par microscopie optique entre l'enrobage bakélite et le substrat métallique. Par conséquent, dans le cas de la paroi coffrante PMr2, le substrat métallique interagit directement avec le béton. Cependant, une couche de l'ordre du nanomètre pourrait être présente mais difficile à confirmer au MEB en raison de sa très faible épaisseur [2].

La figure 3.3a montre sur la surface de la peau coffrante RMf un marquage organisé de l'ordre du micromètre. Cette structuration en extrême surface reflète un **fleurage** causé par la cristallisation naturelle du revêtement métallique après une galvanisation par trempage. La micrographie de la coupe transversale sur la figure 3.3b montre un dépôt plutôt régulier d'environ 18,3 μm d'épaisseur.

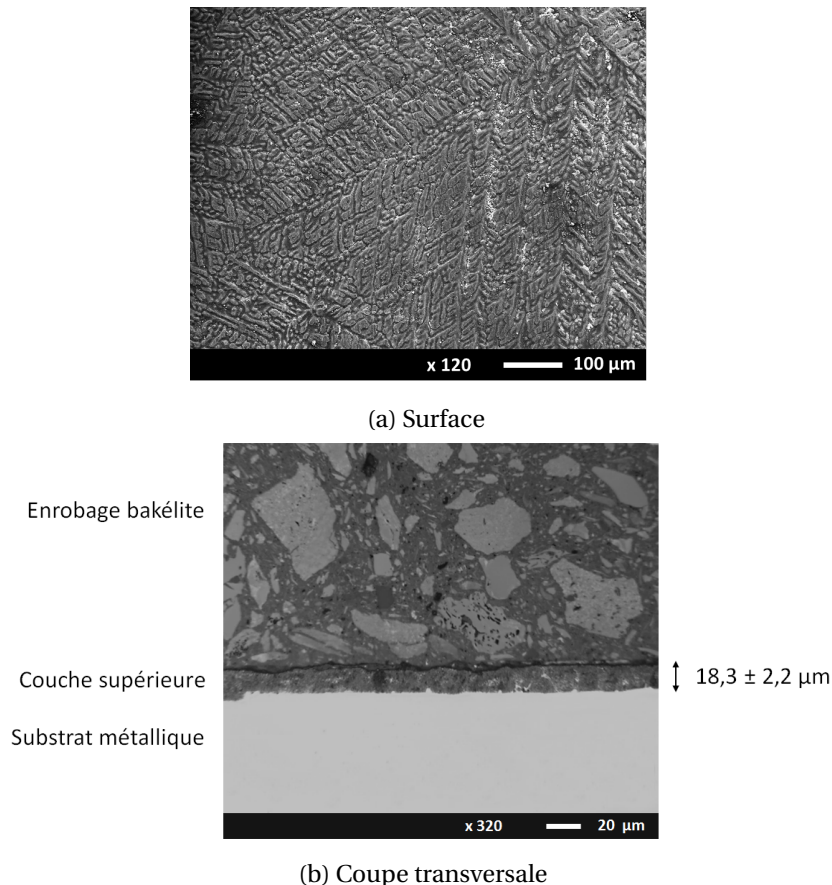


FIGURE 3.3 – Micrographies de la peau coffrante RMf.

La figure 3.4 affiche les micrographies des sections des trois revêtements coffrants auto-adhésifs. Sur la figure 3.4a, trois couches successives composent la peau coffrante RPa1', qui sont une couche adhésive qui permet de coller le revêtement au coffrage, une couche témoin qui permet de contrôler l'usure du revêtement et une couche fonctionnelle en proche surface qui est directement en contact avec le béton. Celles-ci mesurent respectivement 145, 420 et 160 μm d'épaisseur. Concernant le second modèle de peau coffrante RPa1'', celui-ci ne présente plus de couche témoin, cependant la couche fonctionnelle est devenue beaucoup plus épaisse s'élevant à 550 μm . L'épaisseur totale du revêtement est légèrement inférieure à celle du premier modèle RPa1'. Quant au revêtement coffrant auto-adhésif RPa2 présenté sur la figure 3.4c, son épaisseur est largement inférieure à celle des premiers revêtements coffrant RPa1' et RPa1'' avec une couche fonctionnelle de 125 μm d'épaisseur. Son épaisseur totale de 160 μm avec la couche adhésive fait de ce revêtement coffrant le plus mince des trois.

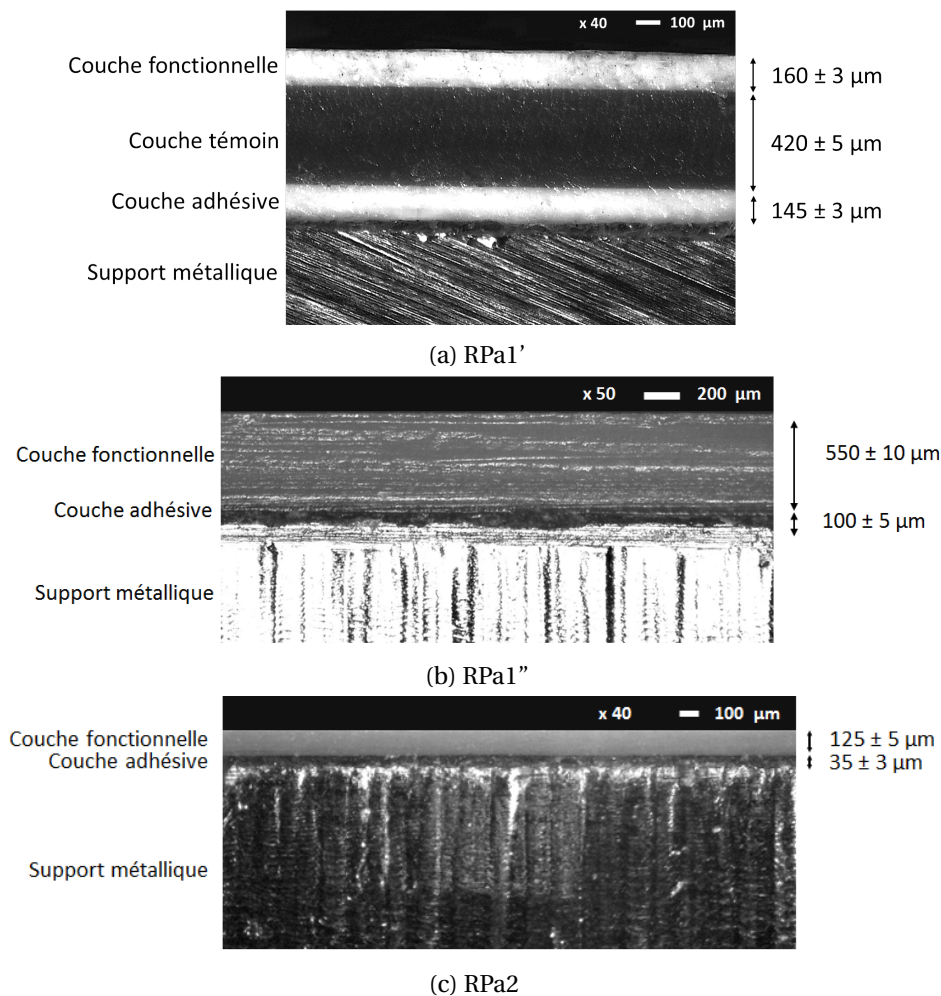


FIGURE 3.4 – Micrographies des coupes transversales des revêtements coffrants auto-adhésifs.

Les coupes transversales des revêtements polymères fluides sont présentées sur la figure 3.5. Sur la figure 3.5a, le produit coffrant RPF1 montre une couche régulière d'épaisseur moyenne égale à 15 μm . Cependant, celle-ci peut atteindre 40 μm dans les aspérités les plus profondes du support métallique. Cela indique une bonne pénétration du fluide dans les porosités du support. Le second revêtement coffrant fluide est appliqué en trois couches successives comme le montre la figure 3.5b. La première sous-couche déposée sur le métal représente une couche d'apprêt. Elle permet de préparer la surface en uniformisant la surface métallique. La deuxième sous-couche est la couche d'attache qui permet d'améliorer la liaison entre la couche d'apprêt et la couche fonctionnelle. Enfin, cette dernière qui sera directement en contact avec le béton apporte les fonctionnalités physico-chimiques du produit coffrant.

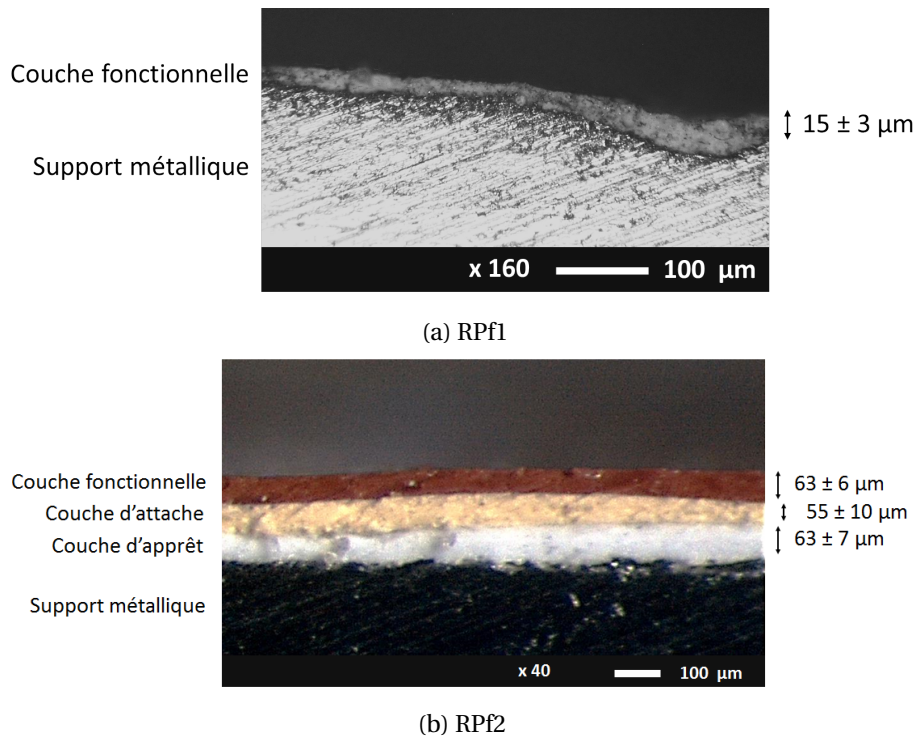


FIGURE 3.5 – Micrographies des coupes transversales des revêtements coffrants fluides.

Le tableau 3.1 résume la quantification des couches observées à la suite des analyses micrographiques effectuées sur l'ensemble des peaux coffrantes étudiées. Par défaut, la couche 1 représente celle en contact avec le substrat métallique. La structuration de surface des parois impacte en partie sur leurs comportements mécaniques lors d'une sollicitation surfacique. Hormis le revêtement de peau coffrante RPF1 qui présente une couche de l'ordre de la dizaine de micromètres équivalente à la peau métallique de référence PMr1, les revêtements coffrants polymères présentent des couches beaucoup plus épaisses qui tendent vers le millimètre pour le RPa1' et RPa1''.

Peau coffrante	Nombre de couches surfaciques	Épaisseur des couches (µm)			
		1	2	3	Totale
PMr1	2	7,6 ± 0,6	3,8 ± 0,3	-	11,4 ± 0,9
PMr2	0	-	-	-	-
RMf	1	16,3 ± 2,2	-	-	18,3 ± 2,2
RPa1'	3	145 ± 3	420 ± 5	160 ± 3	725 ± 11
RPa1''	2	100 ± 5	550 ± 10	-	650 ± 15
RPa2	2	35 ± 3	125 ± 5	-	160 ± 8
RPF1	1	15 ± 3	-	-	15 ± 3
RPF2	3	63 ± 7	55 ± 10	63 ± 6	181 ± 23

TABEAU 3.1 – Tableau synthétique des observations micrographiques des peaux coffrantes étudiées. La couche 1 est celle en contact avec le substrat métallique.

Dans cette partie, les analyses microscopiques ont identifié la structuration de surface des peaux coffrantes étudiés dans ce travail de recherche. Le nombre et l'épaisseur des couches présentes en surface sont quantifiés. Par la suite, pour estimer la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes, leurs différentes signatures surfaciques sont caractérisées en commençant par la signature topographique.

3.3 Signatures topographiques des peaux coffrantes

L'adhérence du béton contre le coffrage est en partie provoquée par l'ancrage mécanique de la pâte de ciment dans les aspérités de la paroi coffrante. Pour estimer la propension du béton à s'incruster à la surface des peaux, leur topographie est caractérisée par IO en lumière blanche et différents paramètres de rugosité sont retenus.

Les cartographies 3D des peaux coffrantes sont présentées sur les figures 3.6, 3.7 et 3.8 où l'échelle de rugosité est exprimée en amplitude totale. Les microaspérités de surface de la référence PMr1 et les larges plateaux superficiels de la peau PMr2 observés au MEB sont également visibles en IO respectivement sur la figure 3.6a et 3.6b. La peau coffrante PMr2 présente une rugosité totale deux fois plus élevée que celle de la référence PMr1. Sur la figure 3.6c, la cartographie 3D de la référence RMf montre une microrugosité de l'ordre du micromètre significatif du processus de fleurage.

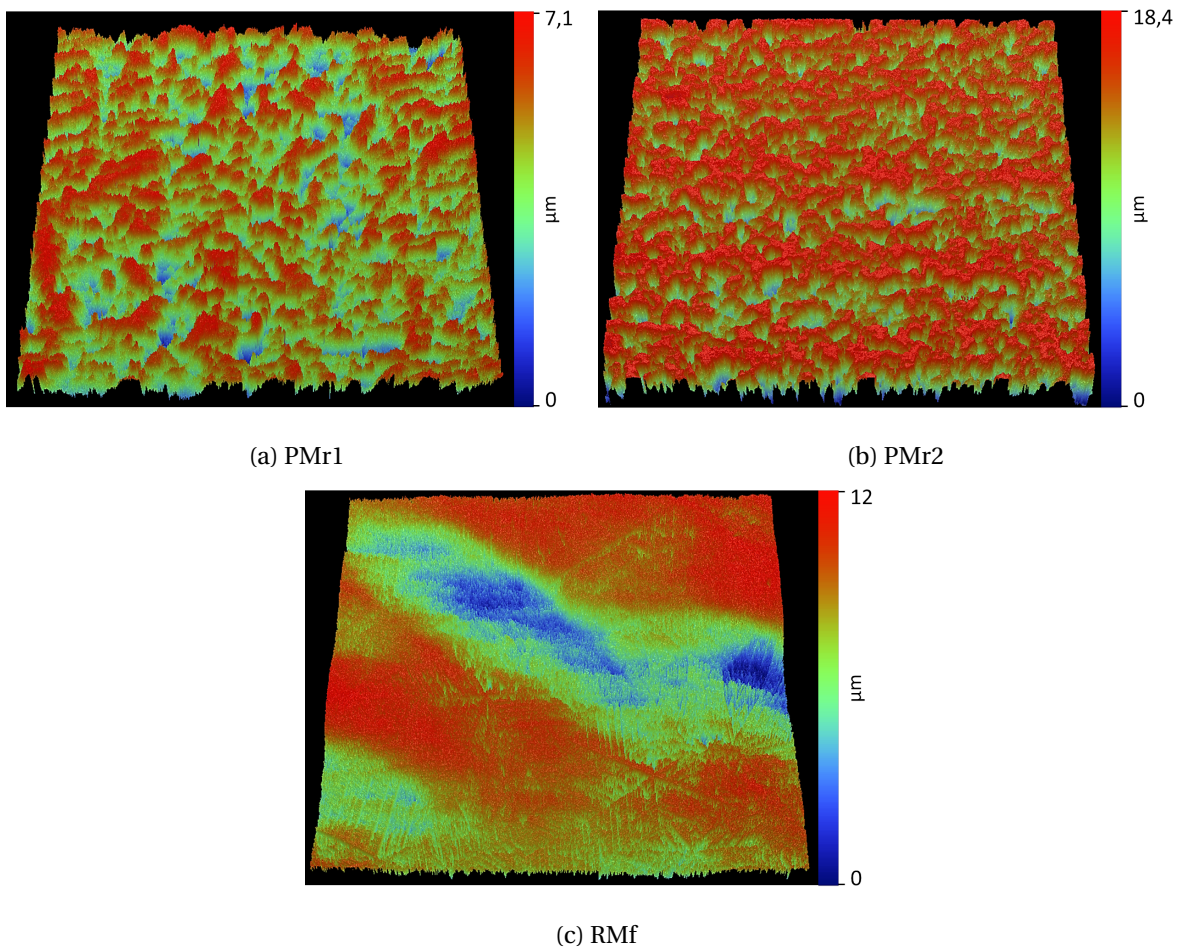


FIGURE 3.6 – Cartographies 3D de la surface des peaux coffrantes métalliques de référence PMr1, PMr2 et RMf.

Le revêtement coffrant RPa1' révèle une surface initialement rugueuse alors que le revêtement RPa1'' présente une surface très rayée sur la figure 3.7b après son application. En parallèle, un effet de bullage est observé sur la référence RPa2 d'après la figure 3.7c qui est amplifié par la fine épaisseur du revêtement. Des phénomènes similaires sont visibles avec les autres revêtements coffrants en polymère où des marquages résiduels dus aux passages successifs des pinceaux sont observés. La surface de la référence RPa1 affichée sur la figure 3.8a montre une grande amplitude de rugosité de plus de 50 µm provoquée par les passages successifs du pinceau lors de son application. Le revêtement coffrant RPa2 plus visqueux montre une juxtaposition de gouttelettes lors de son dépôt qui en se durcissant cause une accumulation de matière visible sur la figure 3.8b. L'ensemble de ces observations semblent indiquer que la robustesse des revêtements coffrants en polymère est plus faible.

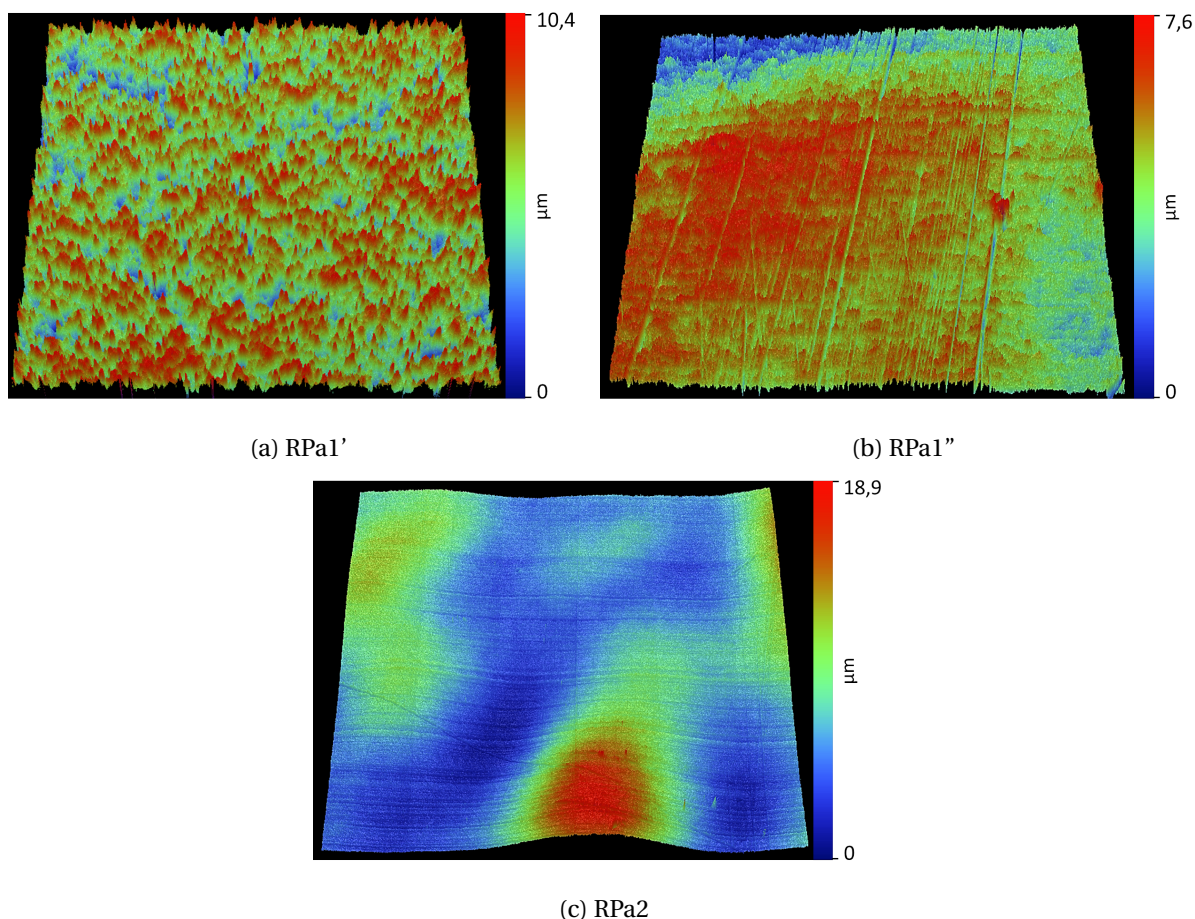


FIGURE 3.7 – Cartographies 3D de la surface des revêtements coffrants polymères auto-adhésifs RPa1', RPa1'' et RPa2.

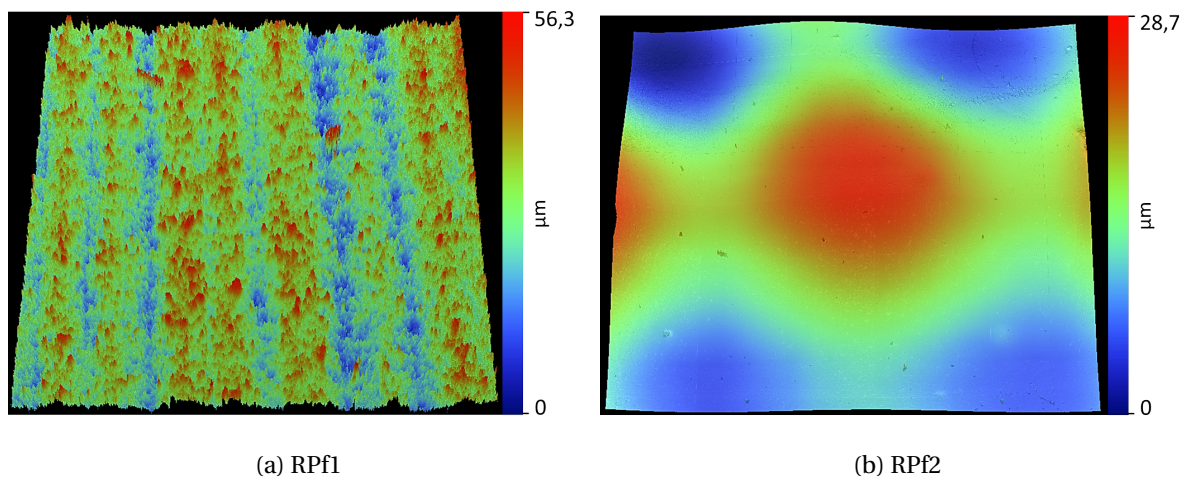


FIGURE 3.8 – Cartographies 3D de la surface des revêtements coffrants polymères fluides RPF1 et RPF2.

Pour la caractérisation de la signature topographique des peaux coffrantes, six paramètres de rugosité sont étudiés dans ce travail de recherche. Les paramètres S_a et S_q sont associés à la capacité de la peau à piéger les particules de ciment à la surface. Le paramètre S_{dr} exprime la vraie surface de contact entre la paroi et le béton et donc l'interface réellement formée. Ensuite, les paramètres V_{vc} et V_{vv} sont en corrélation avec la quantité de particules de ciment piégées dans les aspérités ainsi que les propriétés de rétention des surfaces coffrantes. Enfin, le volume de matière des pics V_{mp} est lié aux propriétés de frottement et d'usure des peaux coffrantes.

Les figures 3.9 et 3.10 représentent respectivement les paramètres d'amplitude S_a , S_q et le paramètre hybride S_{dr} des peaux coffrantes étudiées. Les revêtements coffrants fluides RPF1 et RPF2 montrent des rugosités moyennes arithmétiques et quadratiques similaires très élevées avec des valeurs de S_a supérieures à 6 μm . Cependant, le paramètre S_{dr} du revêtement RPF2 est quasi-nul contrairement à celui de la référence RPF1 où celui-ci est très grand avec une surface développée de plus de 70 %. Par conséquent, malgré une rugosité élevée, la surface du revêtement coffrant RPF2 est plutôt homogène et lisse alors que celle de la peau RPF1 est très rugueuse et chaotique et serait donc très sensible à l'ancrage mécanique. Ensuite, la formation des plateaux en surface de la peau de référence PMr2 crée une rugosité et une surface développée élevées avec 3,3 μm et 11,9 % respectivement. Le revêtement polymère RPa1' présente la surface la plus rugueuse des revêtements auto-adhésifs s'élevant à 2,5 μm provoquant une surface développée de presque 10 %. Malgré une surface accidentée, la référence RPa1'' montre une surface plutôt homogène et peu rugueuse avec des valeurs de S_a et S_{dr} très faibles. Enfin, les peaux coffrantes PMr1, RMf et RPa2 montrent des rugosités entre 0,9 et 2,2 μm mais des surfaces développées très proches et faibles, inférieures à 5 %.

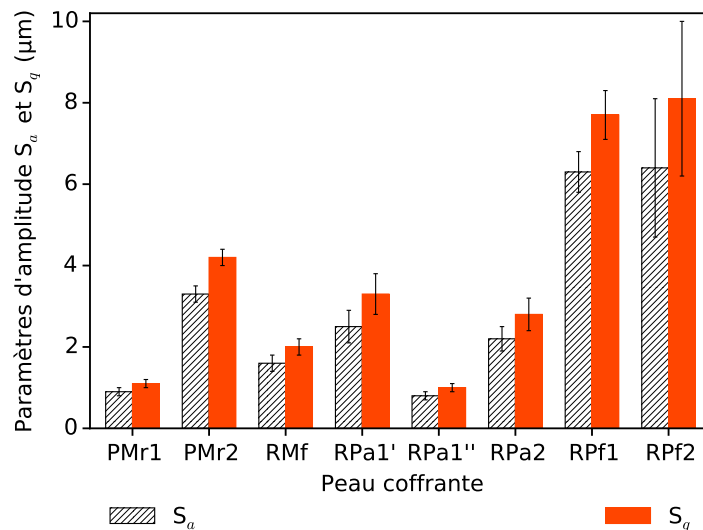


FIGURE 3.9 – Paramètres d'amplitude S_a et S_q des surfaces des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.1).

Les paramètres de volume de vide à coeur V_{vc} et dans les vallées V_{vv} des peaux coffrantes sont affichés sur la figure 3.11. Le vide contenu à coeur est largement supérieur à celui compris dans les vallées avec en moyenne un facteur 10. Ces deux paramètres suivent la même tendance que le paramètre de rugosité moyenne S_a . Les revêtements coffrants RPF1 et RPF2 contiennent en surface des volumes très importants et seraient par conséquent plus exposés à un enchevêtrement du béton contrairement au revêtement polymère auto-adhésif RPa1'' qui contient huit fois moins de volume en surface. De plus, la référence de peau RPF1 possède un volume de matière V_{mp} en surface le plus élevé, donc une perte de matière potentiellement plus grande pendant l'usure de la surface lors des coulages. Contrairement au volume de vide, le volume de matière en extrême surface varie généralement peu entre les différentes peaux coffrantes.

L'état topographique et les paramètres de rugosité ont été caractérisés afin d'estimer l'ancrage mécanique du béton dans les aspérités des peaux coffrantes. En plus de ce phénomène mécanique, l'adhérence du béton par des effets électrochimiques et capillaires est également possible. De ce fait, les signatures physico-chimiques des surfaces coffrantes sont étudiées dans le paragraphe suivant.

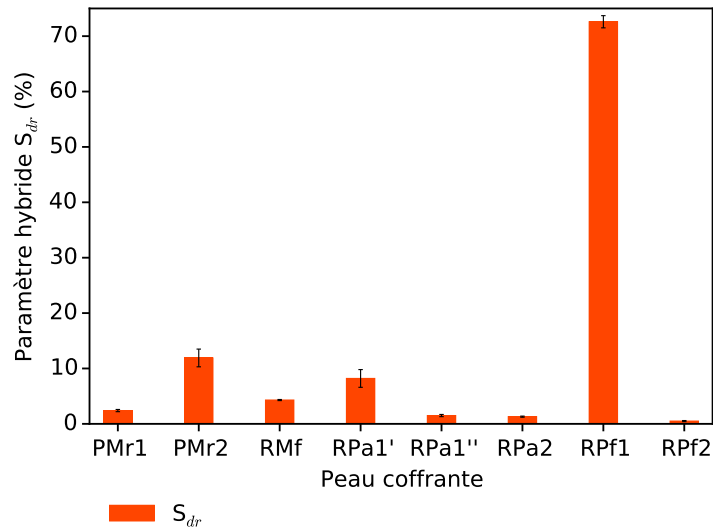


FIGURE 3.10 – Paramètre hybride S_{dr} des surfaces des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.2).

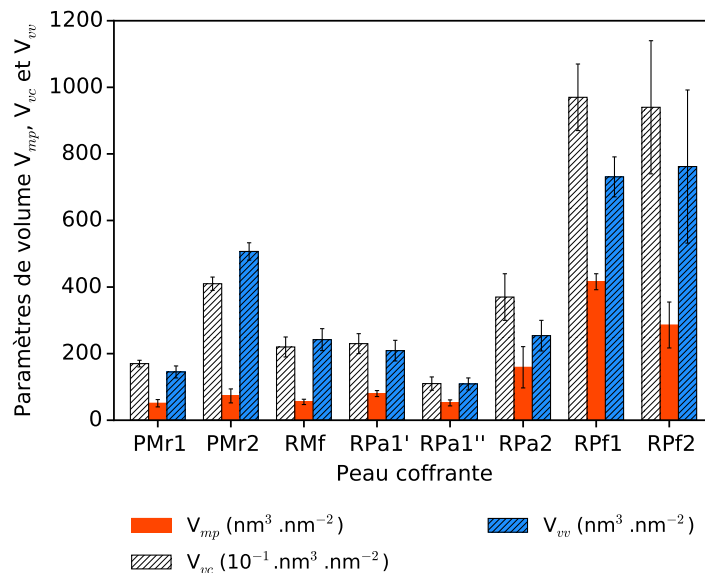


FIGURE 3.11 – Paramètres fonctionnels de volume V_{mp} , V_{vc} et V_{vv} des surfaces des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans les tableaux A.3, A.4 et A.5).

3.4 Signatures physico-chimiques des peaux coffrantes

Cette partie est consacrée à la caractérisation des signatures physico-chimiques des peaux coffrantes. Dans cette étude, cette signature est liée à la composition chimique et aux propriétés de mouillage des surfaces coffrantes. Ces deux caractéristiques sont étudiées individuellement dans les paragraphes suivants.

3.4.1 Caractérisation de la composition chimique surfacique des peaux coffrantes

Il a été montré dans le paragraphe 1.4.4.1 que l'interface béton/coffrage était en partie gouvernée par la composition chimique des parois coffrantes due aux interactions chimiques et électro-physiques engendrées par le béton. Par conséquent, la chimie des couches fonctionnelles des peaux coffrantes est identifiée et les analyses sont divisées par nature de peaux, métalliques et polymères.

3.4.1.1 Peaux coffrantes métalliques

Les surfaces des parois métalliques PMr1, PMr2 et RMf sont analysées localement par DRX et EDS selon les procédures décrites au chapitre 2.3.2.1.

La figure 3.12 présente le diagramme DRX de la peau coffrante PMr1. Quatre structures cristallines sont déterminées. Le premier composé détecté est le fer α qui d'après la fiche [joint committee on powder diffraction standards \(JCPDS\) 87-0721](#) cristallise dans une structure cubique centré. En réalité, il s'agit de ferrite qui est une solution solide de carbone en très faible proportion dans la phase α du fer. Ensuite, le carbure de fer Fe_3C qui représente la cémentite sous forme orthorhombique selon la fiche [JCPDS 85-0871](#). Sa légère intensité de diffraction aux angles $2\theta_B = 48,55^\circ$ suggère une proportion très faible dans le métal. Finalement, deux oxydes de fer sont détectés dans la peau PMr1 qui sont, l'oxyde de fer (III) αFe_2O_3 de structure rhomboédrique (hématite) et l'oxyde de fer (II, III) Fe_3O_4 sous forme cubique faces centrées (magnétite) suivant les fiches [JCPDS 33-0664](#) et [87-2334](#) respectivement.

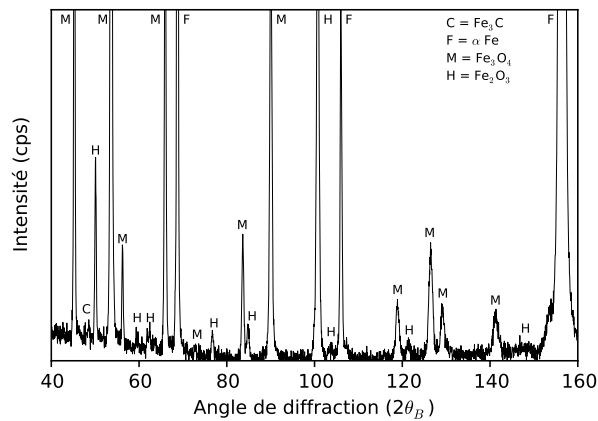


FIGURE 3.12 – Diagramme DRX de la peau coffrante PMr1.

En considérant que la phase α du fer et la cémentite Fe_3C composent le substrat métallique de la peau PMr1, les deux oxydes de fer détectés par DRX peuvent possiblement former les deux couches observées à la surface de la peau par passivation de l'acier sous-jacent [3, 4]. Pour vérifier cette hypothèse, trois pointés EDS par zone sont effectués aléatoirement dans le substrat métallique, la couche interne et la couche externe. La figure 3.13 présente les spectres EDS en fonction de la région analysée. Sur le spectre du substrat métallique, le pic d'émission de la raie K_α de l'oxygène à 0,52 keV est faiblement visible contrairement aux pics du fer qui sont plus intenses par rapport à ceux des deux couches. Ce premier résultat suggère un substrat de la paroi fortement à base de fer. De plus, dans la couche externe, l'intensité du pic d'oxygène est la plus élevée suggérant une couche plus oxydée. Les proportions massiques de fer (Fe) et d'oxygène (O) sont mesurées et sont résumées dans le tableau 3.2.

	$\%m_{O}^{EDS}$	$\%m_{Fe}^{EDS}$
Couche interne	$31,9 \pm 0,2$	$67,1 \pm 0,3$
Couche externe	$34,5 \pm 0,9$	$63,6 \pm 1,2$
Substrat métallique	$0,5 \pm 0,0$	$98 \pm 0,2$

TABLEAU 3.2 – Pourcentages massiques en fer et oxygène déterminés par EDS pour la peau coffrante PMr1.

Même si la quantification massique par EDS reste imprécise, on constate cependant que les proportions en oxygène sont inégales dans les deux couches impliquant par conséquent deux oxydes de fer différents. Pour déterminer la nature des oxydes dans les deux couches, les pourcentages massiques théoriques en oxygène et en fer des oxydes de fer sont calculés. Pour cela, les masses molaires

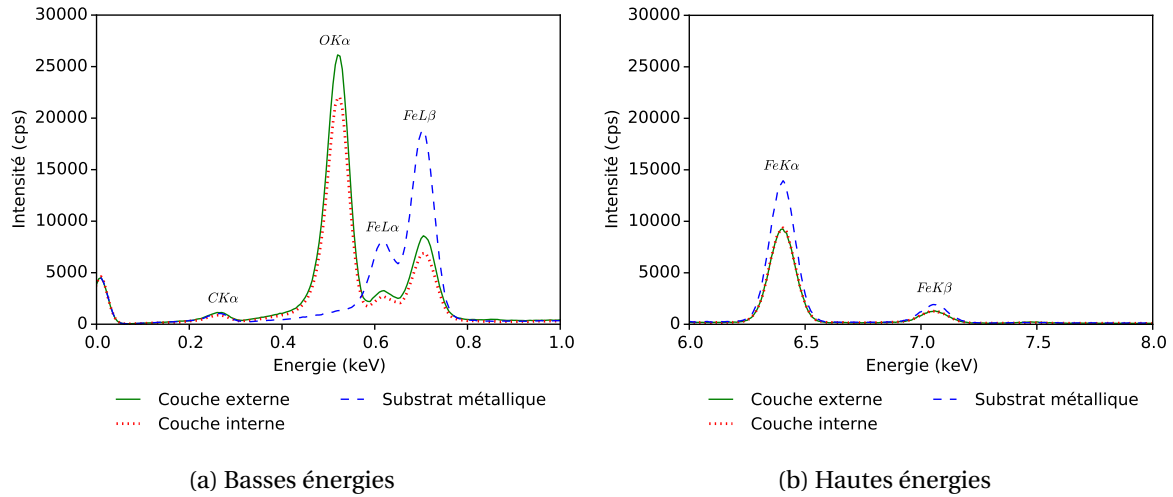


FIGURE 3.13 – Spectres EDS de la peau coffrante PMr1.

des oxydes de fer sont premièrement calculées d’après la masse molaire des éléments qui les composent ($M_{Fe}=55,8 \text{ g.mol}^{-1}$, $M_O=16,0 \text{ g.mol}^{-1}$) :

$$M_{Fe_2O_3} = 2.M_{Fe} + 3.M_O = 159,6 \text{ g.mol}^{-1} \quad (3.1)$$

$$M_{Fe_3O_4} = 3.M_{Fe} + 4.M_O = 231,4 \text{ g.mol}^{-1} \quad (3.2)$$

Ensuite, en connaissant les masses molaires des oxydes de fer, on peut remonter aux pourcentages massiques théoriques en oxygène et en fer suivant le calcul :

$$\%m_{O_{(Fe_2O_3)}}^{Th} = \frac{3.M_O}{M_{Fe_2O_3}} \cdot 100 = \frac{3.16,0}{159,6} \cdot 100 = 30,1\% \quad (3.3)$$

Les pourcentages massiques théoriques en oxygène et en fer de l’hématite et de la magnétite sont résumés dans le tableau 3.3.

	$\%m_{O}^{Th}$	$\%m_{Fe}^{Th}$
Fe_3O_4	27,7	72,3
Fe_2O_3	30,1	69,9

TABEAU 3.3 – Pourcentages massiques théoriques en fer et oxygène pour le Fe_2O_3 et le Fe_3O_4 .

Les taux massiques d’oxygène mesurés par EDS (31,9 et 34,5 %) sont proches des taux massiques théoriques dans les oxydes de fer αFe_2O_3 et Fe_3O_4 calculés à 30,1 et 27,7 % respectivement. D’après les résultats EDS, la couche externe est plus oxydée que la couche interne donc elle serait composée majoritairement de Fe_2O_3 . Par conséquent, c’est l’oxyde de fer Fe_3O_4 qui formerait la couche interne. Cependant, les pourcentages massiques théoriques en oxygène sont plus faibles que ceux déterminés par EDS. Afin de confirmer la présence des deux oxydes de fer à la surface de la peau coffrante PMr1, les ratios théoriques et expérimentaux d’oxygène des oxydes de fer sont calculés :

$$\frac{\%m_{O_{(Fe_3O_4)}}^{EDS}}{\%m_{O_{(Fe_2O_3)}}^{EDS}} = \frac{31,9}{34,5} = 0,92 \quad (3.4)$$

$$\frac{\%m_{O_{(Fe_3O_4)}}^{Th}}{\%m_{O_{(Fe_2O_3)}}^{Th}} = \frac{27,7}{30,1} = 0,92 \quad (3.5)$$

Les deux ratios calculés sont identiques donc la présence des composés αFe_2O_3 et Fe_3O_4 dans les couches superficielles de la peau coffrante PMr1 est confirmée. L’oxyde αFe_2O_3 possède de bonnes

propriétés lubrifiantes et l'oxyde Fe_3O_4 plus dur a une meilleure résistance à l'usure [5–7]. Par conséquent, la présence de ces deux oxydes de fer à la surface de la peau PMr1 justifierait son bon état fonctionnel sur les sites de construction comme paroi de coffrage.

Après avoir analysé la composition chimique surfacique de la peau coffrante PMr1 par EDS et DRX, la microstructure du substrat métallique est étudiée. Pour cela, la peau PMr1 est attaquée chimiquement avec une solution d'acide picrique à 1,2 % puis observée au microscope optique. Les différentes phases de l'acier vont refléter différemment la lumière blanche et donc créer un contraste de couleur. D'après la figure 3.14, la microstructure ferrito-perlitique du métal est mise en évidence [8]. Les grains blancs représentent de la ferrite seule qui est une solution solide de fer et de carbone. Les grains blancs et noirs sont significatifs de perlite. Ils sont composés de ferrite (zones blanches) et de cémentite Fe_3C en lamelles alternées (zones noires).

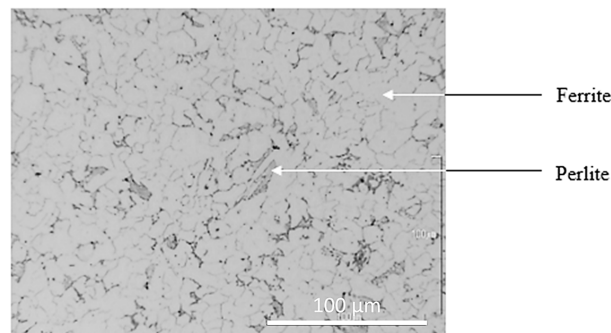


FIGURE 3.14 – Microstructure du substrat métallique de la peau coffrante PMr1.

Une fois la composition chimique de peau coffrante PMr1 déterminée, la surface de la paroi PMr2 est analysée. La figure 3.15 représente le diagramme DRX de la peau métallique PMr2. Les trois principaux pics de diffraction $2\theta_B$ du fer α sont présents, ce qui confirme la nature ferritique de l'acier qui compose la peau PMr2. Aucune couche n'avait été observée par microscopie, cependant des pics de diffraction d'oxydes de fer αFe_2O_3 et Fe_3O_4 sont détectés. Leurs faibles intensités pourraient suggérer des traces partielles à la surface de la peau PMr2.

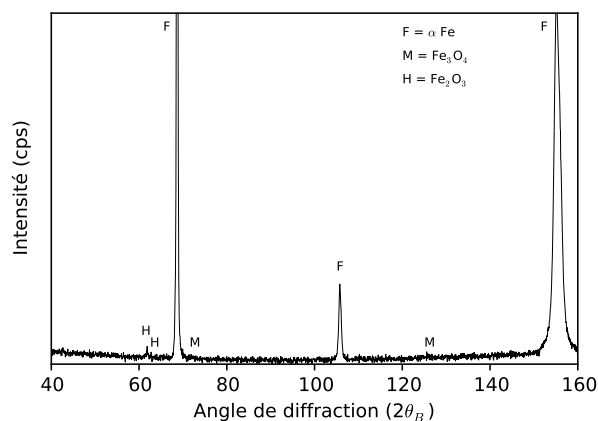


FIGURE 3.15 – Diagramme DRX de la peau coffrante de référence PMr2.

Des analyses complémentaires effectuées au MEB permettent d'obtenir des cartographies en éléments chimiques de la peau coffrante PMr2. Les régions colorées observées sur les cartographies de la figure 3.16 montrent la présence respective de fer, de chrome et d'oxygène sur la surface de la peau PMr2. L'oxygène en surface pourrait justifier les pics de diffraction des oxydes de fer. Également, un film d'oxyde de chrome pourrait être formé en surface mais étant de l'ordre du nanomètre, sa détection est difficile [2].

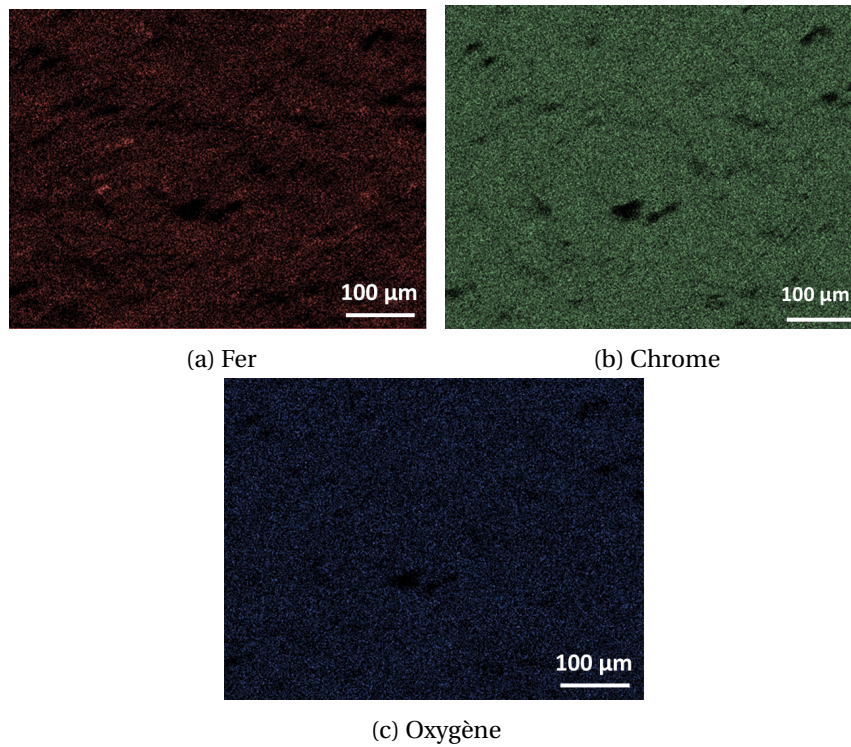


FIGURE 3.16 – Cartographies EDS de la surface coffrante PMr2.

Par la suite, la surface de la peau coffrante RMf est caractérisée une première fois par EDS et les pourcentages massiques des éléments chimiques sont synthétisés dans le tableau 3.4. Ces valeurs massiques ne sont que des estimations, cependant des tendances sont observées. La couche fonctionnelle de la peau RMf semble être riche en zinc et en aluminium. La présence de phosphore et de fluor pourrait provenir de résidus des bains de galvanisation. En effet, l’ajout de phosphore permet augmenter la capacité de trempage du substrat métallique.

Éléments chimiques	Pourcentages massiques (%)
Zn	41
Al	29
O	17
P	4
F	3,5

TABEAU 3.4 – Estimation massique EDS des éléments chimiques à la surface de la peau coffrante RMf.

Le diagramme DRX de la peau coffrante RMf présenté sur la figure 3.17 montre majoritairement des pics de diffraction du zinc et de l’aluminium. L’identification exacte des composés du revêtement métallique est difficile en raison d’un bruit très élevé dû à une trop grande porosité en surface qui altère la continuité des cristaux. Cependant, la diffraction du zinc et de l’aluminium confirme les analyses EDS.

Les analyses DRX et EDS réalisées dans cette partie ont permis de déterminer la composition chimique en surface des trois peaux coffrantes métalliques PMr1, PMr2 et RMf. Par la suite, la composition chimique des revêtements coffrantes polymères est caractérisée.

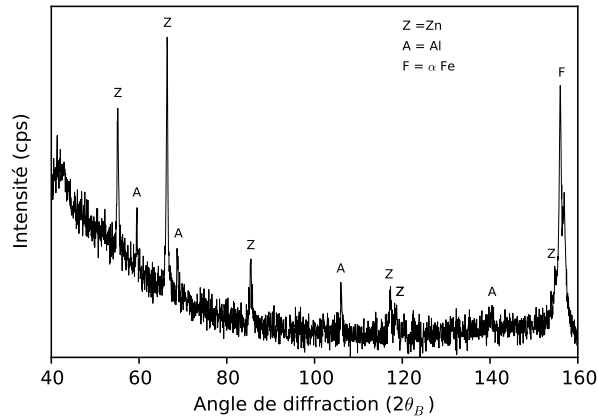


FIGURE 3.17 – Diagramme DRX du revêtement métallique coffrant RMf.

3.4.1.2 Peaux coffrantes polymères

Pour les revêtements coffrants à base de polymère, seulement la référence RPa1' est analysée chimiquement. Pour déterminer la composition chimique de la couche fonctionnelle de ce revêtement coffrant, les analyses ATG, DSC et FTIR ont été effectuées par le laboratoire des Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM-UMR CNRS 8006) du réseau Arts et Métiers ParisTech.

La figure 3.18a présente le thermogramme de la couche fonctionnelle du revêtement coffrant RPa1'. De 380 à 500 °C, la courbe montre une perte de 88 % de la masse significative de la dégradation du polymère polypropylène (PP) [9]. Après chauffage, une poudre noire est observée dans le creuset suggérant la présence d'une charge minérale dans la couche fonctionnelle.

La courbe DSC de la figure 3.18b montre un pic endothermique à 164 °C lors du chauffage correspondant à la fusion du polymère. La cristallisation de celui-ci est observée au refroidissement avec un pic exothermique. La température de fusion déterminée par l'analyse DSC est similaire à celle du polypropylène [9, 10] confirmant l'hypothèse émise après les analyses ATG. D'après l'aire sous la courbe du pic endothermique, l'enthalpie de fusion ΔH_f calculée pour le polymère est égale à 70 J.g⁻¹. En considérant, l'enthalpie de fusion du PP 100 % cristallin à 198 J.g⁻¹ [10], le PP de la couche fonctionnelle du RPa1' est cristallisé à 35 % d'après l'équation 2.4. La présence de ramifications greffées le long de la chaîne polymère provoquerait le pic endothermique observé à 122 °C avant la fusion du PP.

Sur le spectre d'absorbance de la figure 3.18c, les bandes infrarouges intenses proches de 3000 cm⁻¹ et celles comprises dans la gamme 1500-650 cm⁻¹ sont spécifiques du polypropylène [11]. Les pics d'absorption additionnels compris entre 1750 et 1550 cm⁻¹ pourraient être dus à certains groupes anhydrides (-C=O) [10-13]. Cependant, il est difficile de déterminer exactement la nature des anhydrides greffés au polymère PP en raison du décalage des pics par rapport aux anhydrides purs. La présence de ces fonctions chimiques justifie le pic endothermique détecté à 122 °C lors des analyses DSC. Le greffage d'anhydride est généralement employé pour améliorer la liaison entre le polymère et la charge [13].

Pour finir, la poudre noire résiduelle récupérée après la dégradation du polymère lors de la caractérisation ATG est analysée par spectroscopie en transmission. La figure 3.18d montre sur le spectre des bandes infrarouge à 3470 cm⁻¹ attribués aux liaisons -OH et à 2083 et 1641 cm⁻¹ attribués aux liaisons H-O-H [14]. Les bandes à 1080 et 900 cm⁻¹ pourraient respectivement correspondre à des liaisons Al-O-H et Al-O [15] de particules de boehmite AlOOH, un polymorphe de l'alumine Al₂O₃. La libération d'eau à 480 °C par la boehmite lors du chauffage du polymère [16] n'est pas visible sur le thermogramme ATG de la figure 3.18a car celle-ci est masqué par la dégradation du PP. Par ailleurs, ce processus peut être responsable du décalage de la fin de dégradation du PP à 500 °C, généralement observée vers 450 °C [9].

Pour résumer les analyses du revêtement coffrant RPa1', la couche fonctionnelle présente en proche

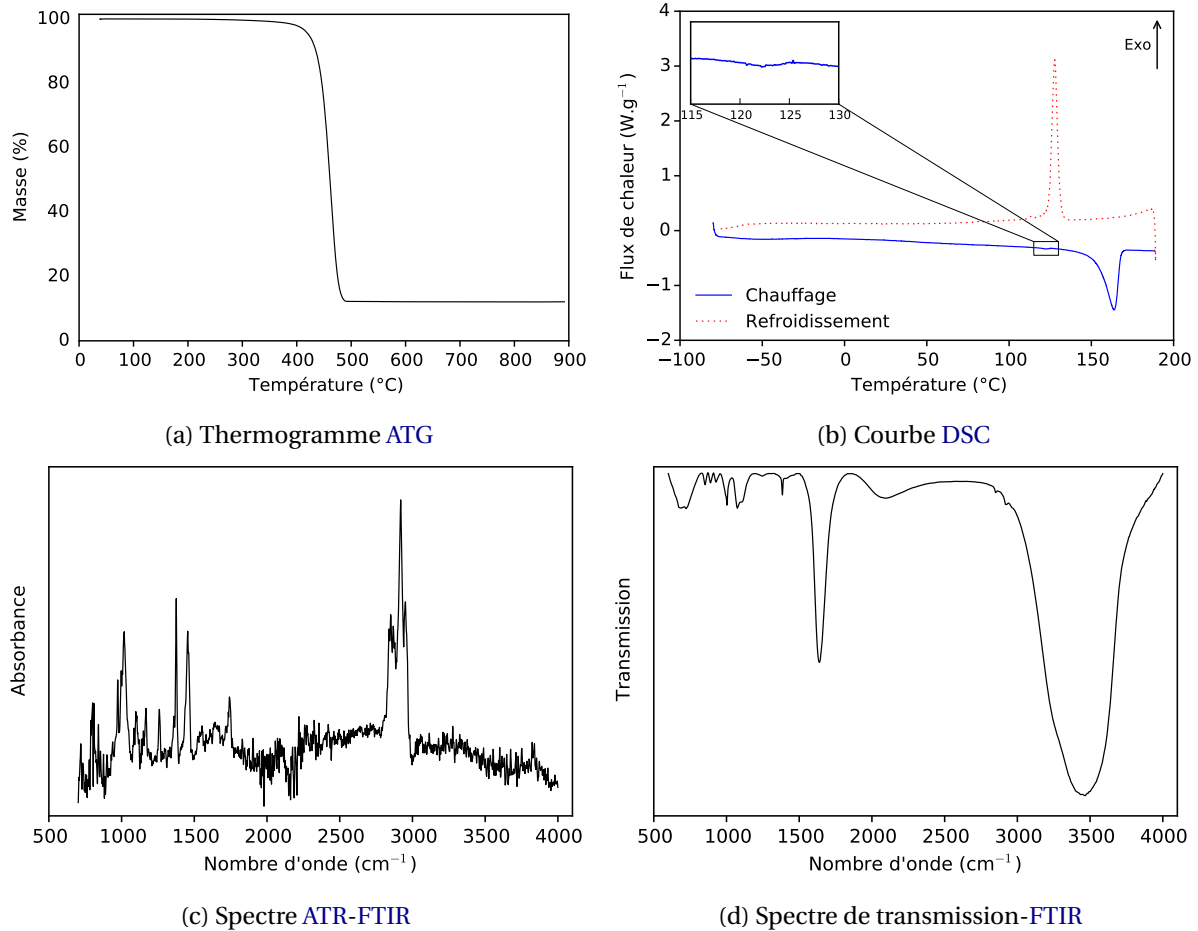


FIGURE 3.18 – Analyses chimiques de la couche fonctionnelle du revêtement coffrant RPa1’.

surface est composée d’une matrice polypropylène potentiellement greffée avec des anhydres et d’environ 12% de charge dérivée de l’alumine.

Le polypropylène possède une grande inertie chimique avec une faible absorption à l’eau [17] mais ses propriétés mécaniques et sa résistance aux ultraviolets [17, 18] sont peu élevées. Le greffage de fonctions anhydres et l’ajout d’une charge alumine améliore la stabilité du PP. En effet, l’alumine est connue pour être une excellente charge absorbuse d’ultraviolets mais également elle permet d’améliorer la résistance aux frottements et à la compression des polymères [19]. De ce fait, le revêtement coffrant RPa1’ semble être adéquate pour une utilisation sur site.

Compte tenu de la similitude entre les deux modèles de revêtement coffrant RPa1’ et RPa1”, la composition chimique déterminée pour le RPa1’ est considérée similaire pour le RPa1” avec une base de polypropylène.

Dans ce travail de recherche, les revêtements coffrants RPa2, RPa1 et RPa2 sont choisis en fonction de leur composition et nature chimique. Par conséquent, aucune caractérisation chimique n’est faite sur ces références. Cependant, nous savons que le revêtement coffrant RPa2 est composé majoritairement de fluor. Concernant les références RPa1 et RPa2, leur couche fonctionnelle contient principalement des fonctions siliconées avec une proportion supérieure dans celle du revêtement coffrant RPa2.

Pour compléter la caractérisation des signatures physico-chimiques des peaux coffrantes, des mesures de mouillabilité sont effectuées dans la section suivante afin de déterminer les énergies libres des surfaces coffrantes.

3.4.2 Etude de la mouillabilité de surface des peaux coffrantes

L'adhérence du béton contre une peau coffrante est potentiellement provoquée par des interactions capillaires induites par la formation d'un film d'eau à l'interface béton-coffrage. Le développement de ce film d'eau repose principalement sur les capacités de mouillage des surfaces coffrantes.

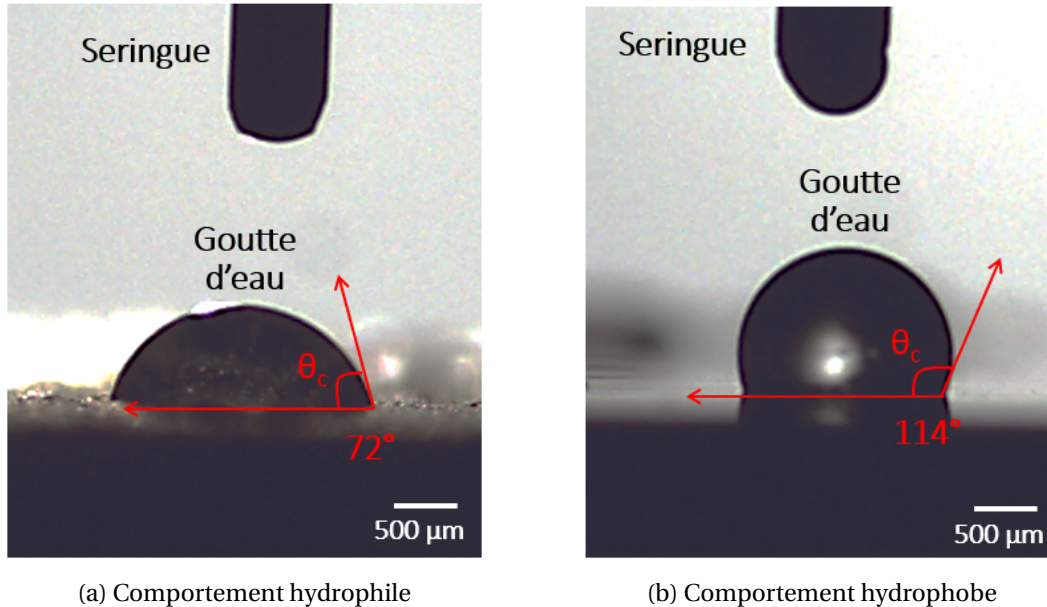


FIGURE 3.19 – Goutte d'eau déposée sur la surface de la peau coffrante (a) RPa1' et (b) RPF2.

L'affinité de l'eau sur les peaux coffrantes est premièrement étudiée à travers l'angle de contact que forme une goutte d'eau sur la surface des peaux. La figure 3.19a présente une goutte d'eau déposée sur le revêtement coffrant RPa1'. La forme de la goutte et l'angle de contact θ_c mesuré proche de 70° suggèrent une surface à tendance hydrophile. Au contraire, sur la figure 3.19b l'angle de contact supérieur à 110° sur le RPF2 montre un comportement opposé avec une surface coffrante aux propriétés hydrophobes. Les angles de contact des gouttes d'eau sur la surfaces des parois coffrantes étudiées sont résumés sur la figure 3.20. Les revêtements polymères montrent généralement des angles de contact avec l'eau plus élevés en raison de leurs chaînes carbonées et leurs fonctions éthylènes, fluors ou silicones qui sont hydrophobes [20]. Cependant, la référence RPF1 affiche un comportement hydrophile pour des fonctions chimiques à base de silicone. Ce résultat serait dû à sa rugosité plus élevée et sa topographie très chaotique. Par ailleurs, l'observation des revêtements coffrants RPa1' et RPa1' montre que l'angle de l'eau passe de 110° pour une rugosité S_a de $0,8 \mu\text{m}$ à 70° lorsque la rugosité augmente à $2,5 \mu\text{m}$ ce qui suggère un modèle de Wenzel [21] pour la référence RPa1. De plus, les valeurs du paramètre S_{dr} et du volume de vide à coeur V_{vc} plus élevées suggère une imprégnation de l'eau dans les aspérités du revêtement RPa1' plus facile. Concernant les métaux de référence PMr1 et PMr2, les angles de contact de l'eau semblent être surestimés, peut-être à cause de la présence d'impuretés ancrées à leur surface. Le revêtement coffrant RMf présente un comportement mixte avec un angle de contact proche de 90° . Les faibles angles de contact de l'eau mesurés sur les parois coffrantes laissent penser que la couche limite du béton s'étalerait plus facilement en surface pour pénétrer dans les aspérités.

Dans le but de remonter aux énergies libres de surface des peaux coffrantes, le glycérol est utilisé comme second liquide de référence et les angles de contact glycérol-surface coffrante sont affichés sur la figure 3.20. En s'appuyant sur l'équation 2.8 d'Owens-Wendt, et d'après les courbes de la figure 3.21, les énergies libres superficielles des parois coffrantes sont déterminées par lecture graphique. Le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine des pentes représentent respectivement les composantes polaires γ_{SV}^p et dispersives γ_{SV}^d , des énergies de surface. Les deux composantes de polarité ainsi que les énergies libres sont regroupées sur la figure 3.22.

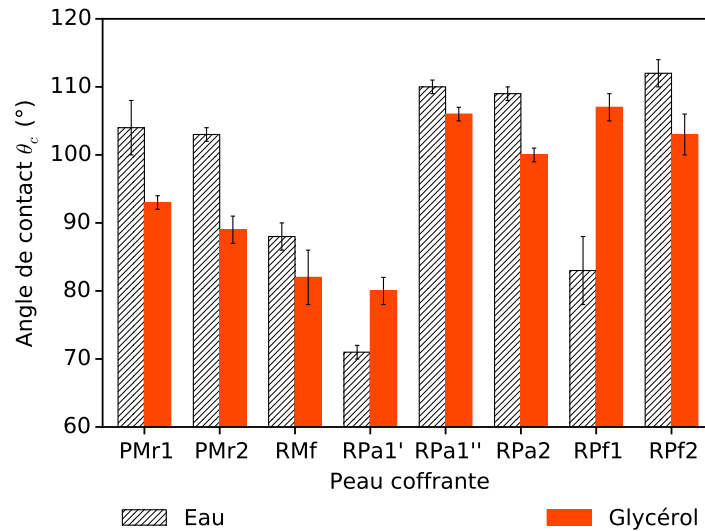


FIGURE 3.20 – Angles de contact θ_c des liquides de référence sur les peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.6).

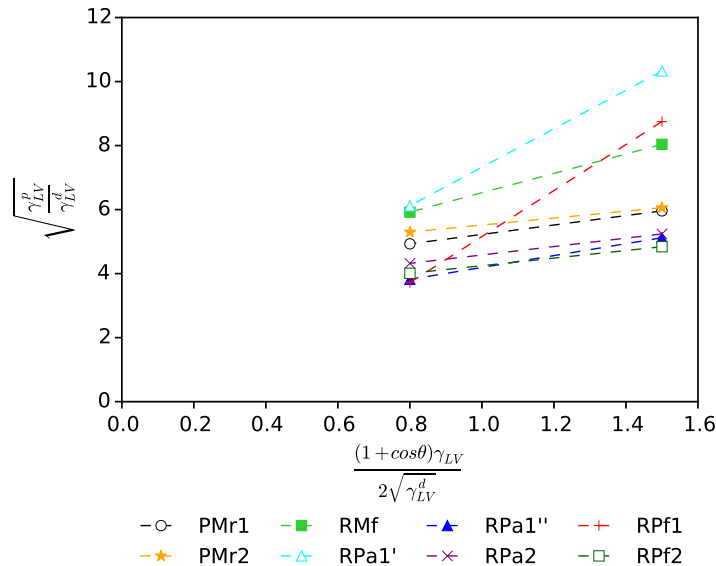


FIGURE 3.21 – Courbes d'Owens-Wendt appliquées à l'eau et au glycérol pour les peaux coffrantes étudiées.

L'énergie de surface libre d'un solide est reliée à la capacité d'attraction de molécules et par conséquent à la formation de liaisons physico-chimiques par unité de surface. De ce fait, les peaux coffrantes possédant les plus faibles énergies libres de surface auront tendance à peu interagir chimiquement avec le béton. Les trois revêtements coffrants RPa1'', RPF2 et RPa2 ont une énergie libre γ_{sv} inférieure ou égale à 12 mN.m^{-1} . Ces faibles énergies sont notamment expliquées par la composition des polymères qui sont généralement inertes chimiquement. Cependant, pour les références polymères RPa1' et RPF1, les énergies calculées sont les plus élevées. En effet, une forte rugosité de surface influence également le comportement de l'eau sur les peaux coffrantes. L'imprégnation du liquide dans les aspérités conduit par conséquent à une augmentation de l'énergie libre.

En négligeant l'aspect d'ancrage mécanique et en supposant que l'adhésion des liquides est seulement due aux forces de Van der Waals, il est possible de calculer le travail d'adhésion d'un liquide sur une surface. Ce paramètre peut être corrélé à l'effort par unité de surface qu'il faut fournir pour séparer le liquide de la surface du solide. Cependant, cette valeur ne caractérise par une interface

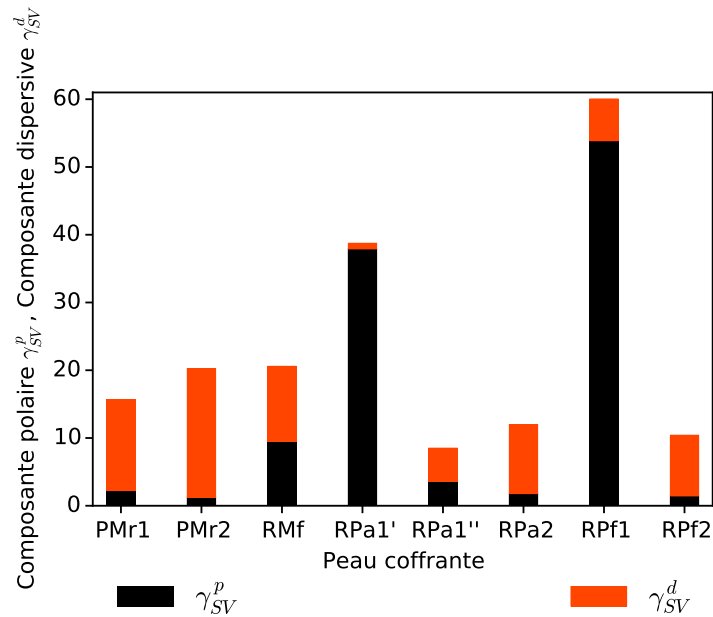


FIGURE 3.22 – Sommes des composantes polaires γ_{SV}^p et dispersives γ_{SV}^d des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.7).

solide/solide mais celle-ci peut donner des informations sur la capacité du liquide à adhérer à la surface du solide [22]. Par conséquent, nous pouvons estimer la tendance à l'adhésion du béton frais sur les différentes peaux coffrantes à travers le travail d'adhésion de l'eau. L'équation suivante donne le travail d'adhésion W_a en fonction des composantes polaires γ_{SV}^p et dispersives γ_{SV}^d des énergies de surfaces des peaux coffrantes :

$$W_a = 2\sqrt{\gamma_{SV}^d \cdot \gamma_{LV}^d} + 2\sqrt{\gamma_{SV}^p \cdot \gamma_{LV}^p} \quad (3.6)$$

La figure 3.23 résume les travaux d'adhésion des deux liquides de référence sur la surface des peaux coffrantes. Les travaux calculés suivent des tendances similaires à celles des énergies libres superficielles avec des valeurs minimales pour les trois revêtements coffrants RPa1'', RPF2 et RPa2 ($W_a \leq 50 \text{ mJ.m}^{-2}$), ce qui confirme leur plus grande inertie physico-chimique. La référence polymère RPF1 présente une valeur de travail maximale avec 128 mJ.m^{-2} principalement à cause de sa grande rugosité. Au final, les peaux coffrantes métalliques possèdent des travaux d'adhésion intermédiaires.

Dans le but d'évaluer la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes étudiées, leurs signatures topographiques et physico-chimiques ont été caractérisées dans cette première partie. Les revêtements polymères lisses ont généralement montré des surfaces hydrophobes contrairement aux revêtements rugueux qui ont des comportements hydrophiles et par conséquent auront potentiellement de meilleures affinités physico-chimiques avec le béton.

Dans la suite de ce travail de recherche, des essais mécaniques sont réalisés sur la surface des peaux coffrantes afin de déterminer leur signature mécanique.

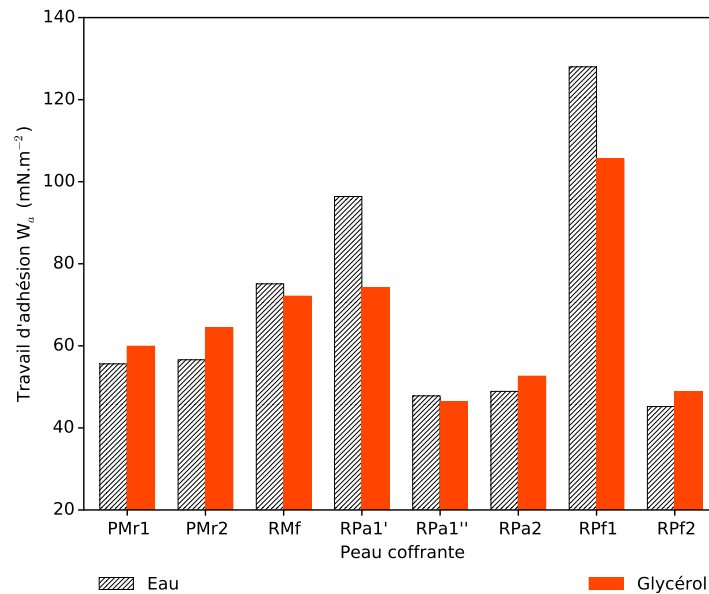


FIGURE 3.23 – Travaux d’adhésion de l’eau et du glycérol W_a sur les peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.8).

3.5 Signatures mécaniques des peaux coffrantes

La résistance des parois coffrantes vis-à-vis des frottements du béton est étroitement liée au comportement mécanique de leur surface. Cette partie s’est donc consacrée à la caractérisation des signatures mécaniques des surfaces coffrantes aux moyens d’essais de nanoindentation instrumentés et de tests de rayage.

3.5.1 Détermination de la dureté surfacique des peaux coffrantes

La dureté de surface est seulement déterminée pour les références PMr1, PMr2 et RPa1’ car des essais tribologiques seront réalisés sur ces peaux coffrantes. Par la suite, celle-ci pourra être corrélées à la robustesse des surfaces coffrantes vis-à-vis de la friction du béton. Les valeurs de dureté sont calculées à partir des courbes de nanoindentation analysées par le modèle d’Oliver et Pharr [23, 24].

Pour la caractérisation mécanique de la peau coffrante PMr1, une seule couche d’oxyde d’épaisseur égale à 11,4 μm est considérée en proche surface. La dureté de cette couche vaut environ 12 ± 2 GPa pour des profondeurs de pénétration inférieures à 1000 nm. Au-delà, une dureté de l’acier H peut être mesurée à $2,0 \pm 0,3$ GPa.

Pour la référence PMr2, la dureté est difficilement mesurable en surface en raison de sa forte porosité et sa topographie accidentée. Dans ces conditions, une valeur de dureté similaire à celle de la peau coffrante PMr1 est pris en compte en raison de leur similitude.

Les essais de nanoindentation instrumentée sur le revêtement RPa1’ permettent de quantifier une dureté de 0,20 GPa pour une profondeur indentée de 1000 nm. Cette valeur est cinq fois supérieure à celle mesurée dans les travaux de Ramirez [25] où la dureté H d’un film de polypropylène pur de 20 μm d’épaisseur est égale à 0,04 GPa. Cette différence peut être causée par la présence d’alumine de dureté proche de 12 GPa [26] qui tend à durcir la couche fonctionnelle du revêtement RPa1’.

A la suite des mesures de nanoindentation, les essais de rayage sont effectués sur l’ensemble des peaux coffrantes.

3.5.2 Caractérisation du rayage des peaux coffrantes

Dans cette partie, les tests de rayage sont réalisés sur les surfaces coffrantes afin de déterminer la résistance au cisaillement interfaciale des couches fonctionnelles. Les modifications soudaines de la force tangentielle ou de la profondeur de la rayure permettent de remonter aux forces normales critiques. Par la suite, différents modèles de dépouillement sont appliqués pour calculer les contraintes de cisaillement interfaciales.

3.5.2.1 Comportement mécanique des peaux coffrantes au rayage

La figure 3.24 montre les résultats du rayage de la peau coffrante PMr1. Des micrographies optiques et interférométriques sont également représentées afin de caractériser le comportement mécanique de la couche fonctionnelle.

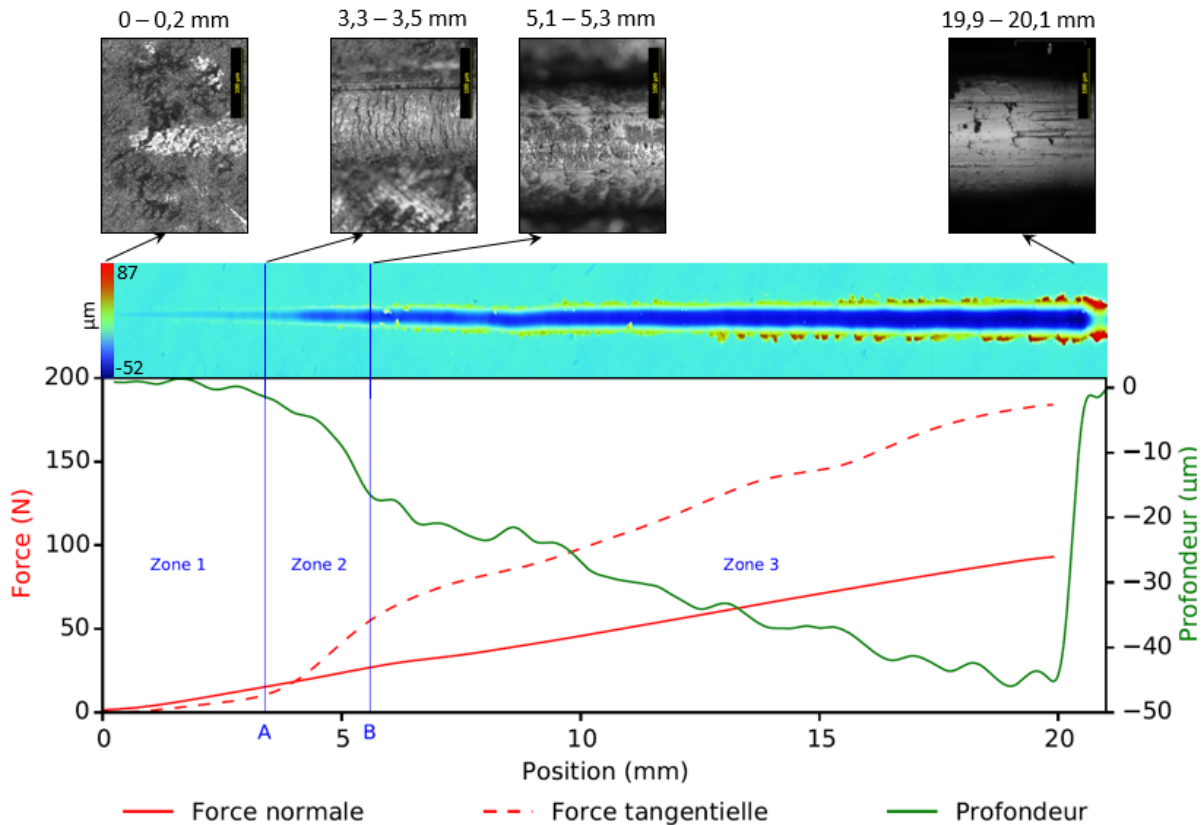


FIGURE 3.24 – Rayage surfacique de la peau coffrante PMr1.

A partir de la figure 3.24, trois régions mécaniques sont identifiées pour la surface coffrante PMr1 suite au rayage. La première zone représente la réponse mécanique de la couche d'oxyde durant le rayage de la surface. Pour une force normale inférieure à 15 N (point A), la couche se déforme mais ne rompt pas. Au-delà de cette force normale critique dans la zone 2, la force tangentielle augmente rapidement en parallèle de la profondeur qui diminue. Ces variations semblent indiquer une rupture partielle de la couche en surface. Par ailleurs, la déformation du substrat dessous engendre la formation de bourrelets de part et d'autre de la rayure. La rupture totale de la couche est observée à partir de 25 N (point B) où la profondeur de la rayure est supérieure à l'épaisseur de la couche. Par la suite, dans la zone 3, l'augmentation de la force normale engendre une pénétration constante de l'indenteur dans le substrat. Au final, la couche est totalement aplatie au fond de la rayure et la déformation de l'acier provoque des bourrelets latéraux plus larges. Les paramètres critiques déterminés suite au rayage de la peau coffrante PMr1 sont résumés dans le tableau 3.5.

Pour la peau coffrante de référence PMr2, le comportement au rayage est plus simple d'après la figure 3.25 et le tableau 3.6. Ce résultat est plutôt logique étant donné qu'il n'y a pas de couche

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	3,4 ± 0,4	15 ± 3	9 ± 2	-1,9
B	5,2 ± 0,4	25 ± 3	58 ± 6	-16

TABLEAU 3.5 – Paramètres critiques de rayage de la peau coffrante PMr1.

en surface. Dans la zone 1, la force tangentielle augmente légèrement mais la profondeur mesurée ne varie pas de façon significatif. Ce comportement pourrait être relié à la forte rugosité de la peau PMr2 ($S_a = 3,3 \mu\text{m}$) qui masque le rayage. En effet, la force normale appliquée initialement permet seulement de normaliser la topographie de la surface ce qui expliquerait une profondeur positive au point A. A partir d'un chargement normal de 20 N, la force de friction augmente plus rapidement et la profondeur de la rayure diminue linéairement suggérant une pénétration dans la peau coffrante. De plus, des bourrelets latéraux significatifs de la déformation de l'acier commencent à apparaître et s'élargissent dans la zone 2. Par ailleurs, cette force normale critique est proche de celle mesurée pour déformer la peau coffrante PMr1, ce qui pourrait confirmer des duretés de surface proches pour les deux références.

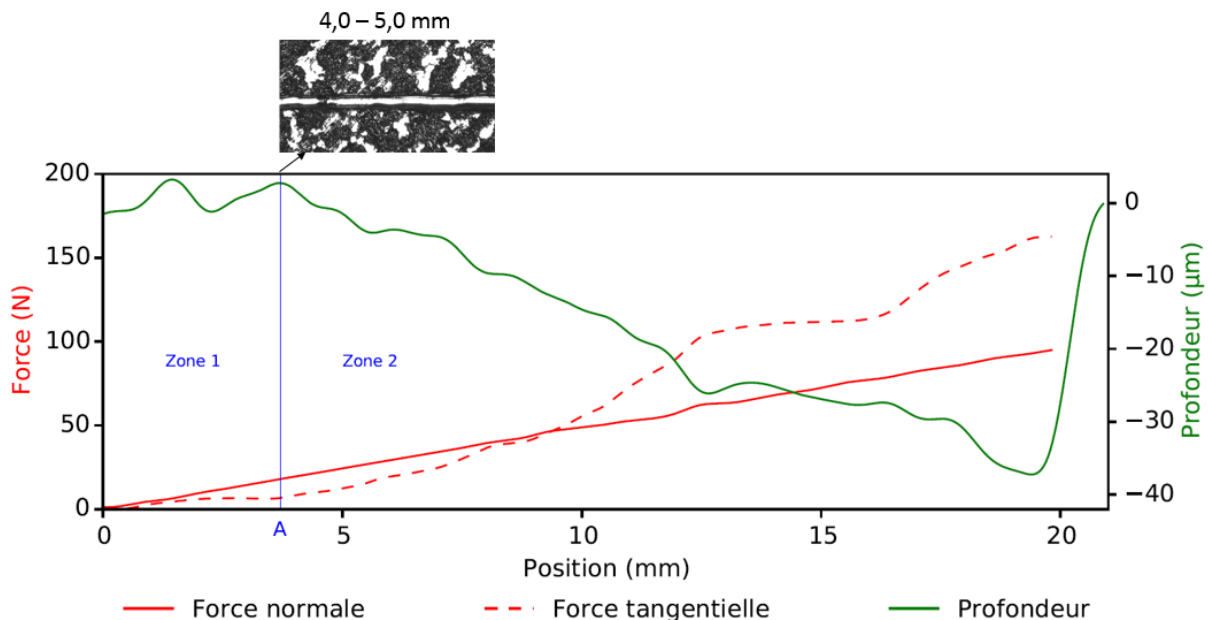


FIGURE 3.25 – Rayage surfacique de la peau coffrante PMr2.

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	4,2 ± 0,3	20 ± 3	10 ± 2	1,9

TABLEAU 3.6 – Paramètres critiques de rayage de la peau coffrante PMr2.

Pour le revêtement coffrant RMf, quatre domaines mécaniques sont identifiés sur la figure 3.26 et les paramètres critiques associés à ces différentes régions sont résumés dans le tableau 3.7. En dessous d'une force normale de 7 N symbolisée par le point A, la force de friction et la profondeur mesurées varient très peu dans la zone 1. Les aspérités de surface liées au **fleurage** semblent limiter le contact de l'indenteur sur le revêtement RMf empêchant sa pénétration dans la couche en proche surface. Au-delà de ce chargement critique, la zone 2 montre une légère augmentation de la friction en parallèle de la diminution progressive de la profondeur jusqu'à 9 µm. A partir du point B, ces deux paramètres varient brusquement tout au long de la zone 3 et la profondeur de la rayure atteint plus de 20 µm, soit l'épaisseur de la couche fonctionnelle. Par ailleurs, la largeur de la rayure augmente grandement de la zone 2 à la zone 3 d'après la micrographie associée à la figure 3.26. Ces deux

comportements semblent indiquer une déformation préalable de la couche dans la zone 2 puis une délamination de celle-ci dans la zone 3 avec un retrait total pour une force normale de 26 N. Au final, les variations linéaires de la force de friction et de la profondeur de la rayure après le point C suggèrent une pénétration dans le substrat métallique.

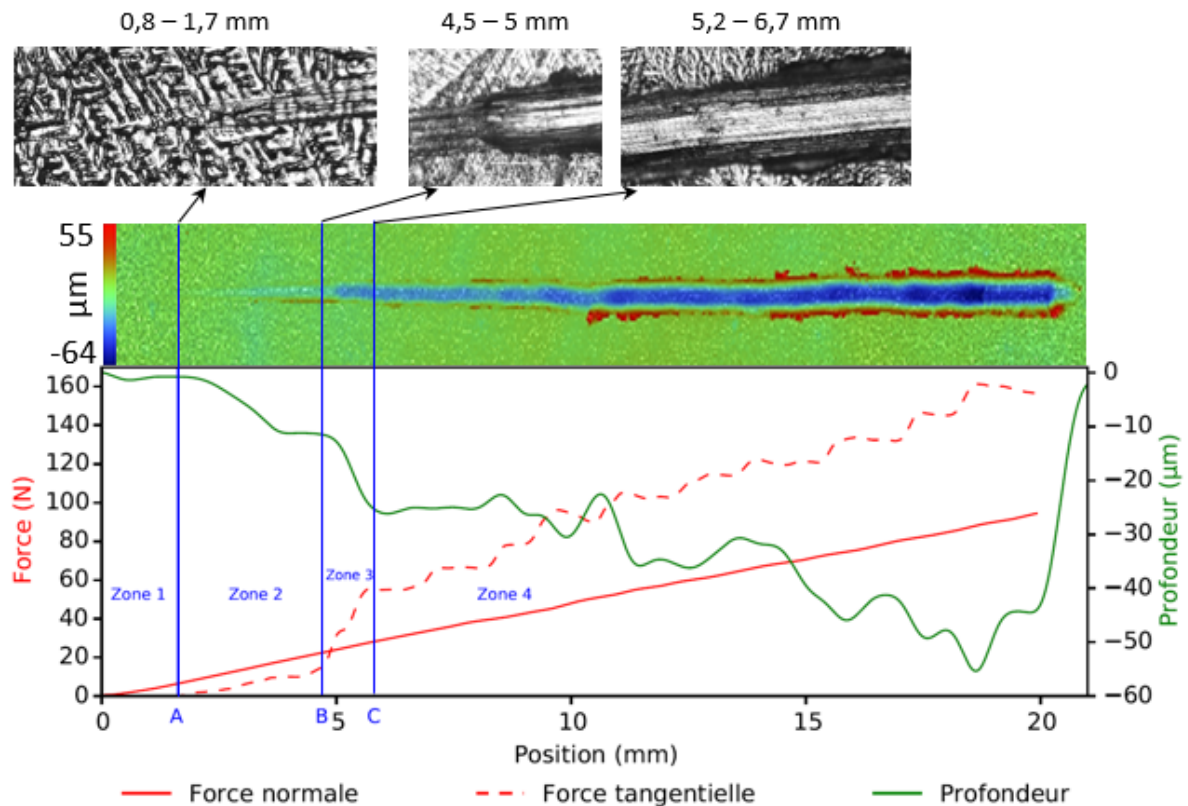


FIGURE 3.26 – Rayage surfacique du revêtement métallique coffrant RMf.

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	$1,7 \pm 0,4$	7 ± 2	≈ 0	- 0,5
B	$4,7 \pm 0,3$	21 ± 3	15 ± 2	- 9
C	$5,7 \pm 0,4$	26 ± 3	55 ± 5	- 21

TABLEAU 3.7 – Paramètres critiques de rayage du revêtement métallique coffrant RMf.

La figure 3.27 présente le comportement mécanique du revêtement polymère coffrant RPa1' lors du rayage. Quatre régions sont identifiées pour ce revêtement et les paramètres critiques de rayage sont affichés dans le tableau 3.8. Pour des chargements initiaux inférieurs à 6 N (zone 1), la couche de polypropylène du revêtement RPa1' ne présente pas de rayure, ce qui suggère une force normale trop faible pour déformer la surface. Par ailleurs, la force de friction mesurée reste presque nulle. A partir de 6 N (point A), la force tangentielle augmente linéairement avec la force normale. En parallèle, une profondeur résiduelle quasi-constante de la rayure d'une vingtaine de micromètre est observée dans la zone 2, suggérant un comportement plastique du revêtement polymère dans cette gamme de chargements. Au-delà de 45 N dans la zone 3, la profondeur de la rayure augmente linéairement, ce qui implique l'enfoncement de la couche fonctionnelle dans la couche témoin intermédiaire. Ce phénomène s'accompagne également d'une variation significative de l'émission acoustique et d'une augmentation moins intense de la force tangentielle, ce qui laisse penser à la résistance mécanique de la couche témoin. A la transition de la zone 2 à la zone 3 au point B, une modification du comportement mécanique du revêtement coffrant RPa1' est observée sur le zoom optique de la figure 3.27. Dans le domaine supposé plastique du polymère, celui-ci se déforme en présentant des écailles de

poisson. Ces lignes ondulées régulièrement espacées dans la zone 2 seraient due à la formation de bandes de cisaillement dans le polymère [27]. A partir de 45 N, ces écailles ne sont plus visibles en raison du labourage du polymère qui conduit à un lissage du fond de la rayure. Cette transition est en accord avec les observations de rayures effectuées sur des films de polypropylène [27, 28]. Plus le film est ductile, plus le phénomène sera amplifié. Pour des chargements supérieurs à 90 N (point C), la couche fonctionnelle semble s'enfoncer brutalement dans le revêtement coffrant où la profondeur mesurée de la rayure est supérieure 120 μm .

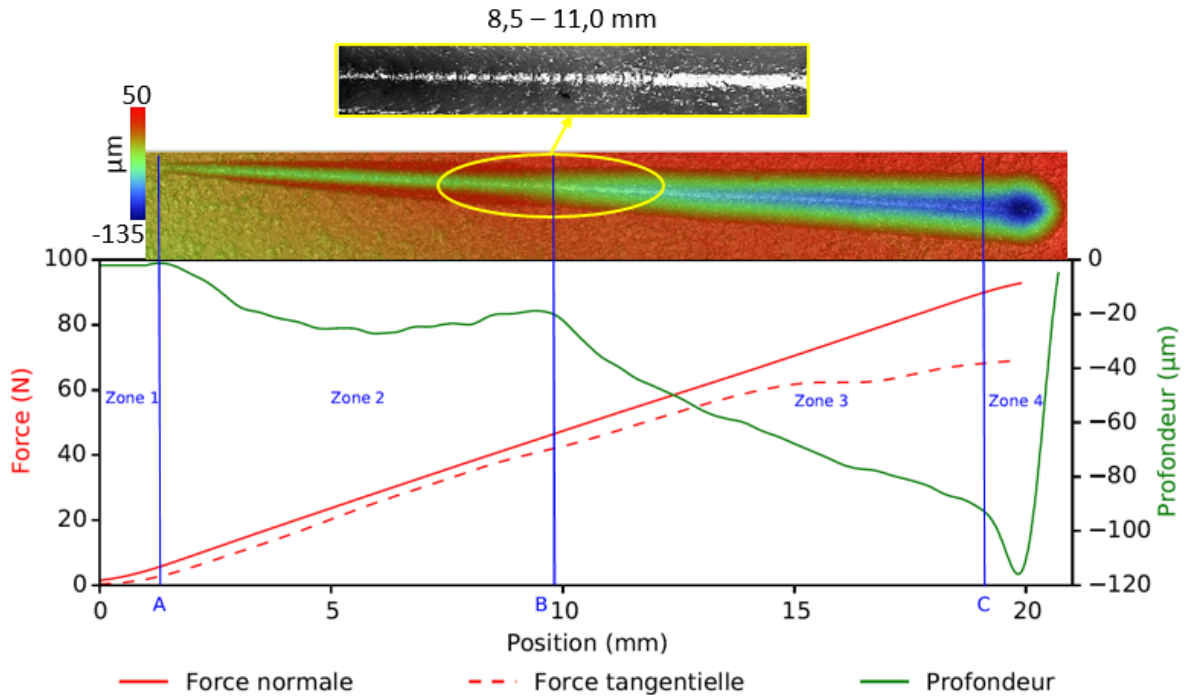


FIGURE 3.27 – Rayage surfacique du revêtement polymère coffrant RPa1’.

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (μm)
A	$1,2 \pm 0,2$	6 ± 2	$2,5 \pm 0,2$	- 8
B	$9,2 \pm 0,5$	45 ± 3	40 ± 3	-25
C	$19,2 \pm 0,5$	90 ± 4	68 ± 5	-100

TABEAU 3.8 – Paramètres critiques de rayage du revêtement polymère coffrant RPa1’.

Pour le deuxième revêtement coffrant RPa1”, trois zones de sollicitations mécaniques sont identifiées sur la figure 3.28 et les paramètres critiques associés à ces différents domaines sont résumés dans le tableau 3.9. Dès le début de l’essai au point A, le contact de l’indenteur en proche surface provoque aussitôt une pénétration dans la couche fonctionnelle du revêtement coffrant, ce qui suggère une faible robustesse de la surface coffrante. Dans le premier domaine (zone 1), la force tangentielle est linéaire à la force normale et la profondeur de la rayure chute rapidement. A partir de 6 N (point B), la vitesse de pénétration dans le revêtement coffrant ralentie, ce qui semble être provoquée par l’accumulation de la couche fonctionnelle dans le fond la rayure. En effet, aucun bourrelet significatif d’un déplacement de matière ne s’est formé et la couche n’est pas arrachée dans la zone 2. Vers une force normale de 75 N au point C, une profondeur de rayure d’environ 280 μm est mesurée et la force de friction se stabilise. Ce phénomène pourrait correspondre à la réponse mécanique du substrat métallique. Au-delà, dans la dernière zone, la profondeur de la rayure oscille aléatoirement laissant penser à une accumulation de résidus de matière polymère.

La figure 3.29 montre l’arrachement du revêtement coffrant RPa2 lors des essais de rayage. Les

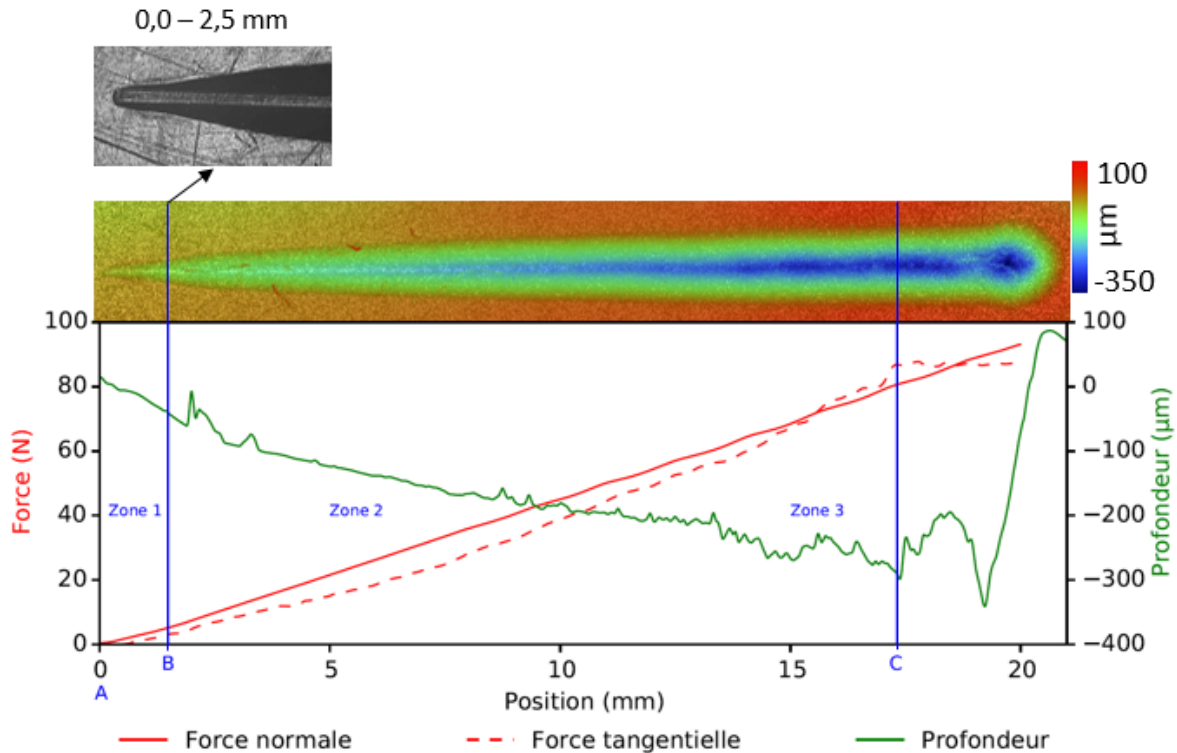


FIGURE 3.28 – Rayage surfacique du revêtement polymère coffrant RPa1”.

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	0	1	0	0
B	1,5 ± 0,3	6 ± 2	8 ± 2	- 40
C	17 ± 1	75 ± 5	85 ± 5	- 280

TABLEAU 3.9 – Paramètres critiques de rayage du revêtement polymère coffrant RPa1”.

paramètres critiques de rayage associés à la surface coffrante RPa2 sont résumés dans le tableau 3.9. Le comportement initial au point A du revêtement coffrant RPa2 est similaire à celui-ci observé pour le revêtement RPa1”. Dès le début de l’essai, une pénétration de l’indenteur dans la couche fonctionnelle est observée, montrant également une robustesse inférieure de la référence RPa2. Dans la première région, la force tangentielle reste linéaire à la force normale et la profondeur de la rayure chute rapidement jusqu’à 80 µm au point B. Aucun bourrelet n’est observé de part et d’autre de la rayure signifiant donc une compression de la couche fonctionnelle dans le revêtement coffrant. Au-delà d’une force normale de 17 N (point B), le revêtement résiste toujours à l’arrachement mais la couche en surface n’est plus compressée sous l’indenteur. Celle-ci forme des bourrelets circulaires perpendiculairement à la rayure (zone 2). Finalement à partir d’une cinquantaine de newtons (point C), la pénétration de l’indenteur atteint le substrat métallique, ce qui provoque l’arrachement du revêtement en créant une ouverture triangulaire. Par conséquent, le rayage dans la zone 3 est uniquement provoqué dans le métal, engendrant une accumulation de revêtement coffrant devant l’indenteur en fin d’essai. Le revêtement coffrant RPa2 est le seul revêtement auto-adhésif à s’être arraché lors des essais de rayage. Cela implique donc une adhérence avec le substrat métallique inférieure par rapport aux deux références RPa1’ et RPa1” provoquée potentiellement par une épaisseur quatre fois plus faible.

A partir de la figure 3.30, le comportement au rayage du revêtement coffrant RPa1 est observé. Les paramètres critiques des différents domaines mécaniques sont synthétisés dans le tableau 3.11. La force normale initialement appliquée (point A) engendre aussitôt la pénétration de l’indenteur dans

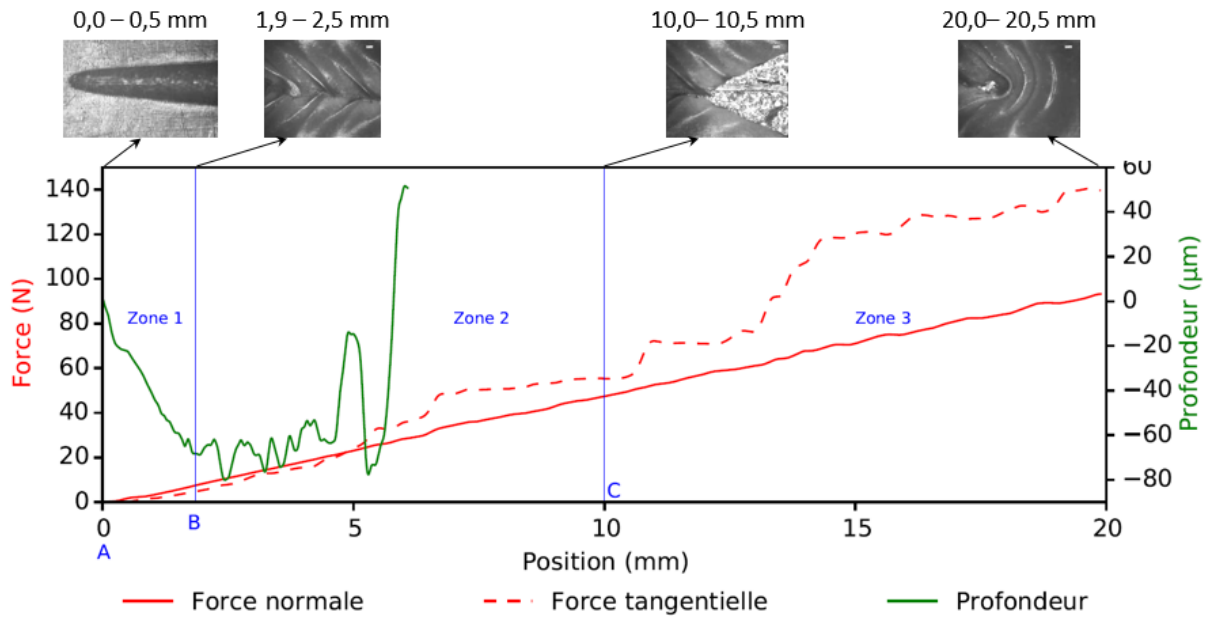


FIGURE 3.29 – Rayage surfacique du revêtement polymère coffrant RPa2.

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	0	1	0	0
B	4 ± 0,5	17 ± 2	17 ± 2	- 80 (dans le revêtement)
C	10 ± 0,5	47 ± 5	65 ± 10	- 20 (dans le substrat)

TABLEAU 3.10 – Paramètres critiques de rayage du revêtement polymère coffrant RPa2.

le revêtement. Dans la première région identifiée, la couche fonctionnelle s’arrache partiellement au cours du rayage jusqu’à un chargement de 6 N (point **B**) où la rayure atteint 14 µm de profondeur, soit l’équivalent de l’épaisseur de la couche fonctionnelle en proche surface. Au-delà de cette force normale (zone 2), la vitesse de pénétration dans le revêtement coffrant diminue, ce qui implique une pénétration de l’indenteur dans le substrat métallique et donc un arrachement total de la couche fonctionnelle. Par ailleurs, les oscillations présentes sur les courbes de profondeur et de force tangentielle suggèrent des résidus de matière au fond de la rayure provenant de la couche qui perturbent la mesure des deux paramètres.

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	0	1	0	0
B	1,5 ± 0,4	6 ± 1	7 ± 2	- 14

TABLEAU 3.11 – Paramètres critiques de rayage du revêtement coffrant fluide RPF1.

Le dernier revêtement coffrant RPF2 montre quatre domaines de sollicitation mécanique sur la figure 3.31 et les paramètres critiques de rayage associés à ses régions sont résumés dans le tableau 3.12. Le contact initial de l’indenteur en proche surface provoque une légèrement pénétration d’une centaine de nanomètres dans la couche fonctionnelle. A partir d’une force normale de 1,5 N (point **A**), la pénétration de la pointe de rayage dans le revêtement coffrant est brutale provoquant l’arrachement de la couche fonctionnelle et de la couche d’attache dans la deuxième zone. La profondeur de la rayure chute fortement jusqu’à 115 µm où la couche d’apprêt blanche est visible. En parallèle, la force de friction mesurée est quasi-nulle, ce qui indique une très faible résistance au rayage des deux premières couches. Par ailleurs, la transition entre la couche fonctionnelle et la couche d’attache n’est pas observée, suggérant donc une bonne adhérence entre ces deux couches. Lorsque le chargement devient supérieur à 2,5 N (point **B**), la couche d’apprêt est progressivement arrachée (zone 3). Au-delà

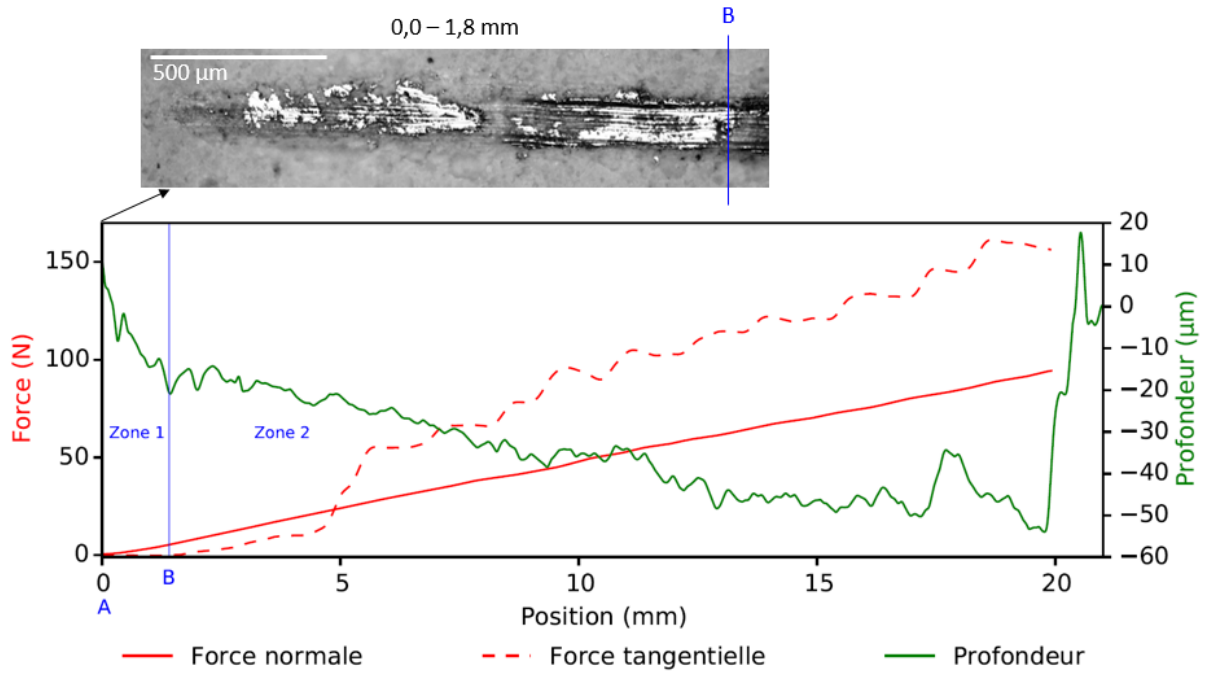


FIGURE 3.30 – Rayage surfacique du revêtement coffrant fluide RPf1.

d'une force normale de 35 N (point C), le substrat semble être pénétré car la profondeur de la rayure mesurée à 185 µm est équivalente à l'épaisseur cumulée des trois couches du revêtement coffrant RPf2. En parallèle, la force de friction augmente ce qui laisse penser à une plus forte résistance au rayage potentiellement engendrée par le substrat métallique. Dans les zones 3 et 4, la profondeur de la rayure montre des pics positifs significatifs de résidus de matière provenant de l'arrachement des couches en proche surface.

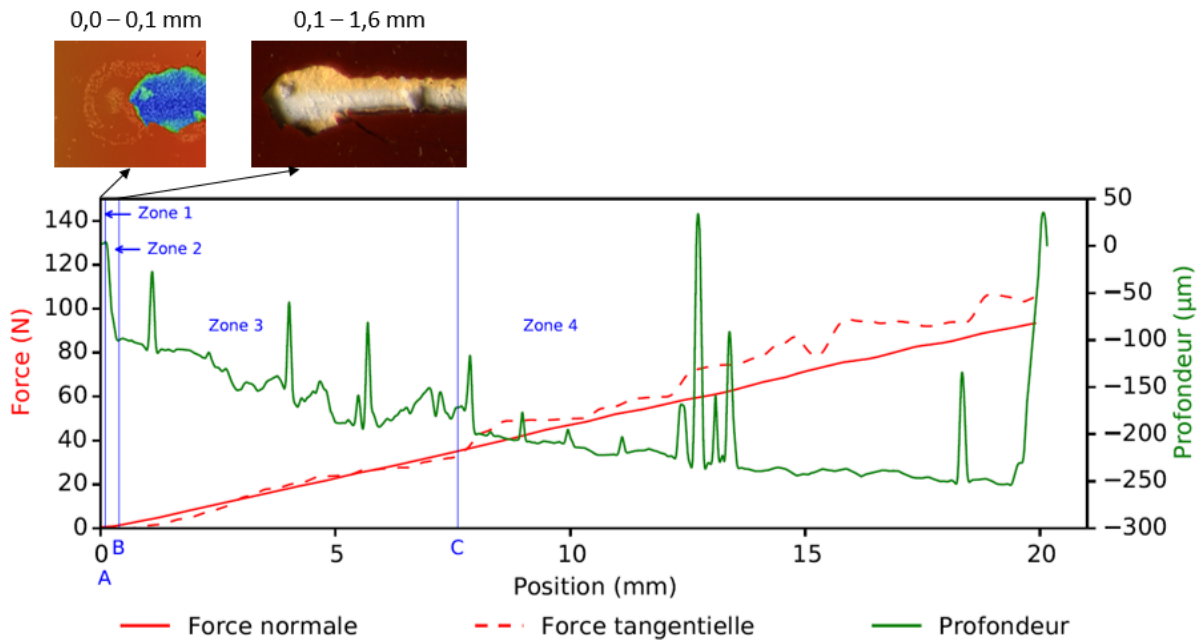


FIGURE 3.31 – Rayage surfacique du revêtement coffrant fluide RPf2.

Le tableau 3.13 synthétise les forces critiques associées aux essais de rayage. Les forces nécessaires à la pénétration dans la couche, à la rupture interfaciale de la couche fonctionnelle et à la pénétration dans le substrat métallique sont retenues. La première force est liée principalement à la robustesse

Points	Position (mm)	Force normale (N)	Force tangentielle (N)	Profondeur (µm)
A	0,2 ± 0,1	1,5 ± 0,3	≈ 0	- 0,1
B	0,5 ± 0,1	2,5 ± 0,3	0,5 ± 0,2	- 115
C	7,6 ± 0,4	35 ± 5	32 ± 3	- 185

TABLEAU 3.12 – Paramètres critiques de rayage du revêtement coffrant fluide RPF2.

Peaux coffrantes	Forces critiques (N)		
	Pénétration dans la couche fonctionnelle	Rupture de la couche fonctionnelle	Pénétration dans le substrat métallique
PMr1	15 ± 3	25 ± 3	25 ± 3
PMr2	-	-	20 ± 3
RMf	7 ± 2	26 ± 3	26 ± 3
RPa1'	6 ± 2	-	90 ± 4 (dans la couche témoin)
RPa1''	1	-	-
RPa2	1	17 ± 2	47 ± 5
RPf1	1	6 ± 1	6 ± 1
RPF2	1,5 ± 0,3	2,5 ± 0,3	35 ± 5

TABLEAU 3.13 – Forces critiques de rayage des peaux coffrantes étudiées.

mécanique de la surface des peaux coffrantes alors que les deux autres renseignent notamment sur l'adhérence des couches en surface. Premièrement, on remarque que les couches fonctionnelles des revêtements coffrants possèdent des forces critiques faibles et généralement inférieures à 2 N, hormis pour la référence RPa1' potentiellement en raison des charges alumines qui augmenteraient la résistance au rayage du revêtement polymère. Dans le cas de la peau coffrante PMr1, la force critique de dégradation de la couche fonctionnelle est la plus élevée signifiant donc la couche la plus robuste contre le rayage. Finalement, avec les références RPa1' et RPa1'', aucun pénétration dans le substrat métallique n'a été observée, ce qui laisse penser à une forte adhérence de ces revêtements coffrants contre le métal. Également, leur grande épaisseur supérieure à 600 µm a pu conduire à une meilleur résistance à l'arrachement.

Dans le paragraphe suivant, la contrainte de cisaillement interfacial de la couche fonctionnelle de la peau coffrante PMr1 est calculée à partir de différents modèles mécaniques de rayage.

3.5.2.2 Modèles mécaniques de rayage

Pour déterminer la résistance au cisaillement de la couche d'oxydes de la surface coffrante PMr1, nous nous sommes intéressés aux modèles qui sont principalement fonction de la largeur de la rayure (ou du rayon de contact) et de la force normale critique mesurées lors des essais de rayage [29].

Le premier modèle appliqué à la peau coffrante PMr1 est proposé par Benjamin et Weaver [30]. Il quantifie l'adhésion de la couche sur le substrat à travers la contrainte de cisaillement critique τ_{crit} suivant l'équation ci-dessous :

$$\tau_{crit} = \frac{H_s \cdot a_{crit}}{\sqrt{R_i^2 - a_{crit}^2}} \quad (3.7)$$

où H_s est la dureté du substrat, R_i est le rayon de l'indenteur et a_{crit} est le rayon de contact entre la pointe et la surface de la couche à la force critique L_{crit} . Celui-ci peut être approximé par la demi-largeur de la rayure. La largeur de la rayure pour une force critique de 15 N représentée par le point A de la figure 3.24 vaut $d_{crit} = 55 \mu\text{m}$, soit un rayon de contact a_{crit} égale à $27,5 \mu\text{m}$. Par conséquent,

selon l'équation 3.7, la contrainte de cisaillement critique τ_{crit} de la couche d'oxydes de la peau coffrante PMr1 est égale à 0,3 GPa.

Dans leur modèle de rayage, Olliver and Matthews [31] ont substitué la dureté du substrat H_s de l'équation 3.7 par le terme $L_{crit}/\pi \cdot a_{crit}^2$, ce qui donne la relation suivante :

$$\tau_{crit} = \frac{L_{crit}}{\pi \cdot a_{crit} \sqrt{R_i^2 - a_{crit}^2}} \quad (3.8)$$

Avec le modèle d'Olliver et Matthews, la contrainte de cisaillement critique τ_{crit} de la couche de la surface coffrante PMr1 serait égale à 0,9 GPa avec l'équation 3.8. Celle-ci est trois fois supérieure à celle calculée avec le première modèle Benjamin et Weaver mais reste du même ordre de grandeur.

Un troisième modèle de rayage proposé par Laugier [32] permet de calculer la contrainte de cisaillement critique τ_{crit} selon la contrainte de compression σ_x créée devant l'indenteur lors du rayage d'après l'équation :

$$\tau_{crit} = \frac{\sigma_x \cdot a_{crit}}{R_i} \quad (3.9)$$

$$\sigma_x = \frac{L_{crit}}{2 \cdot \pi \cdot a_{crit}^2} [(4 + \nu_s) \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu_{crit}}{8} - (1 - 2 \cdot \nu_s)] \quad (3.10)$$

dans laquelle ν_s est le coefficient de Poisson du substrat (0,3 pour l'acier) et μ_{crit} est le coefficient de frottement de l'indenteur sur la surface à la force critique L_{crit} . Pour une force critique de 15 N, ce coefficient de frottement est égale à 0,6. Finalement, d'après l'équation 3.9 du modèle de Laugier, la contrainte de cisaillement critique τ_{crit} de la couche en proche surface de la peau coffrante PMr1 vaut 1,1 GPa. Cette valeur est supérieure à celles calculées dans les deux premiers modèles mais reste proche. Par conséquent, en considérant ces trois modèles de rayage, la contrainte de cisaillement critique moyenne du film d'oxyde de la peau coffrante PMr1 vaut $0,8 \pm 0,3$ GPa.

Benjamin et Weaver [30] ont défini un autre modèle de rayage à la suite d'essais de rayage de films métalliques fins sur des substrats de verres. En considérant que l'adhésion du film sur le substrat est due à des forces de Van der Waals, la force de friction critique F_{crit} mesurée pendant le rayage de la surface peut être exprimée selon l'équation suivante :

$$F_{crit} = \frac{d_{crit}^3 \cdot H_s}{12 \cdot R_i} + \frac{\pi \cdot \tau_{crit} \cdot d_{crit}}{4} - d_{crit} \cdot t_c \cdot H_c \quad (3.11)$$

avec t_c et H_c respectivement l'épaisseur et la dureté de la couche et d_{crit} la largeur de la rayure. Le premier terme de l'équation (3.11) exprime la force nécessaire pour déformer le substrat. La deuxième composante représente la force requise pour retirer la couche du substrat, *i.e.* la force nécessaire pour cisailer le liaison entre la couche et le substrat. Ce terme est comparable à la force critique. Enfin, le dernière terme est la force dite de "labourage" nécessaire pour écarter la couche cisailée de la rayure [30]. Avec une force de friction F_{crit} égale à 9 N, la contrainte de cisaillement critique τ_{crit} de la couche d'oxyde de la peau coffrante PMr1 vaut 6,7 GPa d'après l'équation 3.11. Cette valeur de contrainte critique est nettement supérieure à celle déterminées suivant les trois premiers modèles avec un ordre de grandeur de différence.

Les contraintes de cisaillement critiques de la couche fonctionnelle de la surface coffrante PMr1 calculés selon les différents modèles sont résumés dans le tableau 3.14.

En s'appuyant sur l'équation 3.11 du second modèle de Benjamin et Weaver [30], la force normale critique L_{crit} peut être estimée à partir du second terme en suivant l'équation :

$$L_{crit} = \frac{\pi \cdot \tau_{crit} \cdot d_{crit}}{4} \quad (3.12)$$

D'après l'équation 3.12, l'effort normale critique L_{crit} nécessaire pour cisailer la couche fonctionnelle du substrat métallique de la peau coffrante PMr1 serait égale à 16 N avec le dernier modèle

Modèle de rayage	Equation	τ_{crit} calculée	Revêtement-substrat	Référence
$\tau_{crit} = \frac{H_s \cdot a_{crit}}{\sqrt{R_i^2 - a_{crit}^2}}$	3.7	0,4 GPa	Films métalliques Substrat dur	[30]
$\tau_{crit} = \frac{L_{crit}}{\pi \cdot a_{crit} \sqrt{R_i^2 - a_{crit}^2}}$	3.8	0,9 GPa	Film carbone Substrat mou	[31]
$\tau_{crit} = \frac{\sigma_x \cdot a_{crit}}{R_i}$	3.9	1,1 GPa	Revêtements Substrats divers	[32]
$F_{crit} = \frac{d_{crit}^3 \cdot H_s}{12 \cdot R_i} + \frac{\pi \cdot \tau_{crit} \cdot d_{crit}}{4} - d_{crit} \cdot t_c \cdot H_c$	3.11	6,7 GPa	Films métalliques Substrat dur	[30]

TABLEAU 3.14 – Modèles de rayage appliqués à la peau coffrante de référence PMr1.

étudié, ce qui est proche de la force normale critique mesurée pendant les essais de rayage (15 ± 3 N). En considérant la valeur moyenne de la contrainte critique τ_{crit} des trois premiers modèles (0,8 GPa), la force normale critique L_{crit} serait égale à 3 N, ce qui est 5 fois plus faible. De plus, aucun changement de comportement mécanique n'est observé à cette valeur de force normale suggérant donc que ces trois modèles ne sont pas applicables pour caractériser le cisaillement de la couche de la surface coffrante PMr1.

Le second modèle de Benjamin et Weaver a été développé dans le cas de films métalliques fins déposés sur des substrats de verre plus durs et en considérant la liaison des deux solides par des forces de Van der Waal's. Généralement, les couches d'oxydes présente en proche surface sont formées par la diffusion de l'eau et de l'oxygène à travers l'acier créant réseau tridimensionnel. Par conséquent, l'adhésion de la couche fonctionnelle d'oxyde sur la surface coffrante PMr1 ne semble pas être causée par des forces de Van der Walls. La corrélation entre ce modèle mécanique et les résultats des essais de rayage semble être principalement due au mécanisme de rupture interfacial. En effet, ce modèle de rayage considère que la rupture des films sur les substrats de verre est provoquée par un mécanisme de stripping. Ce phénomène peut être observé par microscopie optique au point A de la figure 3.24 où la couche d'oxyde commence à se fissurer. De plus, l'estimation de la force critique de cisaillement confirme celle déterminée à la suite des essais de rayage. Par conséquent, le second modèle de Benjamin et Weaver [30] serait le plus réaliste pour la peau coffrante PMr1 avec une contrainte de cisaillement critique τ_{crit} égale à 6,7 GPa pour rompre la couche en surface.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les signatures physico-chimiques, topographiques et mécaniques des peaux coffrantes ont été caractérisées à partir des outils expérimentaux décrits dans le chapitre 2. L'identification des différentes signatures surfaciques ont permis d'évaluer, à travers les divers phénomènes interfaciaux, la propension à l'adhérence du béton sur les surfaces coffrantes ainsi que leur robustesse vis-à-vis de la friction du béton.

Le tableau 3.15 résume la probabilité de genèse des interactions entre le béton et les parois de coffrage. Les phénomènes peu susceptibles d'être générés, ce qui est recherché dans ce travail, sont représentées par le symbole ✓. Au contraire, ceux qui risquent fortement de se produire à l'interface béton-paroi sont symbolisés par le signe ✗.

Les mesures de rugosité et de mouillabilité ont permis d'évaluer la capacité de la pâte de ciment à se répandre à la surface des peaux coffrantes. Les plus rugueuses auront tendance à piéger une forte quantité de fines dans leurs aspérités et donc créer un ancrage mécanique du béton plus important. Concernant les parois lisses et hydrophobes, celles-ci pourraient montrer une affinité plus faible avec le béton mais néanmoins favoriser les effets capillaires dus à l'accumulation d'eau à l'interface béton-coffrage. En parallèle, les revêtements polymères généralement inertes auront tendance à peu réagir avec le ciment et former de faibles interactions électrochimiques.

Enfin, les essais de rayage ont montré des résistances au cisaillement interfacial plus faibles des couches fonctionnelles dans le cas des revêtements coffrants en polymère, suggérant une robustesse mécanique plus élevée pour les peaux coffrantes métalliques.

D'après le tableau 3.15, aucune des surfaces coffrantes étudiées ne montre exclusivement de faibles probabilités de genèse, ce qui justifierait que le huilage des parois soit encore très répandu actuellement sur site. Cependant, nous observons que les trois peaux coffrantes PMr2, RMf et RPa1' présentent de meilleures fonctionnalités où les phénomènes seront généralement les moins susceptibles de se produire.

Dans le but de caractériser le comportement du béton sur les peaux coffrantes et vérifier les hypothèses émises dans ce chapitre, des essais de frottement et d'adhérence du béton sur les surfaces coffrantes sont réalisés respectivement dans le chapitre 4 lors du coulage et dans le chapitre 5 durant la phase de décoffrage.

Peau coffrante	Robustesse à la friction	Ancrage mécanique	Effet capillaire	Adhésion chimique [33, 34]
PMr1	✓	✓	?	✗
PMr2	✓	?	?	✓
RMf	?	✓	?	?
RPa1'	?	✓	?	✓
RPa1''	✗	✓	✗	✓
RPa2	✗	✓	✗	✓
RPf1	✗	✗	✓	✓
RPf2	✗	?	✗	✓

TABLEAU 3.15 – Récapitulatif des probabilités de genèse des interactions entre le béton et les parois de coffrage.

3.7 Références

- [1] T. S. Phan, “Modélisation numérique de l’interface acier-béton : Application au comportement des structures en béton renforcées par des aciers plats crantés,” *Thèse de doctorat, Université de Paris Est*, 2012. 70
- [2] R. Merz, A. Brodyanski, and M. Kopnarski, “On the Role of Oxidation in Tribological Contacts under Environmental Conditions,” *Conference Papers in Science, Hindawi Publishing Corporation*, vol. 2015, 2015. 71, 80
- [3] D.J.Young, *High temperature oxidation and corrosion of metals*. vol. 1 ed., 2008. 78
- [4] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen, “Examination of Oxide Scales of Hot Rolled Steel Products,” *ISIJ International*, vol. 45, no. 1, pp. 52–59, 2005. 78
- [5] C. Vergne, C. Boher, R. Gras, and C. Levallant, “Influence of oxides on friction in hot rolling : Experimental investigations and tribological modelling,” *Wear*, vol. 260, no. 9-10, pp. 957–975, 2006. 80
- [6] K. Chin, H. Zaidi, and T. Mathia, “Oxide film formation in magnetized sliding steel/steel contact—analysis of the contact stress field and film failure mode,” *Wear*, vol. 259, no. 1-6, pp. 477–481, 2005.
- [7] X. Yu, Z. Jiang, D. Wei, C. Zhou, Q. Huang, and D. Yang, “Tribological properties of magnetite precipitate from oxide scale in hot-rolled microalloyed steel,” *Wear*, vol. 302, no. 1-2, pp. 1286–1294, 2013. 80
- [8] G. Murry, “Transformations dans les aciers,” *Techniques de l’ingénieur*, vol. 1, p. 54, 1998. 80
- [9] M. Sahli and J. C. Gelin, “Development of a feedstock formulation based on polypropylene for micro-powder soft embossing process of 316L stainless steel micro-channel part,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 9-12, pp. 2139–2148, 2013. 82
- [10] A. Oromiehie, H. Ebadi-Dehaghani, and S. Mirbagheri, “Chemical modification of polypropylene by maleic anhydride : melt grafting, characterization and mechanism,” *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 117–122, 2014. 82
- [11] E. Andreassen, “Polypropylene,” vol. 2, no. August, 1999. 82
- [12] H. H.-t. S. Corporation, “DSC Measurement of Polypropylene,” no. 86, pp. 1–2, 2008.
- [13] B. De Roover, M. Sclavons, V. Carlier, J. Devaux, R. Legras, and A. Momtaz, “Molecular characterization of maleic anhydride-functionalized polypropylene,” *Journal of Polymer Science Part A : Polymer Chemistry*, vol. 33, no. 5, pp. 829–842, 1995. 82
- [14] C. Liu, K. Shih, Y. Gao, F. Li, and L. Wei, “Dechlorinating transformation of propachlor through nucleophilic substitution by dithionite on the surface of alumina,” *Journal of Soils and Sediments*, vol. 12, no. 5, pp. 724–733, 2012. 82
- [15] D. Y. Li, Y. S. Lin, Y. C. Li, D. L. Shieh, and J. L. Lin, “Synthesis of mesoporous pseudoboehmite and alumina templated with 1-hexadecyl-2,3-dimethyl-imidazolium chloride,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 108, no. 1-3, pp. 276–282, 2008. 82
- [16] A. Laachachi, M. Ferriol, M. Cochez, J. M. Lopez Cuesta, and D. Ruch, “A comparison of the role of boehmite (AlOOH) and alumina (Al₂O₃) in the thermal stability and flammability of poly(methyl methacrylate),” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 94, no. 9, pp. 1373–1378, 2009. 82

- [17] H. A. Maddah, "Polypropylene as a Promising Plastic : A Review," *American Journal of Polymer Science*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2016. 83
- [18] Q. T. Shubhra, A. K. Alam, and M. A. Quaiyyum, "Mechanical properties of polypropylene composites : A review," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 26, no. 3, pp. 362–391, 2013. 83
- [19] P. Kardar, M. Ebrahimi, and S. Bastani, "Study the effect of nano-alumina particles on physical-mechanical properties of UV cured epoxy acrylate via nano-indentation," *Progress in Organic Coatings*, vol. 62, no. 3, pp. 321–325, 2008. 83
- [20] M. Lewin, A. Mey-Marom, and R. Frank, "Surface free energies of polymeric materials, additives and minerals," *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 16, no. 6, pp. 429–441, 2005. 84
- [21] R. N. Wenzel, "Resistance of solide surfaces to wetting by water," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 8, pp. 988–994, 1936. 84
- [22] L. Courard, "Evaluation of thermodynamic properties of concrete substrates and cement slurries modified with admixtures," *Materials and Structures*, vol. 35, no. April, pp. 149–155, 2002. 86
- [23] W. Oliver and G. Pharr, "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation : Advances in understanding and refinements to methodology," *Journal of Materials Research*, vol. 19, no. 01, pp. 3–20, 2004. 87
- [24] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," *Journal of Materials Research*, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583, 1992. 87
- [25] J. Ramirez, "NANOINDENTATION OF Polypropylene Film," *NANOVEA a better measure*, no. January 2012, pp. 1–9, 2010. 87
- [26] M. Bhattacharya, R. Chakraborty, A. Dey, A. Kumar Mandal, and A. Kumar Mukhopadhyay, "New observations in micro-pop-in issues in nanoindentation of coarse grain alumina," *Ceramics International*, vol. 39, no. 2, pp. 999–1009, 2013. 87
- [27] M. Wong, A. Moyse, F. Lee, and H. J. Sue, "Study of surface damage of polypropylene under progressive loading," *Journal of Materials Science*, vol. 39, no. 10, pp. 3293–3308, 2004. 91
- [28] E. Moghbelli, R. L. Browning, W. J. Boo, S. F. Hahn, L. J. E. Feick, and H. J. Sue, "Effects of molecular weight and thermal history on scratch behavior of polypropylene thin sheets," *Tribology International*, vol. 41, no. 5, pp. 425–433, 2008. 91
- [29] M. H. Blees, G. B. Winkelman, A. R. Balkenende, and J. M. J. den Toonder, "Effect of friction on scratch adhesion testing : Application to a sol-gel coating on polypropylene," *Thin Solid Films*, vol. 359, no. 1, pp. 1–13, 2000. 95
- [30] P. Benjamin and C. Weaver, "Measurement of Adhesion of Thin Films," *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 254, no. 1277, pp. 163–176, 1960. 95, 96, 97
- [31] B. Ollivier and A. Matthews, "Adhesion of diamond-like carbon films on polymers : An assessment of the validity of the scratch test technique applied to flexible substrates," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 651–662, 1994. 96, 97
- [32] M. Laugier, "The development of the scratch test technique for the determination of the adhesion of coatings," *Thin Solid Films*, vol. 76, no. 3, pp. 289–294, 1981. 96, 97
- [33] S. Freedman, "Corrosion of nonferrous metals in contact with concrete," *Modern Concrete*, vol. 36, pp. 1–3, 1970. 98
- [34] "Le ciment et les métaux non ferreux," *Bulletin du ciment*, vol. 16-17, no. 6, pp. 1–6, 1948. 98

Chapitre 4

Caractérisation des frottements du béton contre les peaux coffrantes lors du coulage

Sommaire

4.1 Introduction	102
4.2 Mesure de la force tangentielle	102
4.3 Etude de la contrainte de frottement interfaciale béton-peau coffrante	102
4.4 Caractérisation topographique des peaux coffrantes suite aux essais tribologiques .	105
4.4.1 Caractérisation qualitatif de la dégradation des peaux coffrantes	105
4.4.2 Quantification de l'usure par interférométrie optique	106
4.4.3 Caractérisation de l'usure de parois coffrantes utilisées sur site	109
4.5 Conclusion	112
4.6 Références	113

4.1 Introduction

Il a été montré dans la section 1.3 que les frottements engendrés par la coulée du béton peuvent engendrer une altération topographique des parois coffrantes. Cette modification surfacique pourrait conduire à une diminution des fonctionnalités des faces coffrantes et par la suite à la formation de parements de mauvaise qualité.

L'objectif principal de ce chapitre est de caractériser l'impact du frottement du béton sur les peaux coffrantes étudiées au moyen d'un tribomètre plan/plan qui simule les conditions de coulée du béton dans les coffrages. Dans un premier temps, les contraintes de frottement sont déterminées à partir des forces tangentielles mesurées à l'interface béton-peau. A partir des coefficients de frottement résultants, deux mécanismes de frottement interfacial sont proposés selon la nature du béton. Pour finir, des analyses topographiques des parois coffrantes sont réalisées afin de caractériser la dégradation des surfaces provoquée par la friction du béton. La fonctionnalité des paramètres de rugosité est finalement identifiée en fonction de leur amplitude de variation.

4.2 Mesure de la force tangentielle

A partir du tribomètre décrit dans le paragraphe 2.4.1 du chapitre 2, les forces tangentielles induites par le frottement du béton sont mesurées. La figure 4.1 présente un exemple d'enregistrement de la force tangentielle à vide F_v et avec béton F_{mes} en fonction du temps de frottement obtenue avec une peau coffrante PMr2 et un béton B32 à une pression de contact de 110 kPa. Sur les courbes, deux zones sont observées qui sont la zone 1 montrant une augmentation rapide de la force tangentielle due à l'initiation des frottements et au rattrape des jeux de la chaîne mécanique. La zone 2 représente un régime stationnaire qui traduit les frottements dynamiques du béton à l'interface. C'est la valeur moyenne de cette région qui est prise en compte pour déterminer la force tangentielle à vide ou mesurée.

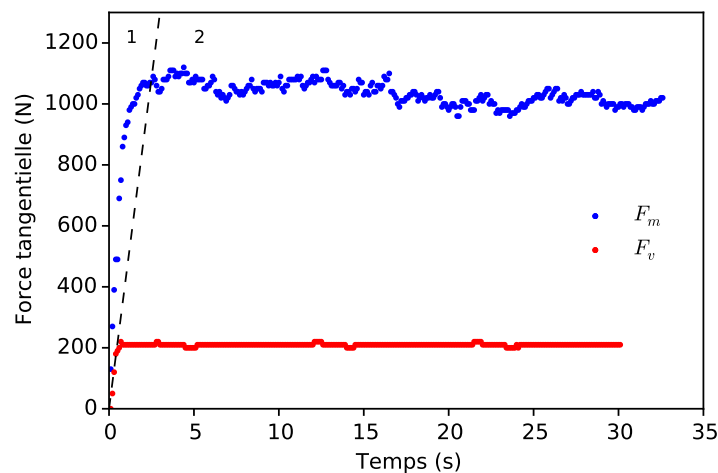


FIGURE 4.1 – Évolution des forces tangentielles F_{mes} et F_v en fonction de la durée de l'essai pour une surface PMr2 avec un béton B32 à une pression de contact de 110 kPa.

A partir de la procédure détaillée dans le 2.4.3, les contraintes de frottement interfaciales béton-paroi coffrante sont calculées et celles-ci sont étudiées dans la partie suivante.

4.3 Etude de la contrainte de frottement interfaciale béton-peau coffrante

Les figures 4.3a, 4.3b et 4.3c présentent respectivement l'évolution de la contrainte de frottement des bétons B32 et BAP36 sur les peaux coffrantes PMr1, PMr2, RPa1'. L'ensemble des courbes

montrent que le frottement du béton croît linéairement avec la pression de contact, ce qui est en accord avec la littérature [1-5]. En effet, ce résultat est directement proportionnel à l'augmentation des contacts intergranulaires dans le béton qui transmettent la pression normale appliquée jusqu'à la surface de la paroi coffrante [6, 7]. En considérant des comportements linéaires, les valeurs des pentes peuvent être associées aux coefficients de frottement béton-paroi et ceux-ci sont résumés dans le tableau 4.1.

La réalisation des tests tribologiques à trois reprises pour chaque condition fixée a entraîné une variation moyenne de la contrainte de frottement τ_f mesurée de ± 2 kPa, démontrant une bonne répétabilité de 20 %. De plus, les coefficients de corrélation R^2 des droites sont généralement supérieurs à 0,8 ce qui est acceptable dans le domaine du génie civil.

Peau coffrante	Béton	
	BAP36	B32
PMr1	0,09	0,18
PMr2	0,09	0,34
RPa1'	0,11	0,24

TABLEAU 4.1 – Coefficients de frottement μ_b des bétons BAP36 et B32 selon les peaux coffrantes testées.

La linéarité des courbes de la figure 4.3 indique que la pression de contact P_b (de 50 à 110 kPa) est toujours inférieure au seuil de pression au-dessus duquel la phase liquide de la couche limite rediffuse dans le volume de béton et que la surface adopte un comportement granulaire lors du cisaillement [8]. La valeur constante du coefficient de frottement pour la plage de pressions étudiées indique que la lubrification due à la présence de l'eau dans la couche limite est toujours présente [7].

Quelle que soit la peau coffrante étudiée, on remarque que les coefficients de frottement sont toujours plus faibles avec le BAP36 suggérant un mécanisme de friction différent entre les deux bétons étudiés potentiellement lié à une différence de fluidité. En effet, lorsque le béton est comprimé, la migration de l'eau et des fines vers la paroi coffrante provoque la formation d'une couche limite à l'interface béton-paroi. Dans le cas d'un béton adjuvanté tel que le BAP36, cette migration s'accompagne également d'une diffusion de superplastifiant entraînant la défloculation des fines proches de la paroi [1]. Ce phénomène engendre donc une compacité plus faible de la couche limite par rapport au béton non standard B32 comme schématisée sur la figure 4.2. De ce fait, la surface de contact totale entre les particules de ciment et la peau coffrante est plus petite. Par conséquent, lors du glissement de la paroi, la couche limite du béton BAP36 subit un cisaillement interne moins intense ce qui provoque des contraintes de frottement plus faibles.

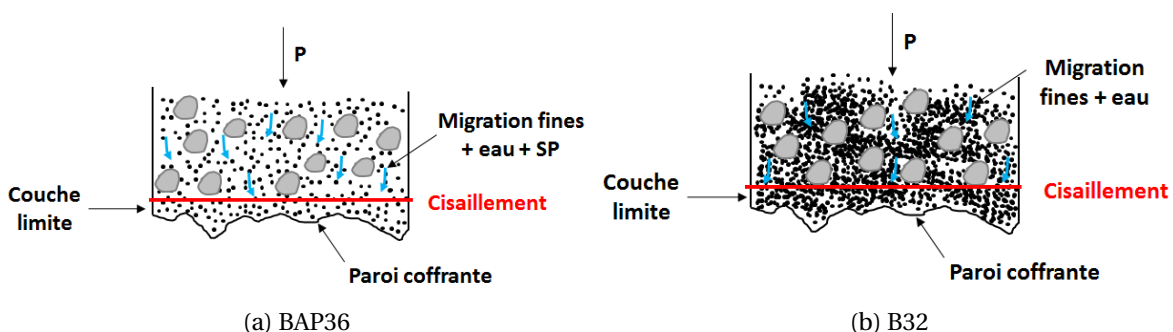
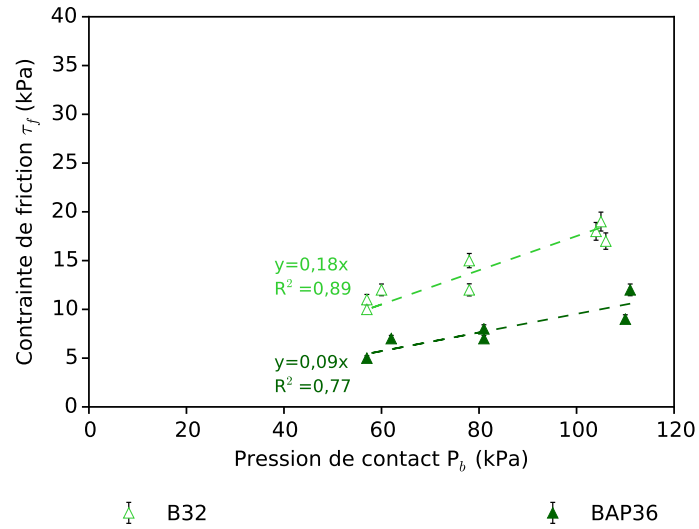
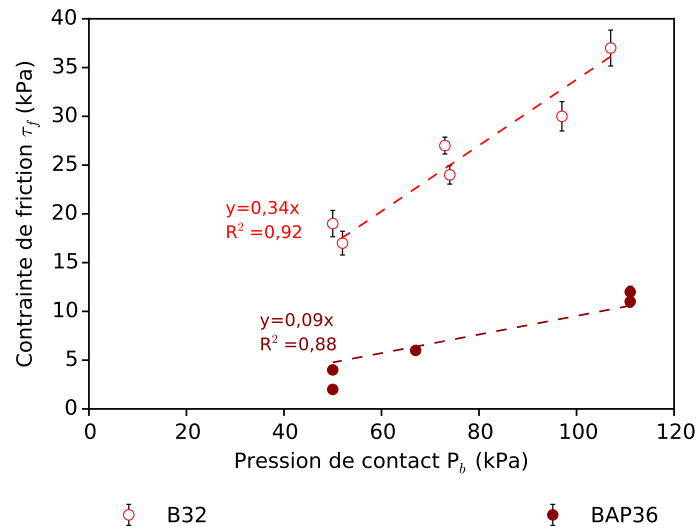


FIGURE 4.2 – Représentations schématiques de l'interface béton-peau coffrante selon le béton étudié.

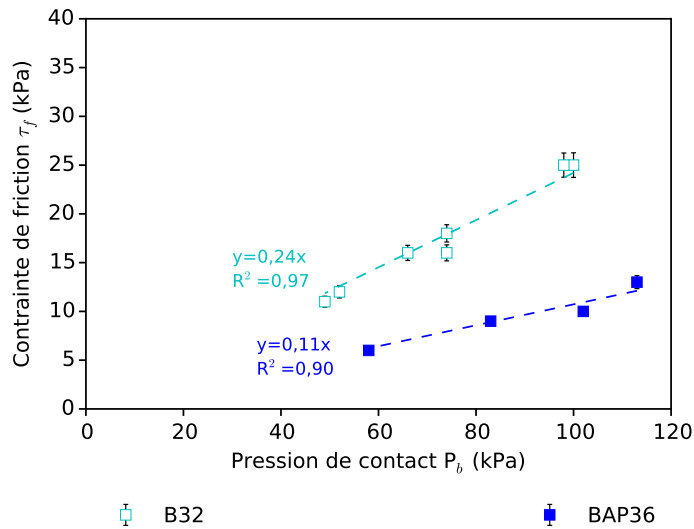
Une fois les coefficients de frottement béton-paroi déterminés, les signatures topographiques des peaux coffrantes testées sont analysées par la suite afin de caractériser la dégradation induite par la friction des bétons.



(a) PMr1



(b) PMr2



(c) RPa1'

FIGURE 4.3 – Évolution des contraintes de frottement τ_f des bétons B32 et BAP36 en fonction de la pression de contact P_b pour les trois peaux coffrantes étudiées.

4.4 Caractérisation topographique des peaux coffrantes suite aux essais tribologiques

Pour quantifier l'usure des parois coffrantes provoquée par le frottement du béton, différentes analyses sont effectuées. En premier lieu, la dégradation surfacique des peaux est notée visuellement en fonction du béton et de la pression appliquée. Ensuite, la fonctionnalité de leurs paramètres topographiques est déterminée par interférométrie optique selon leur variation suite à la friction du béton. Finalement, la surface des peaux testées est comparée à celle de parois coffrantes similaires déjà employées sur site.

4.4.1 Caractérisation qualitatif de la dégradation des peaux coffrantes

Un premier classement qualitatif de la surface des peaux coffrantes est effectué à partir d'observations visuelles suite au frottement du béton. Les parois non altérées et extrêmement dégradées sont notées respectivement de 1 à 5 et les résultats sont résumés dans le tableau 4.2 en fonction du béton et la pression mis en jeu. La note finale obtenue indique la robustesse globale des surfaces coffrantes aux frottements quelles que soient les conditions de coulée. Le béton BAP36 induit moins de dommage que le béton B32 ce qui est en accord avec les coefficients de frottement μ_b plus faibles déterminés précédemment. Les peaux PMr2, PMr1 et RPa1' recueillent respectivement une note globale de 8, 10 et 18 indiquant une meilleure résistance à l'usure pour le PMr2.

Avec le béton B32, la surface des parois PMr1 n'est pas altérée en dessous de 80 kPa. Au-delà, des rayures sont visibles en surface lorsque la pression de contact est de 110 kPa. Celles-ci sont parallèles à la direction de frottement, ce qui suggère que ces marques sont générées par les granulats présents dans le béton frais. Également, des traces ponctuelles de corrosion apparaissent à la surface suggérant donc une pénétration au-delà de la couche fonctionnelle dans le substrat métallique. Dans la section 3.5.2.2, il a été calculé d'après un des modèles de Benjamin et Weaver [9], une contrainte de cisaillement critique τ_{crit} entre la couche d'oxydes et l'acier égale à 6,7 GPa. En considérant la contrainte de frottement du B32 à 110 kPa à 20 kPa, celle-ci est 10^6 fois inférieure à la valeur nécessaire pour délaminer le film d'oxyde du PMr1. Par conséquent, les rayures plus profondes résultantes de la friction du béton semblent être provoquées par un frottement granulaire ponctuel plus intense. Ce dernier peut être causé par la création de chaînes granulaires à l'intérieur du béton transmettant l'effort jusqu'à la surface de la paroi. Ces résultats montrent donc que la contrainte de frottement mesurée pendant un essai tribologique est en réalité une somme de la contrainte de friction moyenne de la pâte de ciment et des contraintes granulaires locales. Concernant la peau coffrante PMr2, celle-ci présente dans l'ensemble peu de marques suite au frottement du béton. Seulement des rayures ponctuelles sont visibles à 110 kPa avec un béton B32. Avec le béton BAP36, les parois PMr1 et PMr2 se comportent de façon similaire avec une dégradation très faiblement marquée. Au contraire, la surface coffrante RPa1' montre des rayures de plus en plus profondes lorsque la pression augmente. La paroi polymère RPa1' se dégrade plus fortement que les deux autres peaux métalliques PMr1 et PMr2, même lors du frottement d'un béton fluidifié, ce qui indique une robustesse plus faible à la friction.

Paroi coffrante	Béton		B32			BAP36			Note globale
	60 kPa	80 kPa	110 kPa	60 kPa	80 kPa	110 kPa			
PMr1	1	2	3	1	1	2	10		
PMr2	1	2	2	1	1	1	8		
RPa1'	3	4	5	1	2	3	18		

TABLEAU 4.2 – Classification de la dégradation des peaux coffrantes en fonction de la pression P_b et du béton employé suite aux essais de frottement. Classement d'1 (non altérée) à 5 (très dégradée).

Par la suite, la résistance à l'usure des parois coffrantes est caractérisée à partir de mesures d'interférométrie optique IO en étudiant les variations des paramètres topographiques avant et après le frottement du béton.

4.4.2 Quantification de l'usure par interférométrie optique

Pour quantifier les variations des paramètres de rugosité provoquées par la friction du béton, chaque peau testée est analysée en deux régions distinctes : une zone de référence (0) où le frottement n'a pas eu lieu et une zone altérée (1) où la surface coffrante s'est fortement dégradée. Les zones (0) et (1) sont analysées sur des domaines de $8 \times 8 \text{ mm}^2$ avec un pas d'échantillonnage de $1,94 \text{ }\mu\text{m}$ qui est inférieur à plus de 80 % du diamètre des fines comprises dans le béton. Les deux faces des parois sont caractérisées et la valeur moyenne des paramètres de rugosité est retenue. Toutes les surfaces analysées sont préalablement nettoyées à l'alcool pour retirer les traces de bétons résiduelles. Finalement, les variations relatives des paramètres de rugosité ΔX sont calculées selon l'équation :

$$\Delta X = \frac{X_1 - X_0}{X_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Dans le cas du BAP36, les paramètres topographiques des trois parois coffrantes ne montrent aucunes variations pertinentes suite aux essais tribologiques, suggérant un faible impact du frottement du BAP36 dans la gamme de pressions étudiée. Pour les peaux PMr1 et PMr2, les rayures en surface ne dépassent pas 5 et 3 μm de profondeur pour une pression de contact de 110 kPa. Dans les mêmes conditions, la surface coffrante RPa1' présente des rayures de plus de 30 μm de profondeur confirmant sa plus faible robustesse par rapport aux deux autres parois.

Cependant, avec l'utilisation du béton B32, des tendances significatives sont observées, notamment sur le volume de matière des pics V_{mp} des peaux coffrantes qui évolue avec l'augmentation de la pression de contact. Ce paramètre de volume est généralement exploité pour caractériser la quantité de matière en surface qui peut être érodée au cours d'un processus d'usure [10]. Par conséquent, cela expliquerait pourquoi ce paramètre est devenu un indicateur fonctionnel d'usure des parois coffrantes.

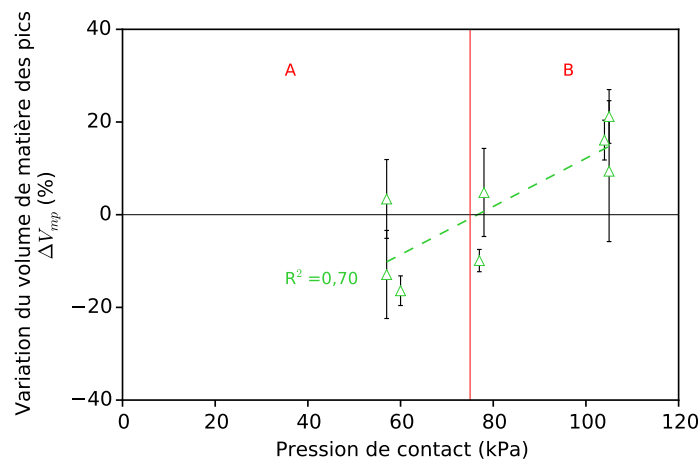


FIGURE 4.4 – Évolution de la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau coffrante PMr1 en fonction de la pression de contact P_b suite à la friction du béton B32.

La figure 4.4 présente les variations relatives du paramètre ΔV_{mp} de la peau PMr1 suite aux frottements du béton B32. Les résultats montrent une augmentation de la variation du volume suggérant une modification évolutive de la topographie en fonction de la pression. La zone A présente des variations négatives de ΔV_{mp} jusqu'à 75 kPa évoquant une usure superficielle des pics avec une pression insuffisante pour induire un rayage de la surface. En effet, aucune rayure n'est observée sur les peaux après un frottement à 60 kPa. Ce léger rodage pourrait expliquer l'amélioration des performances observée après plusieurs coulées de béton sur des parois coffrantes similaires. Au-delà, dans la région B, les variations deviennent positives jusqu'à 25 % à 110 kPa laissant penser à des volumes de matière dans les pics supérieurs après frottement du B32. La figure 4.5a présente la topographie 3D de la peau PMr1 après un frottement à 110 kPa. La formation de bourrelets provoquée par le rayage de la

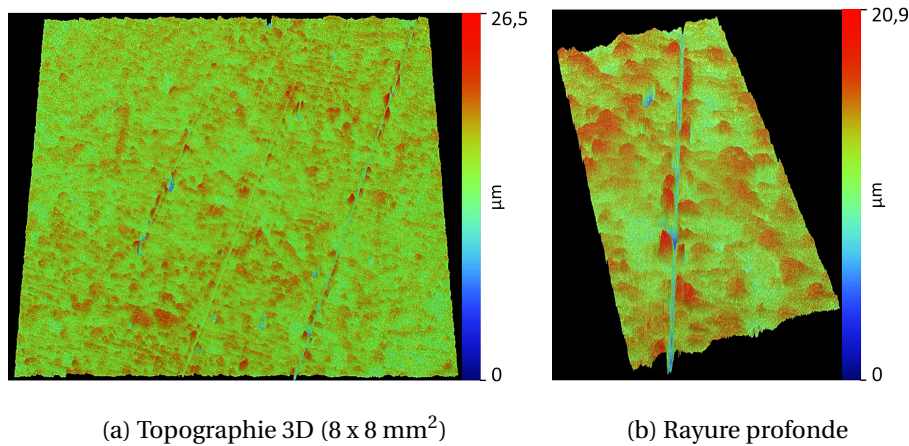


FIGURE 4.5 – Surface de la peau coffrante PMr1 suite à la friction du béton B32 à 110 kPa.

surface pourrait expliquer cette augmentation de matière dans les aspérités. Concernant les rayures résultantes présentées sur la figure 4.5b, les mesures interférométriques montrent que celles-ci ne dépassent pas 70 µm de largeur suggérant une usure provoquée principalement par les fines et non les granulats d'après les granulométries respectives des figures 2.2 et 2.1. Également, celles-ci peuvent atteindre plus de 15 µm de profondeur, soit une pénétration au-travers de la couche dans l'acier, ce qui justifie les traces d'oxydation observées précédemment lors de frottement à 110 kPa.

Sur la figure 4.6, la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau PMr2 ne montre pas de tendance significative en fonction de la pression suggérant une très faible usure dans la plage de pression étudiée. De plus, ce paramètre semble être négatif suggérant également un mécanisme de rodage des pics. La surface de la paroi présentée sur la figure 4.7a ne montre pas de topographie altérée suite aux frottements du béton, ce qui est en adéquation avec le comportement du volume ΔV_{mp} . En réalité, la rugosité élevée ($S_a = 3,3 \mu\text{m}$) et la grande amplitude des hauteurs ($\approx 9 \mu\text{m}$) cachent le processus d'usure du PMr2. Une variation faible inférieure à 10 % est quantifiée avant et après friction du béton. Toutefois, la friction de gros granulats à 110 kPa provoque des rayures ponctuelles de 7 µm de profondeur observable sur la figure 4.7b.

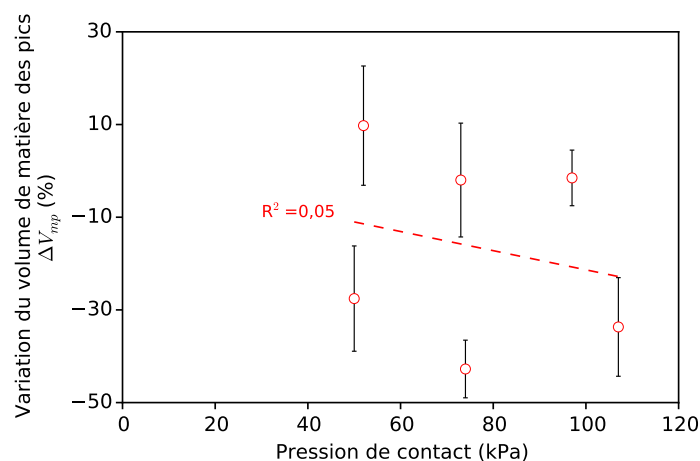


FIGURE 4.6 – Évolution de la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau coffrante PMr2 en fonction de la pression de contact P_b suite à la friction du béton B32.

Le frottement du béton B32 provoque une forte dégradation surfacique de la peau coffrante RPa1' engendrant une augmentation continue du volume de matière des pics ΔV_{mp} observée sur la figure 4.8. Le volume des pics croît linéairement de 50 % à 60 kPa jusqu'à plus de 150 % pour des pressions

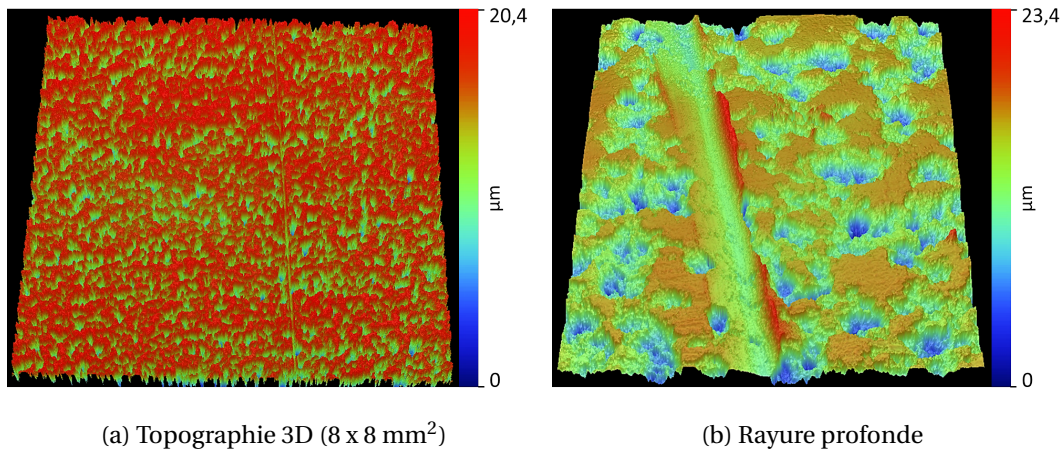


FIGURE 4.7 – Surface de la peau coffrante PMr2 suite à la friction du béton B32 à 110 kPa.

de 110 kPa. Cette variation positive et continue implique donc une quantité de matière plus élevée en extrême surface. Dans le même cas que la paroi PMr1, cette augmentation est en partie expliquée par la formation de bourrelets latéraux de par et d'autre des rayures observées sur la figure 4.9. Cependant, la dégradation du revêtement coffrant RPa1' est 10 fois supérieure à celle de la paroi PMr1 avec des rayures atteignant cent micromètres de profondeur. Ce manque de robustesse de la peau coffrante RPa1' est en corrélation avec une dureté de surface 60 fois plus faible par rapport aux peaux coffrantes PMr1 et PMr2.

Dans cette étude, les variations des volumes de matière des pics ΔV_{mp} à une pression donnée montrent d'importantes dispersions à la suite des essais tribologiques. En effet, la friction du béton est appliquée sur des surfaces de l'ordre de la centaine de centimètres carrés alors que les mesures interférométriques sont effectuées à l'échelle millimétrique et micrométrique. De ce fait, un coefficient de corrélation R^2 compris entre 0,6 à 0,7 est acceptable.

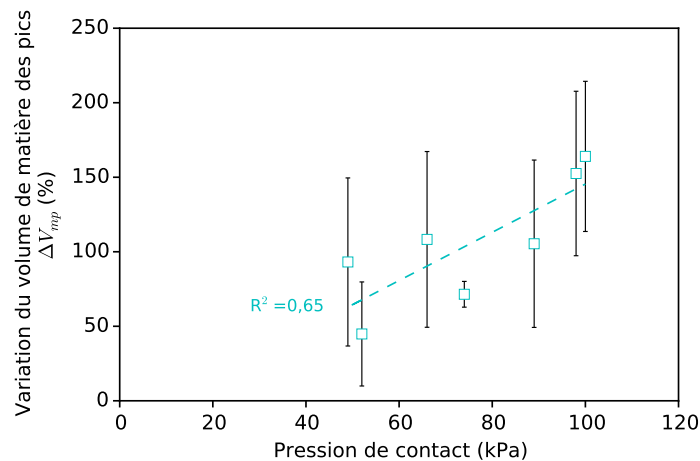


FIGURE 4.8 – Évolution de la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau coffrante RPa1' en fonction de la pression de contact P_b suite à la friction du béton B32.

Les analyses interférométriques réalisées sur la surface des peaux coffrantes après des essais de frottement montrent des surfaces légèrement rayées pour les références PMr1 et PMr2 à fortement dégradées pour la RPa1'. Ces dégradations de surface sont provoquées par la friction du béton sous une pression de contact imposée. Cependant, sur site, la poussée du béton contre les coffrages est principalement observée lorsque le béton est immobile, c'est-à-dire en frottement statique. Par conséquent, les frottements mesurés et la dégradation qui en résulte semblent être surestimés lors

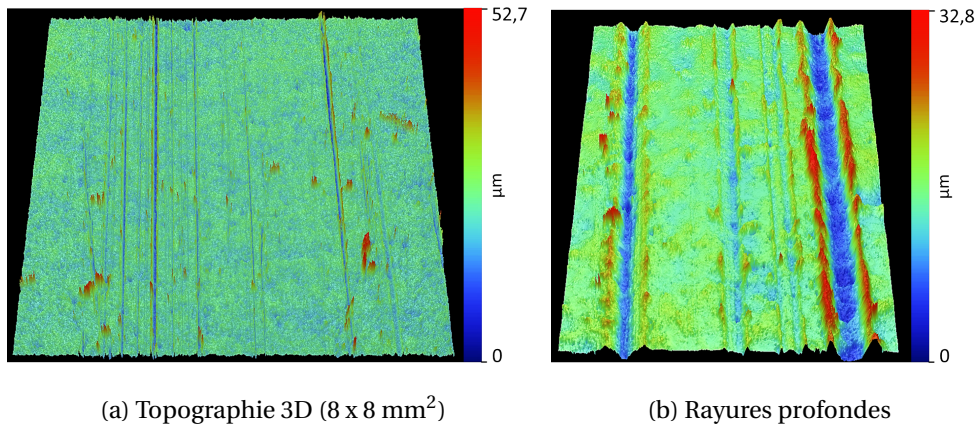


FIGURE 4.9 – Surface de la peau coffrante RPa1' suite à la friction du béton B32 à 110 kPa.

des essais tribologiques.

Pour confirmer les tendances observées précédemment et vérifier le comportement à l'usure des surfaces coffrantes étudiées, des parois identiques déjà employées sur sites sont analysées par la suite.

4.4.3 Caractérisation de l'usure de parois coffrantes utilisées sur site

Dans le but de comparer la dégradation des surfaces induite lors des essais tribologiques à celle provoquée en conditions réelles, des échantillons de 50 x 50 mm² de peaux coffrantes PMr1, PMr2 et RPa1' sont récupérés sur des coffrages qui ont déjà été utilisés sur site. Celles-ci sont mentionnées par l'indice c dans la suite de ce travail de recherche. Les échantillons de PMr1_c et PMr2_c proviennent de peaux de coffrage ayant subi plusieurs centaines de coulages alors que les coupons de revêtement coffrant RPa1'_c ont subi quelques coulages.

La figure 4.10a présente l'état de surface de la peau PMr1_c après une utilisation abondante sur site. Une forte altération de la peau coffrante est observée avec des dépôts grisâtres suggérant l'adhérence du béton et des traces rougeâtres laissant penser à la formation de produits de corrosion. Ces derniers forment de hauts plateaux créant une amplitude de rugosité 10 fois plus élevée par rapport à une peau PMr1 neuve d'après la figure 4.10b. Par ailleurs, la rugosité S_a augmente fortement en atteignant $5,0 \pm 1,6 \mu\text{m}$, ce qui équivaut à un facteur d'usure égale à +5,6. Dans le cas de la paroi PMr1_c nombreuses fois utilisées sur site, aucune marque de rayage due à la friction du béton n'est observée telle qu'il a été vu lors des essais tribologiques. En effet, le dépôt de béton semble masquer les rayures. Cependant, les traces de corrosion observées en extrême surface impliquent la pénétration dans l'acier.

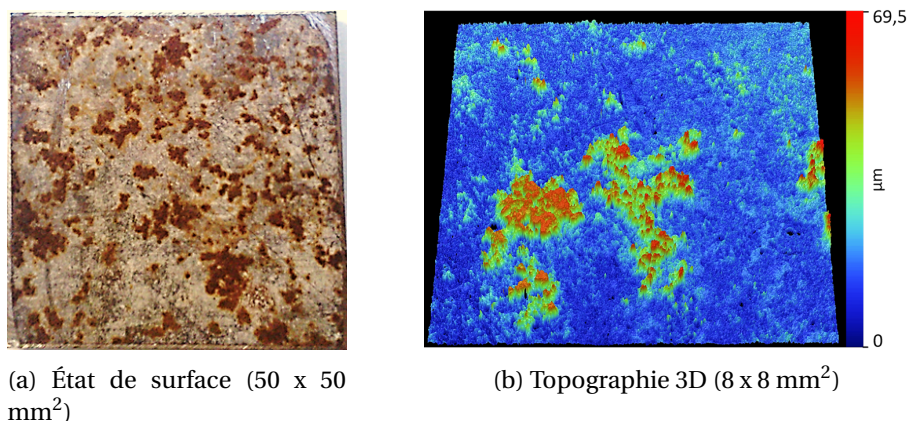


FIGURE 4.10 – Surface de la peau coffrante PMr1_c après utilisation sur site.

La présence de béton et de produits de corrosion sur la surface du PMr1_c est vérifiée par analyses DRX en différentes régions. La figure 4.11 regroupe les diagrammes DRX de la paroi neuve ainsi que de la paroi usée.

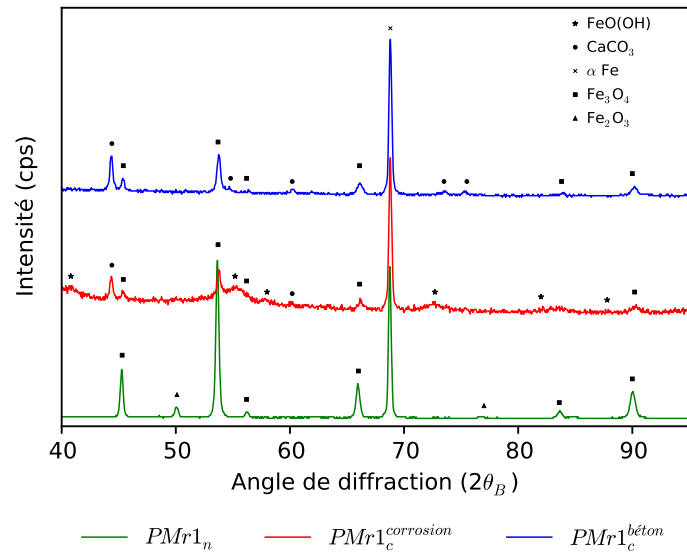
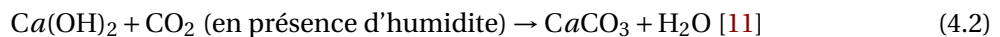


FIGURE 4.11 – Diagrammes DRX de la paroi PMr1 neuve (PMr1_n) et utilisée sur site (PMr1_c^{corrosion} et PMr1_c^{béton}).

Premièrement, on remarque que les pics de diffraction du Fe₂O₃ d'après la fiche JCPDS 33-0664 ne sont plus visibles sur les diagrammes du PMr1_c^{corrosion} et PMr1_c^{béton}. Cela pourrait signifier que la couche externe d'hématite s'est totalement érodée lors des coulages successifs. Concernant la couche interne de Fe₃O₄, les pics de diffraction sont moins intenses sur la peau usée (d'après la fiche JCPDS 87-2334) suggérant une érosion partielle de la magnétite. La détection des oxydes Fe₂O₃ et Fe₃O₄ pourrait être masquée par la couche de béton et/ou de corrosion toutefois, la diffraction de la matrice α Fe (fiche JCPDS 87-0721) est toujours intense sur la peau usée rejetant cette hypothèse. Les analyses DRX des zones rougeâtres PMr1_c^{corrosion} indiquent la formation d'oxyhydroxyde de fer FeO(OH) selon la fiche JCPDS 75-7594. Ces composés formés par l'oxydation du fer confirme donc la corrosion de la peau PMr1 par pénétration dans l'acier à travers la couche fonctionnelle. Ce résultat est en accord avec les essais tribologiques où les frottements du béton avaient également engendré des pénétrations locales dans le métal. Pour finir, des carbonates de calcium CaCO₃ (fiche JCDPS 47-1743) sont largement détectés sur les diagrammes PMr1_c^{corrosion} et PMr1_c^{béton}. Ces composées proviennent de la carbonatation des hydroxydes de calcium Ca(OH)₂ initialement déposés à la surface des parois selon l'équation chimique suivante :



En effet, ces carbonates se forment au cours du temps généralement lorsque les coffrages sont stockés à l'extérieur. Par conséquent, leur détection par DRX sur les parois analysées est logique.

Pour la deuxième peau coffrante PMr2, l'usure provoquée par une utilisation abondante est présentée sur la figure 4.12. De légères rayures sont visibles mais aucune trace de corrosion n'est observée en surface. Sur la figure 4.12b, la cartographie 3D de la topographie du PMr2_c montre principalement un aplatissement des plateaux en surface après la succession des coulages. L'amplitude de rugosité a augmenté de 60 % mais les hauteurs moyennes des aspérités sont 30 % plus faibles ce qui confirme le rodage partiel de la paroi. Avec une rugosité S_a final de 4,6 μm, le facteur d'usure de la peau PMr2 est égale à +1,4 soit quatre fois moins élevé qu'avec la peau PMr1. La faible dégradation du PMr2 confirme la bonne robustesse de la peau caractérisée précédemment lors des essais tribologiques.

Concernant les analyses chimiques, les diagrammes DRX de la paroi neuve et usée ne présentent pas de différences significatives sur la figure 4.13, suggérant aucune modification chimique de la surface. De ce fait, en plus d'une bonne résistance mécanique, la paroi PMr2 semble posséder une robustesse chimique vis-à-vis du béton.

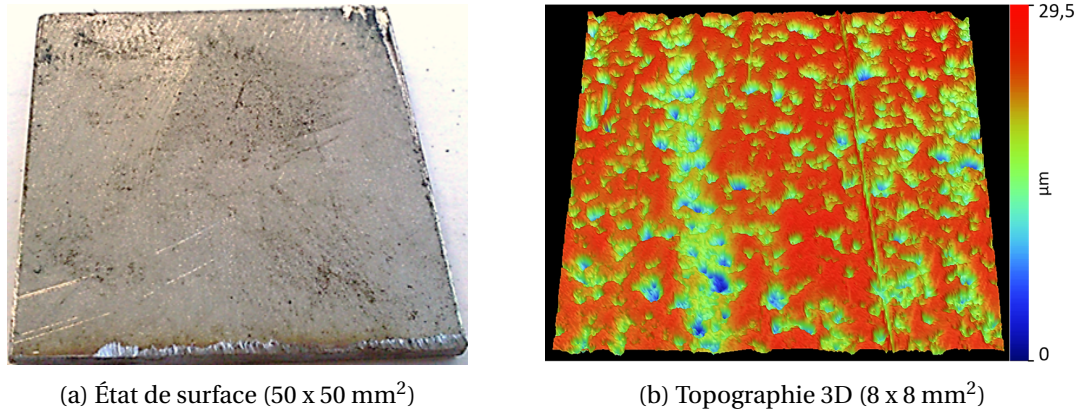


FIGURE 4.12 – Surface de la peau coffrante PMr_{2c} après utilisation sur site.

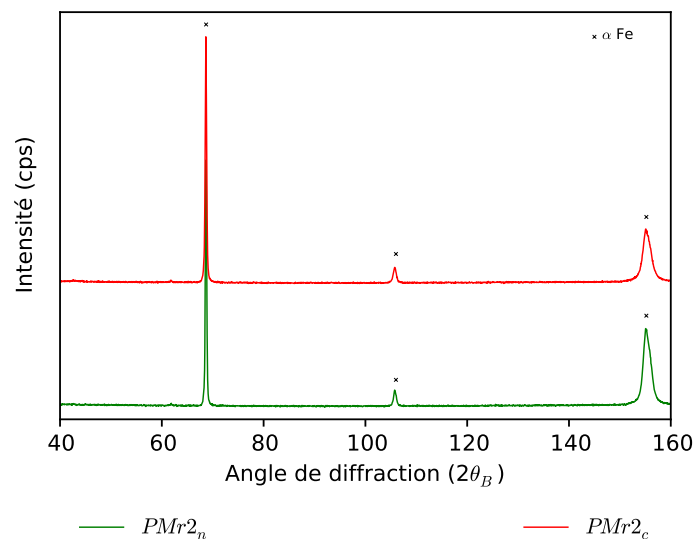


FIGURE 4.13 – Diagrammes DRX de la paroi PMr2 neuve (PMr_{2n}) et utilisée sur site (PMr_{2c}).

Les figures 4.14a et 4.14b montrent de nombreuses rayures sur la surface coffrante du RPa1' après une dizaine de coulages. Cet état de surface dégradé est semblable à celui observé suite aux essais tribologiques confirmant donc une plus faible résistance à la friction du béton. De plus, ces résultats mettent en avant une durée de vie plus courte des parois polymères par rapport à celles métalliques pour une utilisation sur site, ce qui est en accord avec les recommandations de la littérature.

Malgré une utilisation très diversifiée des parois coffrantes sur chantier, des tendances similaires ont toutefois été observées avec les essais tribologiques. Généralement, les résultats ont montré que le frottement du béton contre les peaux polymères provoque une dégradation plus importante de la surface par rapport aux peaux métalliques. Cependant, la répétabilité des coulages engendre progressivement l'érosion des surfaces métalliques. Dans le cas de la paroi coffrante PMr1, l'usure des couches d'oxyde cause une corrosion importante de l'acier dégradant considérablement l'état de surface de la peau.

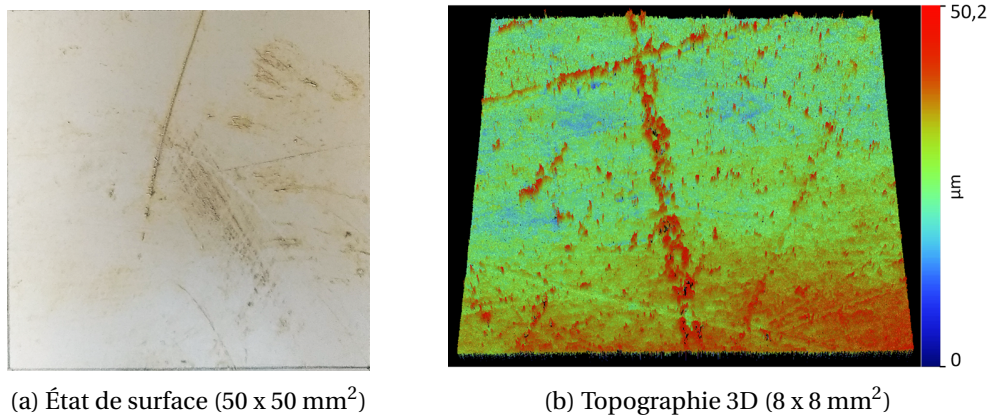


FIGURE 4.14 – Surface de la peau coffrante RPa1'c après utilisation sur site.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la friction du béton contre les parois coffrantes a été étudiée afin de déterminer leur robustesse à l'usure. Pour cela, une série d'essais tribologiques a été réalisée au moyen d'un tribomètre plan/plan simulant le coulage du béton dans les coffrages. Les résultats ont montré que le frottement du béton est directement impacté par les caractéristiques de la couche limite formée à l'interface béton-paroi. Avec des bétons fluidifiés, la répulsion des fines génère une couche moins compacte entraînant une friction peu élevée contre les peaux coffrantes. De ce fait, ces faibles frottements engendrent une altération peu marquée de la surface de ces peaux. En revanche, avec l'utilisation de bétons standards, les coefficients de frottement sont deux à quatre fois plus élevés et les parois sont plus endommagées. Cette dégradation est étroitement liée à la dureté de leur surface et l'analyse du volume de matière des pics V_{mp} a permis de déterminer différents mécanismes d'usure. Les peaux coffrantes métalliques dures tendent à s'éroder partiellement lors des coulages alors que le frottement du béton provoque un fort rayage des peaux polymères généralement plus molles. Toutefois, si l'usure des parois métalliques est importante et engendre la délamination de la couche fonctionnelle, la peau coffrante se corrode.

Dans le chapitre 5, l'adhérence du béton sera caractérisée à travers le développement d'un essai instrumenté simulant le décoffrage des voiles sur site. L'association des résultats de frottement et d'adhérence du béton contre les parois coffrantes permettra de dresser une compréhension générale des phénomènes interfaciaux béton-coffrage et de déterminer par la suite la fonctionnalité des signatures surfaciques des peaux coffrantes.

4.6 Références

- [1] S. Bouharoun, “Comportement tribologique des huiles de décoffrage à l’interface béton/coffrage - Influence de la formulation du béton,” *Thèse de doctorat, Université d’Artois*, 2011. 103
- [2] C. Djelal, P. De Caro, L. Libessart, I. Dubois, and N. Pébère, “Comprehension of demoulding mechanisms at the formwork/oil/concrete interface,” *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 571–581, 2008.
- [3] S. Bouharoun, “Friction behaviour of fresh concrete in the vicinity of formwork,” *Journal of the South African institution of civil engineering*, vol. 55, no. 3, pp. 10–17, 2013.
- [4] S. Bouharoun, P. De Caro, I. Dubois, C. Djelal, and Y. Vanhove, “Effect of a superplasticizer on the properties of the concrete/oil/formwork interface,” *Construction and Building Materials*, 2013.
- [5] S. Bouharoun, Y. Vanhove, C. Djelal, P. De Caro, and I. Dubois, “Interactions between superplasticizer and release agents at the concrete/formwork interface,” *Materials Sciences and Applications*, vol. 3, pp. 384–389, 2012. 103
- [6] Y. Vanhove, “Contribution à l’étude du frottement d’un béton autoplaçant contre une surface métallique - Application aux poussées contre les coffrages,” *Thèse de doctorat, Université d’Artois*, 2001. 103
- [7] C. Djelal, Y. Vanhove, and A. Magnin, “Tribological behaviour of self compacting concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 821–828, 2004. 103
- [8] Y. Vanhove, C. Djelal, and A. Magnin, “A device for studying fresh concrete friction,” *Cement, concrete, and aggregates*, vol. 26, no. 2, pp. 35–41, 2004. 103
- [9] P. Benjamin and C. Weaver, “Measurement of Adhesion of Thin Films,” *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 254, no. 1277, pp. 163–176, 1960. 105
- [10] R. Leach, *Characterization of Areal Surface Texture*. springer ed., 2013. 106
- [11] C. Ployaert, “La Corrosion des armatures des bétons armés et précontraints,” *Fédération de l’Industrie Cimentière Belge*, p. 15, 2008. 110

Chapitre 5

Caractérisation de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes lors du décoffrage

Sommaire

5.1	Introduction	116
5.2	Élaboration de l'essai d'adhérence béton-coffrage	116
5.2.1	Hypothèses initiales	116
5.2.2	Conception du dispositif expérimental	117
5.2.2.1	Dimensionnement des éprouvettes de peaux coffrantes	117
5.2.2.2	Conception du moule à béton	118
5.2.2.3	Développement des éléments d'attache	120
5.2.3	Estimation de la déformation par simulation numérique	122
5.2.4	Fabrication du dispositif d'essai d'adhérence	124
5.3	Méthodologie de l'essai d'adhérence	128
5.4	Validation expérimentale de l'essai d'adhérence	129
5.5	Étude de la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes lors du décoffrage	131
5.5.1	Détermination des contraintes de rupture interfaciale béton-peaux coffrantes	131
5.5.2	Analyses surfaciques des peaux coffrantes suite aux essais d'adhérence	132
5.5.2.1	Quantification du pourcentage de béton arraché sur les peaux coffrantes	133
5.5.2.2	Caractérisation chimique de l'interface béton-peau coffrante	135
5.6	Conclusion	139
5.7	Références	140

5.1 Introduction

L'état de l'art présenté au chapitre 1.4 a montré que l'adhérence du béton a été fortement quantifiée dans le cadre des barres de renforcement mais peu étudiée dans le cas des **banches** lors du décoffrage. Par ailleurs, un essai d'adhérence béton-coffrage à l'échelle du laboratoire n'est pas défini et l'impact des signatures surfaciques des parois de coffrage a été peu étudié dans la littérature.

Ce chapitre sera consacré à la caractérisation de l'adhérence du béton sur les surfaces coffrantes analysées dans le chapitre 3. Pour cela, un essai expérimental instrumenté à échelle réduite est développé en s'appuyant sur la méthode de décoffrage actuelle. La conception du nouveau dispositif de l'essai d'adhérence est détaillée ainsi que la méthodologie expérimentale de son utilisation. Par la suite, les efforts nécessaires à la rupture interfaciale béton-peaux coffrantes sont mesurés. Des analyses post-mortem par traitement d'image sont effectuées pour quantifier des taux d'adhérence du béton. L'influence des signatures surfaciques des peaux coffrantes ainsi que les mécanismes régissant l'adhérence à l'interface lors du décoffrage sont enfin discutés.

5.2 Élaboration de l'essai d'adhérence béton-coffrage

L'adhérence du béton sur les peaux coffrantes peut s'étudier in-situ directement sur des coffrages. Dans ce cas, les phénomènes mis en jeu sont les plus représentatifs. Cependant, ces essais à grande échelle sont généralement couteux, chronophages et volumineux. Pour pallier ces contraintes, des mesures mécaniques à l'échelle micrométrique peuvent être réalisées afin de mesurer une rigidité de contact à l'interface entre le béton et la paroi. Ces caractérisations locales permettent de remonter à des efforts de liaison et finalement à l'adhérence du béton. Certes moins contraignantes à cette échelle de mesure très réduite, des interrogations peuvent se poser : Les analyses à l'échelle micrométrique sont-elles représentatives des phénomènes à l'échelle 1 ? Les modèles mécaniques appliqués à petite échelle sont-ils réellement valides à l'échelle métrique ?

Par conséquent, une caractérisation à l'échelle intermédiaire semble être le compromis idéal entre le ratio durée/volume d'un essai et la représentativité des mécanismes en conditions réelles. Dans le but de concevoir cet essai à l'échelle du laboratoire, les hypothèses initiales prises en compte sont décrites dans un premier temps.

5.2.1 Hypothèses initiales

Dans le but de mesurer les efforts de rupture de l'interface entre le béton et les peaux coffrantes, l'essai expérimental développé s'appuie sur le processus de décoffrage actuellement employé sur site ainsi que sur certaines hypothèses mécaniques. Lors du décoffrage des **voiles** verticaux, les **banches** sont initialement inclinées vers l'arrière avant d'être totalement retirées, ce qui permet d'évacuer l'eau et l'air piégés à l'interface béton-coffrage. L'angle de bascule d'un coffrage étant très faible, le procédé de décoffrage est mécaniquement considéré comme un tirage uniaxial (figure 5.1). C'est dans ces conditions que le nouvel essai d'adhérence est développé en s'inspirant des tests standards d'adhésion de type "pull-off test" qui sont réalisés pour mesurer l'adhérence entre deux solides.

Pour assurer le tirage unidirectionnel des coffrages à l'échelle du laboratoire, l'appareil de traction 1185 d'Instron est utilisé. C'est à partir de ses caractéristiques mécaniques et dimensionnelles présentées dans le paragraphe 2.5.1 du chapitre 2 que le dispositif expérimental de l'essai d'adhérence béton-coffrage est conçu. Les réflexions sur son développement et les étapes de fabrication du dispositif sont présentées par la suite.

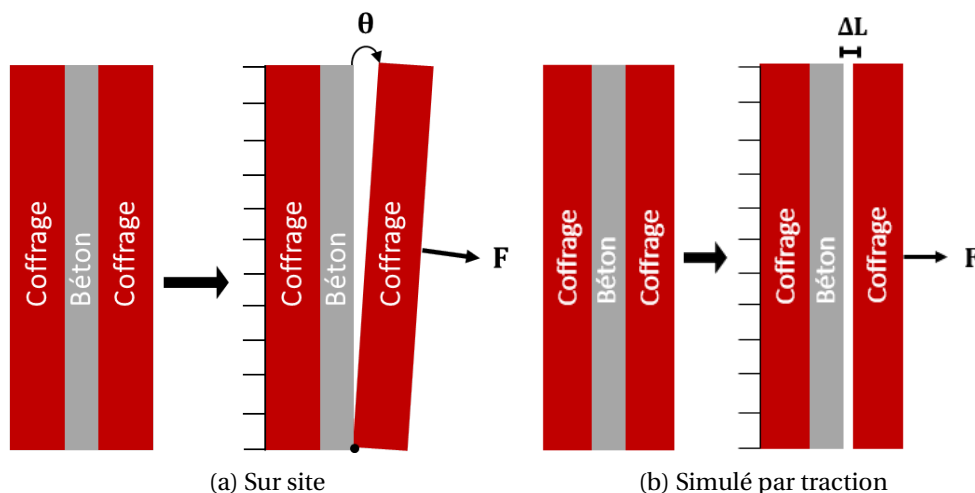


FIGURE 5.1 – Représentations schématiques des procédés de décoffrage.

5.2.2 Conception du dispositif expérimental

L'objectif principal dans le développement du dispositif mécanique est d'établir un tirage uniaxial pur lors du décoffrage. Par conséquent, les différents composants du montage expérimental sont conçus de manière à être parfaitement alignés avec l'effort de traction. Par ailleurs, cet effort doit aussi être perpendiculaire à l'interface béton-coffrage. A partir des conditions décrites ci-dessus, le dispositif est conçu en trois parties qui sont : une éprouvette de paroi coffrante représentant la **banches**, un moule permettant de contenir le béton et un système d'attaches garantissant le tirage unidirectionnel de la machine de traction. Pour l'élaboration des plans techniques des différentes pièces du montage, le logiciel de conception assistée par ordinateur CATIA est utilisé. Tous les schémas techniques avec les cotations tolérancées et les contraintes géométriques sont disponibles en annexe dans la partie A.3.

Le développement et la conception des trois composants sont détaillés individuellement dans les paragraphes suivants.

5.2.2.1 Dimensionnement des éprouvettes de peaux coffrantes

La première partie développée lors de la réalisation du montage expérimental est l'éprouvette de paroi coffrante. D'après la littérature, les contraintes de rupture interfaciale béton-coffrage σ_{ri} sont plutôt faibles, de 0,03 MPa [1] à 0,185 MPa [2] pour des parois en acier. Par conséquent, les efforts de tirage attendus devraient également être peu élevés. De ce fait, le coffrage est directement représenté par une peau coffrante dans le nouveau dispositif mécanique.

Une des premières interrogations qui se pose est donc la forme de l'aire de contact entre le béton et la paroi coffrante. Afin d'homogénéiser les efforts de traction et ainsi éviter les ruptures anticipées par des effets de bords, une interface circulaire béton-peau coffrante est choisie.

Ensuite, le rayon minimal de contact r_{cmin} entre le béton et les éprouvettes coffrantes est déterminé d'après les contraintes de rupture interfaciale béton-acier σ_{ri} citées ci-dessus. En raison de la calibration de la cellule de force de la machine de traction (cf. paragraphe 2.5.1), une force minimale F_{min} de 1000 N est prise en compte et le rayon minimal r_{cmin} est déterminé d'après l'équation suivante :

$$\sigma_{ri} = \frac{F_{min}}{\pi \cdot r_{cmin}^2} \Rightarrow r_{cmin} = \sqrt{\frac{F_{min}}{\sigma_{ri} \cdot \pi}} \quad (5.1)$$

Le tableau 5.1 résume les rayons de contact minimums calculés selon l'équation 5.1. Le rayon interfacial minimal acceptable pour avoir une force de rupture supérieure ou égale à 1000 N est de

103 mm. Par sécurité, une marge de 20 % est appliquée soit un rayon de contact de 125 mm entre le béton et les peaux coffrantes. Si le rayon de contact r_c est de 125 mm, les éprouvettes ont cependant un diamètre supérieur de 330 mm dans le but de supporter le moule à béton d'une épaisseur de 40 mm, ce qui sera développé dans la section suivante 5.12b.

Référence	[1]	[2]
Contrainte de rupture interfaciale σ_{ri}	0,03 MPa	0,185 MPa
Force minimale	1000 N	1000 N
Rayon minimal	103 mm	42 mm

TABLEAU 5.1 – Rayons minimums calculés selon les valeurs de contrainte à la rupture d'une interface béton-peau coffrante acier.

Même si les efforts de rupture interfaciale attendus sont peu élevés, la faible épaisseur des peaux coffrantes (5 mm) ainsi que leurs grandes dimensions peuvent potentiellement engendrer la déformation des éprouvettes coffrantes pendant le tirage. Par sécurité, des raidisseurs rectangulaires de 30 x 10 mm² en acier sont rajoutés derrière les peaux circulaires afin de limiter leur distorsion. Ceux-ci sont positionnés afin de rigidifier l'éprouvette uniformément en restant représentatif d'un coffrage industriel. Pour faciliter la mise en place et garantir la perpendicularité des raidisseurs sur les peaux coffrantes, une nouvelle pièce cylindrique composée de guides latéraux est développée (figure 5.2a). Cette barre de guidage de 35 mm de diamètre est parfaitement disposée au centre des peaux circulaires grâce à une poche de 0,8 mm de profondeur préalablement réalisée. Par conséquent, la coaxialité entre la peau circulaire et la pièce cylindrique est maintenue. Cette dernière assurera également la liaison entre le dispositif final et la machine de traction par le biais d'un filetage central. La figure 5.2b présente le schéma de l'éprouvette de peau coffrante du nouvel essai d'adhérence béton-coffrage.

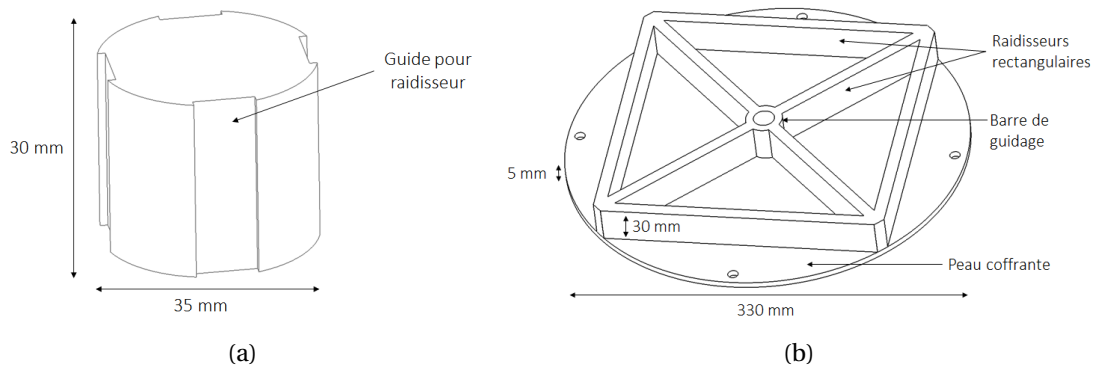


FIGURE 5.2 – (a) Schéma de la barre de guidage, (b) Schéma de l'éprouvette de peau coffrante.

Après avoir dimensionné l'éprouvette de peau coffrante, la conception du moule à béton du dispositif expérimental est détaillée dans la section suivante.

5.2.2.2 Conception du moule à béton

Afin de maintenir le béton frais contre l'éprouvette coffrante lors de son durcissement, un moule à béton est développé. En raison de la géométrie circulaire choisie pour les peaux coffrantes, un moule cylindrique est par conséquent considéré.

Dans le but de faciliter une mise en œuvre manuelle du béton, une masse limite m_{max} de béton durci de 5 kg est initialement imposée. A partir du moule cylindrique, une hauteur maximale de béton coulé h_{max} est calculée d'après l'équation :

$$\rho_b = \frac{m_{max}}{V_{moule}} \Rightarrow \rho_b = \frac{m_{max}}{\pi \cdot r_c^2 \cdot h_{max}} \Rightarrow h_{max} = \frac{m_{max}}{\pi \cdot r_c^2 \cdot \rho_b} \quad (5.2)$$

avec $\rho_b = 2300 \text{ kg.m}^{-3}$. En prenant un rayon de contact r_c de 125 mm et une masse maximale de 5 kg, la hauteur maximale de béton h_{max} (équivalente à la hauteur du moule) est égale à 40 mm. De plus, cette hauteur calculée est également deux fois supérieure à la dimension maximale des granulats utilisés pour la formulation du béton (16 mm d'après le paragraphe 2.5.2). Ainsi, les bétons coulés dans le moule présentent les trois régions granulaires détaillées sur la figure 1.15 dans le cadre des coffrages. A l'intérieur du moule, une marche de 20 mm avec une contre-dépouille de 5° est ajoutée afin de bloquer le béton lors du tirage sans le contraindre mécaniquement. Finalement, en respectant le rayon de contact r_c de 125 mm, le diamètre extérieur du moule vaut 330 mm en considérant la marche et l'épaisseur du moule. La figure 5.3 schématise le dimensionnement du moule à béton.

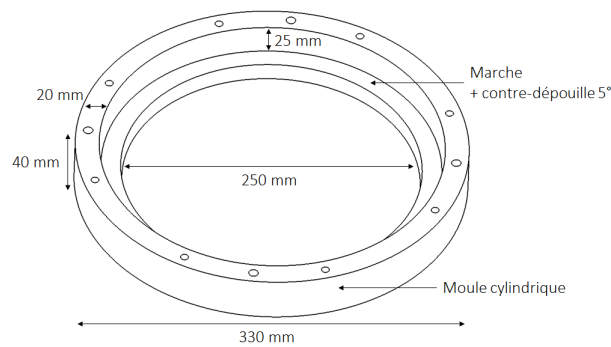


FIGURE 5.3 – Schéma du moule à béton.

Dans le but de réaliser un tirage uniaxial et caractéristique du décoffrage du béton de la peau coffrante, un premier dispositif est imaginé à l'aide d'une barre ancrée dans le béton. Cependant, la faible hauteur du moule limite la pénétration d'une barre dans le béton. De plus, l'alignement de celle-ci au centre du moule semble délicate. Par conséquent, un nouveau dispositif adapté au moule à béton doit être développé pour assurer la concentricité des composants lors du tirage. Pour cela, un support cylindrique de 330 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur est élaboré afin qu'il puisse se superposer parfaitement au-dessus du moule. La figure 5.4 présente le support supérieur du moule à béton qui permet la coaxialité de ce dernier avec l'éprouvette coffrante. Sur le même principe que la peau coffrante, un filetage central qui assure l'alignement avec la machine de traction a été réalisé.

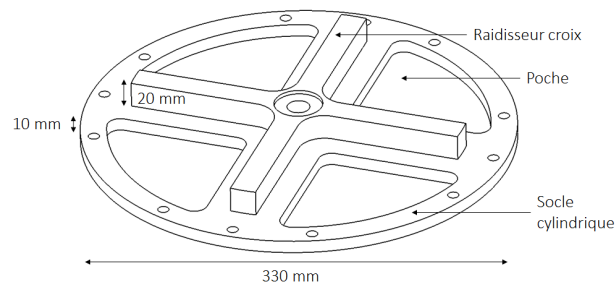


FIGURE 5.4 – Schéma du support supérieur du moule à béton.

Afin de faciliter la manipulation du dispositif final, le moule à béton et le support supérieur sont réalisés en **alliage d'aluminium (AA)** plus léger que les aciers. Pour son excellente usinabilité et son aptitude au soudage, l'AA 2007 est choisi. Avec des masses volumiques moyennes de 7900 et 2800 kg.m^{-3} respectivement pour l'acier S235 et l'AA 2007, un gain de 180 % en masse est obtenu. L'ensemble du dispositif béton compris ne dépasse pas 20 kg afin de faciliter la mise en œuvre des essais d'adhérence.

Dans le but d'éviter une déformation du support supérieur du moule pendant le tirage, un raidisseur en forme de croix de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ est placé au centre de la pièce. Également, des poches débouchantes sont créées à travers le socle cylindrique pour permettre le coulage du béton lorsque le dispositif est totalement assemblé. Finalement, pour faciliter le montage et démontage des différentes pièces du moule, huit vis en aluminium de filetage M8 sont choisies pour ne pas dégrader les

filetages réalisés dans le moule.

Dans la partie suivante, les composants permettant d'associer le dispositif de l'essai d'adhérence avec la machine de traction sont présentés.

5.2.2.3 Développement des éléments d'attache

La figure 5.5 montre le socle initialement présent sur la traverse haute et basse de la machine de traction. Par défaut, ceux-ci possèdent des trous à goupille afin d'immobiliser mécaniquement les mors. Les pièces d'attache sont par conséquent spécialement dimensionnées pour s'adapter à ces socles.

De plus, pour faciliter la mise en place des attaches sur l'éprouvette de peau coffrante et le moule à béton, des filetages sont réalisés sur celles-ci.



FIGURE 5.5 – Socle de la machine de traction.

La figure 5.6 présente la barre d'attache conçue pour l'éprouvette de peau coffrante avec une partie filetée sur 30 mm. Un contre écrou est placé sur ce filetage pour éviter le dévissage de la barre.

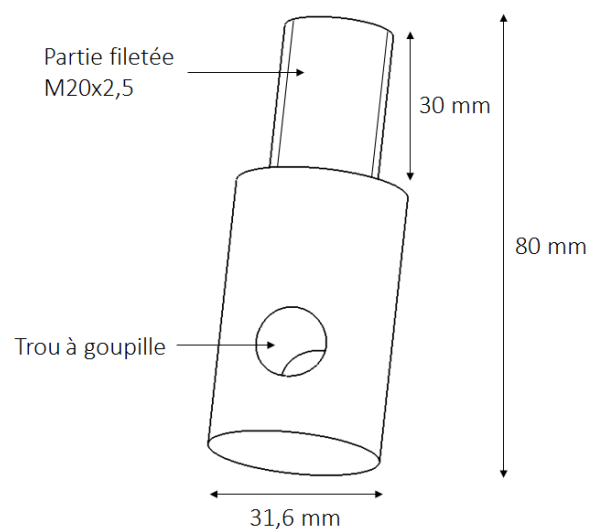


FIGURE 5.6 – Schéma de la barre d'attache de l'éprouvette de peau coffrante.

Pour l'attache du support supérieur du moule à béton, un dispositif légèrement plus complexe est développé. En effet, un embout à rotule mâle est ajouté au-dessus du moule afin de maintenir

l'alignement et le parallélisme du dispositif pendant le tirage (figure 5.7). Par conséquent, l'interface béton-peau coffrante est continûment sollicitée en traction pure. Cependant, la rotule possède une limite angulaire de 9° selon les plans XY et XZ. Du fait de la présence de l'embout à rotule, deux pièces d'attache supplémentaires sont également développées. La première vissée sur le support du moule est évidée en U pour accueillir l'embout par le biais d'une goupille. La seconde vissée à l'embout est directement goupillée au socle de la machine de traction. Les schémas des deux pièces d'attache sont affichés sur la figure 5.8.

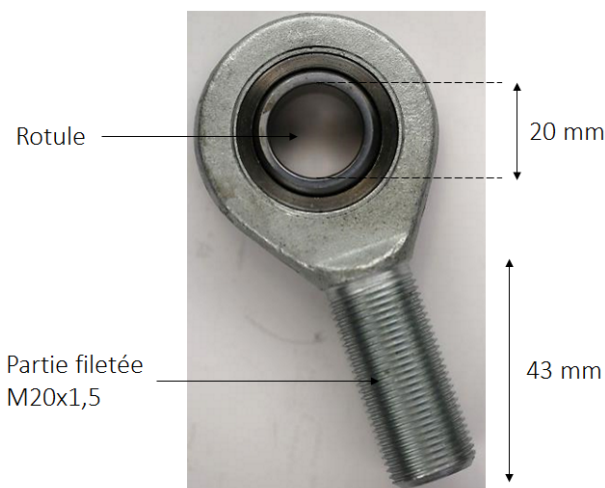


FIGURE 5.7 – Embout à rotule mâle d'Alpes Transmission Mécanique.

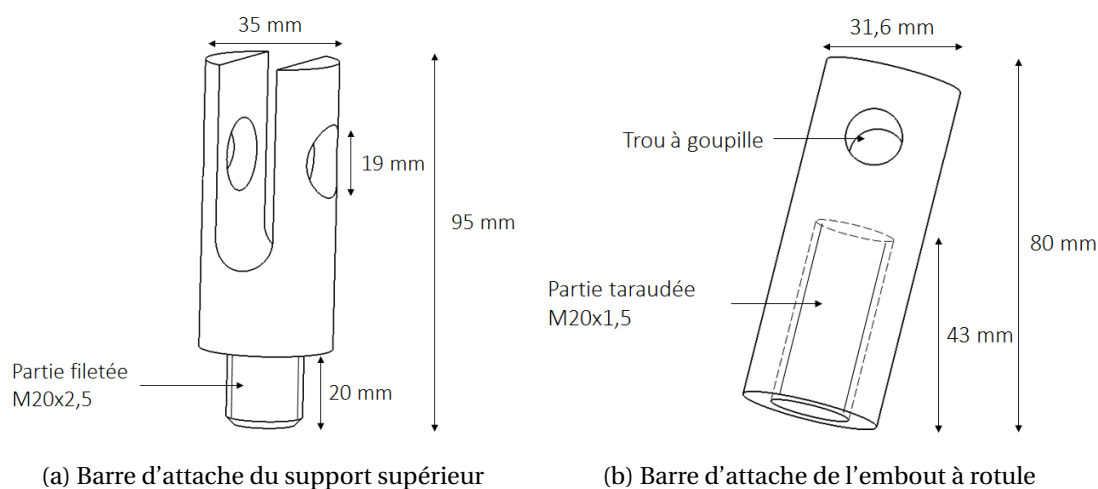


FIGURE 5.8 – Schémas des attaches du moule à béton.

Les pièces d'attache développées précédemment ont de faibles dimensions devant l'éprouvette de peau coffrante et le moule à béton. De ce fait, leurs masses sont négligeables et par conséquent ces pièces sont réalisées en acier inoxydable pour éviter une déformation de type longitudinale.

Finalement, des vis en acier inoxydable à filetage partiel sont utilisées afin d'assembler le moule à béton avec l'éprouvette de peau coffrante et maintenir le dispositif pendant le durcissement du béton. Ces vis sont choisies pour éviter le filetage du moule et de la peau coffrante. Dans les conditions d'utilisation du dispositif de l'essai d'adhérence, le béton n'engendre pas de pression pendant son durcissement, par conséquent ce système de serrage est bien adapté. Enfin, pour ne pas perturber la surface de contact béton-peau coffrante, ces vis sont placées vers l'extérieur du dispositif.

Cette partie s'est consacrée au développement d'un nouveau dispositif permettant de réaliser un décoffrage représentatif du béton des peaux coffrantes. Les différents composants du montage qui sont l'éprouvette de peau coffrante, le moule à béton avec son support supérieur ainsi que les divers éléments d'attache sont respectivement développés en s'appuyant sur un raisonnement logique et structuré.

Pour vérifier la déformation du dispositif de l'essai de d'adhérence, des simulations numériques par éléments finis sont réalisées dans la section suivante.

5.2.3 Estimation de la déformation par simulation numérique

L'objectif de cette section est d'analyser le comportement en déformation de l'éprouvette de peau coffrante et du moule à béton lors d'un tirage uniaxial. Pour cela, des simulations numériques par éléments finis sont réalisées avec le logiciel de calculs ABAQUS. Les distorsions finales mesurées permettront de justifier l'ajout de raidisseurs sur les différentes pièces du dispositif. Les déformations géométriques recherchées doivent être suffisamment faibles pour maintenir une traction pure à l'interface béton-peau coffrante.

	Acier S235	AA 2007
Module d'Young (GPa)	210	72
Coefficient de Poisson	0,28	0,33

TABEAU 5.2 – Propriétés mécaniques des matériaux appliquées pour la simulation d'éléments finis.

Pour réaliser les calculs de déformation, l'acier de construction S235 et l'alliage d'aluminium 2007 sont respectivement choisis pour l'éprouvette et le moule. Les propriétés matérielles des deux métaux sont présentées dans le tableau 5.2. La déformation des pièces est caractérisée selon l'axe Z où une force de 1000 N est appliquée dans la même direction. Afin d'effectuer l'analyse des structures, des éléments de maillage quadrilatères ou tétraédriques dans le cas de géométries plus complexes sont utilisés avec une taille de maillage égale à 2 mm. Du fait de la symétrie axiale, un quart des pièces est simplement étudié et par conséquent des conditions limites de symétrie aux bords sont appliquées. Selon l'axe de symétrie, celles-ci sont :

$$\text{Selon l'axe X : } \begin{cases} UY = 0, \\ URX = 0, \\ URZ = 0. \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\text{Selon l'axe Y : } \begin{cases} UX = 0, \\ URY = 0, \\ URZ = 0. \end{cases} \quad (5.4)$$

La figure 5.9 présente les résultats de la simulation du moule à béton suite au tirage axial en Z. En plus des conditions limites de symétrie selon X et Y, la surface du dessous est encastrée (représentée par l'équation $UX=UY=UZ=URX=URY=URZ=0$ sur la figure 5.9a), ce qui signifie qu'elle est indéformable. En effet, cette zone repose uniquement sur l'éprouvette de peau coffrante, par conséquent elle ne peut pas se déformer sous sollicitation mécanique. La figure 5.9b montre que le tirage en Z provoque principalement une déformation de la partie haute vers l'intérieur du moule (les flèches roses représentent la direction de l'effort appliqué). Cependant, celle-ci est très faible et ne dépasse pas le micromètre sur l'ensemble de la pièce d'après la courbe de la figure 5.9c. De ce fait, le dimensionnement du moule et le choix de l'aluminium pour la fabrication de celui-ci sont justifiés.

Ensuite, l'impact du raidisseur en croix sur la déformation du support supérieur du moule à béton est analysé par calcul numérique. Pour cela, le comportement mécanique de la pièce est étudié avec

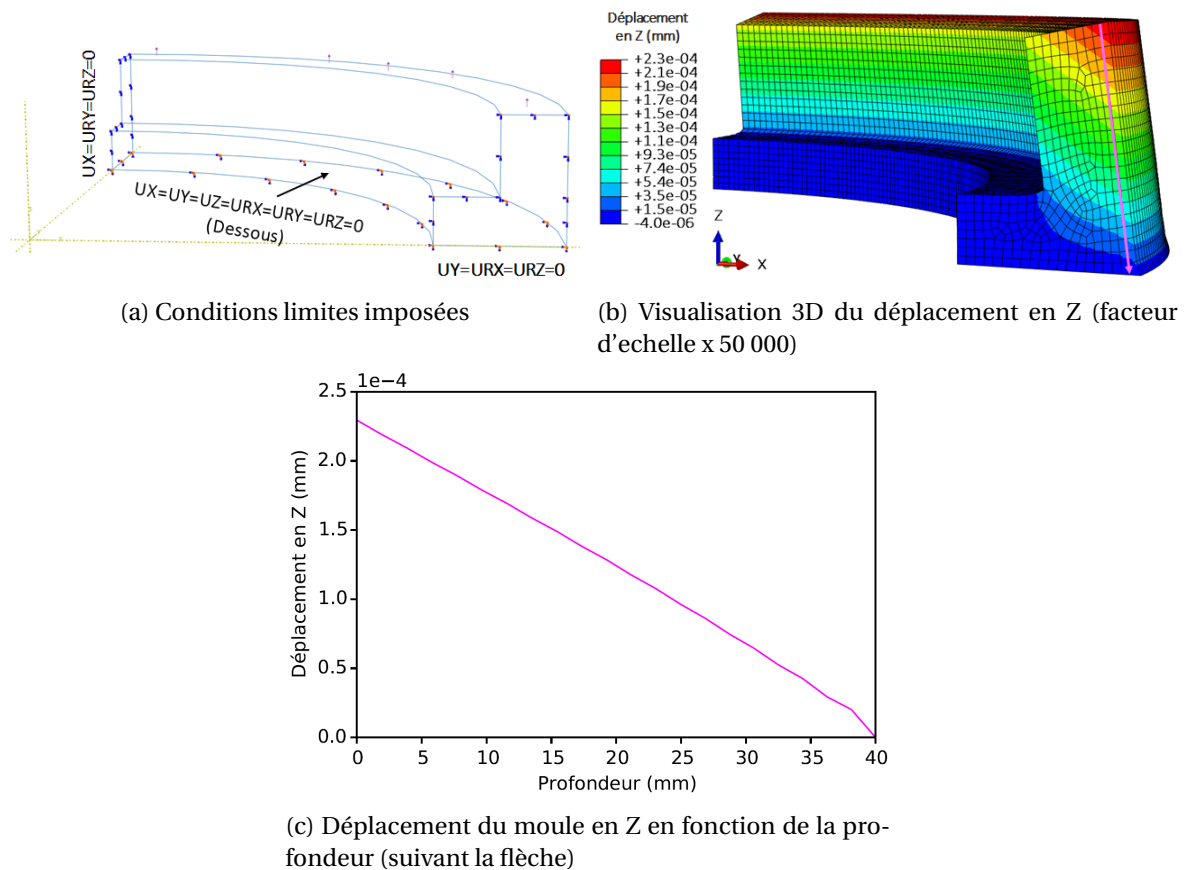


FIGURE 5.9 – Simulation numérique de la déformation du moule à béton.

et sans raidisseur. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 5.10. Dans les deux configurations, la région périphérique du support est immobilisée mécaniquement car celle-ci est directement visée au moule (figures 5.10a et 5.10b). Le tirage selon Z provoque dans les deux cas une déformation plus importante au centre du support de l'ordre de la dizaine de millimètre d'après les figures 5.10c et 5.10d. Cependant, les courbes de la figure 5.10e montrent qu'avec un support rigidifié, cette distorsion est divisée par 2,5 atteignant un maximum de 0,12 mm suivant l'axe Z. Par conséquent, l'ajout d'un raidisseur en forme croix est justifié pour la fabrication du support supérieur.

Enfin, la même méthodologie est appliquée à l'éprouvette de peau coffrante pour étudier l'influence des raidisseurs rectangulaires. Dans le cas de l'éprouvette, c'est la surface supérieure qui est immobilisée mécaniquement en raison de l'adhérence du béton (figure 5.11a et 5.11b). La déformation de la pièce est analysée en considérant l'interface béton-peau coffrante indéformable jusqu'à sa rupture. Même si la déformation est très largement inférieure au micromètre, la figure 5.11c montre que la peau circulaire se déforme en surface lors du tirage en Z quand les raidisseurs ne sont pas présents. Toutefois, l'ajout de ces raidisseurs au verso de la peau permet de réduire la déformation surfacique de celle-ci en absorbant l'effort (figure 5.11d).

Les analyses numériques par calcul d'éléments finis réalisées sur les principaux composants du dispositif de l'essai d'adhérence ont montrées de légers déplacements dans la direction de sollicitation mécanique. Majoritairement inférieurs au dixième de millimètre, ces déplacements impliquent donc de faibles déformations des pièces lors du tirage uniaxial. Par conséquent, les éléments composant l'essai d'adhérence donne un mode de contrainte en traction pure de l'interface béton-peau coffrante.

Après que le dimensionnement des pièces ait été vérifié par simulation numérique, celles-ci sont fabriquées individuellement afin de réaliser le banc de test de l'essai d'adhérence.

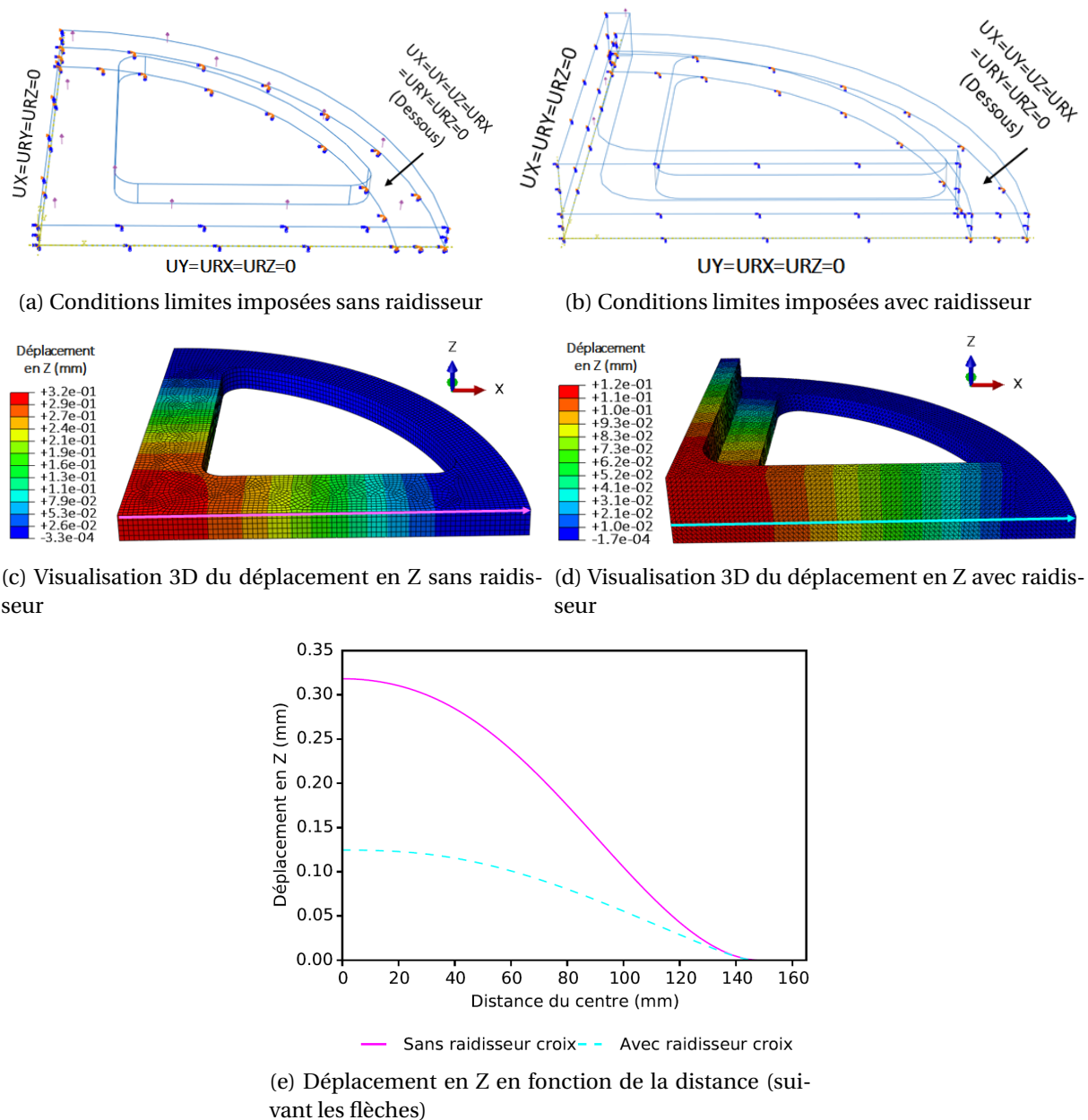


FIGURE 5.10 – Simulations numériques de la déformation du support supérieur du moule à béton.

5.2.4 Fabrication du dispositif d'essai d'adhérence

A partir des plans techniques présentés dans la partie A.3 des annexes, les composants du nouveau dispositif d'adhérence sont fabriqués. Des tolérances de qualité ISO JS13 sont appliquées par défaut pour la cotation des pièces. Cependant, une tolérance plus rigoureuse à cinq centièmes est imposée pour des côtes nominales demandant plus de précision. Dans le cas des contraintes géométriques telles que la perpendicularité, le parallélisme ou la coaxialité, les tolérances exigées sont de deux centièmes afin de garantir la sollicitation en traction pure de l'interface béton-peau coffrante lors du tirage.

Tous les composants sont réalisés intra-muros dans les ateliers du laboratoire de Mécanique, Surface, Matériaux et Procédés (MSMP-EA 7350) du campus Arts et Métiers d'Aix-en-Provence. Un centre d'usinage 3 axes VX12 d'HURON à commandes numériques est principalement utilisé pour la fabrication du moule à béton et de son support supérieur. De même pour la préparation des peaux circulaires. Pour les pièces d'attache de plus petites dimensions, celles-ci sont usinées à l'aide de tours et

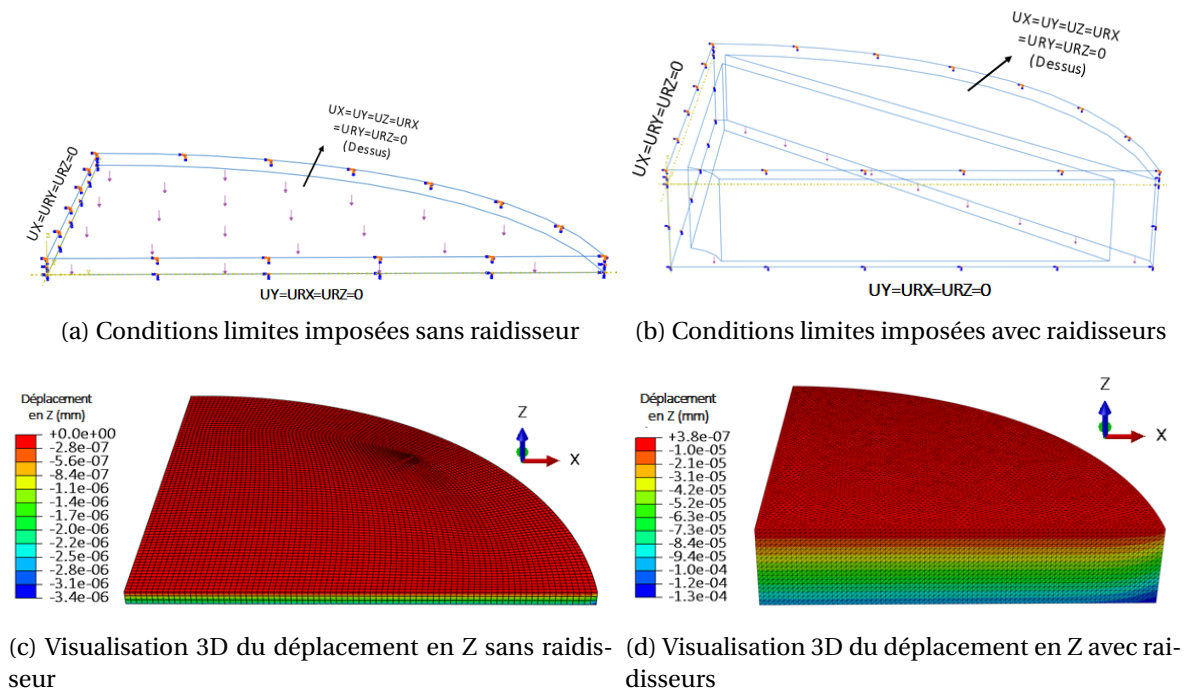


FIGURE 5.11 – Simulations numériques de la déformation de l'éprouvette de peau coffrante.

de fraiseuses conventionnels semi-automatiques.

Le moule à béton et le support supérieur sont usinés à partir d'un bloc d'AA 2007 de 350 mm de diamètre par 100 mm de hauteur présenté sur la figure 5.12a. Après découpe du bloc en deux parties, le moule et le support sont réalisés individuellement. Dans le but de satisfaire les contraintes géométriques fixées, les étapes d'usinage des deux pièces sont préétablies suivant la gamme d'usinage ci-dessous :

1. Surfaçage ébauche des sections;
2. Usinage du diamètre extérieur;
3. Ébauche du raidisseur croix pour le support supérieur et évidage central du moule à béton;
4. Finition du raidisseur croix et définition de la marche intérieure du moule à béton;
5. Fraisage des poches du support supérieur et usinage des angles de contre-dépouille du moule à béton;
6. Surfaçage de finition avec épaisseurs finales;
7. Perçage;
8. Filetage.

Après l'étape 6 de surfaçage de finition, la planéité finale du moule et du support est vérifiée au moyen d'une colonne de mesure Mahr Digimar. Des écarts de parallélisme d'un à trois centièmes sont mesurés, ce qui est acceptable pour la confection des deux éléments. Les figures 5.12b et 5.12c présentent respectivement le moule à béton et son support supérieur usinés avant les étapes 7 et 8. Les étapes de perçage sont réalisées en fin d'usinage afin d'optimiser la perpendicularité des trous taraudés par rapport à la surface des pièces.

Simultanément à l'usinage du moule et du support, des éprouvettes de peaux coffrantes sont fabriquées. Celles-ci sont élaborées en évitant les opérations susceptibles de modifier les signatures surfaciques de la face qui sera directement en contact avec le béton. Les premières sont conçues à partir de la peau coffrante PMr1 qui sont découpées par laser CO₂ sur des tôles métalliques de 5 mm d'épaisseur (figure 5.13a). Les poches centrales de positionnement des barres de guidage sont ensuite réalisées sur les disques coffrants au centre d'usinage VX12 pour assurer la coaxialité des deux pièces.

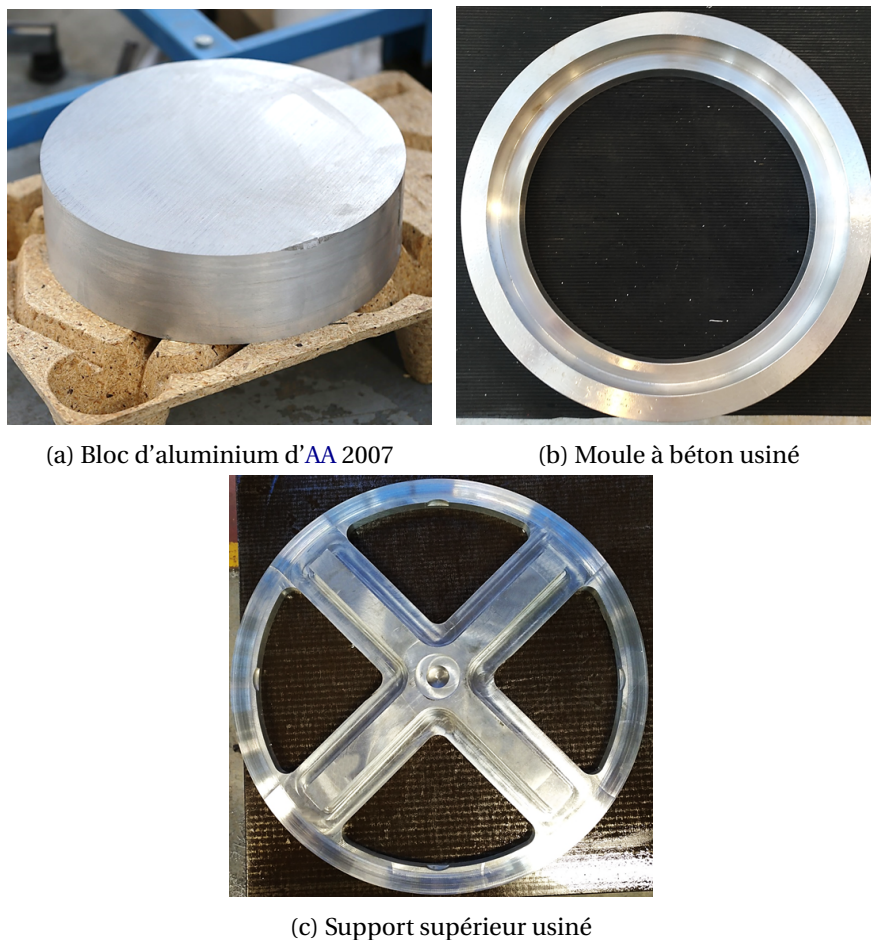


FIGURE 5.12 – Usinage du moule à béton avec son support supérieur à partir d'un bloc d'AA 2007 (avant les étapes de perçage-filetage).

Toutes ces barres proviennent d'un rond plein étiré en acier inoxydable 316L de 35 mm de diamètre. La figure 5.13b montre une barre de guidage usinée à l'aide des machines-outils conventionnelles semi-automatiques. Concernant les raidisseurs rectangulaires, ceux-ci sont découpés à partir de fers plats 30 x 10 mm² de nuance d'acier S235 puis leurs angles sont limés pour faciliter la pénétration des cordons de soudure. Une fois les barres de guidage et les raidisseurs réalisés, ces éléments sont directement soudés à l'arc sur les disques coffrants. Un soudage par cordons discontinus alternés est choisi pour limiter la propagation de chaleur dans l'éprouvette et réduire sa déformation. Pendant le refroidissement des cordons, des serre-joints et des masses sont déposés sur les raidisseurs pour maintenir leurs positions et minimiser les distorsions. Après soudage, une déformation d'un à deux millimètres de la partie externe des disques coffrants est observée. Cependant, cette zone n'est pas en contact avec le béton mais avec le moule par conséquent sa déformation n'intervient pas à l'interface béton-peau. Et concernant la région centrale de l'éprouvette, un faible gondolage de l'ordre du dixième de millimètre est mesuré, ce qui est acceptable pour la création d'une interface plane entre le béton et les peaux coffrantes. La figure 5.13c présente une éprouvette de peau coffrante fabriquée avant les étapes de filetage. De même que pour le moule à béton, les éprouvettes sont percées puis taraudées en fin de conception pour corriger les défauts de perpendicularité.

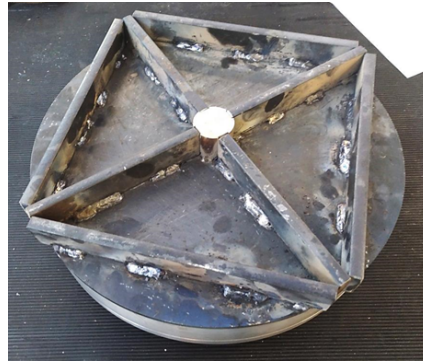
En ce qui concerne les pièces d'attache, celles-ci sont successivement usinées en acier inoxydable 316L principalement par tournage et par fraisage. Les pièces finales sont présentées sur la figure 5.14. La goupille de liaison entre l'embout à rotule mâle et la barre d'attache du support supérieur est également réalisée sur site pour optimiser le mouvement de la rotule.



(a) Peau coffrante circulaire découpée

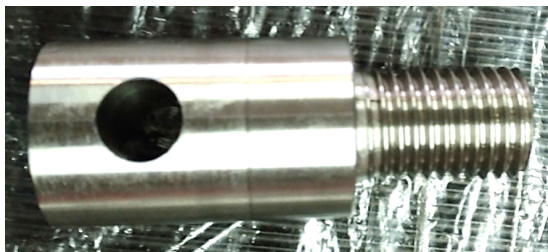


(b) Barre de guidage usinée

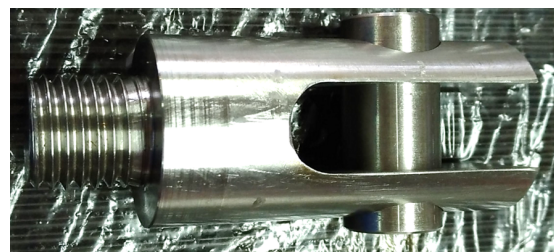


(c) Epreuve de peau coffrante

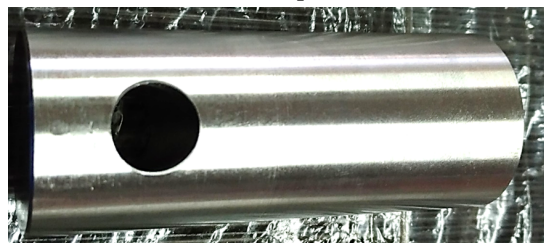
FIGURE 5.13 – Conception d'une éprouvette de peau coffrante.



(a) Barre d'attache de l'éprouvette de peau coffrante



(b) Barre d'attache du support supérieur + goupille



(c) Barre d'attache de l'embout à rotule

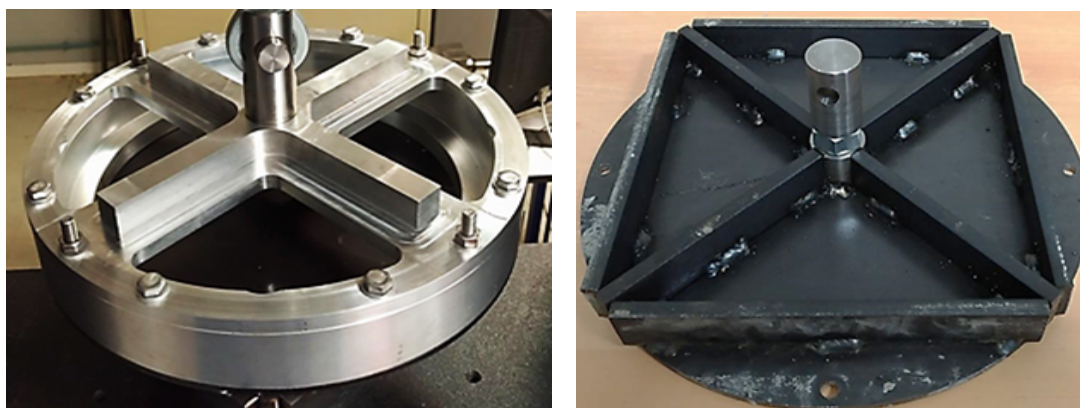
FIGURE 5.14 – Usinage des pièces d'attache.

Après cette phase de fabrication, des essais préliminaires sont effectués afin de vérifier le fonctionnement du nouveau montage et valider la conception du dispositif. Une procédure expérimentale est préalablement établie afin de réaliser ces essais de validation.

5.3 Méthodologie de l'essai d'adhérence

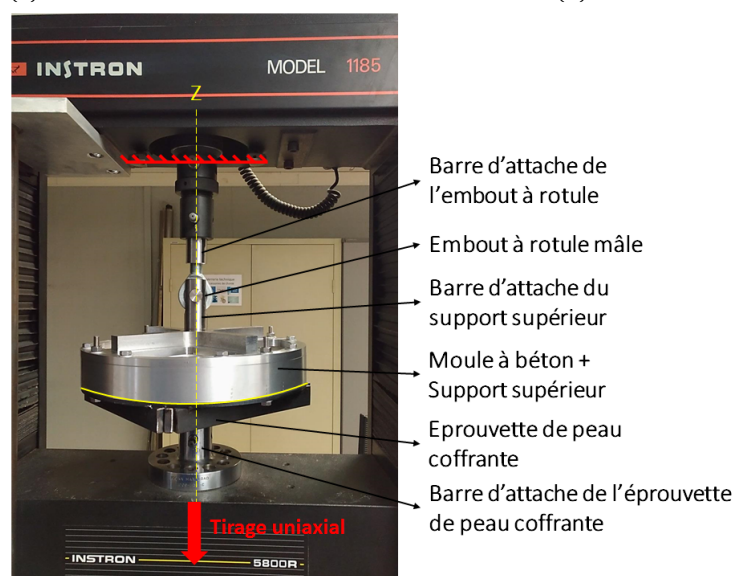
Dans le but de mesurer une contrainte de rupture interfaciale entre le béton et la peau coffrante, une méthodologie est mise en place. Celle-ci est principalement basée sur des considérations mécaniques et les résultats des premiers essais de validation.

Dans la configuration actuelle de la machine de traction, c'est la traverse inférieure qui est mobile. Par conséquent, une fois le dispositif assemblé, l'éprouvette de peau coffrante est installée sur la traverse du bas pour simuler le décoffrage. De plus, dans cette disposition, la masse du dispositif est majoritairement placée au-dessus de l'interface béton-peau coffrante et donc celle-ci est moins sollicitée par le poids du montage. La figure 5.15 représente le dispositif final mis en place sur la machine de traction. L'assemblage du moule à béton et de l'éprouvette de peau coffrante est effectué à l'aide de plusieurs boulons. Le serrage du montage à vide (sans béton dans le moule) à la clé plate a montré lors du dévissage (une fois le béton durci) une rupture instantanée de l'interface béton-peau coffrante. En effet, un fort serrage initial contraint mécaniquement l'éprouvette contre le moule, ce qui provoque une relaxation de la peau coffrante pendant le desserrage. Par la suite, le serrage des boulons est effectué manuellement pour éviter cette relaxation. De plus, dans ces nouvelles conditions, aucune fuite de laitance n'a été observée pendant le coulage du béton.



(a) Vue du dessus

(b) Vue du dessous



(c) Dispositif final

FIGURE 5.15 – Mise en place du dispositif de l'essai d'adhérence.

L'analyse préliminaire des tests d'adhérence lors du décoffrage a conduit à la définition de la pro-

cédures expérimentales. Celle-ci se décline ainsi :

1. Réalisation d'une éprouvette coffrante;
2. Assemblage manuel du dispositif à vide;
3. Préparation du béton avec essai d'affaissement d'après la section 2.2;
4. Coulage du béton dans le moule à travers les poches;
5. Durcissement du béton pendant 24 h;
6. Assemblage des pièces d'attache au dispositif;
7. Montage du dispositif final sur la machine de traction;
8. Dévissage manuel des boulons pour dissocier l'éprouvette du moule;
9. Lancement de l'essai d'adhérence suivant les paramètres du 2.5.2;
10. Après rupture de l'interface béton-peau coffrante, démontage du dispositif de la machine de traction;
11. Retrait du béton durci dans le moule;
12. Nettoyage de l'intérieur du moule.

Pour simuler les opérations de vibration du béton et améliorer le contact béton-peau coffrante, le dispositif est secoué manuellement une fois le béton coulé dans le moule. Par la suite, les essais d'adhérence sont effectués 24 h après le coulage du béton, ce qui correspond au temps moyen sur site du durcissement du béton dans les coffrages. Pour la mise en place du dispositif sur la machine de traction, la partie inférieure est premièrement goupillée au socle afin d'atténuer le poids de l'éprouvette sur l'interface béton-peau. Lorsque les essais d'adhérence sont réalisés, les éprouvettes de peau coffrante sont conservées dans le but d'effectuer les analyses des signatures surfaciques des peaux coffrantes. Concernant le moule, celui-ci est récupéré afin d'être nettoyé pour réitérer de nouveaux essais. Pour retirer facilement le béton durci dans le moule, le support supérieur est premièrement dévissé puis un marteau est utilisé en s'appuyant sur la contre-dépouille de la marche intérieure. Au final, les résidus de béton présents sur les parois intérieures du moule sont enlevés au racloir.

Dans la partie suivante, les premiers essais d'adhérence sont présentés et les résultats sont discutés afin de valider le fonctionnement du nouveau test d'adhérence mis en place.

5.4 Validation expérimentale de l'essai d'adhérence

La validation de l'essai d'adhérence élaboré dans ce travail de recherche est effectuée sur la peau coffrante PMr1. Pour cela, cinq éprouvettes sont préalablement conçues.

La figure 5.16 présente la force de tirage mesurée en fonction du déplacement de la traverse inférieure pendant un essai d'adhérence. Sur la courbe de traction non traitée, trois zones distinctes séparées par des lignes verticales en pointillés sont observées. La première zone (1) montre plusieurs paliers à charge constante suggérant des jeux de réglage du dispositif à travers les goupilles et la rotule. Cette phase généralement longue est très importante car elle permet de repositionner le montage afin de maintenir l'axialité du tirage. La zone 2 présente une augmentation de la charge qui est relative à la déformation de la zone de transition interfaciale entre le béton et la peau coffrante. La forme de la courbe révèle un mode de rupture fragile de l'interface. Enfin, après rupture de la ZTI, une chute instantanée suivie d'une immobilisation de la charge est observée dans la dernière zone (3). Ce plateau représente en fait le poids du dispositif encore suspendu à la cellule de charge.

Par la suite, un traitement de la courbe de traction est effectué afin de récupérer un effort de rupture interfaciale béton-peau coffrante. Pour cela, le poids du dispositif restant dans le troisième domaine est retiré de la charge mesurée. Puis, la courbe est redécalée à l'origine en négligeant les efforts négatifs de compression. Au final, la charge de rupture $F_{r,i}$ considérée pour la suite de ce travail est la charge la plus élevée représentée par le symbole R de la courbe traitée sur la figure 5.16.

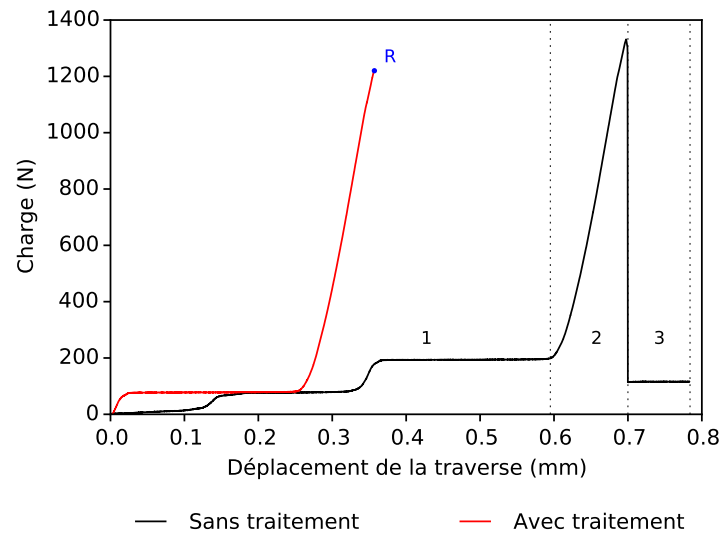


FIGURE 5.16 – Evolution de la charge de tirage en fonction du déplacement de la traverse lors d'un essai d'adhérence avec post-traitement de la courbe de traction.

La figure 5.17 montre les courbes de traction obtenues à la suite d'essais d'adhérence sur des peaux coffrantes PMr1. Sur les cinq éprouvettes testées, certaines ne sont pas retenues en raison d'essais infructueux. Les trois courbes affichent des tendances similaires avec le même palier initial à 75 N. En moyenne, un tirage sur 0,3 mm est nécessaire pour ajuster le positionnement du dispositif. Ce déplacement dépend fortement des jeux présents dans les goupilles et du réglage des vis. Par la suite, le comportement à l'augmentation de la charge est semblable pour les trois essais, cependant les courbes montrent différentes valeurs de rupture interfaciale. La disparité de ces forces de rupture F_{ri} peut être liée à des hétérogénéités surfaciques entre éprouvettes de peau coffrante ainsi qu'à des conditions de mise en œuvre du béton différentes qui sont susceptibles de modifier l'interface béton-peau coffrante. Le déplacement total effectué pendant un essai est supérieur à la déformation des éléments calculée par simulation numérique, par conséquent une dilatation du béton dans la ZTI est bien présente. Pour caractériser la propension à l'adhérence du béton, seulement la force maximale de rupture et non le déplacement est prise en compte suite aux essais de tirage. En effet, celui-ci étant très relié à la mise en place du montage expérimental, il n'est pas retenu.

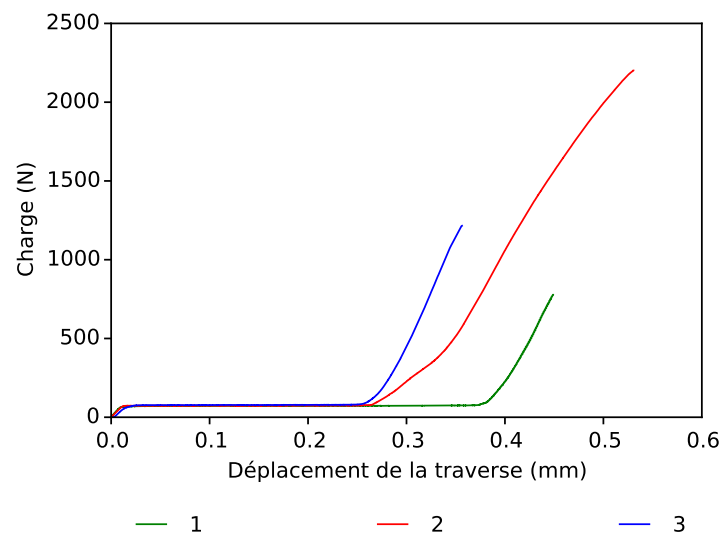


FIGURE 5.17 – Courbes de traction traitées obtenues pour des éprouvettes de peau coffrante PMr1.

Malgré des efforts de rupture interfaciaux différents entre les essais, les courbes présentent des

comportements similaires. Par conséquent, une contrainte moyenne de rupture de l'interface béton-peau coffrante peut être calculée d'après l'équation 2.23. En considérant une surface de contact de 125 mm de rayon, la contrainte de rupture interfaciale σ_{ri} entre le béton et la peau coffrante PMr1 vaut $2,8 \pm 1,5 \cdot 10^4$ Pa. Avec un mode de sollicitation de l'interface béton-peau coffrante similaire, une contrainte de rupture égale à $3 \cdot 10^4$ Pa a été déterminée par Montgomery et *al.* pour une surface coffrante de même nature chimique [1]. Cette similarité des résultats démontre par conséquent la validité de l'essai d'adhérence ainsi que celle de la méthodologie appliquée lors du décoffrage.

Les essais d'adhérence réalisés sur des éprouvettes de PMr1 ont montré qu'il était possible de mesurer une force de rupture interfaciale entre le béton et une peau coffrante à l'aide du nouveau dispositif développé. Par ailleurs, les courbes de traction obtenues en amont ont révélé des comportements analogues pour chaque essai.

Par la suite, d'autres peaux coffrantes sont testées afin de confirmer la répétabilité de l'essai. Cela permet également d'obtenir une nouvelle base de données des contraintes de rupture interfaciale béton-peau coffrante qui est peu abondante dans la littérature.

5.5 Étude de la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes lors du décoffrage

Dans la partie précédente, l'essai d'adhérence a été validé sur des éprouvettes de peau coffrante en PMr1. A partir de la procédure mise en place, l'adhérence du béton est caractérisée sur l'ensemble des peaux coffrantes étudiées dans ce travail de recherche. Les contraintes de rupture interfaciale sont calculées et comparées puis des analyses post-mortem sont effectuées afin de discuter des mécanismes d'adhérence du béton selon les signatures surfaciques des peaux coffrantes caractérisées.

5.5.1 Détermination des contraintes de rupture interfaciale béton-peaux coffrantes

Initialement, pour réaliser un essai d'adhérence, une nouvelle éprouvette de peau coffrante était fabriquée. Cependant, leur fabrication selon le procédé établi dans le paragraphe 5.2.4 est plutôt longue. Par conséquent, des modifications sont apportées afin d'optimiser ce processus. Celles-ci consistent principalement à réutiliser les anciennes éprouvettes testées comme support pour en préparer de nouvelles. En effet, aucune variation structurelle n'est observée sur les premières éprouvettes ce qui permet donc de les réemployer.

Pour les peaux coffrantes métalliques PMr2 et RMf, des disques de 330 mm de diamètre sont découpés au laser puis soudés par résistance sur les éprouvettes précédemment fabriquées. Une résistance au déboutonnage des soudures suffisamment élevée est recherchée pour ne pas rompre pendant l'essai d'adhérence. Toutefois, celle-ci doit être assez faible pour faciliter le retrait de la peau soudée et réutiliser les supports éprouvettes. Par conséquent, les paramètres de soudage sont testés et optimisés sur des coupons de taille réduite. Le tableau 5.3 présente les paramètres retenus en fonction de la peau coffrante. Huit points de soudure sont réalisés sur la partie externe des peaux coffrantes afin de ne pas altérer la surface interne de contact puis les bavures résultantes du soudage sont limées pour assurer le contact plan entre le moule et l'éprouvette. Au final, avec ce nouveau procédé de fabrication des éprouvettes, un gain de temps minimum de 50 % est estimé.

	PMr2	RMf
Épaisseur de la peau coffrante (mm)	5	2
Intensité de soudage (kA)	12,1	8,5
Temps de soudage (s)	0,6	0,6

TABLEAU 5.3 – Paramètres de soudage par résistance employés.

Concernant les revêtements coffrants auto-adhésifs RPa1" et RPa2, ceux-ci sont directement collés sur les éprouvettes préalablement nettoyées à l'éthanol. Pour l'application des revêtements coffrants fluides RPF1 et RPF2, la surface des éprouvettes est d'abord poncée pour améliorer la pénétration des revêtements.

A partir de la nouvelle procédure de fabrication des éprouvettes, l'adhérence du béton est caractérisée sur les autres peaux coffrantes. La figure 5.18 présente les contraintes moyennes de rupture interfaciale σ_{ri} béton-peau coffrante déterminées à partir de l'essai d'adhérence. Celles-ci varient de $2,5 \cdot 10^2$ Pa pour le revêtement coffrant RPF1 à $5,2 \cdot 10^4$ Pa pour le RPa1". On observe également que ces contraintes interfaciales sont supérieures avec les revêtements coffrants polymères (RPa1", RPa2 et RPF2) qu'avec les peaux coffrantes métalliques. Ce résultat suggère une meilleure adhérence du béton sur des peaux en polymère avec la formation d'une interface mécaniquement plus forte. Concernant la répétabilité sur la contrainte de rupture, celle-ci est d'environ 30 % en moyenne, ce qui reste admissible connaissant les sources de variabilité des conditions expérimentales, plus particulièrement dans le cas du décoffrage du béton.

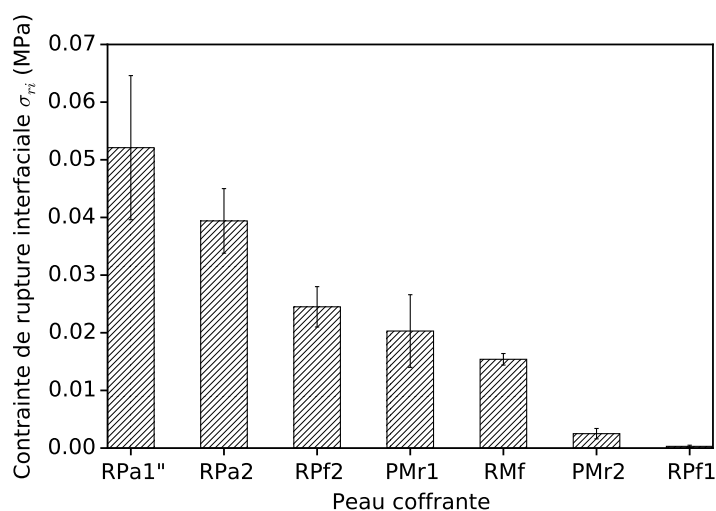


FIGURE 5.18 – Contraintes de rupture interfaciale béton-peau coffrante σ_{ri} déterminées par les essais d'adhérence (Valeurs en annexe dans le tableau A.9).

Dans ces travaux de recherche, l'adhérence entre le béton et les peaux coffrantes est étudiée horizontalement alors que sur site le béton est verticalement durci à l'intérieur des coffrages. De ce fait, il est possible que les caractéristiques de la couche limite et la microstructure du béton de peau varient selon le mode de coulage. Toutefois, les phénomènes d'adhérence du béton restent similaires dans les deux cas. De plus, l'interface formée entre le béton et une surface coffrante semble être plus forte horizontalement que verticalement [3]. Par conséquent, les contraintes de rupture béton-peau coffrante déterminées horizontalement sont pertinentes car celles-ci ne sont pas sous-estimées par rapport au cas vertical.

Afin de justifier les valeurs de ces contraintes interfaciales, des analyses surfaciques sont effectuées sur les peaux coffrantes suite aux essais de tirage et les résultats sont présentés dans la section suivante.

5.5.2 Analyses surfaciques des peaux coffrantes suite aux essais d'adhérence

L'analyse de la surface des éprouvettes est effectuée selon la méthodologie présentée dans le paragraphe 2.5.4 du chapitre 2. La première analyse consiste à quantifier la proportion de béton accroché sur les peaux coffrantes par traitement d'image. Par la suite, une caractérisation chimique est effectuée localement à l'interface béton-peau.

5.5.2.1 Quantification du pourcentage de béton arraché sur les peaux coffrantes

Lors des essais d'adhérence deux modes de rupture interfaciale sont rencontrés qui sont notamment la rupture adhésive et la rupture cohésive. Dans ce deuxième cas, un arrachement de béton à l'interface est observé et quantifié par traitement d'image.

La figure 5.19 présente les peaux coffrantes ayant entraîné l'arrachement du béton suite aux essais d'adhérence. Visuellement, la peau PMr1 semble montrer une proportion de béton arraché inférieure par rapport aux surfaces coffrantes RMf et RPf1. Cependant, avec le revêtement coffrant RPf1, l'arrachement du béton est superficiel car celui-ci est facilement nettoyé à la brosse suggérant une plus faible adhérence du béton. Concernant la peau métallique RMf, l'arrachement du béton est provoqué en profondeur suggérant que l'adhérence de celui-ci sur cette peau coffrante est supérieure par rapport à sa résistance en traction. De plus, il semble que le béton ait réagi avec cette peau en formant une couche bleue, ce qui est caractérisé ultérieurement dans ce travail.

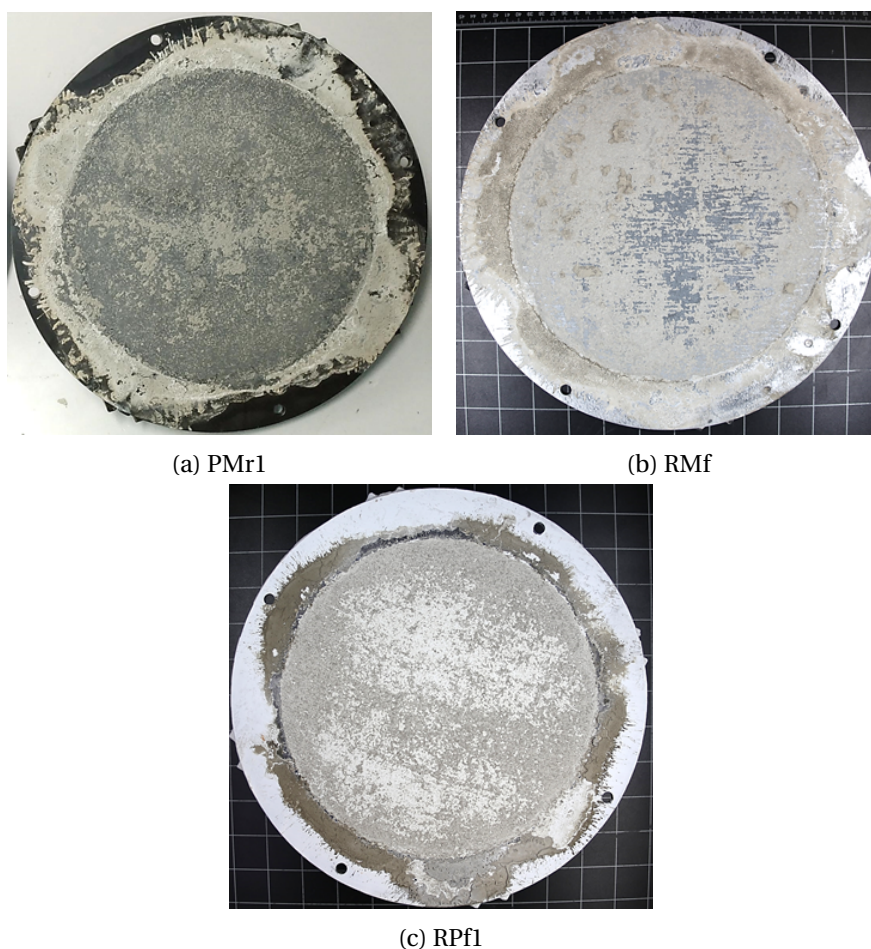


FIGURE 5.19 – Surfaces des peaux coffrantes impliquant un arrachement du béton.

Avec les surfaces coffrantes PMr2, RPa1", RPa2 et RPf2, une décohésion totale du béton est observée sur les éprouvettes d'après la figure 5.20. En effet, aucun résidu de béton n'est visible sur leurs surfaces, ce qui implique une rupture purement adhésive de l'interface béton-peau. Par ailleurs, les bétons décoffrés présentent des surfaces lisses et sans bullage.

On remarque qu'une couche de béton est présente sur la surface externe de l'ensemble des éprouvettes de peau coffrante. Celle-ci est formée par la fuite du béton pendant son coulage à l'intérieur du moule due à une étanchéité incomplète causée par des éprouvettes de peau déformées. Toutefois, cette couche est en dehors de la zone de contact béton-peau et par conséquent, elle n'est pas prise en compte pour quantifier l'adhérence du béton. De plus, il semblerait que cette couche externe de

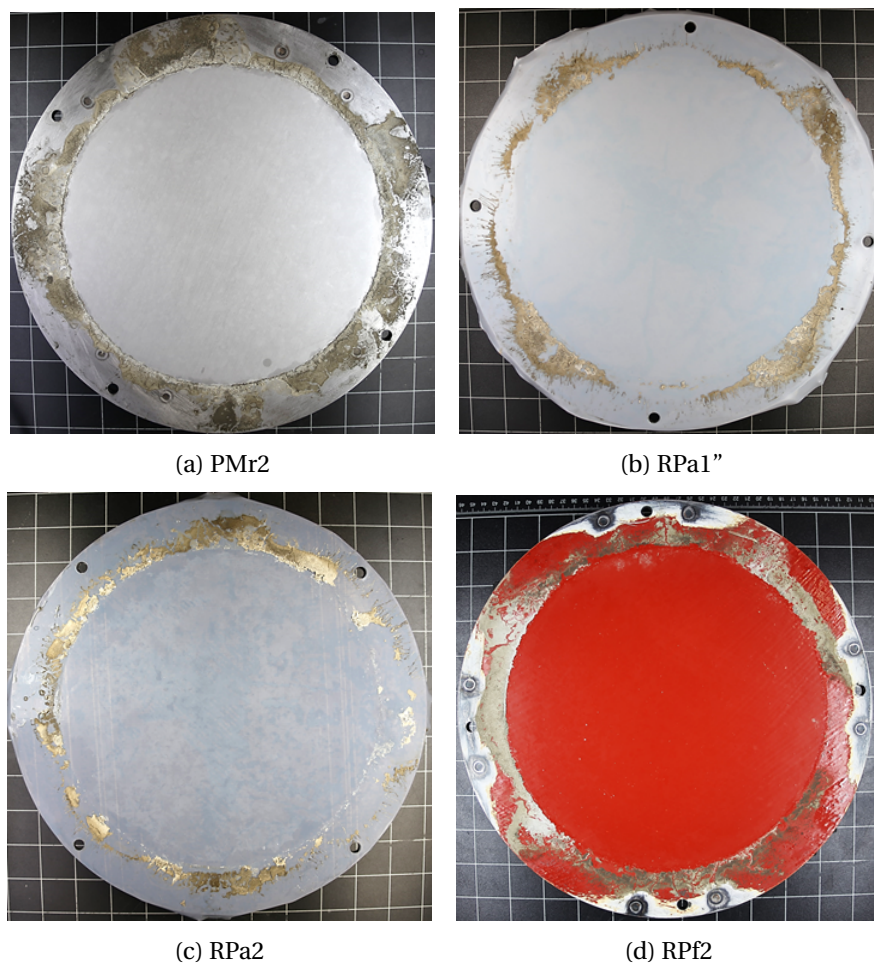


FIGURE 5.20 – Surfaces des peaux coffrantes impliquant une décohesion totale du béton.

béton n'ait pas adhéré du moule car aucune trace de béton n'est observée au-dessous du moule.

A la suite des observations visuelles des éprouvettes, les pourcentages de béton accroché p_{ba} sur les peaux coffrantes sont estimés par traitement d'image puis résumés dans le tableau 5.4. Les pourcentages mesurés sont en accord avec les observations précédentes en confirmant la plus importante proportion de béton accroché sur la surface de la peau RMf avec plus de 70 %.

	PMr1	PMr2	RMf	RPa1''	RPa2	RPF1	RPF2
p_{ba} (%)	16 ± 2	0	71 ± 15	0	0	42 ± 19	0

TABLEAU 5.4 – Pourcentages de béton accroché p_{ba} sur les peaux coffrantes.

La figure 5.21 synthétise les contraintes de rupture interfaciale avec les pourcentages de béton arraché p_{ba} pour l'ensemble des peaux coffrantes étudiées. Premièrement, la décorrélation de la contrainte de rupture σ_{ri} avec le pourcentage de béton est observée. Ce résultat implique par conséquent que l'arrachement du béton induit par le tirage de la peau coffrante n'est pas fonction de l'effort fourni pour rompre l'interface béton-peau. De plus, une contrainte de rupture élevée n'implique pas une proportion de béton accroché plus important d'après les résultats des trois peaux coffrantes RPa1'', RPa2 et RPF2. Du fait de ces nouveaux résultats, le pourcentage de béton accroché est également devenu un indicateur quantitatif significatif de la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes.

L'application d'un contraste de luminosité sur la surface des éprouvettes à la suite des essais

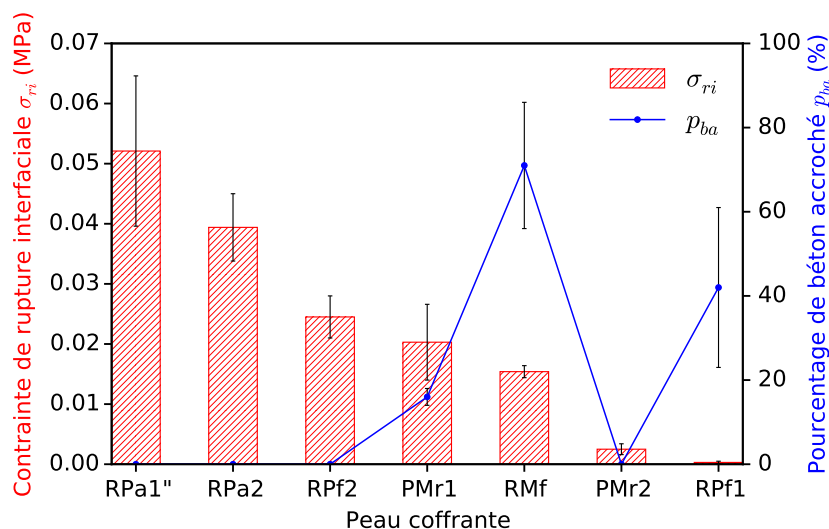


FIGURE 5.21 – Corrélation des contraintes de rupture interfaciale σ_{ri} avec les pourcentages de béton accroché p_{ba} .

d'adhérence a montré qu'il était possible de quantifier un pourcentage de béton arraché sur les peaux coffrantes. Celui-ci s'est révélé pertinent et est retenu en plus des contraintes de rupture interfaciale pour caractériser l'adhérence du béton.

Par la suite, des analyses chimiques locales de l'interface béton-peau sont effectuées afin d'identifier la formation de composés interfaciaux potentiellement responsables de l'arrachement du béton.

5.5.2.2 Caractérisation chimique de l'interface béton-peau coffrante

Dans le but d'analyser chimiquement l'interface entre le béton et les peaux coffrantes, la spectroscopie rayons X à dispersion d'énergie couplée au MEB est principalement employée.

Les premières analyses sont effectuées sur la peau coffrante métallique RMf où l'arrachement du béton est le plus important. D'après la figure 5.19b, une couche bleue avait été observée sur la peau suggérant la réaction du béton avec celle-ci accompagnée de la formation d'un composé interfacial. Afin de vérifier cette hypothèse, un nouvel essai d'adhérence est réalisé avec la même éprouvette. Pour cela, le béton est préalablement retiré à l'aide d'un racloir mou pour ne pas dégrader la surface. La contrainte de rupture interfaciale calculée au second essai est similaire à celle déterminée lors des premiers essais d'adhérence ($1,6 \cdot 10^4$ et $1,5 \cdot 10^4$ Pa respectivement, soit une augmentation inférieure à 10 %). Concernant l'arrachement du béton, celui-ci est deux fois plus faible avec 30 % de béton accroché. La figure 5.22a montre l'éprouvette reconditionnée et des résidus noirs sont à présent visibles sur la surface de la peau RMf. Ces mêmes résidus sont également observés sur la surface du béton ce qui suggère une délamination partielle de la couche. Par conséquent, l'adhérence du béton sur la couche semble être supérieure à la résistance en traction de celle-ci lors du second essai.

Pour vérifier les hypothèses émises précédemment, des observations MEB sont effectuées sur la couche formée par la réaction du béton et sur le faciès de rupture de la couche après le second essai. Sur la figure 5.23a, la couche montre une surface plutôt poreuse avec des résidus de béton. Cette porosité peut expliquer la forte adhérence du béton sur la couche en raison d'une meilleure infiltration de celui-ci dans les aspérités de la couche. Sur le faciès de rupture interne présenté sur la figure 5.23b, des micro-fissures sont observées ce qui implique une fragilité de la couche et donc justifierait la délamination de la couche lors du second essai.

Des analyses EDS sont ensuite réalisées sur la couche afin d'identifier la formation d'un composé suite à la réaction du béton sur la peau RMf. D'après la figure 5.24a, une réduction significative du pic

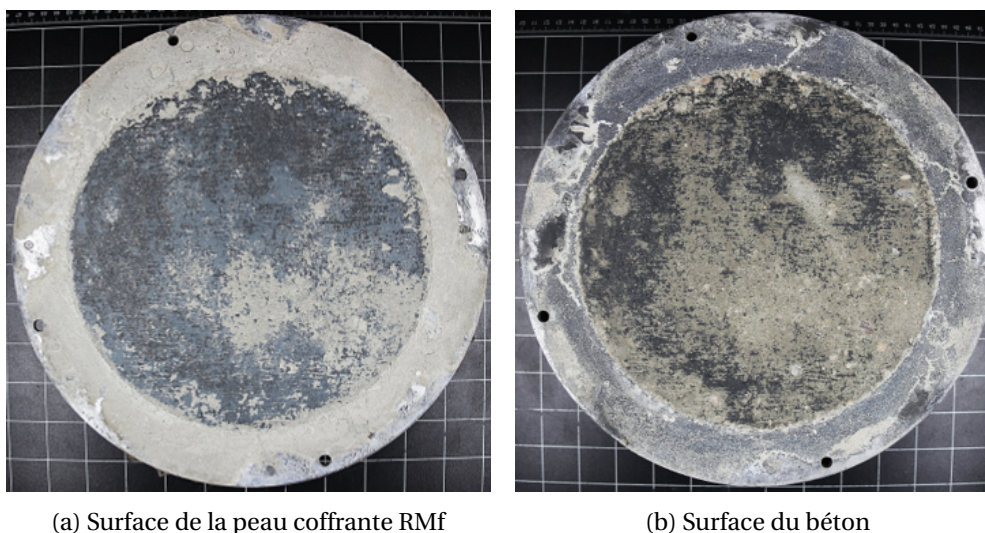
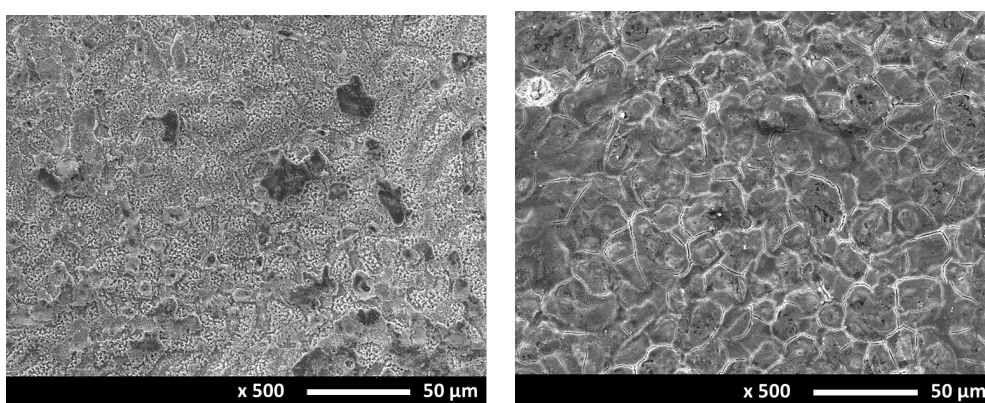


FIGURE 5.22 – Second essai d'adhérence sur une éprouvette de peau coffrante RMf reconditionnée.

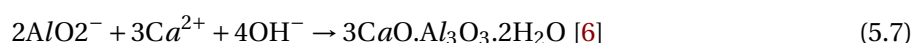


(a) Surface de la couche après réaction du béton (b) Faciès de rupture interne de la couche

FIGURE 5.23 – Micrographies MEB de la peau coffrante RMf après un et deux essais d'adhérence.

de diffraction de la raie K_{α} de l'aluminium à 1,48 keV est observée. Par ailleurs, du calcium est nouvellement détecté dans le composé formé selon la figure 5.24b. Ces deux résultats suggèrent donc une réaction majoritaire du béton avec l'aluminium contenu dans la couche fonctionnelle de la peau coffrante RMf.

En présence d'humidité, le béton attaque instantanément l'aluminium en provoquant un dégagement gazeux [4]. Le produit finalement formé par la réaction du béton sur l'aluminium semblerait être de l'aluminate de calcium ($3CaO.Al_3O_3.2H_2O$) selon la séquence de réactions suivantes :



L'oxydation préférentielle de l'aluminium par rapport au zinc en début de réaction peut en partie s'expliquer par le potentiel standard de réduction du couple $Al(OH)_3/Al(s)$ ($E_{Al(OH)_3/Al(s)}^0 = -2,31$ V/électrode normale à l'hydrogène (ENH) [7]) inférieur à celui du couple $Zn(OH)_2/Zn(s)$ ($E_{Zn(OH)_2/Zn(s)}^0 =$

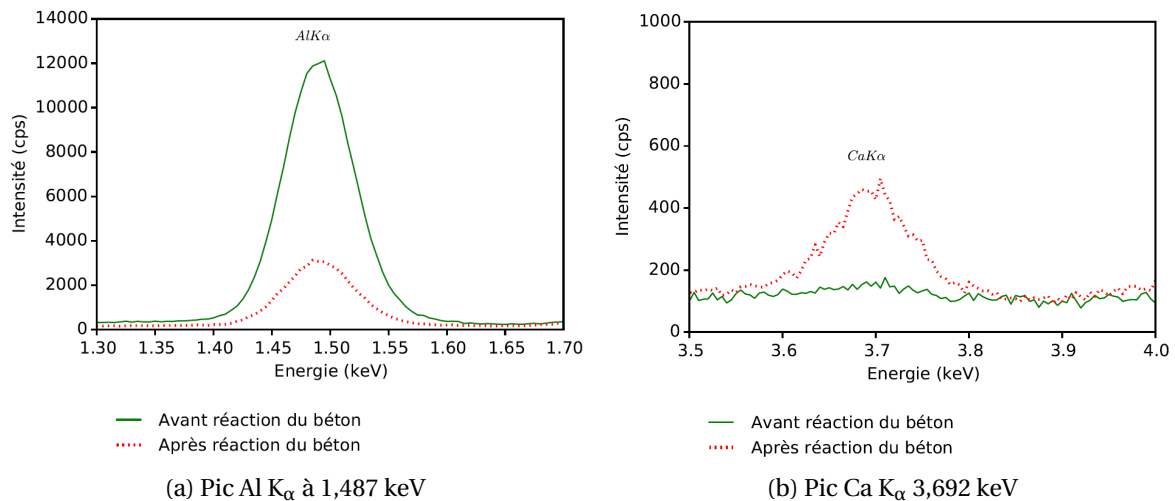


FIGURE 5.24 – Pics EDS de la surface coffrante RMf avant et après réaction du béton.

- 1,25 V/ENH [7]). Par ailleurs, une augmentation du pH dans des environnements alcalins engendre une diminution du potentiel de réduction de l'aluminium solide [5]. Avec des pH aux alentours de 13, les bétons sont des milieux alcalins très basiques ce qui entraîne davantage la diminution du potentiel de l'aluminium.

Après les analyses micrographiques et chimiques de la référence RMf, des échantillons de peau coffrante PMr2 sont également caractérisés suite aux essais d'adhérence. D'après la figure 5.20a, aucun arrachement du béton n'avait été observé sur la surface de contact de la peau PMr2. Cependant, sur la section externe de l'éprouvette de peau coffrante, une couche de béton était visible. Adhérent fortement à la peau coffrante, celle-ci est par conséquent étudiée pour caractériser l'adhérence du béton sur la peau PMr2.

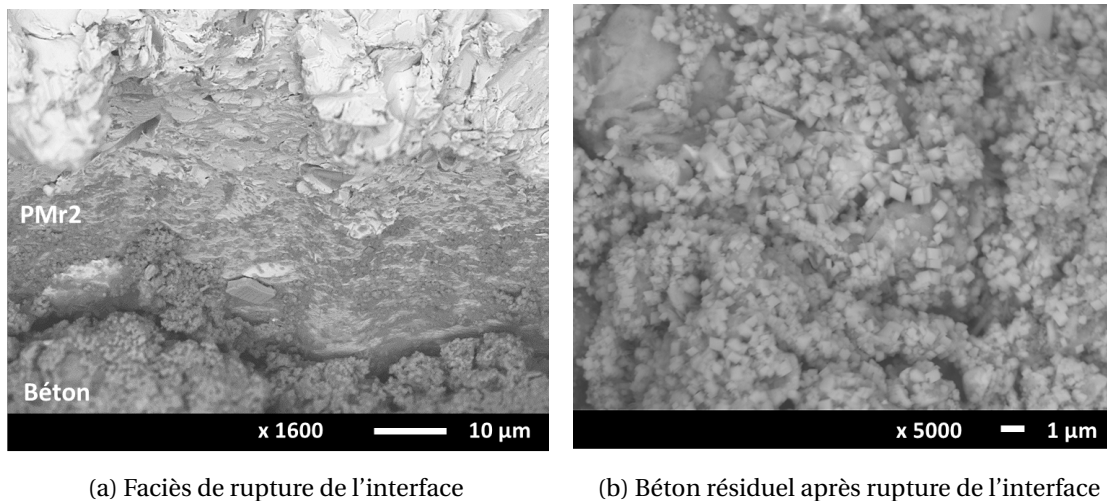


FIGURE 5.25 – Micrographies MEB de l'interface béton-peau coffrante PMr2.

La figure 5.25 présentent des micrographies MEB de l'interface béton-PMr2 après une inclinaison de 30° de l'échantillon. Un grande quantité de cubes de l'ordre du micromètre sont observées à la surface de la peau coffrante PMr2. Cette structure cubique suggère la formation de carbonate de calcium $CaCO_3$ [8] sur la peau PMr2 suivant la réaction 4.2. Initialement, le durcissement du béton implique la formation d'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$. Cependant, la préparation des échantillons en environnement aqueux en plus d'un délai suffisant pour favoriser la diffusion du CO_2 semblent avoir provoqué la carbonatation du béton jusqu'à l'interface.

Afin de confirmer la présence du carbonate de calcium, des analyses EDS sont effectuées à l'interface béton-PMr2 après un pré-polissage. Les profils EDS du calcium (Ca), du chrome (Cr), du fer (Fe) et de l'oxygène (O) sont affichés sur la figure 5.26. Premièrement, les résultats montrent une forte intensité du Ca et de l'O dans le béton ce qui est cohérent avec la formation de carbonate de calcium. Cependant, il est difficile de confirmer totalement sa présence à l'interface. Ensuite, les profils chimiques des quatre éléments montrent des variations brutes sur 2 μm à l'interface béton-peau coffrante PMr2 suggérant une faible diffusion chimique. En effet, le chrome est chimiquement stable au contact du béton et ne réagit pas avec celui-ci [4, 9], ce qui confirmerait la faible adhésion chimique entre le béton et la peau PMr2. Par conséquent, l'adhérence du béton sur cette peau coffrante semble être principalement due à des enchevêtrements mécaniques locaux qui sont visibles sur la figure 5.26a.

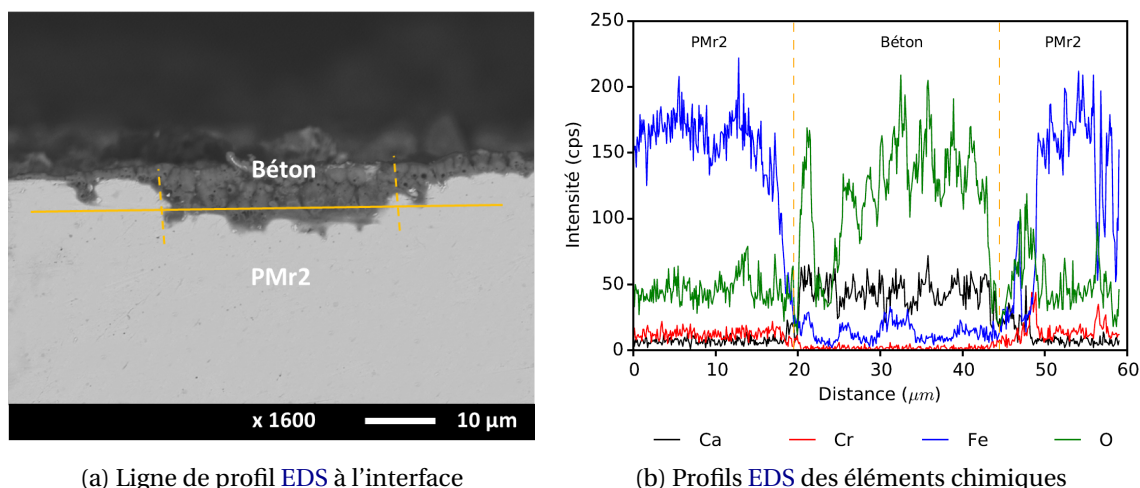


FIGURE 5.26 – Analyses EDS de l'interface béton-peau coffrante PMr2.

La caractérisation chimique de la surface des peaux coffrantes suite aux essais d'adhérence a été réalisée dans cette partie. Les analyses par EDS ont révélé différents mécanismes d'adhérence selon la peau coffrante étudiée. Au contact de la surface coffrante RMf, le béton forme de l'aluminate de calcium et crée une interphase tridimensionnelle, ce qui provoque une rupture cohésive du béton à l'interface. Concernant la peau coffrante PMr2, les analyses chimiques n'ont pas révélé de produits interfaciaux significatifs d'une adhésion chimique avec le béton. Cependant, des points d'enchevêtrement suggèrent que l'ancrage mécanique du béton dans les aspérités de la peau coffrante serait le mécanisme principal responsable de l'adhérence du béton dans le cas de la référence PMr2.

5.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes. La conception actuelle des essais mécaniques ne permet pas de quantifier significativement l'adhérence du béton dans le cas des coffrages. Par conséquent, un nouveau test instrumenté a été entièrement développé pour être représentatif du procédé de décoffrage sur site. A partir d'hypothèses initialement établies, celui-ci a été considéré comme un tirage uniaxial et un dispositif mécanique monté sur une machine de traction a été proposé. Pour le développement de l'essai, l'axialité de l'ensemble du système a été la principale contrainte prise en compte pour garantir le tirage uniaxial. Des simulations numériques par éléments finis ont permis de vérifier la déformabilité des pièces composant le dispositif. Toute la gamme de fabrication de ce dispositif a été réalisée intra-muros suivant une méthodologie de fabrication représentatif des contraintes liées aux coffrages industrielles. Les essais de validation ont montré qu'il était possible de mesurer une force de rupture interfaciale entre le béton et la peau coffrante. Celles-ci sont généralement plus élevées pour des peaux coffrantes en polymère. Une quantification du béton accroché sur les peaux a été réalisée à travers un traitement d'image de la surface des éprouvettes testées. Il a été montré que la contrainte de rupture σ_{ri} ainsi que la proportion de béton arraché p_{ba} n'étaient pas corrélées et que par conséquent, ces deux paramètres doivent être pris en compte pour caractériser la propension à l'adhérence du béton sur les parois coffrantes. Au final, les analyses chimiques ont révélé sur la peau coffrante de référence RMf la formation de composés interfaciaux responsables de l'arrachement du béton.

Dans le but de comprendre la décorrélation de la force de rupture interfaciale béton-paroi de la proportion de béton arraché post-mortem, l'impact des signatures surfaciques des peaux coffrantes sur ces deux paramètres est discuté dans le chapitre suivant.

5.7 Références

- [1] D. Montgomery and A. Samarin, "Adhesion between concrete and treated or untreated flat metal surfaces," *MRS Proceedings, Cambridge University Press*, vol. 114, 1987. 117, 118, 131
- [2] A. Mazkewitsch and A. Jaworski, "The adhesion between concrete and formwork," *In Adhesion between polymers and concrete/Adhésion entre polymères et béton*, Springer, pp. 67–72, 1986. 117, 118
- [3] C. L. Page, M. N. Al Khalaf, and A. G. Ritchie, "Steel/Mortar interfaces : Mechanical characteristics and electrocapillarity," *Cement and Concrete Research*, vol. 8, no. 4, pp. 481–490, 1978. 132
- [4] "Le ciment et les métaux non ferreux," *Bulletin du ciment*, vol. 16-17, no. 6, pp. 1–6, 1948. 136, 138
- [5] "La corrosion de l'aluminium par le mortier de ciment," *Bulletin du ciment*, vol. 34-35, no. 10, pp. 1–6, 1966. 136, 137
- [6] CSTB, CEBTP, VERITAS, CETEN_APAVE, SOCOTEC, NORISKO_Construction, SNFA, and QUALI-CONSULT, "Comportement de l'aluminium et ses alliages utilisés dans le bâtiment en contact avec le plâtre ou le ciment ainsi que d'autres matériaux," *Fiche technique N°40 - Indice A*, pp. 1–2, 2008. 136
- [7] P. Vanysek, "Electrochemical Series," *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition*, vol. 87, pp. 1–10, 1987. 136, 137
- [8] H. Cheng, X. Zhang, and H. Song, "Morphological investigation of calcium carbonate during ammonification-carbonization process of low concentration calcium solution," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2014, pp. 1–7, 2014. 137
- [9] S. Freedman, "Corrosion of nonferrous metals in contact with concrete," *Modern Concrete*, vol. 36, pp. 1–3, 1970. 138

Chapitre 6

Impact des signatures surfaciques de la peau coffrante sur l'interface béton-coffrage

Sommaire

6.1	Introduction	142
6.2	Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante sur les frottements du béton	142
6.3	Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante sur l'adhérence du béton .	144
6.4	Identification des signatures surfaciques fonctionnelles des peaux coffrantes	148
6.5	Conclusion	150
6.6	Références	151

6.1 Introduction

Les frottements et l'adhérence du béton sur les parois coffrantes ont été respectivement étudiés dans le chapitre 4 et 5. Les mécanismes interfaciaux provoquant le frottement ont été déterminés selon la formulation du béton. Concernant l'adhérence béton-peau coffrante, différents modes de rupture de l'interface ont été observés provoquant parfois un arrachement du béton suite au retrait des peaux.

Dans le but d'identifier la fonctionnalité des signatures surfaciques des peaux coffrantes, l'influence de celles-ci sur la friction et l'adhérence du béton est caractérisée dans ce chapitre en s'appuyant sur les résultats du chapitre 3. Pour conclure, les signatures fonctionnelles de la paroi coffrante pour limiter ces deux phénomènes interfaciaux sont identifiées.

6.2 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante sur les frottements du béton

Les premiers résultats tribologiques présentés dans le paragraphe 4.3 avaient montré que les frottements engendrés par le BAP36 sur les peaux coffrantes étaient toujours plus faibles par rapport au B32, quelle que soit la nature de la peau. Cependant, des différences sont observées entre les trois peaux lors des frottements du BAP36 et du B32.

La figure 6.1 présente la contrainte de frottement τ_f du BAP36 en fonction de la pression de contact P_b pour les trois peaux coffrantes. Les coefficients de friction sont similaires pour ces trois peaux avec un coefficient moyen pour le BAP36 de $0,10 \pm 0,01$. Cette valeur est en concordance avec celle trouvée dans les travaux de Bouharoun [1] où le coefficient de frottement d'un béton autoplaçant est égale à 0,12. De même dans les travaux de Djelal et *al.* [2] où celui-ci varie de 0,07 à 0,10 pour une même gamme de pression de contact. Cependant, pour la peau du RPa1', les contraintes de friction semblent être légèrement supérieures par rapport aux deux autres peaux coffrantes PMr1 et PMr2. Dans le cas d'un béton frais très fluide tel que le BAP36, la topographie de surface ne semble pas impacter les frottements à l'interface béton-peau. En effet, la mobilité d'un liquide dans les irrégularités d'une surface reste très élevée, notamment à faible pression de contact. En revanche, les propriétés de mouillage des peaux peuvent influencer le contact du béton. La paroi coffrante RPa1' possède une affinité avec l'eau supérieure et une énergie superficielle libre γ_{sv} deux fois plus grande que les peaux métalliques PMr1 et PMr2. Par conséquent, des forces capillaires à petite échelle pourraient justifier la hausse de contrainte de frottement τ_f du RPa1'. Des essais à plus hautes pressions auraient pu justifier cette hypothèse.

Pour le béton B32 des différences significatives entre les trois parois coffrantes sont observées sur les courbes de la figure 6.2. Dans les mêmes conditions expérimentales, le B32 présente des frottements plus faibles sur la surface coffrante PMr1 et une friction plus élevée pour la référence PMr2 avec un coefficient de frottement μ_b deux fois plus élevé. D'après la figure 4.2b, il a été montré que la couche limite créée par la compression du B32 contre les parois était plus compacte. De ce fait, la proportion de fines piégées dans les aspérités des peaux serait plus importante avec ce béton. Par conséquent, la signature topographique des parois affecterait la friction du béton lorsqu'ils sont plus compactes. D'après les paramètres de rugosité des surfaces coffrantes présentés dans le paragraphe 3.3 du chapitre 3, la surface de la peau coffrante PMr2 montre une rugosité S_a , une surface réelle de contact S_{dr} et des volumes de vide à cœur V_{vc} et dans les vallées V_{vv} supérieurs par rapport aux peaux PMr1 et RPa1'. Par conséquent, une plus grande quantité de particules de ciment s'incrusterait dans les irrégularités de la surface du PMr2.

La figure 6.3 présente la proportion de fines piégées en fonction du coefficient de frottement dynamique du B32 selon les peaux coffrantes. Les pourcentages de particules piégées sont calculés d'après la rugosité S_a selon les distributions de la taille des grains des poudres utilisées qui sont présentées sur la figure 2.2 du chapitre 2. Contrairement aux interactions observées avec le béton BAP36, le comportement du frottement du B32 n'est pas corrélé à l'énergie libre de surface des peaux. Les

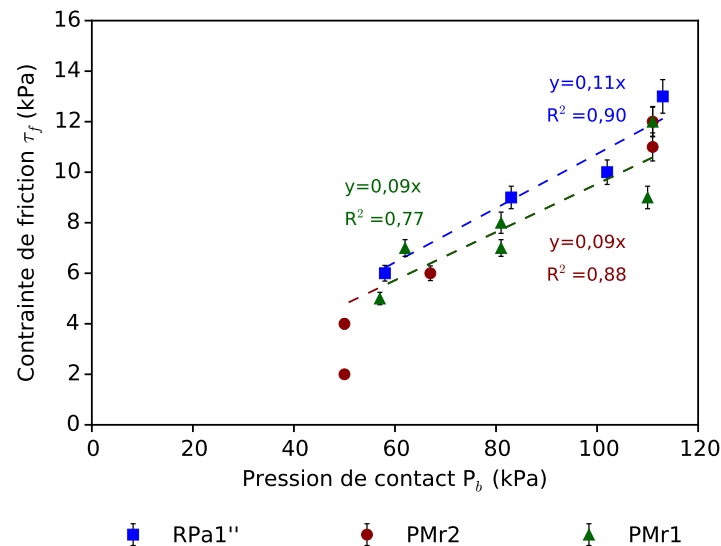


FIGURE 6.1 – Évolution des contraintes de frottement du béton BAP36 en fonction de la pression de contact pour les trois peaux coffrantes étudiées.

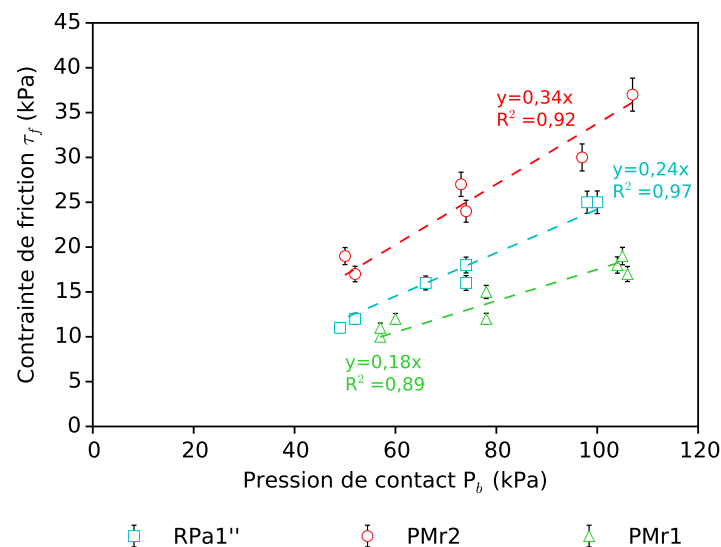


FIGURE 6.2 – Évolution des contraintes de frottement τ_f du béton B32 en fonction de la pression de contact P_b pour les trois peaux coffrantes étudiées.

résultats montrent que le coefficient de frottement augmente simultanément avec le pourcentage de fines incrustées selon la relation suivante :

$$\mu = 0,0625.S_a + 0.1138 \quad (6.1)$$

avec S_a en μm et un coefficient de corrélation égale à 0,89. Il est intéressant de noter que pour une surface parfaitement plane ($S_a = 0$), le coefficient de frottement est de 0,1138, similaire à celui du béton BAP36 à domination capillaire.

Par ailleurs, dans l'étude de Bouharoun [1], des essais de frottement ont été effectués avec une formulation similaire au B32 et une surface coffrante semblable au PMr1 mais plus rugueuse avec un R_a égal à 1,7 μm . Dans ses travaux, le coefficient de frottement est proche de celui calculé pour la peau PMr1 (0,21 [1] pour 0,18 soit une différence τ_f de 15 %). Cependant, les contraintes de frottement résultantes sont deux fois plus élevées, ce qui renforce donc l'hypothèse d'un effet de la rugosité de la paroi coffrante sur la friction d'un béton non adjuvanté tel que le B32.

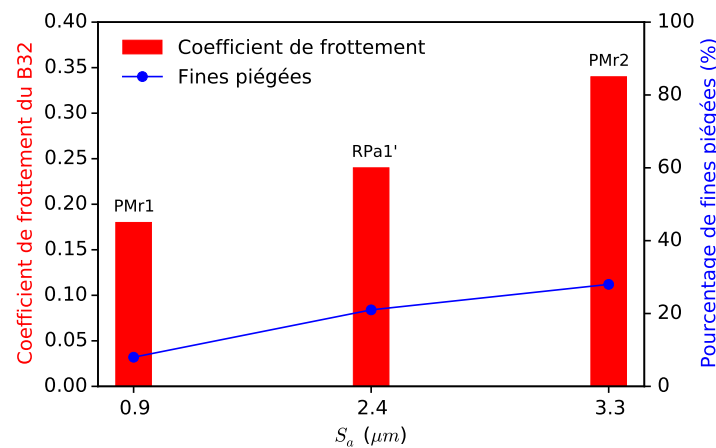


FIGURE 6.3 – Pourcentage de fines piégées en fonction de la peau coffrante lors du frottement du béton B32.

Dans cette partie, l'impact des signatures surfaciques des parois de coffrage sur la friction du béton a été caractérisé. Les frottements engendrés par des BAP semblent être régis par des phénomènes de capillarité à l'interface béton-coffrage. Ceux-ci sont directement liés aux signatures physico-chimiques des peaux coffrantes. Avec des bétons plus compacts, ce sont les signatures topographiques des parois qui influent directement les frottements à l'interface car ceux-ci sont provoqués par une incrustation de fines dans les aspérités des peaux. Ces deux modes de friction interfaciale sont en accord avec la dégradation des peaux quantifiée dans le tableau 4.2 du chapitre 4 où le béton BAP36 induit une dégradation surfacique plus faible que le béton B32.

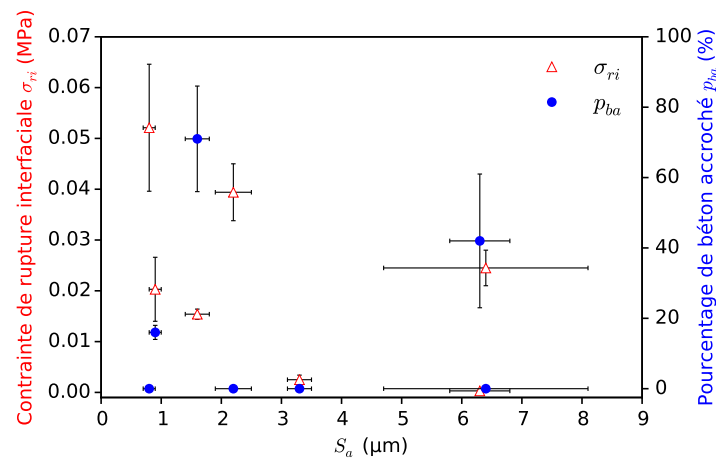
Par la suite, l'influence des signatures surfaciques des peaux coffrantes sur la propension à l'adhérence du béton est étudiée. Cette étude s'appuie principalement sur les contraintes de rupture interfaciale béton-peau ainsi que les proportions de béton arraché quantifiées à la suite des essais d'adhérence.

6.3 Influence des signatures surfaciques de la peau coffrante sur l'adhérence du béton

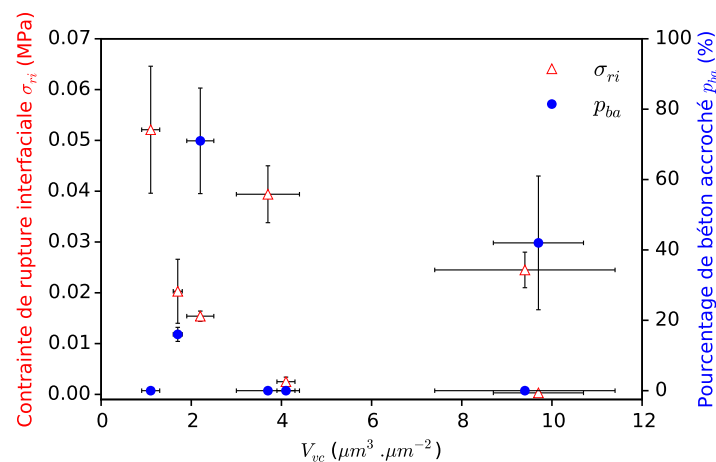
Lors de la campagne d'essais d'adhérence du chapitre 5, une décorrélation de la contrainte de rupture interfaciale béton-peau σ_{ri} avec la proportion de béton résiduel p_{ba} quantifiée sur les peaux avait été identifiée. Ce résultat suggérait donc différents mécanismes d'adhérence selon les peaux coffrantes étudiées. De ce fait, la fonctionnalité des signatures surfaciques des parois sur les phénomènes d'adhérence du béton est caractérisée.

L'adhérence du béton sur une paroi de coffrage est provoquée par plusieurs mécanismes simultanément, par conséquent il est difficile de quantifier individuellement les signatures surfaciques des peaux coffrantes. De plus, les phénomènes d'adhésion chimique ne peuvent être quantifiés par des paramètres surfaciques. Cependant, des tendances sont observées sur les figures 6.4 et 6.5 qui présentent les variations des signatures surfaciques des parois de coffrage en fonction des résultats obtenus suite aux essais d'adhérence.

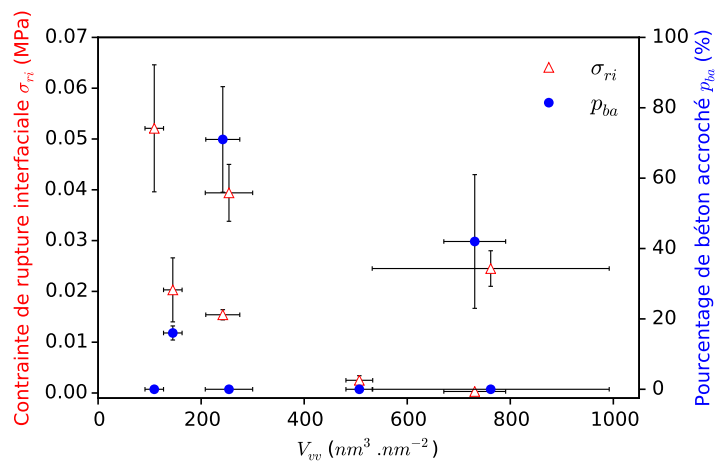
D'après la figure 6.4, la contrainte de rupture interfaciale semble diminuer avec l'augmentation des paramètres surfaciques S_a , V_{vc} et V_{vv} même si la tendance n'est pas très marquée. Ce résultat pourrait être lié aux phénomènes capillaires. En effet, avec des peaux plus lisses, un film d'eau est susceptible de se former entre le béton et la peau coffrante, ce qui engendre un effort de tirage plus important. Au contraire, si les peaux sont très rugueuses, l'eau à l'interface est drainée ou alors de l'air peut être piégé dans les volumes des aspérités de surface limitant ses effets de capillarité.



(a) Paramètre de rugosité S_a



(b) Paramètre de volume V_{vc}



(c) Paramètre de volume V_{vv}

FIGURE 6.4 – Corrélation des signatures topographiques des peaux coffrantes en fonction des résultats d'adhérence.

Concernant les paramètres γ_{sv} et S_{dr} représentés respectivement sur la figure 6.5a et 6.5b, ceux-ci montrent des tendances plus significatives avec une augmentation de la contrainte de rupture lorsqu'ils diminuent. Ces deux paramètres étant directement liés, il est difficile de les étudier séparément. En se basant sur les résultats d'adhérence, trois domaines peau coffrante-mécanisme d'adhérence sont déterminés en fonction de γ_{sv} et S_{dr} .

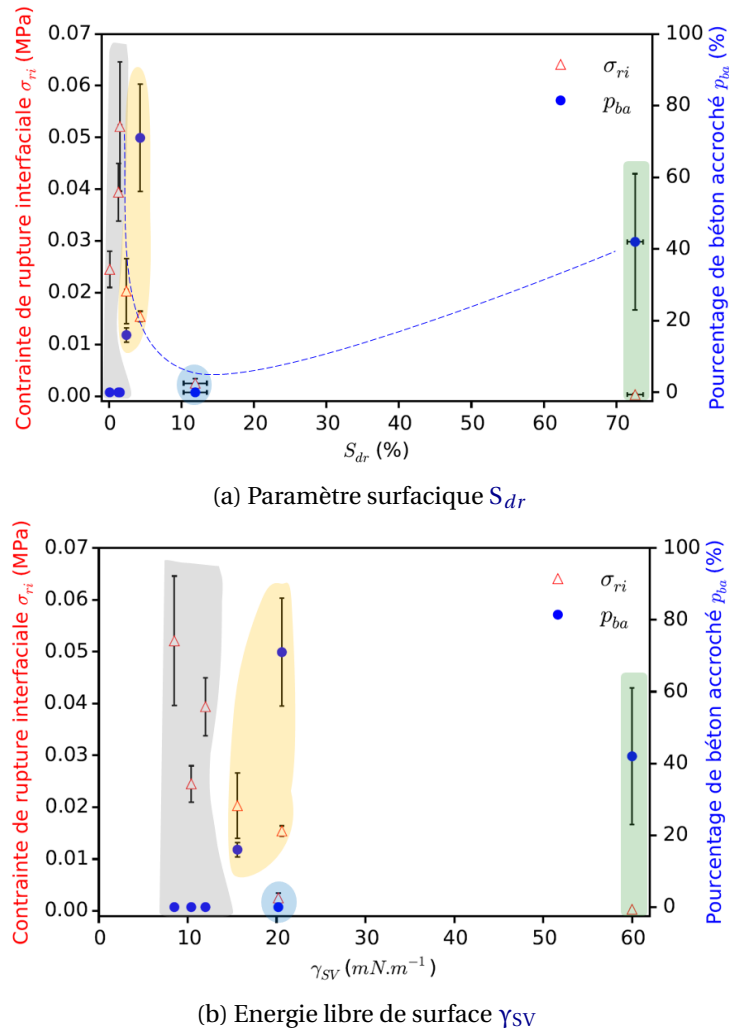


FIGURE 6.5 – Corrélation des signatures surfaciques fonctionnelles des peaux coffrantes en fonction des résultats d'adhérence.

La zone grise représente les contraintes de rupture les plus élevées. En parallèle, on observe que la proportion de béton arraché est nulle. Les hautes valeurs de contrainte peuvent s'expliquer par des forces capillaires prédominantes lors du tirage. En effet, les trois revêtements coffrants polymères RPa1[®], RPa2 et RPa2 possèdent des énergies superficielles libres γ_{sv} faibles, inférieures à 12 mN.m⁻¹ signifiant de faibles affinités chimiques. De plus leurs ratios de surfaces développées S_{dr} sont très faibles ($\leq 1,5\%$) donc ces revêtements coffrants possèdent des surfaces très lisses. A la suite des essais d'adhérence, de l'eau est observée sur les éprouvettes coffrantes et la surface des bétons est humide. Ces résultats valident la condensation importante d'eau à l'interface favorisant les effets capillaires avec des peaux coffrantes en polymère.

La deuxième région jaune contient les peaux coffrantes métalliques PMr1 et RMf qui présentaient des ruptures interfaciales cohésives avec un arrachement de béton. Celui-ci serait principalement provoqué par des effets chimiques et électrophysiques en raison de la réactivité chimique de ces deux peaux. Avec la seconde paroi, l'arrachement plus important du béton était dû à la formation d'aluminate de calcium qui crée une interphase tridimensionnelle avec le béton amplifiant les effets chimiques.

Ensuite, la zone verte suppose une dominance des phénomènes d'ancrage mécanique où bien qu'une contrainte de rupture presque nulle soit déterminée, une quantité élevée de béton post-mortem est observée sur la surface de la peau coffrante RPa1. Ce résultat serait directement lié à sa forte surface développée de plus de 70 % qui impliquerait un piégeage plus important des fines dans les aspé-

rités de la surface. Le fait que le béton arraché pendant les essais d'adhérence ne s'accroche pas sur la peau RPF1 suggère donc une bonne inertie chimique des revêtements coffrants polymères telles que les références RPa1", RPa2 et RPF2.

Finalement, la peau PMr2 indiquée dans la zone bleue présente les paramètres d'adhérence les plus optimaux avec une contrainte de rupture interfaciale faible et une quantité de béton résiduelle nulle. Par conséquent, les signatures surfaciques de la paroi PMr2 semblent être les plus fonctionnelles pour limiter l'adhérence du béton. Effectivement, le chrome composant cette peau est chimiquement inerte vis-à-vis du béton et aucune réaction n'a eu lieu au contact du béton frais. Son énergie de surface libre γ_{sv} est égale à 21 mN.m^{-1} , ce qui semble être suffisant pour éviter les forces de capillarité. Et enfin, sa surface développée autour de 12 % permet d'éviter à la fois les phénomènes capillaires et l'ancrage mécanique due à une trop forte rugosité.

Afin de vérifier la dominance des effets capillaires dans le cas des peaux coffrantes lisses, un essai d'adhérence est effectué avec une paroi PMr2 surfacée. Cette référence est choisie notamment en raison de son inertie chimique et également car elle ne possède pas de couche fonctionnelle. De ce fait, la modification de la topographie ne risque pas de modifier la chimie de surface. La figure 6.6 présente la cartographie 3D de la topographie du PMr2 après surfaçage sur $200 \mu\text{m}$ de profondeur. L'amplitude de rugosité est 6 fois plus petite avec une surface réelle développée 40 fois plus faible par rapport à la peau brute (11,9 brute à 0,3 % après usinage). Avec la peau PMr2 surfacée, la contrainte de rupture interfaciale est égale à $1,6 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, soit une augmentation de 500 %. L'éprouvette de la peau coffrante surfacée présentée sur la figure 6.7 ne montre toujours pas de béton arraché sur sa surface. Par conséquent, l'augmentation de l'adhérence du béton serait principalement due à des effets capillaires plus important à l'interface béton-PMr2. De ce fait, la prédominance des forces de capillarité dans le cas de parois lisses est confirmée.

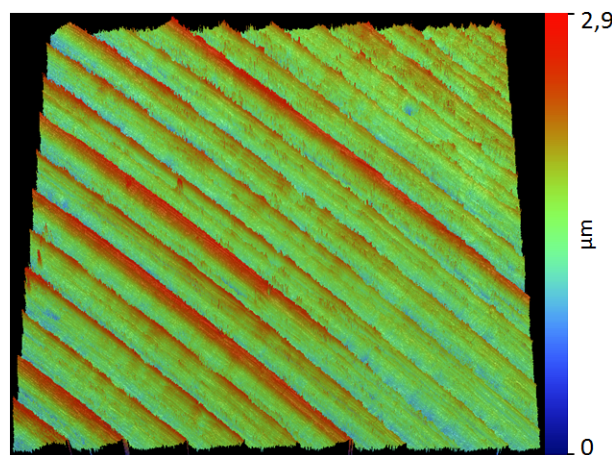


FIGURE 6.6 – Cartographie 3D de la surface de la peau coffrante PMr2 après surfaçage.

Dans la littérature, peu de travaux se sont consacrés à l'influence des signatures surfaciques des parois de coffrage sur l'adhérence du béton lors du décoffrage. Grâce au nouvel essai instrumenté développé dans ce travail de recherche, l'adhérence du béton est caractérisée sur de nombreuses peaux coffrantes et l'ensemble des résultats ont permis d'élaborer une nouvelle base de données. La méthodologie scientifique mise en place dans cette étude a permis d'identifier les signatures fonctionnelles de l'adhérence du béton qui sont la composition chimique de la peau, son énergie de surface libre et sa surface réelle développée.

L'adhérence du béton contre une paroi de coffrage est provoquée par un ensemble de phénomènes physico-chimiques qui sont l'ancrage mécanique, l'effet capillaire, l'adhésion chimique et les forces électrophysiques. Cependant, selon la surface coffrante, certains mécanismes prédominent à l'interface. Dans le cas de peaux lisses et/ou hydrophobes, les forces de capillarité entraînent principalement l'adhérence du béton par la formation d'une couche d'eau à l'interface peau-béton. C'est leur grande inertie chimique qui évite l'arrachement du béton pendant le décoffrage. L'adhérence du

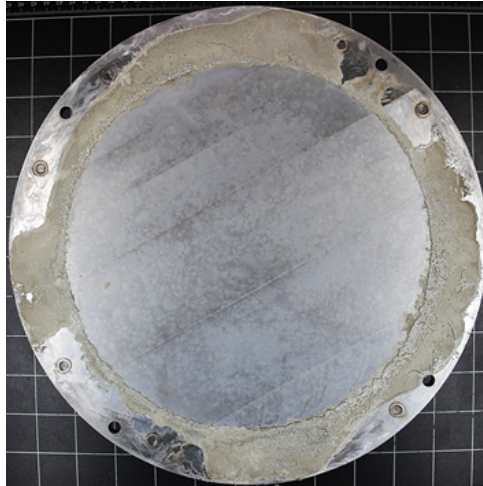


FIGURE 6.7 – Surface de l'éprouvette de la peau coffrante PMr2 surfacée à la suite de l'essai d'adhérence.

béton sur des peaux coffrantes métalliques réactifs au ciment est grandement due à des effets électrochimiques. Ceux-ci engendrent parfois la formation de composés interfaciaux provoquant l'arrachement du béton. Et pour les parois coffrantes poreuses, c'est essentiellement le phénomène d'ancrage mécanique qui régit l'adhérence du béton. Ces résultats sont en accord avec les recommandations qui préconisent d'éviter des parois poreuses et des ciments riches en silicates réactifs pour empêcher l'adhérence mécanique et chimique du béton [3, 4].

Dans ce travail de recherche, la propension à l'adhérence du béton sur les peaux coffrantes lors du décoffrage a été caractérisée à travers un seul béton ordinaire. Sa formulation a été choisie afin d'être représentatif et général des conditions sur site. Cependant, l'interface entre les peaux coffrantes et le béton est-elle impactée si la composition de celui-ci est modifiée? Hors adjuvant rajouté, le béton reste un milieu alcalin et très basique, ce qui implique que la réactivité chimique d'une peau coffrante vis-à-vis du béton est peu affectée et par conséquent les phénomènes d'adhésion chimique également. Toutefois, un béton avec un ratio $\frac{E}{C}$ plus grand entrainera potentiellement des effets capillaires plus importants dus à une plus forte quantité d'eau à l'interface. Au contraire, si le ratio $\frac{E}{C}$ du béton diminue, la proportion supérieure de fines pourrait faciliter la pénétration de la couche limite dans les aspérités de la surface coffrante et donc engendrer un ancrage mécanique du béton plus important. Également, si le béton possède des propriétés mécaniques inférieures à la résistance en traction de l'interface béton-paroi coffrante, la rupture de l'interface aura tendance à être cohésive avec un arrachement de béton. Cela démontre que, même si les signatures surfaciques affectent les caractéristiques de l'interface béton-banche, elles modifient également en volume la ZTI.

En plus de l'influence des signatures surfaciques des peaux coffrantes sur les frottements du béton, celles responsables de l'adhérence du béton lors du décoffrage ont également été déterminées. Dans la dernière partie, les fonctionnalités de la paroi coffrante pour limiter ces deux phénomènes interfaciaux sont présentées.

6.4 Identification des signatures surfaciques fonctionnelles des peaux coffrantes

A partir des résultats précédents, les signatures surfaciques fonctionnelles des parois coffrantes qui respectent le cahier des charges établi dans l'introduction générale peuvent être identifiées.

Lors des essais tribologiques, les parois coffrantes en polymère ont montré une plus faible résistance aux frottements par rapport aux peaux métalliques. La dégradation des peaux ne semble

pas être corrélée à la contrainte de frottement du béton. En fait, la dureté des polymères généralement très inférieure à celle des métaux expliquerait une abrasion plus importante de leur surface. Le manque de robustesse des parois polymères vis-à-vis de la friction du béton lors du coulage limite leur utilisation sur site bien que celles-ci soient inertes chimiquement au béton. Par ailleurs, les forts effets capillaires présents à l'interface durant les essais de décoffrage pourraient également freiner leur application sur site. En effet, avec des parois coffrantes de plusieurs mètres carrés, un effet de succion plus important pourrait être observé lors du décoffrage du *voile* et donc engendrer possiblement une dégradation du *parement* et du coffrage. Dans ces conditions, les peaux coffrantes de nature polymère ne sont pas recommandées sur site même si leurs signatures physico-chimiques et topographiques limitent la propension à l'accroche du béton sur leur surface.

En plus d'une dureté suffisamment élevée pour éviter la dégradation de la peau coffrante lors du coulage du béton, la contrainte de cisaillement interfaciale τ_{crit} de la couche fonctionnelle doit être strictement supérieure à la contrainte de frottement τ_f du béton. Dans le cas de la paroi coffrante PMr1, cette contrainte de cisaillement est 10^6 fois plus grande que les contraintes de friction. Par conséquent, la délamination de la couche d'oxyde est presque impossible pendant la coulée du béton. De plus, la présence d'oxydes durs en surface va protéger le substrat métallique sous-jacent de la corrosion [5] même si les oxydes possèdent une affinité électrochimique avec le calcium provoquant l'adhésion du béton sur la peau.

L'inertie chimique de la paroi coffrante envers le béton est donc primordiale pour limiter l'accrochage de celui-ci sur le coffrage. Les polymères et certains métaux sont intrinsèquement stables au contact du béton, cependant leurs autres signatures surfaciques doivent être contrôlées afin d'éviter totalement l'adhérence du béton. Il a été montré que la topographie chaotique de la peau RPf1 engendre un arrachement superficiel du béton bien qu'elle soit de nature polymérique. Cependant, les résidus n'adhèrent pas à la surface coffrante. Au contraire, le lissage de la surface de la peau métallique PMr2 a causé une forte augmentation de la contrainte de rupture interfaciale σ_{ri} lors du décoffrage.

Finalement, la paroi coffrante fonctionnelle doit être inerte chimiquement vis-à-vis du béton pour éviter les phénomènes chimiques et électrophysiques. Également, posséder une énergie superficielle libre γ_{sv} supérieure 21 mN.m^{-1} afin de limiter les effets capillaires. Et aussi avoir une topographie contrôlée avec une surface réelle développée S_{dr} minimum de 12 % dans le but de réduire à la fois l'ancrage mécanique et la capillarité du béton. Une valeur comprise entre 12 et 50 % pourrait également être acceptable d'après la figure 6.5a.

Et enfin, la dureté doit être à minima à 12 GPa pour obtenir une peau coffrante robuste aux frottements du béton.

6.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre final a été d'identifier l'impact des signatures surfaciques de la paroi coffrante sur les phénomènes interfaciaux provoqués par le béton. Les essais tribologiques ont montré que la contrainte de frottements du béton était directement reliée aux caractéristiques topographiques de la peau coffrante dans le cas de l'utilisation d'un béton compact. L'incrustation des particules fines dans les aspérités de la surface coffrante induit une plus forte résistance au cisaillement de la couche limite. Avec des bétons fluides, la contrainte est indépendante de la signature topographique des parois coffrantes mais semble être gouvernée par les propriétés de mouillage de celles-ci. Une forte dureté de surface limite la dégradation de la peau pendant le coulage du béton.

Les essais d'adhérence lors du décoffrage du béton ont révélé différents mécanismes d'adhérence selon les signatures de la paroi coffrante. La nature chimique de celle-ci est un des paramètres critiques dominant les phénomènes physico-chimiques à l'interface. Le contrôle de la topographie de la peau est nécessaire pour éviter l'ancrage mécanique et les effets capillaires du béton. Ces derniers sont également étroitement liés à la mouillabilité de la surface coffrante.

A partir de l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail de recherche, de nouvelles solutions de décoffrage ont été proposées en s'appuyant sur les signatures surfaciques des peaux coffrantes. L'axe suivant serait de mettre en place ces solutions sur site afin de confirmer leur performance obtenues en laboratoire. Ces essais à l'échelle 1 permettraient également de valider la méthodologie et les travaux scientifiques réalisés à l'échelle réduite.

6.6 Références

- [1] S. Bouharoun, “Comportement tribologique des huiles de décoffrage à l’interface béton/coffrage - Influence de la formulation du béton,” *Thèse de doctorat, Université d’Artois*, 2011. 142, 143
- [2] C. Djelal, Y. Vanhove, and A. Magnin, “Tribological behaviour of self compacting concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 821–828, 2004. 142
- [3] P. G. Allison, R. D. Moser, C. A. Weiss, P. G. Malone, and S. W. Morefield, “Nanomechanical and chemical characterization of the interface between concrete, glass-ceramic bonding enamel and reinforcing steel,” *Construction and Building Materials*, 2012. 148
- [4] M. M. Jalili, S. Moradian, and D. Hosseinpour, “The use of inorganic conversion coatings to enhance the corrosion resistance of reinforcement and the bond strength at the rebar/concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 233–238, 2009. 148
- [5] C. Ployaert, “La Corrosion des armatures des bétons armés et précontraints,” *Fédération de l’Industrie Cimentière Belge*, p. 15, 2008. 149

Conclusion générale

Conclusions

De nos jours, l'utilisation de coffrage sur sites pour la réalisation de structures bétonnées nécessite encore l'application de lubrifiant sur les parois coffrantes afin de limiter le frottement et l'adhérence du béton qui pourraient engendrer des défauts irréversibles. Le procédé de huilage des peaux reste un procédé contraignant, chronophage et répétitif. Des solutions alternatives à l'application d'huile ont déjà été développées dans la littérature mais ceux-ci manquent généralement de robustesse par rapport aux lubrifiants. De ce fait, l'objectif principal de ce travail de recherche était de caractériser de nouveaux procédés de décoffrage en s'appuyant sur les signatures surfaciques des parois coffrantes. En se basant sur les phénomènes interfaciaux béton-coffrage, deux axes scientifiques sont étudiés.

Le premier thème abordé dans cette étude est le comportement tribologique du béton contre la paroi coffrante. Les résultats montrent que les frottements engendrés par un BAP sur les coffrages sont notamment régies par des phénomènes de capillarité qui sont principalement impactés par les signatures physico-chimiques des peaux coffrantes. A l'inverse, avec des bétons plus compacts, les signatures topographiques des parois semblent gouverner la friction à l'interface. Une grande rugosité de la surface coffrante conduit à l'augmentation du coefficient de frottement du béton. Cette tendance est directement liée à une plus grande pénétration des particules fines dans les aspérités de la paroi qui limite le déplacement de la couche limite. Cependant, cette augmentation du coefficient ne reflète pas la dégradation des parois suite au frottement du béton. Cette plus faible robustesse est davantage corrélée par la dureté de surface des peaux.

Dans le second axe, ce travail s'est attaché à la compréhension des mécanismes d'adhérence sur la surface des parois coffrantes. D'après les lacunes mises en évidence dans l'état de l'art, un nouvel essai mécanique simulant le décoffrage des voiles a été développé. La quantification de l'adhérence a montré que la contrainte de rupture interfacial béton-peau coffrante est décorrélée de l'arrachement du béton provoqué au décoffrage. Les surfaces lisses ou hydrophobes génèrent d'importants effets capillaires à l'interface avec le béton contrairement aux peaux rugueuses qui cause un ancrage mécanique prédominant du béton. Les parois métalliques réactifs au ciment sont susceptibles de former des liaisons électrochimiques. En plus de la nature chimique, la surface réelle développée et l'énergie superficielle libre des peaux coffrantes dominent les mécanismes d'adhérence du béton.

Finalement, ces deux axes scientifiques ont permis de combler le manque de données concernant l'influence des signatures surfaciques des parois coffrantes sur les phénomènes de frottement et d'adhérence du béton. A partir de ces nouveaux résultats, de nouvelles solutions alternatives aux huiles sont proposées. Celles-ci s'appuient sur la fonctionnalité des signatures surfaciques qui permettent de réduire la dégradation des parois lors du coulage du béton ainsi que de l'adhérence de ce dernier sur les coffrages.

Perspectives

Dans ce travail de recherche, huit peaux coffrantes et deux bétons ont été étudiés. Dans le cadre du frottement du béton lors du coulage, seulement trois des peaux ont pu être caractérisées à travers les essais tribologiques. Il serait donc intéressant de caractériser les autres surfaces coffrantes afin de compléter l'étude de la friction du béton. Pareillement, l'étude de l'adhérence du béton adjuvanté sur les parois coffrantes serait utile en vue de déterminer l'impact d'un adjuvant chimique sur l'interface béton-paroi lors de phase de décoffrage.

La robustesse des parois coffrantes est indispensable pour une application sur site car les coffrages sont employés mille fois avant leur remplacement. De ce fait, il serait nécessaire d'effectuer des essais tribologiques cycliques dans le but de quantifier la résistance à l'usure des peaux sur le long-terme. Également, la répétition des essais d'adhérence sur de mêmes surfaces coffrantes permettrait de caractériser la propension à l'adhérence du béton en fonction du nombre de décoffrage réalisés. Pour cela, l'amélioration du dispositif expérimental et le développement d'une méthodologie alternative devraient être appliquées dans un premier temps.

La friction et l'adhérence du béton sur les parois coffrantes sont caractérisées à une échelle réduite dans cette étude. Des essais à l'échelle 1 directement sur des coffrages permettraient de confirmer les résultats obtenus en laboratoire avec des phénomènes à grande échelle lors du coulage et du décoffrage du béton. La validation sur site de ces résultats pourrait permettre de prédire la friction et l'adhérence du béton sur de nouvelles solutions coffrantes avant une utilisation sur chantier plus couteuse et contraignante.

Annexe A

Compléments

Les intervalles de confiance à 95% $IC_{95\%}$ selon la distribution T de Student [1] sont calculés selon la formule :

$$IC_{95\%} = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (A.1)$$

avec σ l'écart-type sur la mesure et t la constante multiplicatrice à un intervalle de confiance de 95 % dépendante du nombre de valeurs n pris en compte.

A.1 Signatures topographiques des peaux coffrantes

Peaux coffrantes	Rugosité moyenne arithmétique			Rugosité moyenne quadratique		
	S_a (µm)	σ (µm)	$IC_{95\%}$ (µm)	S_q	σ (µm)	$IC_{95\%}$ (µm)
PMr1	0,9	0,1	0,1	1,1	0,1	0,1
PMr2	3,3	0,2	0,1	4,2	0,2	0,2
RMf	1,6	0,2	0,1	2,0	0,2	0,2
RPa1'	2,5	0,4	0,2	3,3	0,5	0,3
RPa1''	0,8	0,1	0,1	1,0	0,1	0,01
RPa2	2,2	0,3	0,2	2,8	0,4	0,3
RPf1	6,3	0,5	0,4	7,7	0,6	0,4
RPf2	6,4	1,7	1,2	8,1	1,9	1,4

TABEAU A.1 – Paramètres d'amplitude S_a et S_q des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % $IC_{95\%}$.

Peaux coffrantes	Rapport de surface interfaciale développée		
	S_{dr} (%)	σ (%)	$IC_{95\%}$ (%)
PMr1	2,4	0,2	0,1
PMr2	11,9	1,6	1,1
RMf	4,3	0,1	0,1
RPa1'	8,2	1,6	1,2
RPa1''	1,5	0,2	0,1
RPa2	1,3	0,1	0,0
RPf1	72,6	1,1	0,8
RPf2	0,1	0,1	0,1

TABEAU A.2 – Paramètre hybride S_{dr} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % $IC_{95\%}$.

Peaux coffrantes	Volume de matière des pics		
	V_{mp} (nm ³ .nm ⁻²)	σ (nm ³ .nm ⁻²)	IC _{95%} (nm ³ .nm ⁻²)
PMr1	51	11	8
PMr2	73	21	15
RMf	55	8	5
RPa1'	80	9	7
RPa1''	52	9	6
RPa2	159	62	44
RPf1	416	24	17
RPf2	286	69	50

TABLEAU A.3 – Paramètres fonctionnels de volume V_{mp} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC_{95%}.

Peaux coffrantes	Volume de vide à cœur		
	V_{vc} (μm ³ .μm ⁻²)	σ (μm ³ .μm ⁻²)	IC _{95%} (μm ³ .μm ⁻²)
PMr1	1,7	0,1	0,1
PMr2	4,1	0,2	0,1
RMf	2,2	0,3	0,3
RPa1'	2,3	0,3	0,2
RPa1''	1,1	0,2	0,1
RPa2	3,7	0,7	0,5
RPf1	9,7	1,0	0,7
RPf2	9,4	2,0	1,5

TABLEAU A.4 – Paramètres fonctionnels de volume V_{vc} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC_{95%}.

Peaux coffrantes	Volume de vide dans les vallées		
	V_{vv} (nm ³ .nm ⁻²)	σ (nm ³ .nm ⁻²)	IC _{95%} (nm ³ .nm ⁻²)
PMr1	145	18	13
PMr2	507	26	18
RMf	242	33	24
RPa1'	209	31	22
RPa1''	109	18	13
RPa2	254	46	33
RPf1	731	60	43
RPf2	762	230	164

TABLEAU A.5 – Paramètres fonctionnels de volume V_{vv} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC_{95%}.

A.2 Signatures physico-chimiques des peaux coffrantes

Peaux coffrantes	Eau distillée			Glycérol		
	$\theta_c(^{\circ})$	$\sigma(^{\circ})$	IC _{95%} ($^{\circ}$)	$\theta_c(^{\circ})$	$\sigma(^{\circ})$	IC _{95%} ($^{\circ}$)
PMr1	104	4	2	93	1	1
PMr2	103	1	1	89	2	1
RMf	88	2	1	82	4	2
RPa1'	71	1	1	80	2	1
RPa1''	110	1	1	106	1	1
RPa2	109	1	0	100	1	1
RPf1	83	5	4	107	2	1
RPf2	112	2	1	103	3	2

TABLEAU A.6 – Angles de contact θ_c de l'eau distillée et du glycérol des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC_{95%}.

Peaux coffrantes	$\sqrt{\gamma_{SV}^p}$ (mN.m ⁻¹)	$\sqrt{\gamma_{SV}^d}$ (mN.m ⁻¹)	γ_{SV} (mN.m ⁻¹)
PMr1	1,5	3,7	15,6
PMr2	1,1	4,4	20,2
RMf	3,1	3,3	20,6
RPa1'	6,2	0,9	39
RPa1''	1,9	2,2	8,5
RPa2	1,3	3,2	12,0
RPf1	7,3	2,5	60,0
RPf2	1,2	3,0	10,4

TABLEAU A.7 – Composantes polaires $\sqrt{\gamma_{SV}^p}$, composantes dispersives $\sqrt{\gamma_{SV}^d}$ et énergies libres de surface γ_{SV} des peaux coffrantes.

Peaux coffrantes	W_a^{eau} (mJ.m ⁻²)	W_a^{gly} (mJ.m ⁻²)
PMr1	55,6	59,9
PMr2	56,6	64,4
RMf	75,1	72,1
RPa1'	96,4	74,2
RPa1''	47,8	46,4
RPa2	48,9	52,6
RPf1	128,0	105,6
RPf2	45,2	48,8

TABLEAU A.8 – Travaux d'adhésion de l'eau distillée W_a^{eau} et du glycérol W_a^{gly} sur les peaux coffrantes.

A.3 Schémas techniques des composants du dispositif de l'essai d'adhérence

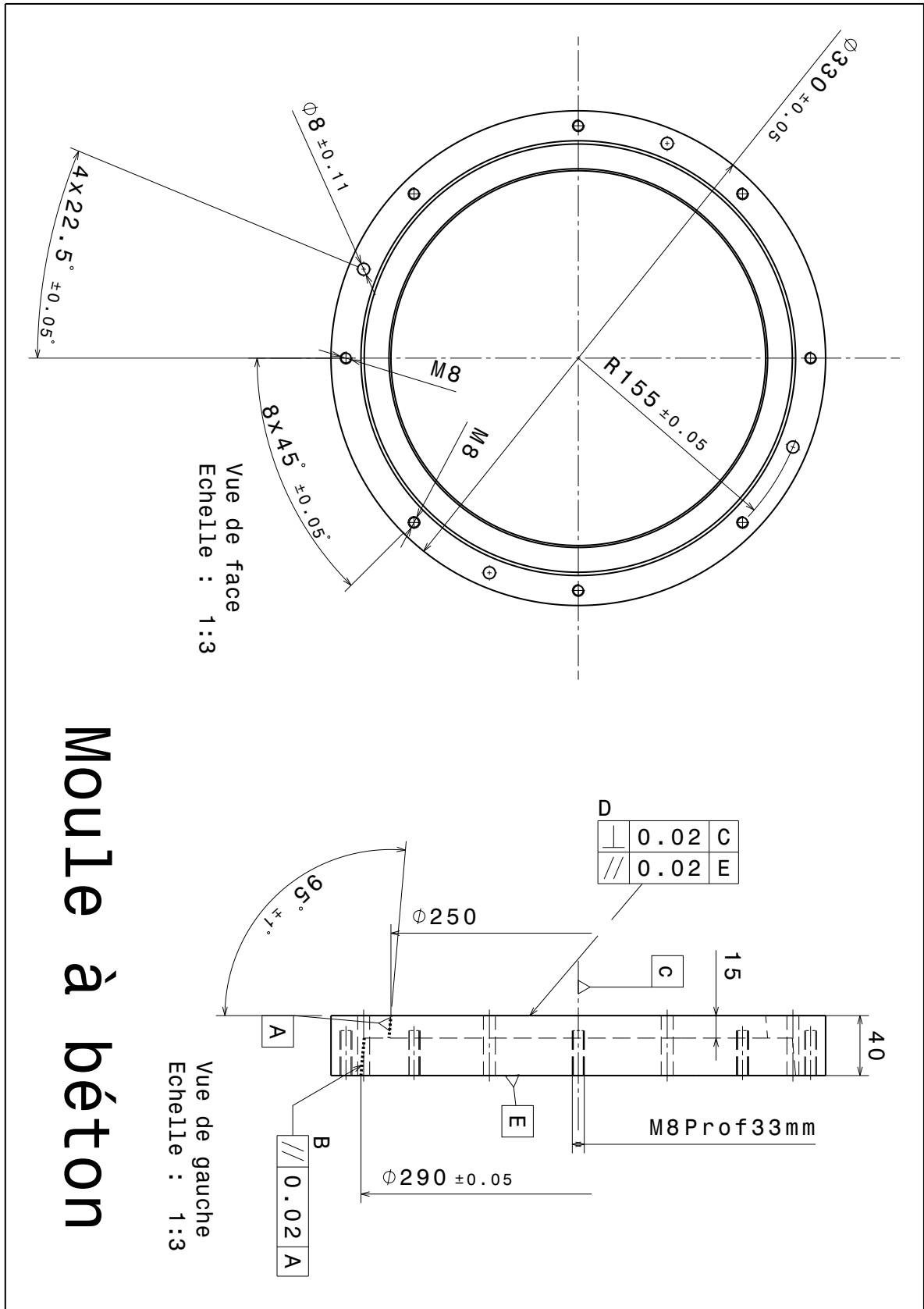


FIGURE A.1 – Schéma technique du moule à béton.

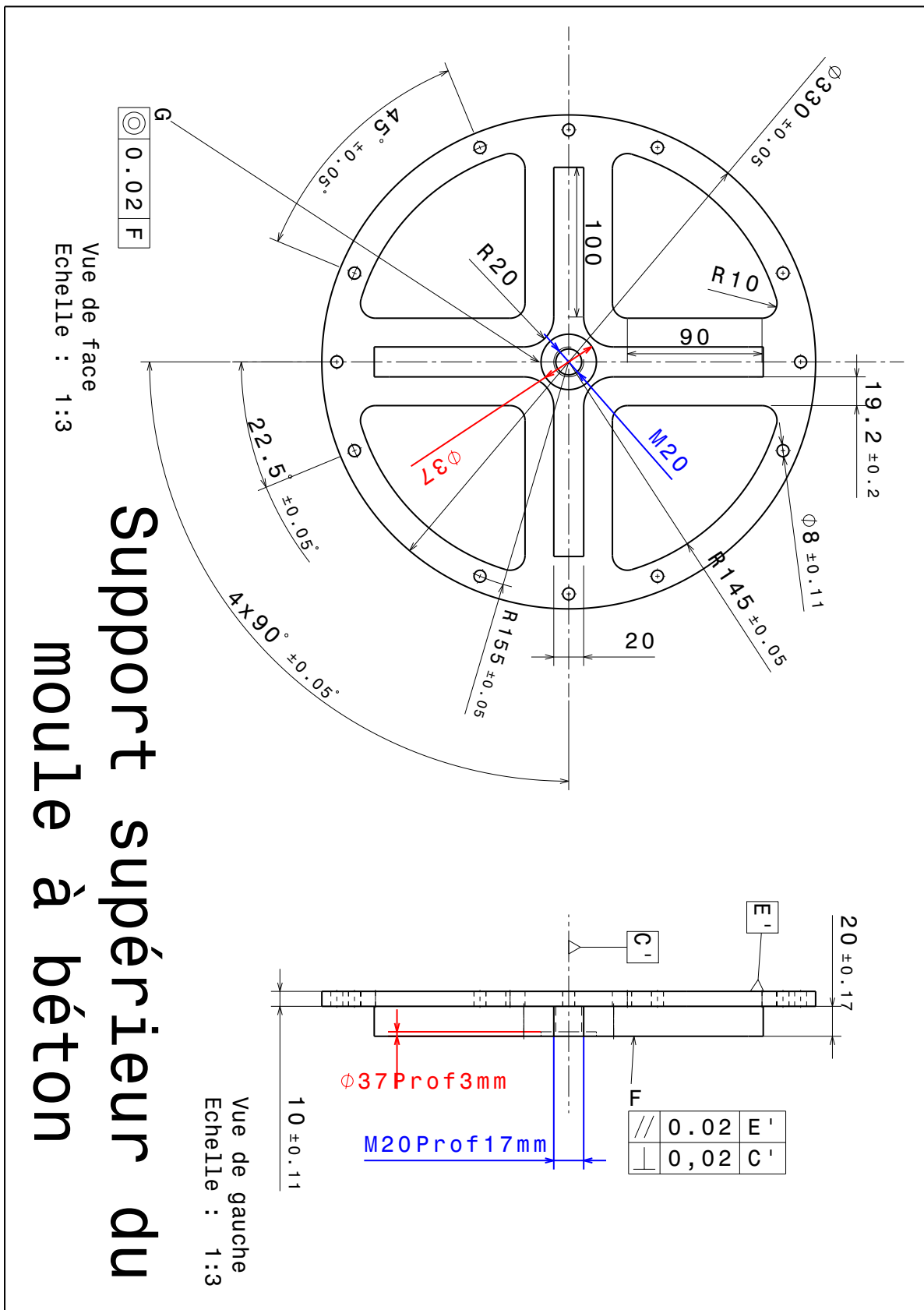


FIGURE A.2 – Schéma technique du support supérieur du moule à béton.

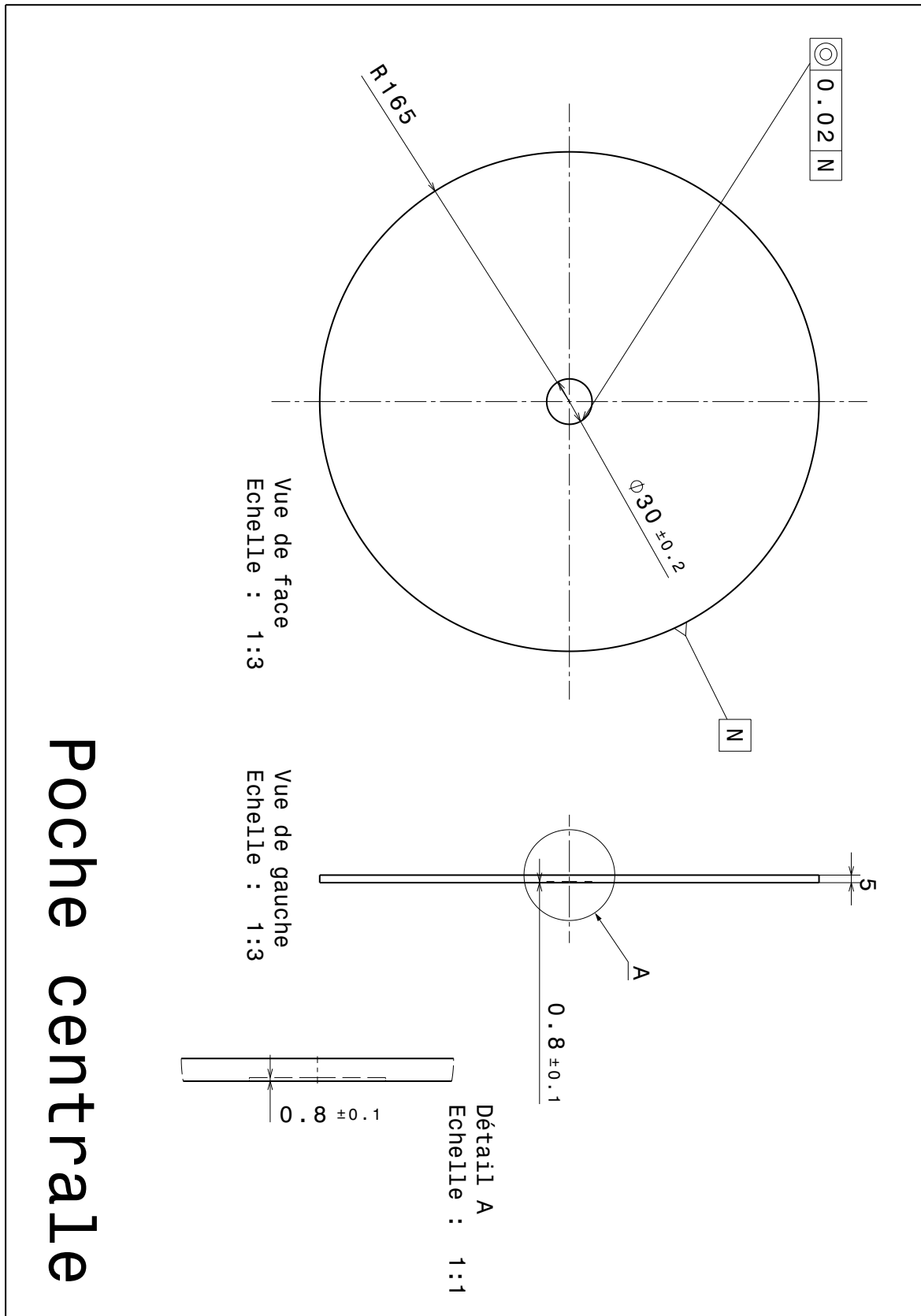


FIGURE A.3 – Schéma technique de la poche centrale de l'éprouvette de peau coffrante.

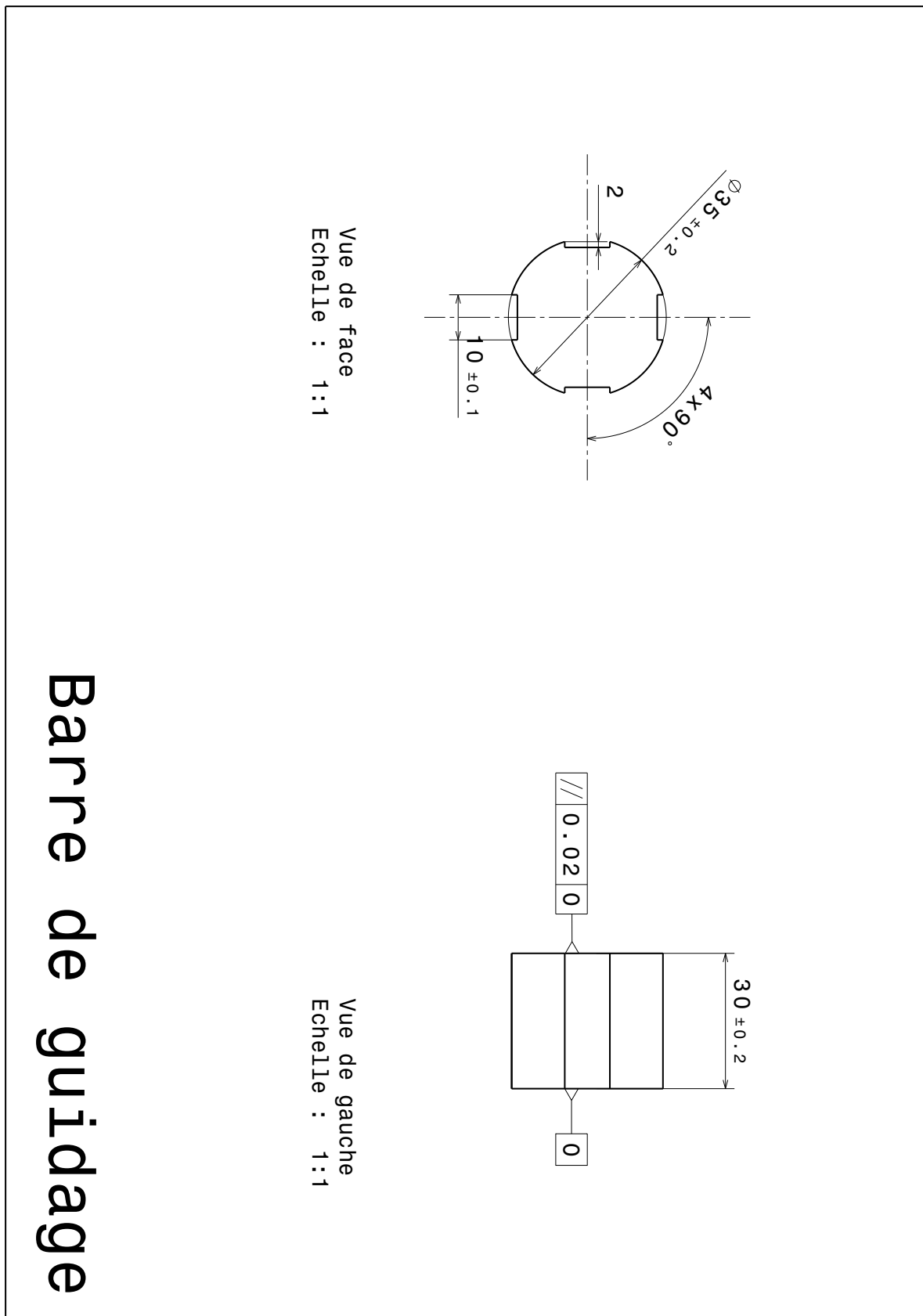


FIGURE A.4 – Schéma technique de la barre de guidage des raidisseurs de l'éprouvette de peau coffrante.

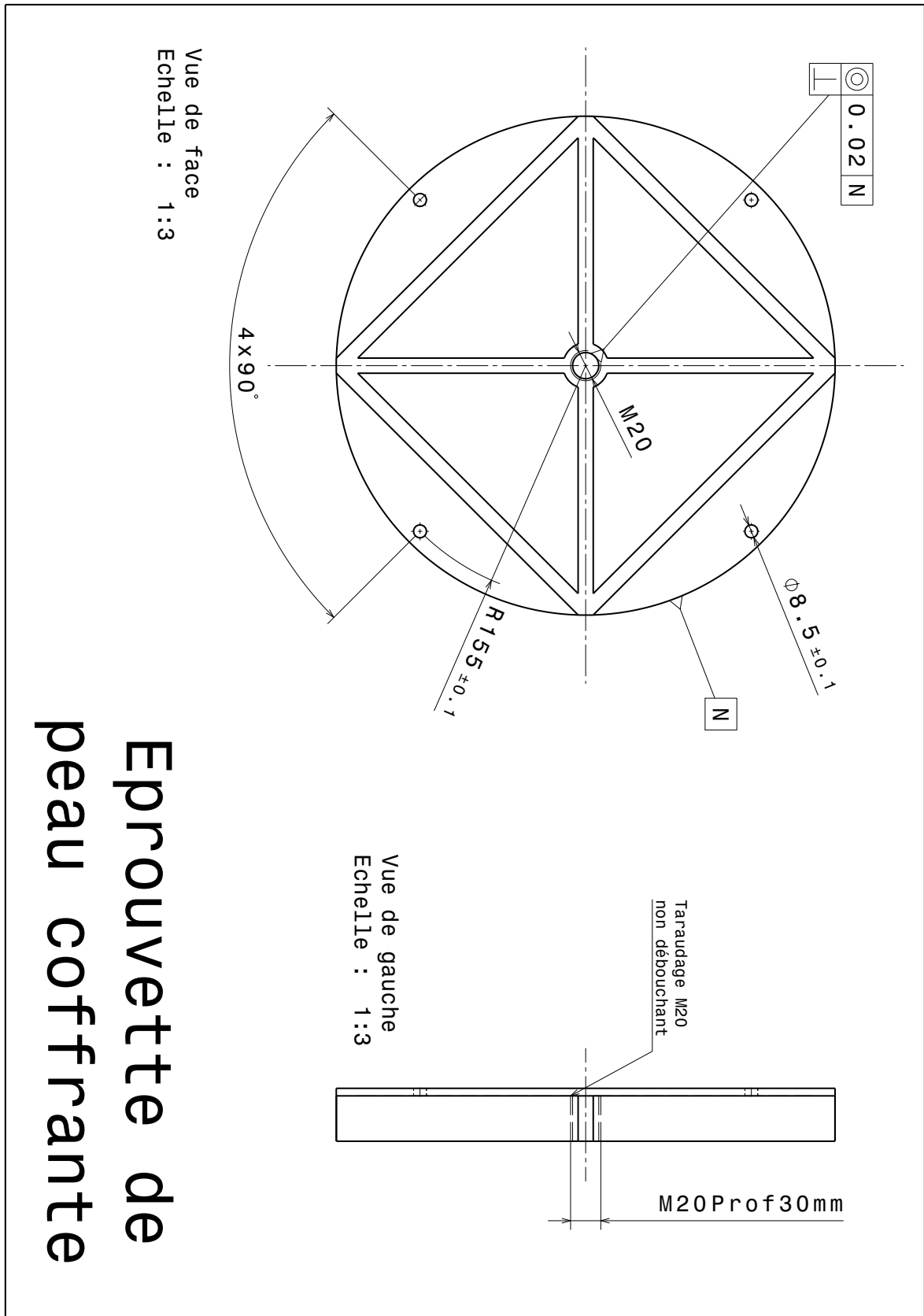
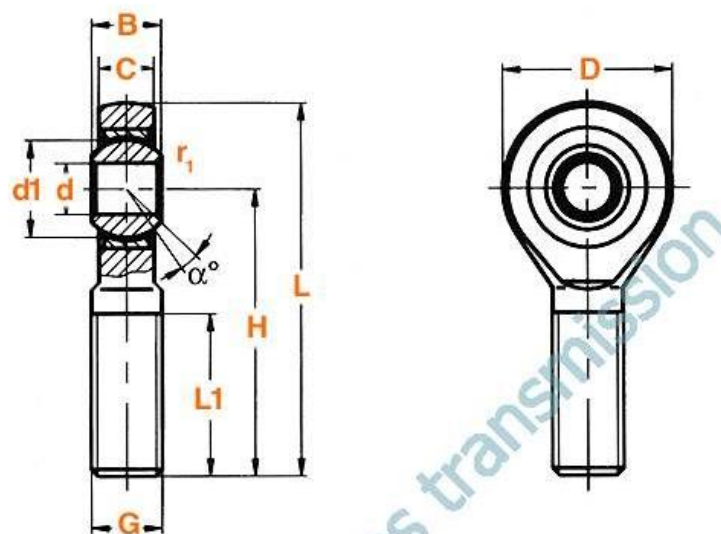


FIGURE A.5 – Schéma technique de l'éprouvette de peau coffrante.



<https://www.alpes-transmission.fr/roulement/rotule/piece/embout-a-rotule-male-filetage-a-droite-sa-c>



8.

SPECS	
Cote D (mm)	53
Cote H (mm)	78
Cote d (mm)	20
Cote L1 (mm)	43
Cote L (mm)	104,5
Cote D1 (mm)	29
Cote C (mm)	13,5
Cote B (mm)	16
Indice de charge dynamique (kN)	31
Indice de charge statique (kN)	60
Filetage G	M20 x 1,5
Angle (°)	9
Entretien	sans
Prix	19.34 €
Masse (g)	280

FIGURE A.6 – Schéma technique de l'embout à rotule mâle.

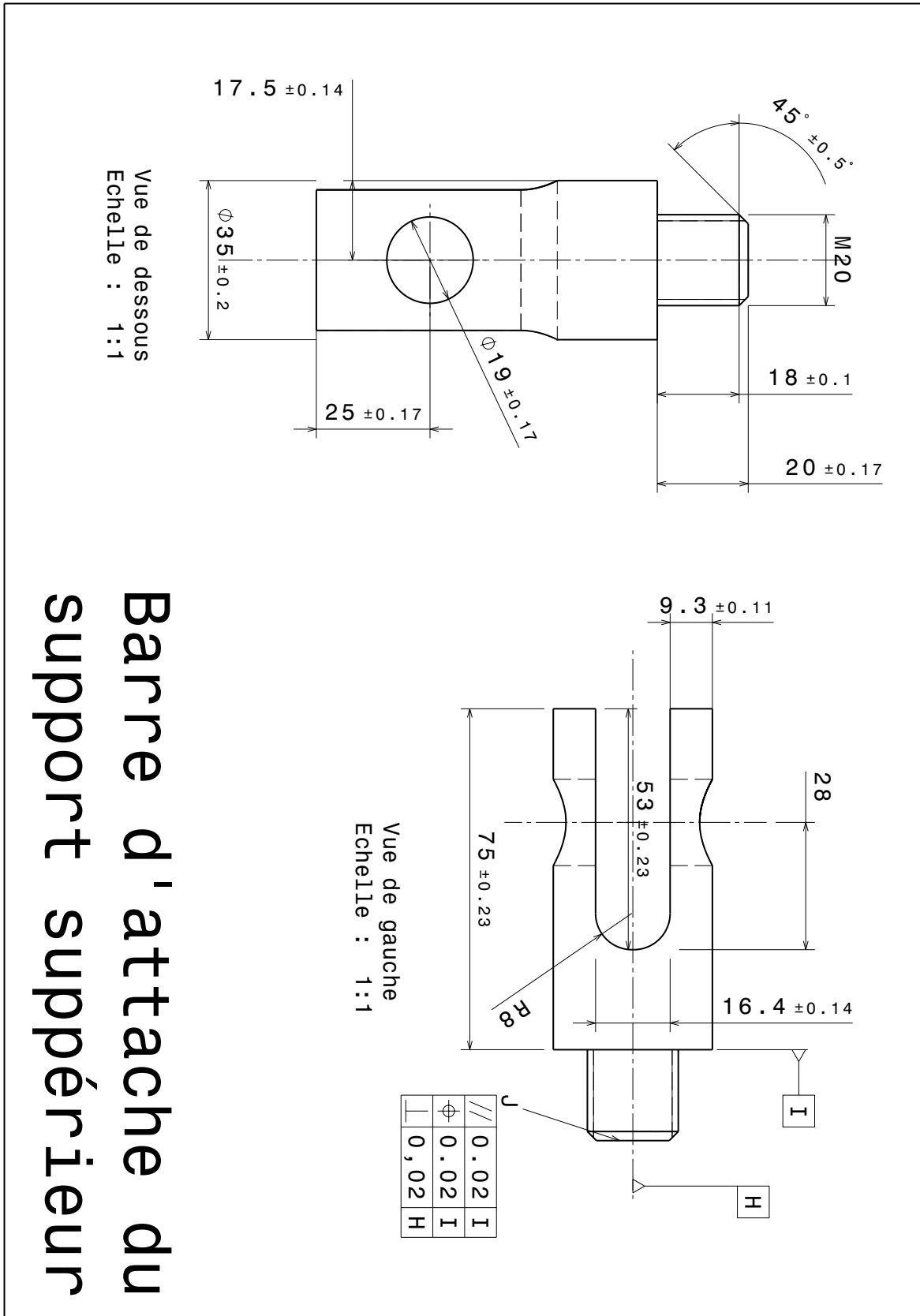


FIGURE A.7 – Schéma technique de la barre d'attache du support supérieur du moule à béton

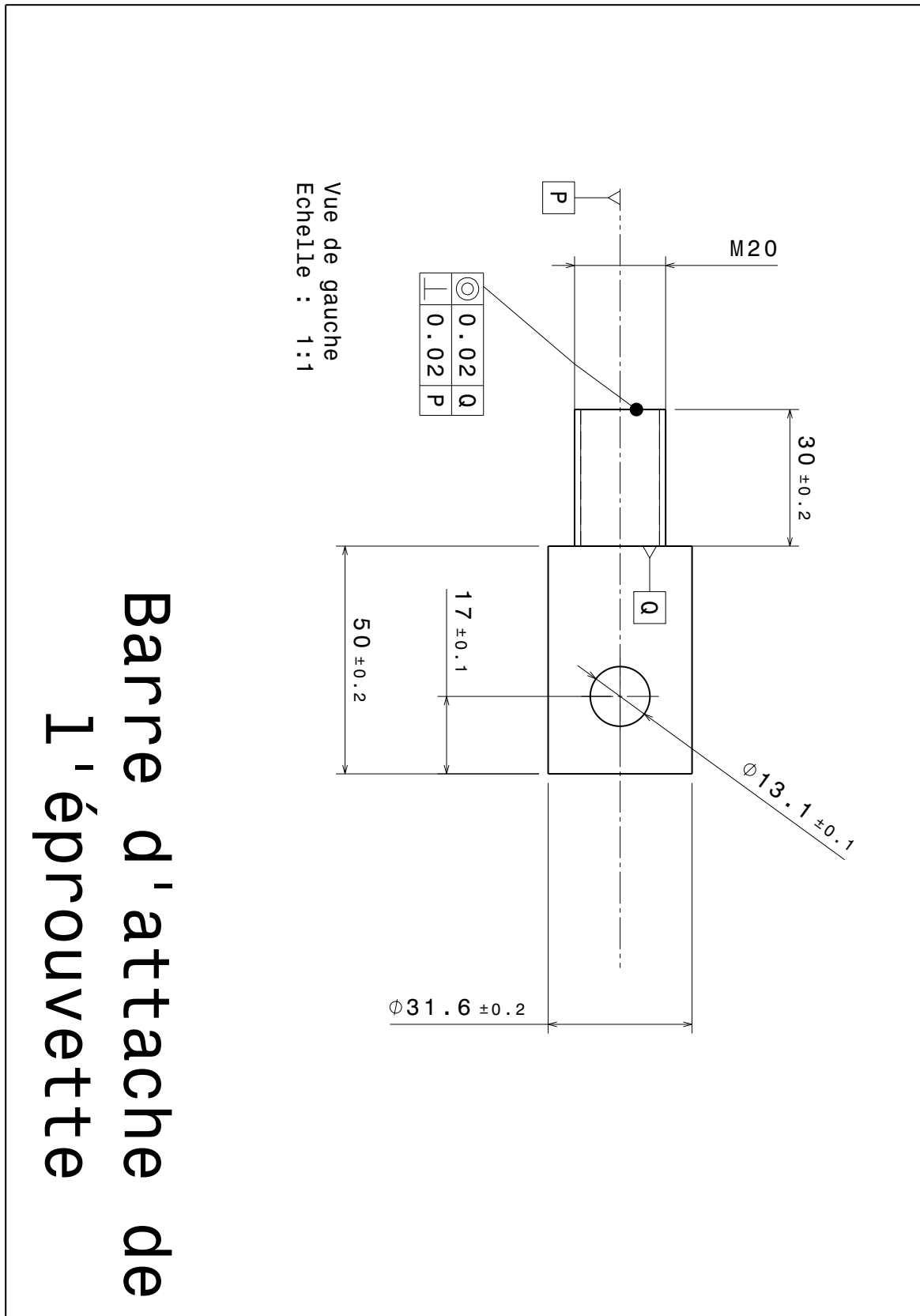


FIGURE A.8 – Schéma technique de la barre d'attache de l'éprouvette de peau coffrante

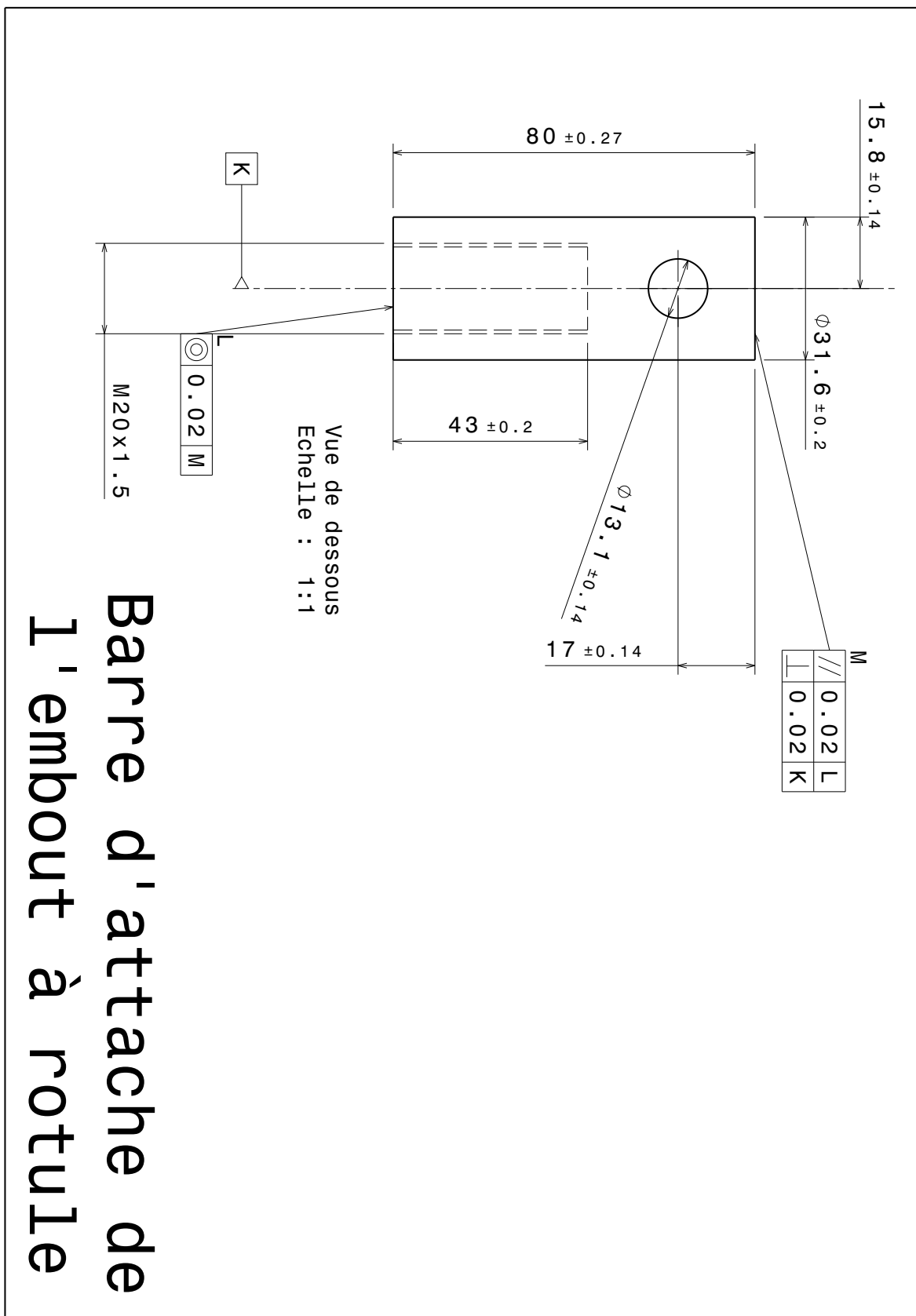


FIGURE A.9 – Schéma technique de la barre d'attache de l'embout à rotule

A.4 Adhérence du béton sur les peaux coffrantes

Peaux coffrantes	Force de rupture interfaciale		Contrainte de rupture interfaciale	
	F_{ri} (N)	σ (N)	σ_{ri} (MPa)	σ (MPa)
PMr1	996	310	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
PMr2	125	42	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$
RMf	755	49	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
RPa1"	2555	615	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
RPa2	1935	276	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
RPf1	13	11	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
RPf2	1203	173	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$

TABLEAU A.9 – Forces F_{ri} et contraintes σ_{ri} de rupture interfaciale béton-peaux coffrantes avec écarts-type σ .

A.5 Références

- [1] Astm Standard, “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size,” *ASTM International*, vol. E112-12, pp. 1–27, 2012. [I](#)

Annexe B

Liste des acronymes

- AA** alliage d'aluminium. 119, 122, 125, 126, XXIII
- ABS** acrylonitrile butadiene styrène. 36, 37, XXII
- ATG** analyse thermogravimétrique. 53, 82, 83
- ATR** réflectance totale atténuée – ou *attenuated total reflection* –. 53, 83
- BAP** béton autoplaçant. 13, 17–20, 51, 144, 153, XXI
- BTP** bâtiment et des travaux publics. 6, 12, 37
- CPF** coffrage à perméabilité contrôlée. 37
- DRX** diffraction des rayons X. 25, 31, 53, 65, 78, 80–82, 110, 111, XXII, XXIII
- DSC** calorimétrie différentielle à balayage – ou *differential scanning calorimetry* –. 53, 82, 83
- EDS** spectroscopie rayons X à énergie dispersive – ou *energy dispersive X-ray spectrometry* –. 53, 65, 78–81, 135, 137, 138, XXII, XXIV, XXV
- ENH** électrode normale à l'hydrogène. 136, 137
- FTIR** spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier – ou *fourier transform infraRed spectroscopy* –. 53, 82, 83
- IO** interféromètre optique. 56, 74, 105
- JCPDS** joint committee on powder diffraction standards. 78, 110
- MEB** microscope électronique à balayage. 25, 26, 30, 32, 33, 53, 71, 74, 80, 135–137, XXI, XXII, XXIV
- PDMS** polydiméthylsiloxane. 33, XXII
- POM** polyoxyméthylène. 32, 33
- PP** polypropylène. 82, 83
- PVC** polychlorure de vinyle – ou *polyvinyl chloride* –. 32
- SI** solution interstitielle. 35
- SP** superplastifiant. 13, 18–20, 50, XXI
- ZTI** zone de transition interfaciale. 25–27, 29, 129, 130, 148, XXI

Annexe C

Glossaire

armature Élément métallique noyé dans le béton pour lui conférer une meilleure résistance mécanique. 11, 29, 31–33

banche Élément modulaire de coffrage vertical. 5, 11, 13, 15, 22, 34, 38, 60, 65, 116, 117, 148

ferrailage Ensemble d'armatures métalliques du béton armé. 11

filetage Opération consistant à former un filet à l'intérieur d'un trou cylindrique. 118–121, 125, 126, XXIII

fleurage Relief uniforme et brillant de la surface d'un métal après galvanisation. 71, 74, 89

laitance Mélange très fluide composé de fines et d'eau. 61, 63, 128

malaxage Étape de la fabrication des bétons, au cours de laquelle sont mélangés les divers constituants. 50, 51, XXII

ouvrabilité Qualité décrivant la capacité du béton à être mis en oeuvre. 13, 50, 51, 65, XXII

parement Surface visible de la paroi en béton après décoffrage. 5, 6, 11, 13–15, 29, 34–37, 102, 149

ségrégation Phénomène de séparation des constituants d'un béton frais. 11, 13

voile Paroi obtenue par coulage du béton dans un coffrage vertical. 1, 5, 9, 11–14, 34, 38, 48, 51, 112, 116, 149, 153, XXI

Annexe D

Liste des symboles

a_{crit} Rayon de contact entre la pointe de rayage et la surface du matériau à la force critique L_{crit} (m). 95–97

C Quantité de ciment dans le béton ($kg.m^{-3}$). 13, 24–26, 28, 31, 37, 148, XXI, XXII

C_c Coefficient de courbure granulaire. 49, 50, XXV

C_u Coefficient d'uniformité granulaire. 49, 50, XXV

d_{crit} Largeur de la rayure à la force critique L_{crit} (m). 95–97

ΔH_f Enthalpie de fusion ($J.g^{-1}$). 53, 82

ΔH_f^{circ} Enthalpie de fusion 100 % cristallin ($J.g^{-1}$). 53

\emptyset_k Diamètre des particules de kaolin (m). 21, 22, XXI

E Quantité d'eau dans le béton ($kg.m^{-3}$). 13, 24–26, 28, 31, 37, 148, XXI, XXII

F_b Force de frottement du béton contre une paroi coffrante (N). 61

F_{crit} Force tangentielle de friction de la pointe de rayage sur la surface du matériau à la force critique L_{crit} (N). 96, 97

F_{ri} Force de rupture interfaciale (N). 27, 28, 63, 129, 130, XIII, XXVI

g Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$). 17, 54

γ_{LV} Tension superficielle d'un liquide ($N.m^{-1}$). 54, 55

γ_{LV}^d Composante dispersive de la tension superficielle d'un liquide ($N.m^{-1}$). 55, 56, 86

γ_{LV}^p Composante polaire de la tension superficielle d'un liquide ($N.m^{-1}$). 55, 56, 86

γ_{SL} Énergie interfaciale solide-liquide ($N.m^{-1}$). 55

γ_{SV} Énergie superficielle libre d'un solide ($N.m^{-1}$). 55, 85, 142, 145–147, 149, III, XXVI

γ_{SV}^d Composante dispersive de l'énergie superficielle libre d'un solide ($N.m^{-1}$). 55, 56, 84, 86, III, XXIII, XXVI

γ_{SV}^p Composante polaire de l'énergie superficielle libre d'un solide ($N.m^{-1}$). 55, 56, 84, 86, III, XXIII, XXVI

H Dureté mesurée par indentation instrumentée (Pa). 58, 87, 95–97

IC_{95%} Intervalle de confiance à 95 %. I–III, XXV, XXVI

L_{crit} Force normale critique de cisaillement d'un film sur un substrat (N). 95–97

M Masse molaire d'un composé chimique ($g.mol^{-1}$). 79

- MF Module de finesse d'un sable. 49, 50, XXV
- μ_b Coefficient de frottement du béton contre une paroi coffrante. 16, 17, 103, 105, 142, XXV
- μ_{crit} Coefficient de frottement de la pointe de rayage sur la surface du matériau à la force critique L_{crit} . 96
- ν Coefficient de Poisson d'un matériau. 96
- P_b Pression de contact du béton contre une paroi coffrante (Pa). 16, 17, 20, 21, 103–108, 142, 143, XXIII–XXV
- p_{ba} Pourcentage de béton accroché sur une paroi coffrante (%). 63, 134, 135, 139, 144, XXIV
- %m Pourcentage massique (%). 78, 79
- pH Potentiel hydrogène. 12, 23, 30–32, 137, XXII
- R_a Rugosité arithmétique moyenne d'un profil (m). 18–21, 32, 143, XXI
- r_c Rayon de contact (m). 117–119
- ρ Masse volumique ($kg.m^{-3}$). 54
- ρ_b Masse volumique du béton ($kg.m^{-3}$). 17, 118, 119
- R_t Rugosité totale d'un profil (m). 21, 22, XXI
- S_a Rugosité arithmétique moyenne d'une surface (m). 56, 75, 76, 84, 89, 107, 109, 110, 142–145, I, XXII, XXV
- S_b Affaissement du béton (m). 51
- S_c Surface de contact (m^2). 28, 61, 63
- S_{dr} Surface réelle développée (%). 56, 75–77, 84, 142, 145, 146, 149, I, XXII, XXVI
- D_b Étalement du béton (m). 17, 51
- σ Écart-type. I–III, XIII, XXV, XXVI
- σ_{ri} Contrainte de rupture en traction de l'interface entre le béton et une paroi coffrante (Pa). 28, 29, 33, 63, 117, 118, 131, 132, 134, 135, 139, 144, 149, XIII, XXIV, XXVI
- SM_a Moyenne arithmétique des hauteurs d'une surface (m). 57, 58, XXII
- S_q Rugosité quadratique moyenne d'une surface (m). 56, 75, 76, I, XXII, XXV
- τ_{crit} Contrainte de cisaillement critique d'un film sur un substrat (Pa). 95–97, 105, 149
- τ_f Contrainte de frottement du béton contre une paroi coffrante (Pa). 16, 18, 61, 103, 104, 142, 143, 149, XXIII, XXIV
- τ_{ri} Contrainte de rupture en cisaillement de l'interface entre le béton et une armature (Pa). 27, 29, 31, 32
- t_c Épaisseur de la couche fonctionnelle (m). 96, 97
- θ_B Angle de Bragg - Demi-angle de diffraction ($^\circ$). 53, 78, 80
- θ_c Angle de contact liquide-solide ($^\circ$). 55, 84, 85, III, XXII, XXVI
- V_{mp} Volume de matière des pics ($m^3.m^{-2}$). 56, 57, 75–77, 106–108, 112, II, XXII, XXIII, XXVI
- V_{vc} Volume de vide à cœur ($m^3.m^{-2}$). 56, 57, 75–77, 84, 142, 144, 145, II, XXII, XXVI
- V_{vv} Volume de vide des vallées ($m^3.m^{-2}$). 56, 57, 75–77, 142, 144, 145, II, XXII, XXVI
- W_a Travail d'adhésion liquide-solide ($N.m^{-1}$). 56, 86, 87, III, XXIII, XXVI

Annexe E

Liste des figures

1.1	Etapes de conception d'un voile vertical en béton armé : (a) Mise en place des coffrages, (b) Coulage du béton par gravité, (c) Durcissement du béton après vibration, (d) Décoffrage du voile.	12
1.2	Profils de concentration solide des particules Φ au voisinage d'une paroi selon différentes échelles de rugosité [43].	16
1.3	Principe du tribomètre développé par Vanhove [27].	17
1.4	Evolution de la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi en fonction de la pression de contact pour quatre compositions de béton standard [41].	18
1.5	Evolution de la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi en fonction de la pression de contact selon le dosage en SP [46].	19
1.6	Evolution de la contrainte de frottement à l'interface béton-paroi en fonction de la vitesse de glissement pour une pression de 200 kPa et un rugosité de peau coffrante R_a égale à 1,6 μm [27].	19
1.7	Evolution du coefficient de frottement d'un BAP en fonction de la pression de contact pour une vitesse de glissement de 2,5 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (a) $R_a = 0,3 \mu\text{m}$, (b) $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ [39].	20
1.8	Représentations schématiques de l'interface béton-peau acier. Détermination des pressions limites pour des rugosités de peau coffrante de 0,3 et 1,6 μm respectivement [39].	21
1.9	Evolution de la contrainte de frottement de trois pâtes d'argile de compositions différentes mais de taille de grains identique ($\varnothing_k = 1,0 \mu\text{m}$) en fonction de la rugosité R_t de la paroi [30].	21
1.10	Représentation des particules de kaolin sur une paroi en fonction de sa rugosité R_t [31].	22
1.11	Réprésentation schématique de l'ancrage mécanique [23].	23
1.12	Réprésentation schématique des effets capillaires [23].	23
1.13	Réprésentation schématique de l'adhésion chimique.	24
1.14	Réprésentation schématique des forces électrochimiques [18].	24
1.15	Réprésentation schématique des couches au voisinage du coffrage [4].	25
1.16	Micrographie MEB de la ZTI [75].	26
1.17	Évolution du pourcentage de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à l'interface béton-acier à 28 jours avec un ratio $\frac{E}{C}$. Les lignes inférieure et supérieure indiquent l'intervalle de confiance à 95 % [74].	26
1.18	Microstructure du faciès de rupture béton-acier avec observation de cristaux de CaOH_2 [75].	26
1.19	Évolution du module élastique à la ZTI au voisinage de l'interface béton-acier déterminé par microindentation [73].	27
1.20	Influence du temps de vibration t_v et du temps de durcissement sur la force de liaison acier-mortier [58].	28
1.21	Courbes force-déplacement des essais d'arrachement pour des aciers plats lisses inoxydables et au carbone [93].	30
1.22	Micrographie MEB de cristaux de CaHZn formés après 6 jours d'immersion dans une solution alcaline [95].	30

1.23 Comportement de l'acier galvanisé immergé dans une solution contenant des Ca^{2+} en fonction du pH [65].	31
1.24 Micrographie MEB de l'acier galvanisé traité au cérium après 1 jours d'immersion dans une solution alcaline [95].	32
1.25 Micrographie MEB de la surface d'un béton décoffré avec un moule en PDMS [63].	33
1.26 Schématisation de l'interface béton-huile-paroi [4].	35
1.27 Organisation de l'interface béton-huile-coffrage selon la nature chimique de l'huile [40].	36
1.28 Coffrage $120 \times 60 \times 8 \text{ cm}^3$ en polymère ABS de Geoplast® [112].	36
1.29 Diminution du rapport $\frac{E}{C}$ à l'interface béton-coffrage avec une nappe de décoffrage Zemdrain® [116].	37
2.1 Courbes granulométriques des granulats utilisés.	49
2.2 Distributions de la taille des grains de ciment et de filler [4].	50
2.3 Mode de malaxage des bétons	51
2.4 Mesure de l'ouvrabilité des bétons utilisés.	51
2.5 Morphoscan de Michalex Tribometrix.	54
2.6 Goutte de liquide en équilibre sur une surface.	55
2.7 Courbe de taux de longueur portante [14].	57
2.8 Spectres de rugosité SM_a pour les deux échantillons de référence.	58
2.9 Représentation schématique d'une courbe de force-déplacement.	59
2.10 Scratch Tester Millenium 200 de TriboTechnic.	59
2.11 Schéma de principe du tribomètre plan/plan [19].	60
2.12 Machine de traction 1185 d'Instron.	62
2.13 Analyse quantitative de béton accroché sur les éprouvettes après les essais de tirage.	63
3.1 Micrographies de la peau coffrante PMr1.	70
3.2 Micrographies de la peau coffrante PMr2.	71
3.3 Micrographies de la peau coffrante RMf.	71
3.4 Micrographies des coupes transversales des revêtements coffrants auto-adhésifs.	72
3.5 Micrographies des coupes transversales des revêtements coffrants fluides.	73
3.6 Cartographies 3D de la surface des peaux coffrantes métalliques de référence PMr1, PMr2 et RMf.	74
3.7 Cartographies 3D de la surface des revêtements coffrants polymères auto-adhésifs RPa1', RPa1'' et RPa2.	75
3.8 Cartographies 3D de la surface des revêtements coffrants polymères fluides RPa1' et RPa2'.	75
3.9 Paramètres d'amplitude S_a et S_q des surfaces des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.1).	76
3.10 Paramètre hybride S_{dr} des surfaces des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.2).	77
3.11 Paramètres fonctionnels de volume V_{mp} , V_{vc} et V_{vv} des surfaces des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans les tableaux A.3, A.4 et A.5).	77
3.12 Diagramme DRX de la peau coffrante PMr1.	78
3.13 Spectres EDS de la peau coffrante PMr1.	79
3.14 Microstructure du substrat métallique de la peau coffrante PMr1.	80
3.15 Diagramme DRX de la peau coffrante de référence PMr2.	80
3.16 Cartographies EDS de la surface coffrante PMr2.	81
3.17 Diagramme DRX du revêtement métallique coffrant RMf.	82
3.18 Analyses chimiques de la couche fonctionnelle du revêtement coffrant RPa1'.	83
3.19 Goutte d'eau déposée sur la surface de la peau coffrante (a) RPa1' et (b) RPa2'.	84
3.20 Angles de contact θ_c des liquides de référence sur les peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.6).	85
3.21 Courbes d'Owens-Wendt appliquées à l'eau et au glycérol pour les peaux coffrantes étudiées.	85

3.22	Sommes des composantes polaires γ_{SV}^p et dispersives γ_{SV}^d des peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.7).	86
3.23	Travaux d'adhésion de l'eau et du glycérol W_a sur les peaux coffrantes (Valeurs en annexe dans le tableau A.8).	87
3.24	Rayage surfacique de la peau coffrante PMr1.	88
3.25	Rayage surfacique de la peau coffrante PMr2.	89
3.26	Rayage surfacique du revêtement métallique coffrant RMf.	90
3.27	Rayage surfacique du revêtement polymère coffrant RPa1'.	91
3.28	Rayage surfacique du revêtement polymère coffrant RPa1''.	92
3.29	Rayage surfacique du revêtement polymère coffrant RPa2.	93
3.30	Rayage surfacique du revêtement coffrant fluide RPF1.	94
3.31	Rayage surfacique du revêtement coffrant fluide RPF2.	94
4.1	Évolution des forces tangentielles F_{mes} et F_v en fonction de la durée de l'essai pour une surface PMr2 avec un béton B32 à une pression de contact de 110 kPa.	102
4.2	Représentations schématiques de l'interface béton-peau coffrante selon le béton étudié.	103
4.3	Évolution des contraintes de frottement τ_f des bétons B32 et BAP36 en fonction de la pression de contact P_b pour les trois peaux coffrantes étudiées.	104
4.4	Évolution de la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau coffrante PMr1 en fonction de la pression de contact P_b suite à la friction du béton B32.	106
4.5	Surface de la peau coffrante PMr1 suite à la friction du béton B32 à 110 kPa.	107
4.6	Évolution de la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau coffrante PMr2 en fonction de la pression de contact P_b suite à la friction du béton B32.	107
4.7	Surface de la peau coffrante PMr2 suite à la friction du béton B32 à 110 kPa.	108
4.8	Évolution de la variation du volume de matière des pics ΔV_{mp} de la peau coffrante RPa1' en fonction de la pression de contact P_b suite à la friction du béton B32.	108
4.9	Surface de la peau coffrante RPa1' suite à la friction du béton B32 à 110 kPa.	109
4.10	Surface de la peau coffrante PMr1 _c après utilisation sur site.	109
4.11	Diagrammes DRX de la paroi PMr1 neuve (PMr1 _n) et utilisée sur site (PMr1 _c ^{corrosion} et PMr1 _c ^{béton}).	110
4.12	Surface de la peau coffrante PMr2 _c après utilisation sur site.	111
4.13	Diagrammes DRX de la paroi PMr2 neuve (PMr2 _n) et utilisée sur site (PMr2 _c).	111
4.14	Surface de la peau coffrante RPa1' _c après utilisation sur site.	112
5.1	Représentations schématiques des procédés de décoffrage.	117
5.2	(a) Schéma de la barre de guidage, (b) Schéma de l'éprouvette de peau coffrante.	118
5.3	Schéma du moule à béton.	119
5.4	Schéma du support supérieur du moule à béton.	119
5.5	Socle de la machine de traction.	120
5.6	Schéma de la barre d'attache de l'éprouvette de peau coffrante.	120
5.7	Embout à rotule mâle d'Alpes Transmission Mécanique.	121
5.8	Schémas des attaches du moule à béton.	121
5.9	Simulation numérique de la déformation du moule à béton.	123
5.10	Simulations numériques de la déformation du support supérieur du moule à béton.	124
5.11	Simulations numériques de la déformation de l'éprouvette de peau coffrante.	125
5.12	Usinage du moule à béton avec son support supérieur à partir d'un bloc d'AA 2007 (avant les étapes de perçage-filetage).	126
5.13	Conception d'une éprouvette de peau coffrante.	127
5.14	Usinage des pièces d'attache.	127
5.15	Mise en place du dispositif de l'essai d'adhérence.	128
5.16	Evolution de la charge de tirage en fonction du déplacement de la traverse lors d'un essai d'adhérence avec post-traitement de la courbe de traction.	130
5.17	Courbes de traction traitées obtenues pour des éprouvettes de peau coffrante PMr1.	130

5.18	Contraintes de rupture interfaciale béton-peau coffrante σ_{ri} déterminées par les essais d'adhérence (Valeurs en annexe dans le tableau A.9).	132
5.19	Surfaces des peaux coffrantes impliquant un arrachement du béton.	133
5.20	Surfaces des peaux coffrantes impliquant une décohésion totale du béton.	134
5.21	Corrélation des contraintes de rupture interfaciale σ_{ri} avec les pourcentages de béton accroché p_{ba} .	135
5.22	Second essai d'adhérence sur une éprouvette de peau coffrante RMf reconditionnée.	136
5.23	Micrographies MEB de la peau coffrante RMf après un et deux essais d'adhérence.	136
5.24	Pics EDS de la surface coffrante RMf avant et après réaction du béton.	137
5.25	Micrographies MEB de l'interface béton-peau coffrante PMr2.	137
5.26	Analyses EDS de l'interface béton-peau coffrante PMr2.	138
6.1	Évolution des contraintes de frottement du béton BAP36 en fonction de la pression de contact pour les trois peaux coffrantes étudiées.	143
6.2	Évolution des contraintes de frottement τ_f du béton B32 en fonction de la pression de contact P_b pour les trois peaux coffrantes étudiées.	143
6.3	Pourcentage de fines piégées en fonction de la peau coffrante lors du frottement du béton B32.	144
6.4	Corrélation des signatures topographiques des peaux coffrantes en fonction des résultats d'adhérence.	145
6.5	Corrélation des signatures surfaciques fonctionnelles des peaux coffrantes en fonction des résultats d'adhérence.	146
6.6	Cartographie 3D de la surface de la peau coffrante PMr2 après surfacage.	147
6.7	Surface de l'éprouvette de la peau coffrante PMr2 surfacée à la suite de l'essai d'adhérence.	148
A.1	Schéma technique du moule à béton.	IV
A.2	Schéma technique du support supérieur du moule à béton.	V
A.3	Schéma technique de la poche centrale de l'éprouvette de peau coffrante.	VI
A.4	Schéma technique de la barre de guidage des raidisseurs de l'éprouvette de peau coffrante.	VII
A.5	Schéma technique de l'éprouvette de peau coffrante.	VIII
A.6	Schéma technique de l'embout à rotule mâle.	IX
A.7	Schéma technique de la barre d'attache du support supérieur du moule à béton	X
A.8	Schéma technique de la barre d'attache de l'éprouvette de peau coffrante	XI
A.9	Schéma technique de la barre d'attache de l'embout à rotule	XII

Annexe F

Liste des tableaux

2.1	Formulations des bétons.	48
2.2	C_u , C_c et MF des granulats utilisés pour la confection des bétons.	50
2.3	Liste des peaux coffrantes étudiées.	52
2.4	Propriétés des liquides de référence utilisés.	54
2.5	Paramètres de rugosité retenus.	56
2.6	Capacités maximales admissibles de la machine de traction 1185 d'Instron.	62
3.1	Tableau synthétique des observations micrographiques des peaux coffrantes étudiées. La couche 1 est celle en contact avec le substrat métallique.	73
3.2	Pourcentages massiques en fer et oxygène déterminés par EDS pour la peau coffrante PMr1.	78
3.3	Pourcentages massiques théoriques en fer et oxygène pour le Fe_2O_3 et le Fe_3O_4	79
3.4	Estimation massique EDS des éléments chimiques à la surface de la peau coffrante RMf.	81
3.5	Paramètres critiques de rayage de la peau coffrante PMr1.	89
3.6	Paramètres critiques de rayage de la peau coffrante PMr2.	89
3.7	Paramètres critiques de rayage du revêtement métallique coffrant RMf.	90
3.8	Paramètres critiques de rayage du revêtement polymère coffrant RPa1'.	91
3.9	Paramètres critiques de rayage du revêtement polymère coffrant RPa1''.	92
3.10	Paramètres critiques de rayage du revêtement polymère coffrant RPa2.	93
3.11	Paramètres critiques de rayage du revêtement coffrant fluide RPF1.	93
3.12	Paramètres critiques de rayage du revêtement coffrant fluide RPF2.	95
3.13	Forces critiques de rayage des peaux coffrantes étudiées.	95
3.14	Modèles de rayage appliqués à la peau coffrante de référence PMr1.	97
3.15	Récapitulatif des probabilités de genèse des interactions entre le béton et les parois de coffrage.	98
4.1	Coefficients de frottement μ_b des bétons BAP36 et B32 selon les peaux coffrantes testées.	103
4.2	Classification de la dégradation des peaux coffrantes en fonction de la pression P_b et du béton employé suite aux essais de frottement. Classement d'1 (non altérée) à 5 (très dégradée).	105
5.1	Rayons minimums calculés selon les valeurs de contrainte à la rupture d'une interface béton-peau coffrante acier.	118
5.2	Propriétés mécaniques des matériaux appliquées pour la simulation d'éléments finis.	122
5.3	Paramètres de soudage par résistance employés.	131
5.4	Pourcentages de béton accroché p_{ba} sur les peaux coffrantes.	134
A.1	Paramètres d'amplitude S_a et S_q des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % $IC_{95\%}$	I

A.2	Paramètre hybride S_{dr} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC _{95%} .	I
A.3	Paramètres fonctionnels de volume V_{mp} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC _{95%} .	II
A.4	Paramètres fonctionnels de volume V_{vc} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC _{95%} .	II
A.5	Paramètres fonctionnels de volume V_{vv} des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC _{95%} .	II
A.6	Angles de contact θ_c de l'eau distillée et du glycérol des peaux coffrantes avec écarts-type σ et intervalles de confiance à 95 % IC _{95%} .	III
A.7	Composantes polaires $\sqrt{\gamma_{SV}^p}$, composantes dispersives $\sqrt{\gamma_{SV}^d}$ et énergies libres de surface γ_{SV} des peaux coffrantes.	III
A.8	Travaux d'adhésion de l'eau distillée W_a^{eau} et du glycérol W_a^{gly} sur les peaux coffrantes.	III
A.9	Forces F_{ri} et contraintes σ_{ri} de rupture interfaciale béton-peaux coffrantes avec écarts-type σ .	XIII

DEVELOPPEMENT D'UN PROCEDE FRUGAL DE DEMOULAGE IN SITU DES PAROIS DE COFFRAGE – ETUDE DES SIGNATURES FONCTIONNELLES DES PAROIS DE COFFRAGE

RESUME : Dans le domaine du génie civil, la pulvérisation d'huile de décoffrage est devenue indispensable pour limiter le frottement et l'adhérence du béton sur les parois des coffrages. Leur utilisation sur site est contraignante car leur application est chronophage et polluante. Aujourd'hui, les enjeux résident dans le développement de nouvelles solutions alternatives aux huiles en s'appuyant sur les signatures surfaciques des parois coffrantes. Bien qu'un fort travail soit réalisé sur le développement d'huiles végétales écologiques, peu d'études analysent l'impact de ces signatures sur les phénomènes interfaciaux agissant entre le béton et le coffrage. Par conséquent, dans ce travail de thèse, le frottement du béton sur des parois coffrantes a été étudié dans un premier temps à l'aide d'un tribomètre plan/plan simulant les conditions de coulée du béton. Après avoir développé un essai instrumenté à l'échelle réduite du laboratoire permettant de reproduire le processus de décoffrage d'un voile sur site, l'adhérence du béton a été ensuite quantifiée sur différentes surfaces des parois de coffrage. L'analyse des données expérimentales et la caractérisation surfacique multiphysique des parois coffrantes permettent d'établir la fonctionnalité des signatures des parois sur le frottement et l'adhérence du béton. Ces corrélations sont utilisées pour proposer une solution de décoffrage innovante permettant d'éviter ses phénomènes à l'interface béton-coffrage.

Mots clés : Paroi coffrante ; Béton ; Interface ; Signature surfacique ; Frottement ; Adhérence.

DEVELOPMENT OF A FRUGAL PROCESS OF IN SITU FORMWORK REMOVAL – STUDY OF FUNCTIONAL SIGNATURES OF FORMWORK SKINS

ABSTRACT : In the civil engineering industry, the formwork oil spraying has become essential to avoid the concrete friction and adhesion on the formwork skins. Their usage on site is limited because their application is time consuming and polluting. Nowadays, the challenges lie in the development of new alternatives to oils based on surface signatures of formwork skins. Even though a large amount of work investigates novel formulations for ecological oils, few studies investigate the effect of these signatures on interfacial phenomena acting between concrete and formwork. Thus, in the present thesis work, the concrete friction on formwork skins has been studied first using a plan/plan tribometer simulating the condition of concrete forming. After developing a small laboratory-scale instrumented test to reproduce the formwork removal process on site, concrete adhesion was secondly quantified. The analysis of experimental data and the multi-physics characterization of formwork surfaces make it possible to establish the functionality of the signatures of skins on the friction and the adhesion of concrete, respectively. These correlations are used to propose an ideal solution of formwork limiting these phenomena to the interface concrete-formwork.

Keywords : Formwork skin ; Concrete ; Interface ; Surface signature ; Friction ; Adherence.