

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil et d'Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

MARS Lilia

**Thème : Innovation dans les matériaux intelligents pour la
construction**

Sous la direction de : Dr. KHALDI. Nacera

Juin 2025

Remerciements

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir permis de réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'achèvement de ce mémoire. En premier lieu, à ma famille, qui m'a toujours soutenu, encouragé et aimé inconditionnellement tout au long de mon parcours académique. Un merci particulier à mes parents pour leur soutien sans faille et leurs sacrifices qui ont été une source d'inspiration constante.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à mon directeur de mémoire, **Dr KHALDI Nacera**, pour sa guidance, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de cette recherche. Son expertise a été essentielle pour mener à bien ce travail.

Un grand merci à l'ensemble des enseignants et des chercheurs de 08 Mai 1945 de Guelma, pour leurs enseignements enrichissants et leur disponibilité.

Je n'oublie pas mes amis et camarades, pour leur amitié, leurs encouragements et leur soutien tout au long de cette aventure académique.

Enfin, je remercie toutes les personnes, proches ou non, qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce mémoire.

Que Dieu accorde à chacun la réussite et la prospérité dans toutes ses entreprises.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

À Mes chers parents

À Ma Soeurs et mon frère

À Toute ma famille

À mes amies

À La promotion 2025 master 2, structures de l'université 8 Mai 1945 Guelma

Lilia

Résumé

Les matériaux intelligents sont des matériaux capables de réagir activement aux stimuli externes comme la température, la pression ou les vibrations. Dans le domaine de la construction, ils offrent des solutions novatrices pour surveiller l'état des structures en temps réel et optimiser la sécurité et la durabilité. Trois exemples principaux de matériaux intelligents étudiés dans ce cadre sont les matériaux thermoactifs, les matériaux auto-réparateurs et les matériaux piézoélectriques.

Les bétons thermoactifs sont conçus pour réagir aux variations de température. Ils intègrent des matériaux spécifiques (par exemple des microcapsules ou des agrégats spéciaux) qui aident à réguler la température interne du béton, ce qui réduit les effets de dilatation thermique et augmente la stabilité structurelle. Ces bétons sont particulièrement utiles dans les régions soumises à des variations de température importantes et dans les projets nécessitant une gestion thermique efficace.

Les matériaux piézoélectriques sont capables de générer un courant électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique (vibrations ou déformations). Cette propriété est exploitée dans la construction pour créer des systèmes de détection intégrés, permettant de suivre en temps réel l'évolution des contraintes et des microfissures dans une structure. Ils sont utiles pour les projets de surveillance structurelle continue, notamment dans les ponts, les bâtiments de grande hauteur, ou les infrastructures sensibles.

Les matériaux auto-réparateurs, quant à eux, possèdent la capacité unique de colmater leurs propres fissures de manière autonome. En intégrant des agents cicatrisants (comme des bactéries ou des polymères encapsulés) dans leur matrice, ils peuvent activer un processus de guérison en présence de dommages, prolongeant ainsi significativement la durée de vie des structures et réduisant le besoin d'interventions de maintenance coûteuses. Ils sont particulièrement prometteurs pour les ouvrages difficiles d'accès ou soumis à des environnements agressifs.

L'intégration de ces matériaux pose cependant des défis techniques et économiques : leur coût est encore élevé, et ils requièrent souvent une expertise spécifique pour leur mise en

œuvre. Néanmoins, leurs applications prometteuses dans le monitoring et la maintenance préventive des infrastructures ouvrent la voie à des bâtiments et ouvrages intelligents, capables de réagir aux changements environnementaux et de signaler les signes de faiblesse avant qu'ils ne deviennent critiques.

Mots-clés : Matériaux intelligents, matériaux thermoactif, matériaux piézoélectriques, matériaux auto-réparateurs, stabilité structurelle, dilatation thermique, maintenance préventive, réactivité aux stimuli.

Abstract

Smart materials are substances capable of actively responding to external stimuli such as temperature, pressure, or vibrations. In the construction sector, they offer innovative solutions for real-time structural monitoring and for optimizing safety and durability. Three primary examples of smart materials studied in this context are thermoactive materials, self-healing materials, and piezoelectric materials.

Thermoactive concretes are engineered to react to temperature variations. They incorporate specific materials (e.g., micro-capsules or specialized aggregates) that help regulate the internal temperature of the concrete, thereby reducing thermal expansion effects and increasing structural stability. These concretes are particularly beneficial in regions subject to significant temperature fluctuations and in projects requiring efficient thermal management.

Piezoelectric materials possess the ability to generate an electric current when subjected to mechanical stress (vibrations or deformations). This property is harnessed in construction to create integrated sensing systems, enabling real-time tracking of stress evolution and micro-cracks within a structure. They are valuable for continuous structural health monitoring (SHM) projects, notably in bridges, high-rise buildings, or sensitive infrastructure.

Self-healing materials, on the other hand, possess the unique capability to autonomously seal their own cracks. By incorporating healing agents (such as bacteria or encapsulated polymers) into their matrix, they can activate a repair process in the presence of damage, thereby significantly extending the service life of structures and reducing the need for costly maintenance interventions. They are particularly promising for structures with difficult access or those exposed to aggressive environments.

The integration of these advanced materials, however, presents technical and economic challenges: their cost remains high, and their implementation often requires specialized expertise. Nevertheless, their promising applications in infrastructure monitoring and preventive maintenance pave the way for intelligent buildings and civil engineering structures, capable of reacting to environmental changes and signaling signs of weakness before they become critical.

Keywords: Smart materials, thermoactive materials, self-healing materials, piezoelectric materials, structural stability, thermal expansion, preventive maintenance, stimuli responsiveness.

ملخص

تُعرف المواد الذكية بأنها مواد قادرة على التفاعل بنشاط مع المحفزات الخارجية مثل درجة الحرارة، الضغط، أو الاهتزازات. في مجال البناء والتشييد، تُقدم هذه المواد حلولاً مبتكرة لمراقبة حالة المنشآت في الوقت الفعلي وتحسين مستويات السلامة الإنشائية والمتانة. تتناول هذه الدراسة ثلاثة أمثلة رئيسية للمواد الذكية وهي: المواد المتفاعلة حراريًا، والمواد ذاتية الإصلاح، والمواد الكهروإجهادية.

تُصمم الخرسانات المتفاعلة حراريًا للاستجابة للتغيرات في درجات الحرارة. تدمج هذه الخرسانات موادًا محددة (مثل الكبسولات الدقيقة أو الركام الخاص) التي تساعد في تنظيم درجة الحرارة الداخلية للخرسانة، مما يقلل من آثار التمدد الحراري ويزيد من الاستقرار الهيكلي. تُعد هذه الخرسانات مفيدة بشكل خاص في المناطق المعرضة لتقلبات درجات الحرارة الكبيرة وفي المشاريع التي تتطلب إدارة حرارية فعالة.

تتميز المواد الكهروإجهادية بقدرتها على توليد تيار كهربائي عند تعرضها لإجهاد ميكانيكي (اهتزازات أو تشوهات). تُستغل هذه الخاصية في الإنشاءات لإنشاء أنظمة استشعار مدمجة، مما يتيح المراقبة الآتية لتطور الإجهادات والتشققات الدقيقة داخل الهيكل الإنشائي. تُعد هذه المواد مفيدة لمشاريع المراقبة الإنشائية المستمرة، لا سيما في الجسور، والمباني الشاهقة، أو البنى التحتية الحساسة.

أما المواد ذاتية الإصلاح، فتمتلك القدرة الفريدة على سد التشققات الخاصة بها تلقائيًا. من خلال دمج عوامل الشفاء (مثل البكتيريا أو البوليمرات المغلفة) في مصفوفة المادة، يمكنها تنشيط عملية معالجة ذاتية في حال وجود أضرار، وبالتالي إطالة العمر الافتراضي للمنشآت بشكل كبير وتقليل الحاجة إلى تدخلات صيانة مكلفة. تُظهر هذه المواد وعدًا كبيرًا بشكل خاص للمنشآت ذات الوصول الصعب أو تلك المعرضة لبيئات قاسية.

ومع ذلك، يطرح دمج هذه المواد بعض التحديات التقنية والاقتصادية؛ فتكلفتها لا تزال مرتفعة، وغالبًا ما تتطلب خبرة متخصصة لتنفيذها. على الرغم من ذلك، فإن تطبيقاتها الواعدة في المراقبة والصيانة الوقائية للبنى التحتية تمهد الطريق نحو مباني ومنشآت ذكية، قادرة على الاستجابة للتغيرات البيئية والإبلاغ عن علامات الضعف قبل أن تصبح حرجية.

الكلمات المفتاحية: المواد الذكية، المواد المتفاعلة حراريًا، المواد الكهروإجهادية، المواد ذاتية الإصلاح، الاستقرار الهيكلي، التمدد الحراري، الصيانة الوقائية، الاستجابة للمحفزات.

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

Chapitre I : Les matériaux intelligents

I.1.Introduction	01
I.1.1. Définition	01
I.2. Caractéristiques des matériaux et structures intelligents	02
I.3. Classement des matériaux intelligents	02
I.4. Exigences pour les matériaux intelligents	03
I.5. Les avantages des matériaux intelligents	05
I.6. Les défis des matériaux intelligents	06
I.7. Objectif	07
I.8. Méthodologies	08
I.9. Conclusion	08

Chapitre II : Les matériaux intelligents pour la construction durable

Partie 1 : Les matériaux auto-réparateurs	09
II.1.1 Introduction	09
II.1.2. Principe de fonctionnement des matériaux autocicatrisants	10
II.1.3. Types de mécanismes d'auto-réparation	10
II.1.4. Types de matériaux auto-réparateurs	11
II.1.5. Avantages des matériaux auto-réparateurs	11
II.1.6. Avancées dans les matériaux auto-réparateurs	11
II.1.7. Polymères Autocicatrisants pour Applications dans le Secteur de la Construction	12
II.1.7.1. Types de polymères autocicatrisants utilisés	12
II.1.8. Application dans le Secteur de la Construction	14
II.1.9. Durée de vie en fatigue et impact de l'Auto-Réparation	15
II.1.9.1. Problème de la durée de vie en fatigue	15
II.1.9.2. Mécanisme de Durée de Vie en Fatigue	16

II.1.10. Mécanisme d'auto-guérison dans les applications de construction	17
II.1.11. Conclusion et aspects futurs	18
Partie 2 : Les matériaux thermoactifs	19
II.2.1. Introduction	19
II.2.2. Définition du Béton Thermoactif	19
II.2.3. Objectifs du Béton Thermoactif	19
II.2.4. Principe de Fonctionnement du Béton Thermoactif	20
II.2.5. Applications des polymères à mémoire de forme (PMF) dans le béton	24
II.2.6. Applications du Béton Thermoactifs	25
II.2.7. Avantages du béton thermoactif	28
II.2.8. Inconvénients	29
II.2.9. Défis et considérations liés à l'utilisation du béton thermoactif	30
II.2.10. Conclusion	30
Partie 03 : Les matériaux piézoélectriques	31
II.3.1. Introduction	31
II.3.2. Historique	32
II.3.3. Piézoélectricité	32
II.3.3.1 Définition	32
II.3.3.2 Matériaux piézoélectriques	33
II.3.4. Applications des matériaux piézoélectriques dans les structures de construction	34
Durables	
II.3.4.1. Applications des Capteurs Piézoélectriques dans la Surveillance	34
Des Infrastructures	
II.3.4.2. Détection des charges excessives	35
II.3.4.3. Surveillance de la santé des structures	35
II.3.4.4. Génération d'énergie	35
II.3.4.5. Amélioration de la durabilité et des performances	36
II.3.4.6. Capteurs intégrés pour la détection de stress ou de pression	36
II.3.4.7. Applications des tuiles piézoélectriques dans les infrastructures urbaines	36
II.3.4.8. Trottoirs et espaces publics	36
II.3.4.9. Pôles de transport	37
II.3.4.10. Surveillance de la sécurité des barrages	37
II.3.4.11. Infrastructures des villes intelligentes	37

II.3.4.12. Routes et autoroutes	37
II.3.5 Applications piézoélectriques dans la conception des bâtiments	38
II.3.6 Perspectives d'avenir des matériaux piézoélectriques	39
II.3.7 Intégration d'agrégats intelligents à base de PZT pour la surveillance du béton	40
II.3.7.1. Méthodes d'interaction directe et indirecte	40
II.3.7.2. Transducteurs piézoélectriques à base de PZT (SMart Agréâtes (SMAG))	40
II.3.8. Défis, opportunités et perspectives d'avenir des capteurs piézoélectriques	45

Pour la surveillance de l'état des structures

II.3.8.1. Développement de matériaux piézoélectriques hautes performances	45
II.3.8.2. Utilisation pratique des actionneurs PZT	45
II.3.8.3. Problèmes de déploiement et de fiabilité	45
II.3.8.4. Autodiagnostic des capteurs et impact environnemental	46
II.3.8.5. Défis dans les applications du monde réel	46
II.3.8.6. Coûts	46
II.3.8.7. Complexité des systèmes de surveillance à grande échelle	46
II.3.8.8. Durabilité dans les environnements difficiles	47
II.3.8.9. Tests et validation sur le terrain	47
II.3.8.10. Intégration avec les technologies avancées	47
II.3.9. Conclusion	48

Chapitre III : Analyse comparative des matériaux intelligents

III.1. Introduction	49
III.2. Comparaison des matériaux intelligents	49
III.3. Étude de la durabilité et des couts	52
III.4. Sélection selon le type de projet	55
III.5. Applications avancées dans l'innovation architecturale et la construction	57
Durable	
III.6. Conclusion	60

Chapitre IV : Études de cas réels des matériaux intelligents

En génie civil

IV.1. Introduction	62
--------------------	----

IV.2. Matériaux Auto-réparateurs	62
IV.2.1. Étude de Cas 1 : Développement du Bio-Béton par Henk Jonkers	62
IV.2.2. Étude de Cas 2 : Béton Auto-réparateur à Capsules Polymères	63
IV.3. Matériaux Piézoélectriques	65
IV.3.1. Étude de Cas 3 : Système de Surveillance Structurelle Intégrée	65
IV.3.2. Étude de Cas 4 : Récupération d'Énergie dans les Chaussées (Université de Technology de Tokyo, 2020)	65
IV.4. Matériaux Thermoactifs	65
IV.4.1. Étude de Cas 5 : Système TABS dans le Bâtiment "The Edge" (Pays-Bas, 2014)	65
IV.5. Conclusion	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	66

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Le Terfenol-D.	03
Figure I.2	Le Nitinol TiNi.	03
Figure II.1.1	Les matériaux auto-réparateurs	09
Figure II.1.2	Le mécanisme extrinsèque via (a) la microcapsule et (b) le réseau vasculaire.	10
Figure II.1.3	Béton auto-réparateur.	14
Figure II.1.4	Mécanisme d'autoréparation via des capsules.	15
Figure II.1.5	Mécanisme de guérison de la fatigue en trois étapes dans la construction de routes.	16
Figure II.1.6	Cinq phases de la représentation de la cicatrisation des fissures : (a) réarrangement, (b) approche de surface, (c) mouillage, (d) diffusion, (e) randomisation .	17
Figure II.2.1	Matériaux de coque de micro encapsulation pour MCP.	23
Figure II.2.2	Applications des PMF en génie civil et architectural.	24
Figure II.2.3	Route Thermoactive en Suisse.	26
Figure II.2.4	Pont de Sotra, Norvège.	26
Figure II.2.5	Ville intelligente de Gandhinagar, India.	27
Figure II.3.1	Le mécanisme de l'effet piézoélectrique	33
Figure II.3.2	Sols piézoélectriques à l'Université de Bristol (Royaume-Uni).	38
Figure II.3.3	Tapis piézoélectriques dans les gares de Tokyo - Sols générateurs D'énergie au Japon.	39
Figure II.3.4	Schéma des Méthodes d'Interaction.	40
Figure II.3.5	Illustration of surface-bonded PZT to monitor concrete characteristics.	41
Figure II.3.6	Illustration du PZT intégré pour surveiller les caractéristiques Du béton.	41
Figure II.3.7	Illustration of indirect interaction of PZT to monitor concrete characteristics.	41
Figure III.1	Université de Saint-Gall en Suisse.	56
Figure III.2	La Cactus Tower (Copenhague, Danemark).	57

Figure III.3	Projet SolaRoad.	59
Figure III.4	La gare de Shibuya.	59
Figure III.5	Sols piézoélectriques à « The Edge » (Amsterdam, Pays-Bas).	60
Figure IV.1	Échantillons de pierre de ciment sans agent de cicatrisation incorporé (témoins), fissurés après 7 (panneaux A : grossissement 250× et B : grossissement 1000×) ou 28 jours de durcissement (panneaux C : grossissement 500× et D : grossissement 2000×).	63
Figure IV.2	Illustration schématique du concept d'un nouveau système de matériaux composites.	64
Figure IV.3	Échantillon du groupe PET (à gauche) fissuré après le chargement de l'étape 1 (à droite) avec fissure fermée après l'activation du polymère.	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Le Terfenol-D	04
Tableau II.1	Le Nitinol TiNi	13
Tableau II.2	Techniques directes et indirectes de mise en place de patches PZT sur /dans des structures en béton –une comparaison	43
Tableau III.1	Tableau comparatif des matériaux intelligents	50
Tableau III.2	Tableau comparatif de la durabilité et coûts des matériaux intelligents.	52
Tableau III.3	Sélection des matériaux selon le type de projet	55
Tableau III.4	Applications avancées dans l'innovation architecturale et la construction durable	57

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Face aux défis contemporains liés au développement durable, à l'efficacité énergétique et à la résilience des infrastructures, le secteur de la construction connaît une profonde mutation technologique. Parmi les innovations émergentes, les matériaux intelligents représentent un levier majeur de transformation. Capables de réagir à des stimuli environnementaux, de s'adapter, voire de s'auto réparer, ces matériaux offrent de nouvelles perspectives pour le développement de structures dites « intelligentes », intégrant des fonctions de surveillance, de régulation thermique, de récupération d'énergie et de durabilité structurelle [GOPI et al., 2015].

Les matériaux intelligents, tels que les capteurs à fibre optique, les alliages à mémoire de forme, les matériaux piézoélectriques ou encore les bétons autocicatrisants, ont pour caractéristique commune leur capacité à interagir avec leur environnement [ELATTAR et al., 2013] ; [CHERGUI et al., 2000]. Leur intégration dans le domaine du génie civil permet non seulement d'optimiser les performances des structures, mais également d'allonger leur durée de vie, de prévenir les défaillances et de réduire les coûts d'entretien [WANG et al., 2021] ; [WANG et al., 2019].

Dans cette optique, des technologies comme le béton thermoactif permettent d'améliorer la régulation thermique des bâtiments, notamment grâce à leur capacité à stocker et restituer la chaleur, favorisant une régulation passive de la température intérieure. Ce type de béton permet également une réduction significative de la consommation énergétique lorsqu'il est couplé à des matériaux à changement de phase [REHOU et al. ; 2013].

Les matériaux piézoélectriques, découverts à la fin du XIXe siècle [CURIE et al., 1880], sont capables de convertir des vibrations mécaniques en énergie électrique, offrant des opportunités uniques pour la récolte d'énergie et la surveillance en temps réel des structures [GAUCHER et al., 2008] ; [SODANO et al., 2004] ; [Oğ et al., 2023] et [AYDIN et al., 2023]. Leur intégration dans les ouvrages de génie civil représente aujourd'hui l'un des axes les plus prometteurs de la recherche en surveillance structurelle.

Par ailleurs, le développement de matériaux autocicatrisants, capables de se réparer de manière autonome, constitue une avancée majeure en matière de durabilité. Inspirés des

processus biologiques naturels, ces matériaux peuvent prolonger significativement la durée de vie des structures tout en réduisant les coûts d'entretien [VICTOR et al., 2012].

Enfin, la synergie entre ces avancées matérielles et l'intégration de systèmes de capteurs et de gestion avancés facilite la création d'environnements bâtis plus performants. Ces approches combinées contribuent à une gestion optimisée des ressources, une surveillance accrue de la sécurité et des performances environnementales, et une réduction significative de l'empreinte carbone des infrastructures modernes [WU et al., 2022].

Problématique

Dans quelle mesure les matériaux intelligents peuvent-ils répondre aux exigences de performance, de durabilité et de sécurité des infrastructures modernes, et quels sont les freins techniques, économiques ou réglementaires à leur intégration généralisée dans le secteur de la construction ?

Objectifs du travail

Ce travail vise à :

- Identifier les principales innovations en matière de matériaux intelligents appliqués à la construction.
- Étudier le fonctionnement et les applications des bétons thermoactifs, des matériaux piézoélectriques et auto cicatrisants.
- Évaluer leur impact sur les performances structurelles, énergétiques et économiques des bâtiments.
- Mettre en évidence les enjeux de mise en œuvre, les limites actuelles et les perspectives d'évolution.

CHAPITRE I

Les matériaux intelligents

Chapitre I

Les matériaux intelligents

I.1. Introduction

Les matériaux intelligents devraient être un ingrédient important des structures de troisième génération. Les matériaux intelligents candidats pour les applications structurelles comprennent les capteurs à base de fibres optiques, les capteurs ferromagnétiques, les alliages à mémoire de forme et les capteurs piézoélectriques. À mesure que les technologies de capteurs progressent, des évaluations périodiques de leurs performances doivent être menées pour identifier les capteurs les plus performants disponibles pour la mesure des réponses structurelles (par exemple, le déplacement, la vitesse, l'accélération, la déformation et la contrainte) et la détection des dommages structurels (par exemple, la fissuration, la fatigue et la corrosion). Ces évaluations doivent tenir compte de leurs performances (par exemple, la fiabilité, la sensibilité, l'intégrité et la robustesse) non seulement en tant que capteurs autonomes, mais plus important encore lorsqu'ils sont fixés à l'extérieur des éléments structurels ainsi qu'intégrés à l'intérieur dans le béton et les matériaux FRP. Dans la construction, les matériaux et systèmes intelligents pourraient être utilisés dans des bâtiments « intelligents », pour le contrôle environnemental, la sécurité et la surveillance de l'état structurel, par exemple, la mesure de la déformation dans les ponts à l'aide de capteurs à fibre optique intégrés. Les fluides magnétorhéologiques ont été utilisés pour amortir les ponts à haubans et réduire les effets des tremblements de terre. Dans le transport maritime et ferroviaire, les possibilités incluent la surveillance des contraintes à l'aide de capteurs à fibre optique intégrés. Cette étude traite des types de matériaux intelligents, de la technologie de détection intelligente, des composants des structures intelligentes, de divers capteurs, c'est-à-dire des capteurs à fibre optique, du béton intelligent, des structures intelligentes pour la protection sismique, de la surveillance de l'état des structures intelligentes [GOPI et al., 2015].

I.1.1. Définition

Les matériaux intelligents sont des matériaux qui « se souviennent » des configurations et peuvent s'y conformer lorsqu'ils sont soumis à un stimulus spécifique. Ces matériaux peuvent réagir aux changements d'électricité, de chaleur ou d'ondes magnétiques. Ils sont capables de percevoir et de ressentir les stimuli de l'environnement ainsi que de leur intérieur, de réagir aux

stimuli et de s'y adapter par l'intégration de fonctionnalités dans leurs structures [ELATTAR et al., 2013].

Le stimulus et la réponse peuvent être de nature électrique, chimique, thermique, magnétique, radiante et autre. Depuis ses débuts, la science des matériaux a évolué de l'utilisation de matériaux structurels inertes à des matériaux sur mesure, en passant par des matériaux actifs ou adaptatifs, jusqu'à des matériaux intelligents dotés de capacités de reconnaissance, de discrimination et de réaction plus précises [CHERGUI et al., 2000].

I.2. Caractéristiques des matériaux et structures intelligents [GOPI et al., 2015]

La majorité des recherches axées sur la structure civile intelligente ont porté sur deux domaines :

1. Identification du comportement ou des propriétés structurelles (par exemple, déformation, utilisation de l'énergie, évaluation des dommages, etc.).
2. Contrôle de la réponse structurelle aux stimuli externes (par exemple, vent, tremblement de terre) (ou) internes (par exemple, acoustique, variation de température).

I.3. Classement des matériaux intelligents [CHERGUI et al., 2000]

Les matériaux intelligents se répartissent donc en plusieurs catégories dont :

- **Piézoélectrique** : lorsqu'il est soumis à une charge électrique ou à une variation de tension, il subit des transformations mécaniques, évoquant des changements appelés effets directs et effets inverses.
- **Électrostrictif** : ayant les mêmes propriétés qu'un matériau piézoélectrique, la transformation mécanique est cette fois proportionnelle au carré du champ électrique. Les mouvements sont toujours dans le même sens.
- **Magnétostrictif** : soumis à un champ magnétique, il va subir une déformation mécanique induite, et inversement (effets directs et inverses). Il peut donc être utilisé comme capteur et/ou actionneur. Le Terfenol-D en est un exemple.

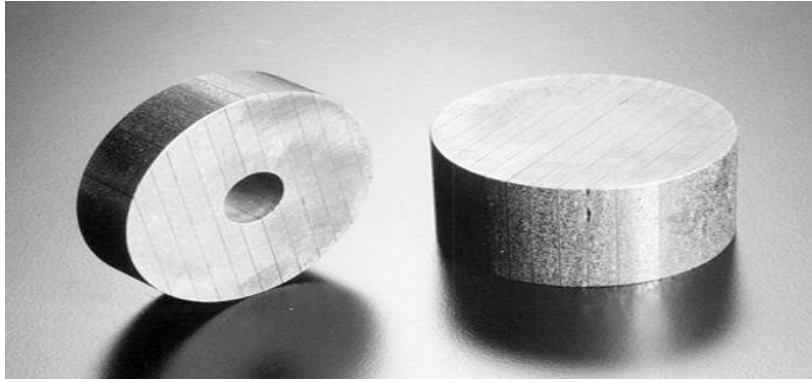


Figure I.1 : Le Terfenol-D [Net 1].

- **Alliage à mémoire de forme** : Soumis à un champ thermique, ce matériau va subir des transformations de phase qui vont provoquer des déformations : le Nitinol TiNi en est un exemple.



Figure I.2 : le Nitinol TiNi [Net 2].

- **Fibres optiques** : Ces fibres utilisent l'intensité, la phase, la fréquence ou la polarisation de la Modulation pour mesurer la contrainte, la température, les champs électriques et magnétiques, la pression et d'autres quantités mesurables. Ce sont d'excellents capteurs.
- **Matériaux à fonctions supplémentaires** : il s'agit essentiellement de matériaux pour capteurs, de catalyseurs et de textiles.

I.4. Exigences pour les matériaux intelligents [AKHRAS et al., 2000]

Pour avoir de telles capacités, les nouveaux matériaux et alliages doivent répondre à plusieurs spécifications fondamentales, notamment :

- Des propriétés techniques, qui incluent des caractéristiques mécaniques telles que l'écoulement plastique, la limite d'élasticité, ainsi que des caractéristiques comportementales

telles que la tolérance aux dommages, la résistance électrique, la résistance thermique et la résistance au feu.

- Des propriétés technologiques, qui incluent les capacités de fabrication, de formage, de soudabilité, de traitement thermique, de niveau de déchets, d'ouvrabilité, d'automatisation et de réparation.
- Des critères économiques liés aux coûts des matières premières et de production, au prix des fournitures et à leur disponibilité.
- Des caractéristiques environnementales telles que la toxicité et la pollution.
- Des critères de durabilité, qui impliquent des capacités de réutilisation et de recyclage.

On voit donc qu'il s'agit de matériaux sensibles adaptatifs et évolutifs. Leurs structures leur permettent de se comporter comme des capteurs (détecter des signaux), des actionneurs (effectuer une action sur leur environnement) et même des processeurs (traiter, comparer, stocker des informations). Ils sont capables de modifier spontanément leurs propriétés physiques, leurs formes, leurs connectivités, leur viscoélasticité ou encore leurs couleurs, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou de l'intérieur.

Il s'agit donc de matériaux caractérisés par la capacité de changer de propriétés et d'énergie, la réversibilité et la taille discrète, dont la réponse peut être électrique, chimique, thermique ou magnétique [CHERGUI et al., 2000].

TableauI.1 : Systèmes intelligents pour applications d'ingénierie [AKHRAS et al., 2000].

Exigences et attentes générales	Perspectives des technologies intelligentes
1. Haut degré de fiabilité, d'efficacité et de durabilité Non seulement de la structure mais aussi de l'ensemble du système. 2. Haute sécurité des infrastructures notamment lorsqu'elles sont Soumises à des conditions extrêmes et non conventionnelles. 3. Intégration complète de toutes les fonctions du système. 4. Surveillance continue de l'intégrité et de la santé. 5. Détection des dommages et auto-récupération.	1. Nouveaux matériaux et dispositifs de détection. 2. Nouveaux matériaux et dispositifs d'actionnement. 3. Nouveaux dispositifs et techniques de contrôle. 4. Fonctions d'auto-détections, d'autodiagnostic, d'autocorrection et d'autocontrôle des matériaux/systèmes intelligents.

6. Système de gestion opérationnelle intelligent.	
---	--

I.5. Les avantages des matériaux intelligents [Net 3]

Les matériaux intelligents ne sont pas seulement une curiosité scientifique. Ils offrent des avantages réels et pratiques qui peuvent transformer la conception, la construction et l'entretien des environnements bâtis. Les matériaux intelligents peuvent améliorer nos bâtiments en augmentant l'efficacité énergétique, en réduisant les coûts de maintenance et en renforçant l'intégrité structurelle. Ils ont le pouvoir de rendre nos espaces plus intelligents, plus écologiques et plus solides.

- **Efficacité énergétique**

L'un des avantages les plus significatifs des matériaux intelligents est leur potentiel à améliorer considérablement l'efficacité énergétique.

- **Coûts de maintenance réduits**

L'entretien représente une part importante du coût du cycle de vie d'un bâtiment. Ici aussi, les matériaux intelligents offrent une solution convaincante. Comme mentionné ci-dessus, le béton auto-réparateur, avec sa capacité à réparer les fissures, réduit considérablement les coûts de maintenance.

- **Intégrité structurelle améliorée**

Les matériaux intelligents changent notre façon de construire, rendant les structures plus sûres et plus durables face aux changements climatiques et environnementaux. Voici comment ils procèdent :

- **Matériaux piézoélectriques**

Ces indicateurs peuvent indiquer des moments où un bâtiment est soumis à des contraintes, comme lors d'un tremblement de terre, contribuant ainsi à limiter les dommages avant qu'ils ne s'aggravent.

- **Revêtements superhydrophobes**

Ce revêtement spécial empêche l'eau de pénétrer, protégeant ainsi les bâtiments de la pluie, de l'humidité et des dégâts potentiels causés par l'eau.

- **Aérogels**

Ultralégers et isolants, les aérogels aident à garder les bâtiments au chaud et au sec, en particulier dans les climats froids. Ces gels sont fabriqués en combinant des polymères avec un solvant, puis en remplaçant l'air par du liquide.

Bien que ce ne soient que quelques exemples, ils démontrent comment des matériaux intelligents peuvent améliorer l'intégrité structurelle et rendre nos environnements bâtis plus résilients.

I.6. Les défis des matériaux intelligents [Net 3]

Bien que les matériaux intelligents offrent un grand potentiel, il est essentiel de reconnaître les différents défis liés à leur utilisation généralisée.

a. Coût :

L'un des défis les plus critiques est le coût initial élevé des matériaux intelligents. Par rapport aux coûts de construction plus traditionnels, les matériaux intelligents nécessitent souvent un investissement initial plus important. Cela peut être dissuasif pour les projets de construction fonctionnant avec des budgets serrés ou pour ceux qui hésitent à s'aventurer en territoire relativement inconnu.

b. Démarrage et estimation :

Le processus de démarrage et d'estimation des matériaux intelligents peut également être plus complexe. Cependant, les progrès des solutions logicielles de démarrage contribuent à atténuer ces défis. Voici comment les entrepreneurs peuvent estimer le coût du passage à des alternatives intelligentes pour certains types courants de matériaux de construction :

1. Béton : une fois qu'il sera plus largement disponible, passez au béton auto-réparateur en comparant les coûts avec ceux du béton ordinaire à l'aide d'un logiciel d'estimation du béton. Envisagez les économies à long terme grâce à une maintenance réduite.
2. Cloisons sèches : évaluez les options d'amélioration de la qualité de l'air ou d'isolation des cloisons sèches à l'aide d'un logiciel d'estimation, en tenant compte des coûts d'installation et des économies d'énergie.
3. Peinture : utilisez un logiciel d'estimation de peinture pour comparer les peintures traditionnelles et intelligentes, comme celles qui changent de couleur avec la température, en fonction du prix par gallon et des économies d'énergie potentielles.

4. Acier : évaluez l'utilisation d'alliages à mémoire de forme pour renforcer l'acier afin d'améliorer la résistance aux tremblements de terre. Tenez compte des coûts par rapport aux avantages en matière de sécurité et aux économies d'assurance potentielles. Utilisez un logiciel d'estimation de l'acier pour calculer la quantité.

5. Matériaux de revêtement de sol : envisagez un revêtement de sol qui génère de l'électricité ou régule la température, en utilisant un logiciel d'estimation de revêtement de sol pour l'analyse du coût par pied carré et les économies d'énergie.

Chacun de ces exemples montre comment les entrepreneurs peuvent utiliser un logiciel d'estimation pour évaluer les coûts et les avantages des matériaux intelligents alternatifs, prenant ainsi des décisions éclairées pour leurs projets de construction.

c. Réglementations obsolètes :

Les codes et réglementations de construction obsolètes dans de nombreuses juridictions constituent un autre obstacle qui ralentit l'adoption généralisée des matériaux intelligents. Ces réglementations ne tiennent souvent pas compte des propriétés et des avantages uniques des matériaux intelligents, ce qui rend difficile pour les architectes et les constructeurs de les intégrer dans leurs conceptions.

d. Résistance du secteur :

Enfin, il existe un élément de résistance au sein même du secteur de la construction. La réticence des principaux acteurs à adopter ces nouveaux matériaux a ralenti leur adoption généralisée. Le changement peut présenter des défis, en particulier dans un secteur ancré dans la tradition. Cependant, à mesure que de plus en plus d'exemples de réussite mettant en valeur les avantages des matériaux intelligents apparaissent, cette résistance est susceptible de s'atténuer.

Bien que l'adoption de matériaux intelligents pose des défis, les développeurs et les constructeurs peuvent les surmonter. Grâce à la recherche continue, aux progrès technologiques et à un changement de mentalité, les matériaux intelligents pourraient devenir courants dans la construction.

I.7. Objectif

L'objectif est d'analyser les principes fondamentaux de ces matériaux, de comprendre leur fonctionnement et leurs propriétés spécifiques pour la construction. Ensuite, l'étude s'intéresse à leur intégration dans les structures des bâtiments, en vue d'améliorer le suivi en temps réel et

de prévenir les défaillances structurelles. L'objectif ici est d'explorer comment ces matériaux permettent de détecter les anomalies et de prévenir les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques. Enfin, l'évaluation des perspectives et des défis de leur utilisation vise à analyser les coûts, la durabilité et l'efficacité de ces matériaux. Cela comprend l'étude de leur rentabilité à long terme, leur résistance aux conditions environnementales, ainsi que l'évaluation de leur efficacité pour renforcer la sécurité et la performance des bâtiments. En bref, ces objectifs cherchent à comprendre les avantages, les applications pratiques et les contraintes de l'utilisation de matériaux intelligents dans le secteur de la construction.

I.8. Méthodologies

Cette recherche suit un modèle de recherche bibliographique, axé sur l'examen et la synthèse de la littérature existante liée à Innovation dans les matériaux intelligents pour la construction. L'objectif est d'examiner l'état actuel des connaissances, d'identifier les lacunes et d'évaluer les résultats des études précédentes.

L'analyse des données a été réalisée à l'aide d'une analyse thématique, identifiant les thèmes et tendances clés des études. En outre, une analyse comparative a été utilisée pour mettre en évidence les différences et les similitudes dans les résultats et les méthodologies de recherche.

I.9. Conclusion

Les technologies utilisant des matériaux intelligents sont utiles pour les constructions nouvelles et existantes. Les nombreuses technologies émergentes disponibles, les quelques-unes décrites ici, nécessitent des recherches plus approfondies pour faire évoluer les directives de conception des structures intelligentes. Les codes, normes et pratiques devraient accorder une importance cruciale au développement ultérieur de structures intelligentes utilisant des matériaux intelligents [GOPI et al., 2015].

CHAPITRE II

Les matériaux intelligents pour la construction

Durable

Chapitre II

Les matériaux intelligents pour la construction durable

Partie 1 : Les matériaux auto-réparateurs

II.1.1 Introduction

Les matériaux auto-réparateurs représentent une catégorie innovante de matériaux capables de se réparer de manière autonome lorsqu'ils sont endommagés, sans nécessiter d'intervention extérieure. S'inspirant de processus biologiques, tels que la régénération de la peau humaine, ces matériaux réparent leurs propres dégradations, prolongeant ainsi leur durée de vie et préservant leur intégrité structurelle. Cette technologie de rupture offre de nombreux avantages, notamment la réduction des coûts et l'amélioration de la sécurité dans divers secteurs industriels [Net 4]. L'innovation des matériaux auto cicatrisants marque un progrès majeur dans le domaine de l'ingénierie des matériaux, permettant une durabilité accrue et une longévité supérieure des structures [Net 5]. Bien que les polymères et les élastomères soient les types les plus courants, l'auto-cicatrisation s'applique également à d'autres classes de matériaux, tels que les métaux, les céramiques et les matériaux cimentaires. Un matériau capable de se réparer en cas de dommages liés à l'usure, sans intervention externe, permettrait de réduire les coûts associés aux défaillances matérielles, tout en optimisant l'efficacité des processus industriels grâce à une durée de vie prolongée des composants et une réduction de l'inefficacité due à la dégradation progressive au fil du temps [Net 6].



Figure II.1.1 : Les matériaux auto-réparateurs [Net 7].

II.1.2. Principe de fonctionnement des matériaux auto-cicatrisants

Les matériaux auto-cicatrisants fonctionnent généralement selon l'un des trois mécanismes suivants : la libération de capsules contenant un agent de guérison, l'utilisation de polymères réactifs ou la régénération à l'échelle nanométrique [Net 5].

II.1.3. Types de mécanismes d'auto-réparation

A. Matériaux auto-réparateurs intrinsèques :

Ces matériaux possèdent des propriétés intégrées qui leur permettent de se réparer par l'intermédiaire de liaisons chimiques réversibles ou d'interactions physiques. Cela signifie que leur capacité de réparation est une caractéristique de leur structure de base.

B. Matériaux auto-réparateurs extrinsèques :

Le mécanisme d'auto-guérison extrinsèque implique l'inclusion intentionnelle d'agents cicatrisants dans des microcapsules ou un réseau vasculaire. En cas de dommage, les capsules ou le réseau s'ouvrent, libérant les agents cicatrisants pour réparer les dommages. Ces agents et catalyseurs peuvent être stockés de quatre manières : capsule-catalyseur, multi causalité, fonctionnalité latente et séparation de phases. Le diamètre des microcapsules et la morphologie de surface affectent la facilité avec laquelle les capsules se rompent, influençant ainsi l'efficacité du processus de guérison [DHANASEKARAN et al., 2018].

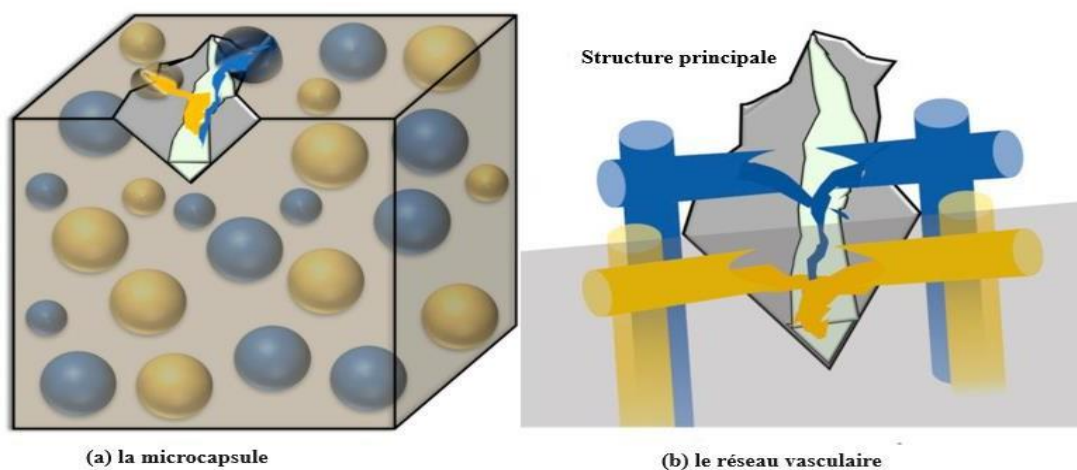


Figure II.1.2 : Le mécanisme extrinsèque via (a) la microcapsule et (b) le réseau vasculaire [Net 8].

II.1.4. Types de matériaux auto-réparateurs

Les matériaux auto-réparateurs se présentent sous différentes formes :

- Polymères auto-réparateurs : intègrent des microcapsules ou une polymérisation réversible.
- Métaux auto-réparateurs : utilisent des procédés de soudage à l'état solide.
- Céramiques auto-réparatrices : utilisent des méthodes de frittage pour combler les fissures.
- Béton auto-réparateur : utilise des bactéries qui produisent du calcaire pour sceller les fissures [Net 9].

II.1.5. Avantages des matériaux auto-réparateurs

A. Réduction des coûts de maintenance :

Les matériaux auto-réparateurs diminuent la nécessité de réparations fréquentes, réduisant ainsi les coûts liés à la main-d'œuvre et à la gestion des stocks de pièces de rechange. Cette réduction des besoins en maintenance permet aux entreprises de réaffecter les ressources humaines et financières vers d'autres priorités [Net 4].

B. Amélioration de la sécurité :

Les matériaux auto-réparateurs contribuent à maintenir l'intégrité structurelle des Infrastructures comme les bâtiments et les ponts. En réparant automatiquement les dommages, ils minimisent les risques liés aux défauts structurels, réduisant ainsi la dépendance aux inspections manuelles [Net 4].

C. Durabilité accrue :

En se réparant, ces matériaux prolongent la durée de vie des structures [Net 5].

D. Durabilité environnementale :

Empreinte écologique moindre : Moins de matériaux sont nécessaires à long terme, diminuant ainsi l'impact environnemental [Net 5].

II.1.6. Avancées dans les matériaux auto-réparateurs

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux auto-réparateurs au cours des dernières décennies ont permis leur application dans divers secteurs, notamment les biomatériaux et les revêtements de protection. Des innovations notables incluent les polymères auto-réparateurs,

qui sont capables de réparer autonomement des rayures, des fissures et d'autres types de dommages mécaniques [Net 4].

II.1.7. Polymères Auto-cicatrisants pour Applications dans le Secteur de la Construction

Les polymères auto-réparateurs sont des polymères qui ont la capacité de réparer le matériau de tout dommage physique en réagissant aux dommages ou aux fissures du matériau et en les cicatrisant. Cette technologie auto-réparatrice donne aux polymères la capacité de se remettre des fissures à un stade précoce en les empêchant de toute défaillance catastrophique, ce qui augmente le champ d'application de ces matériaux [MEGHA et al., 2022].

II.1.7.1. Types de polymères auto-cicatrisants utilisés

1. Résine Polyphénol-Formaldéhyde (PF)

Selon [LV et al., 2016], les agents de cicatrisation comme la résine poly(phénol-formaldéhyde) (PF) peuvent activer les résines pour réparer les fissures. Grâce au processus de polymérisation in situ, des microcapsules de PF ont été créées avec un volume plus important. Il a été observé que la taille des microcapsules devenait plus grande tandis que l'épaisseur de la coque se rétrécissait. De plus, les microcapsules plus petites ont une plus grande capacité d'activation mécanique lors des fractures par rapport aux plus grandes.

2. Composites de Soufre Durables

[GWON et al., 2020] ont démontré que l'auto guérison rapide de composites de soufre durables pouvait être réalisée en utilisant un polymère super absorbant et du ciment binaire. Le mécanisme de guérison a été détecté par la méthode XRD, et la pénétration de l'eau à travers les fissures a été efficacement bloquée après 15 minutes de traitement.

3. Liants Asphaltiques

En 2019, des chercheurs ont étudié l'effet des polymères auto cicatrisants sur les propriétés rhéologiques des liants asphaltiques, notamment en utilisant un polymère auto-cicatrisant appelé OXE-CHI-PUR (oxétane-substitué Chitosane-Polyuréthane). Des tests tels que le rhéomètre à poutre de flexion (BBR), la récupération de fluage sous contrainte multiple (MSCR), et le rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) ont été effectués pour évaluer les performances des mélanges. Les résultats ont montré que les polymères auto cicatrisants

amélioreraient les propriétés mécaniques des mélanges, en particulier dans les conditions de fatigue [SHIRZAD et al., 2019].

4. Polymères Auto Cicatrisants Répétables

Les polymères auto cicatrisants, en particulier ceux qui ont des capacités de guérison répétables, ne nécessitent pas de catalyseurs ou agents de guérison spécifiques, mais sont activés par des stimuli externes différents. Ces polymères peuvent être réactivés plusieurs fois pour réparer les fissures, offrant ainsi une solution durable et économique [PERNIGONI et al., 2020].

5. Polymères Photochimique Activés par UV

Un autre type de polymère auto-cicatrisant est activé par la lumière UV. Ce polymère, souvent à base de polyuréthane, est introduit avec de l'OXE-CHI (Chitosane substitué par l'oxétane) pour créer un polymère réticulé appelé OXE-CHI-PUR. Lorsque ce polymère est exposé à la lumière UV, des microfissures apparaissent et le clivage de la liaison polymère génère des radicaux libres qui scellent les fissures [GHOSH et al., 2011].

Tableau II.1 : Matériaux auto-réparateurs dans les applications de construction.

Agent auto cicatrisant	Application	Résultats	Référence
SAP et ciment binaire (CSA+ ciment Portland)	Auto-réparation des composites à base de soufre Durables.	La présence de la chromatographie SAP a considérablement augmenté les performances rapides d'auto-vente.	[GWON et al., 2020]
Bactéries non uréolytiques, c'est-à-dire <i>Bacillus cohnii</i> , immobilisées dans l'EP	Méthode d'auto-cicatrisation pour les matériaux cimentaires.	Au fur et à mesure que le temps augmente, les fissures dans les Échantillons de béton contenant des bactéries diminuent et cela se produit lorsque les supports sont immobilisés.	[ZHANG et al., 2017]
Matériaux d'encapsulation contenant du polyuréthane	Méthode d'auto-cicatrisation pour les matériaux cimentaires	En effectuant des tests de perméabilité à l'eau, il a été démontré que l'efficacité de la réparation des fissures a été améliorée et a montré une amélioration de l'étanchéité à l'eau.	[VAN et al., 2015]

II.1.8. Application dans le Secteur de la Construction

L'une des applications notables dans le secteur de la construction est le béton auto-réparateur. Le béton traditionnel est sujet à la fissuration et à la détérioration au fil du temps, ce qui entraîne des réparations coûteuses. Cependant, le béton auto-réparateur intègre dans le mélange des polymères à mémoire de forme ou des microcapsules remplies d'agents de cicatrisation. Lorsque ces matériaux se fissurent, ces derniers sont activés par l'humidité ou la pression, déclenchant une réaction chimique qui remplit et répare le béton fissuré. En améliorant la longévité et l'intégrité structurelle du béton, les matériaux auto-réparateurs contribuent à la durabilité et à la pérennité des infrastructures [Net 10].

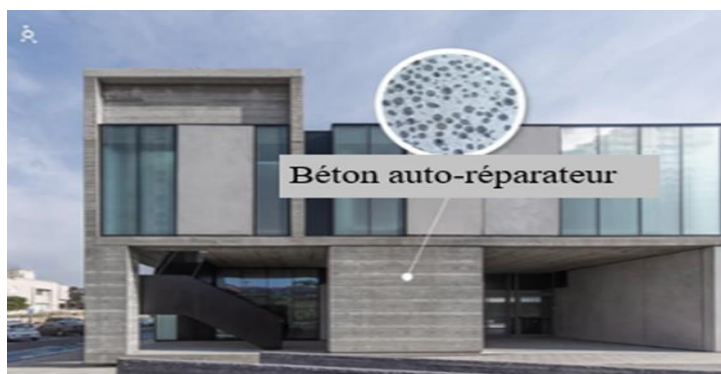


Figure II.1.3 : Béton auto-réparateur [Net 10].

A. Micro-Encapsulation dans la Construction

La micro-encapsulation, une technologie de plus en plus étudiée, consiste à encapsuler des agents auto cicatrisants pour favoriser l'auto guérison des matériaux. [ZHANG et al. 2017] ont étudié l'utilisation de bactéries non uréolytiques encapsulées dans de la perlite expansée pour l'auto-réparation du béton. Ils ont observé que : au fil du temps, les fissures dans les échantillons de béton contenant des bactéries diminuaient, les bactéries étant activées pour réparer les fissures. Les particules de perlite expansée ont été identifiées comme des vecteurs efficaces pour transporter ces bactéries vers les zones fissurées, facilitant ainsi le processus de guérison.

- Application de microcapsules auto-cicatrisantes dans le béton pour la réparation des fissures :

Pour appliquer les microcapsules auto-cicatrisantes dans le béton, les capsules micro-encapsulées sont d'abord préparées. Ces microcapsules auto-cicatrisantes déclenchées mécaniquement et leurs catalyseurs sont ensuite incorporés dans le mélange cimentaire

pendant le processus de mélange du béton. Une fois durcies, les microcapsules auto-cicatrisantes sont intégrées dans la structure du béton. Le mécanisme des microcapsules auto-cicatrisantes dans le béton est illustré sur la figure II.4. Si elles sont soumises à une fissuration du béton, les microcapsules auto-cicatrisantes intégrées ont tendance à se rompre, libérant l'agent cicatrisant encapsulé. Lorsque l'agent cicatrisant est exposé au catalyseur intégré, il se polymérise et agit pour sceller et cicatriser les fissures [XUE et al., 2019].

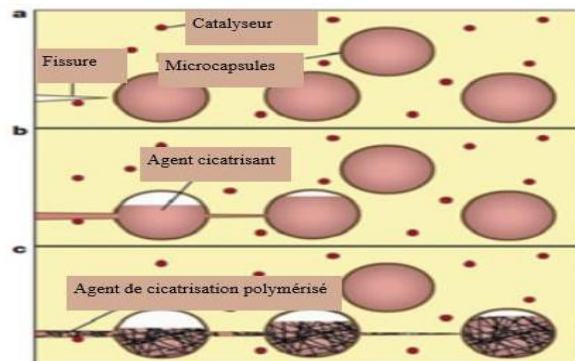


Figure II.1.4 : Mécanisme d'autoréparation via des capsules [Net 11].

Le succès de l'application du mécanisme d'auto-guérison au béton dépend des facteurs suivants : la rupture immédiate des microcapsules intégrées, le flux interne des agents de cicatrisation dans les fissures, la réaction des agents d'auto-guérison avec les catalyseurs, ainsi que la durée et la qualité du durcissement. Par conséquent, une sélection appropriée des agents de cicatrisation et des catalyseurs ainsi que des matériaux des capsules est essentielle pour que le mécanisme d'auto-guérison du béton réussisse [GILABERT et al., 2017].

II.1.9. Durée de vie en fatigue et impact de l'Auto-Réparation

II.1.9.1. Problème de la durée de vie en fatigue

Un autre défi majeur dans la construction est la durée de vie en fatigue des matériaux, en particulier pour les chaussées. La durée de vie en fatigue fait référence à la capacité d'un matériau à résister aux charges répétées sans se détériorer prématurément. L'intégration de polymères auto-réparateurs dans les matériaux asphaltiques permet de prolonger la durée de vie des chaussées tout en réduisant les coûts d'entretien.

- Relation entre auto-réparation et durée de vie en fatigue :

L'auto-réparation peut aider à améliorer la durée de vie en fatigue des matériaux, réduisant ainsi la fréquence des réparations et l'entretien nécessaire. Selon [TABAKOVI et al., 2017], l'auto-

réparation est définie comme la capacité d'un matériau à retrouver son état d'origine après avoir subi des sollicitations mécaniques et environnementales. Ils ont aussi précisé que l'essai de fatigue par flexion en 4 points est le test le plus adapté pour évaluer les performances des chaussées asphaltées auto-réparatrices.

II.1.9.2. Mécanisme de Durée de Vie en Fatigue [SUN et al., 2018]

Ont expliqué le mécanisme de la durée de vie en fatigue dans le domaine de la construction, mettant en lumière l'importance de l'auto-réparation dans le prolongement de la vie des matériaux soumis à des cycles de chargement répétés. Les matériaux qui possèdent la capacité de s'autoréparer sont moins susceptibles de développer des fissures et des irrégularités, ce qui permet de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la performance globale des infrastructures.

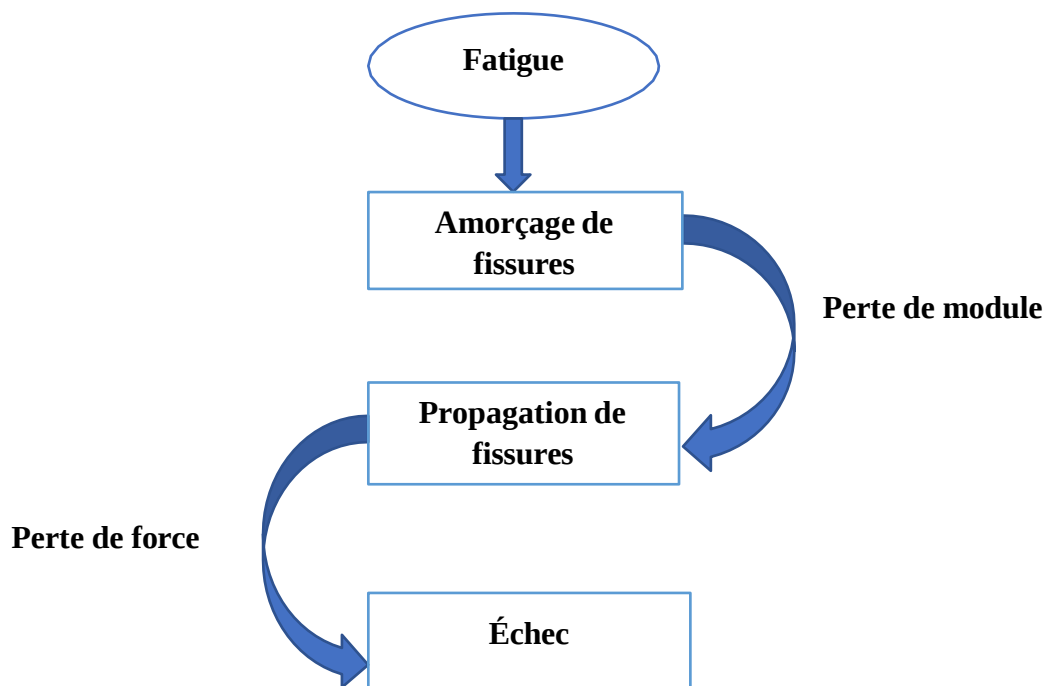


Figure II.1.5 : Mécanisme de guérison de la fatigue en trois étapes dans la construction de routes.

II.1.10. Mécanisme d'auto-guérison dans les applications de construction

Les microcapsules sont produites par un processus physique ou une action mécanique via des techniques physiques. Pour fonctionner, l'utilisation de traitements à base de bactéries aquatiques pour auto-cicatriser le béton marin soumis à une eau de mer extrême a été rapportée par Palin [PALIN et al., 2016]. En 2017, Kanellopoulos A. a recherché des agents à base de bactéries synthétisant des microcapsules de gélatine et de gomme d'acacia contenant du silicate de sodium liquide pour la production de béton auto-cicatrisant qui se sont révélées très équilibrées. [KANELLOPOULOS et al., 2017] Pour mettre les microcapsules autocicatrisantes dans le béton, des micro encapsulations ont d'abord été préparées. Les microcapsules autocicatrisantes intégrées sont sensibles à la fissuration du béton, elles ont tendance à se briser et à libérer les encapsulations. L'agent de cicatrisation se polymérise et agit pour sceller et réparer les fissures lorsqu'il est exposé au catalyseur intégré. [XUE et al., 2019] La création réussie du mécanisme d'auto cicatrisation dépend de trois facteurs [GILABERT et al., 2017] :

- la rupture des microcapsules intégrées.
- la libération de l'agent de cicatrisation dans les fissures.
- la polymérisation de l'agent d'auto cicatrisation avec le catalyseur.

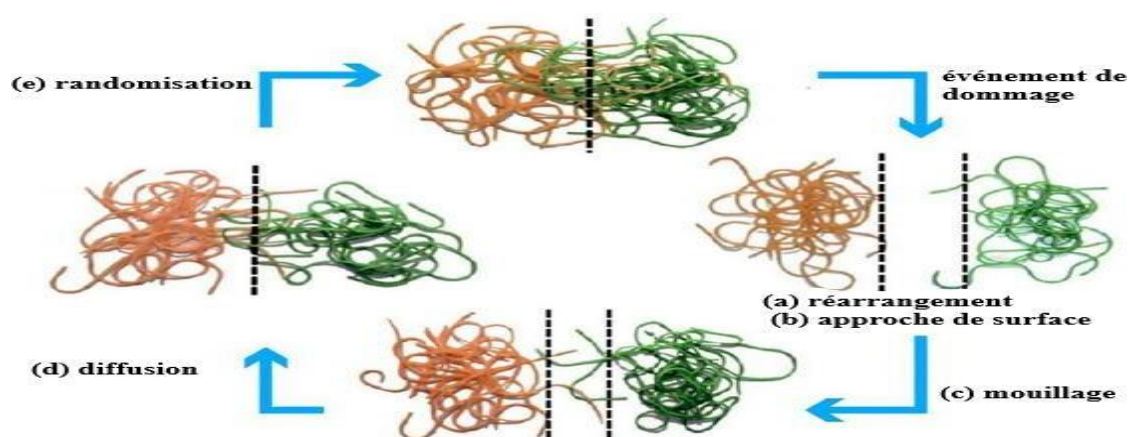


Figure II.1.6 : Cinq phases de la représentation de la cicatrisation des fissures : (a) réarrangement, (b) approche de surface, (c) mouillage, (d) diffusion, (e) randomisation [MEGHA et al., 2022].

II.1.11. Conclusion et aspects futurs :

Les polymères auto-réparateurs sont très polyvalents et peuvent être utilisés dans divers domaines, notamment la construction. Des études ont montré que ces matériaux sont prometteurs pour réparer les dommages structuraux, les fissures ou les défauts par différentes réactions de polymérisation, offrant d'excellentes propriétés mécaniques, physiques, rhéologiques et thermiques. Ces caractéristiques les rendent très recherchés pour diverses applications. Cependant, les facteurs environnementaux tels que la température, la pression et la lumière présentent des défis qui doivent être soigneusement pris en compte au cours des différentes phases du processus d'auto-réparation pour assurer une durabilité à long terme. À l'avenir, des propriétés telles que la résistance aux fissures à basse température, l'orniérage et la capacité d'auto-réparation doivent être évaluées de manière approfondie. Il existe un besoin croissant de techniques de guérison plus avancées qui vont au-delà des approches de guérison intrinsèques et extrinsèques traditionnelles. De nouveaux matériaux polymères émergents devraient également être explorés. Bien que ces recherches soient en cours, d'autres innovations et le développement de critères de test sont nécessaires pour faire progresser le domaine [BHATNAGAR et al., 2022].

Partie 2 : Les matériaux thermoactifs

II.2.1. Introduction

L'efficacité énergétique et le confort thermique sont devenus des piliers fondamentaux de la conception et de la construction modernes. Dans cette optique, le **béton thermoactif**, également connu sous le nom de système d'activation thermique du béton (SATB) ou de dalles thermoactives, représente une solution innovante et durable. Ce concept repose sur l'intégration de réseaux de tubes, parcourus par un fluide caloporteur (généralement de l'eau), directement au sein de la masse structurelle du béton (dalles, murs, fondations). En exploitant l'inertie thermique intrinsèque du béton, ce système permet de stocker et de diffuser de l'énergie thermique, assurant ainsi le chauffage ou le rafraîchissement des espaces de manière douce, uniforme et hautement efficace. Le béton thermoactif se positionne comme une technologie clé pour la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, l'optimisation du confort des occupants et la promotion d'une construction plus respectueuse de l'environnement [REHOU et al. ; 2013].

II.2.2. Définition du Béton Thermoactif

Le béton thermoactif utilise une masse thermique élevée pour absorber, stocker et libérer la chaleur, contribuant ainsi à réguler les températures intérieures. Il est particulièrement efficace dans les climats où les fluctuations de température entre le jour et la nuit sont importantes, offrant un chauffage et un refroidissement passifs. Ce type de béton permet de réduire les coûts énergétiques en maintenant des températures stables, en particulier dans les climats mixtes nécessitant à la fois chauffage et refroidissement. Pour optimiser ses performances, la masse thermique doit être combinée à d'autres éléments de conception passifs tels qu'une orientation appropriée, une isolation et un vitrage. De plus, l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) peut améliorer la capacité du béton à gérer efficacement les variations de température [Net 12].

II.2.3. Objectifs du Béton Thermoactif

Les objectifs du béton thermoactif sont de réduire les coûts énergétiques, d'améliorer la régulation thermique passive, d'adapter les bâtiments aux fluctuations thermiques et de renforcer l'efficacité énergétique en utilisant une combinaison de matériaux thermiques et passifs [Net 12].

II.2.4. Principe de Fonctionnement du Béton Thermoactif

i. Utilisation de MCPs et de Polymères Thermoactifs :

Les matériaux à changement de phase ont une densité de stockage de chaleur latente élevée, ce qui leur permet d'absorber l'énergie thermique lorsqu'ils passent de l'état solide à l'état liquide ou de la libérer lorsqu'ils passent à l'état solide. Grâce à cette propriété, le MCP peut fonctionner comme un système de chauffage et de refroidissement dans le secteur du bâtiment. Pendant la journée, il absorbe l'excès d'énergie thermique dans un élément de construction grâce à un processus de fusion, tandis qu'à des températures réduites (la nuit), il se solidifie et libère l'énergie thermique dans l'environnement [GASCA et al.,2019].

ii. Intégration des MCP dans les Bâtiments : [LACH et al.,2019]

a. Ajout Direct pendant le Processus de Mélange :

- Le MCP peut être ajouté directement lors de la préparation du mélange des matériaux.

b. Immersion dans du MCP Liquide :

- Une autre méthode consiste à immerger la structure du bâtiment dans du MCP sous forme Liquide.

c. Encapsulation (Micro ou Macro) :

- La méthode la plus avancée et populaire est l'encapsulation des MCP sous forme micro ou Macro. Cela permet une meilleure dispersion des particules, réduit les variations de volume externes et élimine l'interaction directe entre le MCP et le matériau de base.

d. Micro encapsulation de MCP :

- La micro encapsulation est un processus désormais industrialisé, mais elle est coûteuse et Limitée à quelques entreprises dans le monde.

e. Bénéfices de l'Ajout de MCP aux Cloisons :

- Ajouter du MCP à la couche intérieure des cloisons apporte plusieurs avantages, notamment une meilleure régulation thermique à l'intérieur du bâtiment. Cela permet de réduire les gradients thermiques et d'uniformiser la température à l'intérieur du béton, ce qui peut réduire le risque de fissuration.

f. Ajout de MCP aux Finitions Intérieures :

- Les matériaux à changement de phase peuvent aussi être intégrés dans des finitions intérieures comme les plaques de plâtre.

iii. Microcapsules à Changement de Phase (MCP) :

Les micro-MCP (matériaux à changement de phase microencapsulés) sont des matériaux Innovants qui stockent et libèrent de l'énergie lors des transitions de phase. Ils sont utilisés dans la construction pour réguler la température et améliorer l'efficacité énergétique. Composés d'un noyau de MCP encapsulé dans une coque protectrice, les micro-MCP peuvent être formulés sous différentes formes, comme des mélanges à base d'eau ou des suspensions. Leur micro encapsulation améliore la stabilité thermique et permet une gestion efficace de la chaleur dans les bâtiments. Intégrés dans des matériaux comme le béton, ils contribuent à l'optimisation énergétique, au confort thermique et à la durabilité des structures [Net 13].

iv. Types de MCPs : [DELMAS et al., 2022]

Les organiques : On appelle matériau organique tout matériau qui comporte au moins un atome de carbone lié à un atome d'hydrogène. Dans cette catégorie, on utilise notamment les paraffines et acides gras pour la constitution du MCP.

Les inorganiques : Les MCP inorganiques sont principalement les sels hydratés, les sels fondus, les métaux purs et les alliages métalliques.

Les eutectiques : Les eutectiques utilisés comme matériaux à changement de phase (MCP) sont des mélanges organiques et/ou inorganiques.

L'utilisation d'un type particulier de MCP présente des avantages et des inconvénients par rapport aux autres types. Sur la base des sources de la littérature, plusieurs avantages et inconvénients des MCP organiques et inorganiques ont été résumés :

1. MCP organiques : ils offrent des avantages tels que la compatibilité avec les matériaux conventionnels, une température de synthèse élevée, des propriétés d'auto-nucléation et le fait d'être sûrs et non toxiques [ZHOU et al., 2015]. Cependant, ils présentent des inconvénients tels que l'inflammabilité, une faible capacité de stockage de chaleur latente volumétrique et une faible conductivité thermique [MAGENDRAN et al., 2019].

2. MCP inorganiques : ils sont rentables et largement disponibles, avec une capacité de stockage de chaleur latente élevée et une bonne conductivité thermique. Comme les matériaux organiques, ils ont une température de synthèse élevée. Cependant, ils sont confrontés à des problèmes tels que la corrosion, les changements de volume dans certains mélanges et un risque plus élevé de sous-refroidissement [LONE et al., 2021].

v. Intégration aux matériaux de construction :

Le changement de phase a lieu selon les matériaux entre 19 et 27°C, températures correspondant aux valeurs limites respectivement fixées pour le confort d'hiver et d'été. Les MCP (paraffine, polymère, acide gras...) peuvent être incorporés dans les matériaux de construction (plâtre, béton, certains plastiques) et même dans une matrice de graphite, qui a l'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique. Les paraffines, chimiquement stables, sont les substances les plus répandues. Elles peuvent être conditionnées dans des billes de plastique microscopique (micro encapsulation) mélangées au plâtre ou au béton, ou bien incorporées dans les pores d'un matériau porteur (imprégnation), ce qui permet de les rajouter lors d'une rénovation. 3 cm d'enduit contenant 30 % de MCP sont équivalents à 18 cm de béton ou 23 cm de brique en termes d'inertie thermique. Les MCP sont indestructibles, inertes et non toxiques ; ils ne nécessitent pas de maintenance. Outre les parois constitutives des bâtiments, les MCP peuvent aussi être intégrés dans les faux plafonds [Net 14].

- **Matériaux de coque d'encapsulation :**

Pour réduire efficacement les fuites de MCP pendant la transition de phase solide-liquide et éviter la réaction des MCP avec l'environnement environnant, la micro encapsulation des MCP a été largement utilisée ces dernières années. La technologie de micro encapsulation peut également fournir une stabilité élevée du cycle thermique, un volume relativement constant et une grande surface de transfert de chaleur pour le stockage thermique à base de MCP [Al-SHANNAQ et al., 2016]. Les matériaux de coque jouent un rôle important dans la morphologie, les propriétés mécaniques et les propriétés thermiques des microcapsules produites [JAMEKHORSHID et al., 2014] et peuvent être classés selon la nature chimique en trois catégories de matériaux organiques, inorganiques et hybrides organiques-inorganiques [AGYENIM et al., 2010], comme le montre la figure II.7.

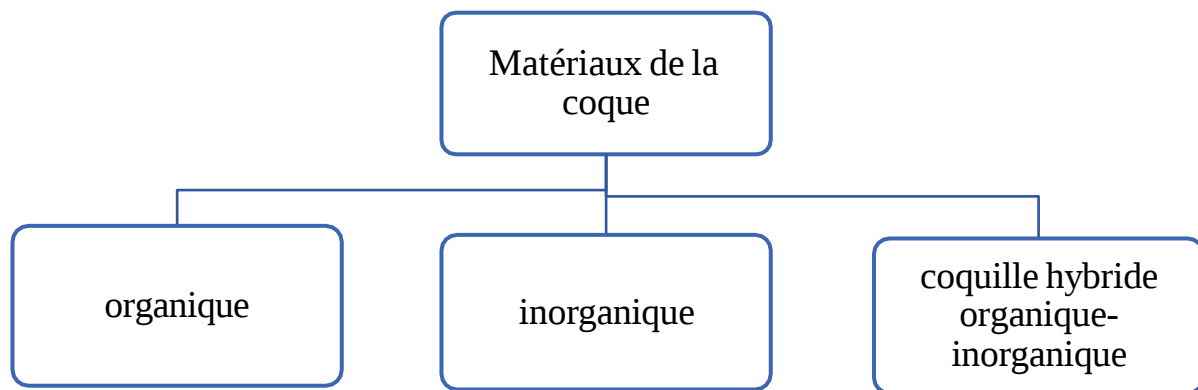


Figure II.2.1 : Matériaux de coque de micro encapsulation pour MCP [Net 15].

Les matériaux à changement de phase doivent donc avoir les propriétés suivantes : [Net 16]

- Une capacité de stockage ou de chaleur latente par volume élevée. Ceci est obtenu lorsque la chaleur molaire de fusion est élevée et, en même temps, qu'il existe une densité élevée et une capacité thermique massique élevée.
- Une conductivité thermique élevée pour un échange thermique rapide entre le MCP et l'environnement
- Un taux de nucléation élevé pour éviter la surfusion et pour obtenir un changement de phase à la température de fonctionnement.
- Un faible changement de volume pendant la transition de phase pour éviter les contraintes mécaniques sur les récipients et les fissures dans la phase solide.
- Un faible coût par énergie stockée et une bonne disponibilité
- Une stabilité chimique élevée sans décomposition, permettant de nombreux cycles de fusion/congélation.

vi. Polymères à mémoire de forme (PMF) :

Les polymères à mémoire de forme (PMF) ont été proposés pour améliorer la cicatrisation autogène du béton, en fermant les fissures et en générant une contrainte de compression sur les bords des fissures. Lorsqu'ils sont intégrés au béton, les PMF réagissent aux stimuli, tels que les variations de température, en retrouvant leur forme d'origine. Ce processus permet au matériau de sceller les fissures et d'encourager l'auto cicatrisation, améliorant ainsi la durabilité et la performance à long terme des structures en béton, tout en réduisant la nécessité de réparations. Cette approche innovante constitue une solution rentable pour l'entretien des infrastructures en béton [TEALL et al., 2016].

En règle générale, les PMF sont principalement utilisés dans les domaines suivants :

- Produits d'étanchéité et matériaux auto-réparateurs.
- Systèmes de contrôle des vibrations.
- Actionneurs ou capteurs pour les systèmes de surveillance de la santé des structures.

De plus, des applications potentielles en tant que matériaux intelligents pour les environnements bâtis sont détaillées dans la figure II.8 [JING et al., 2018].

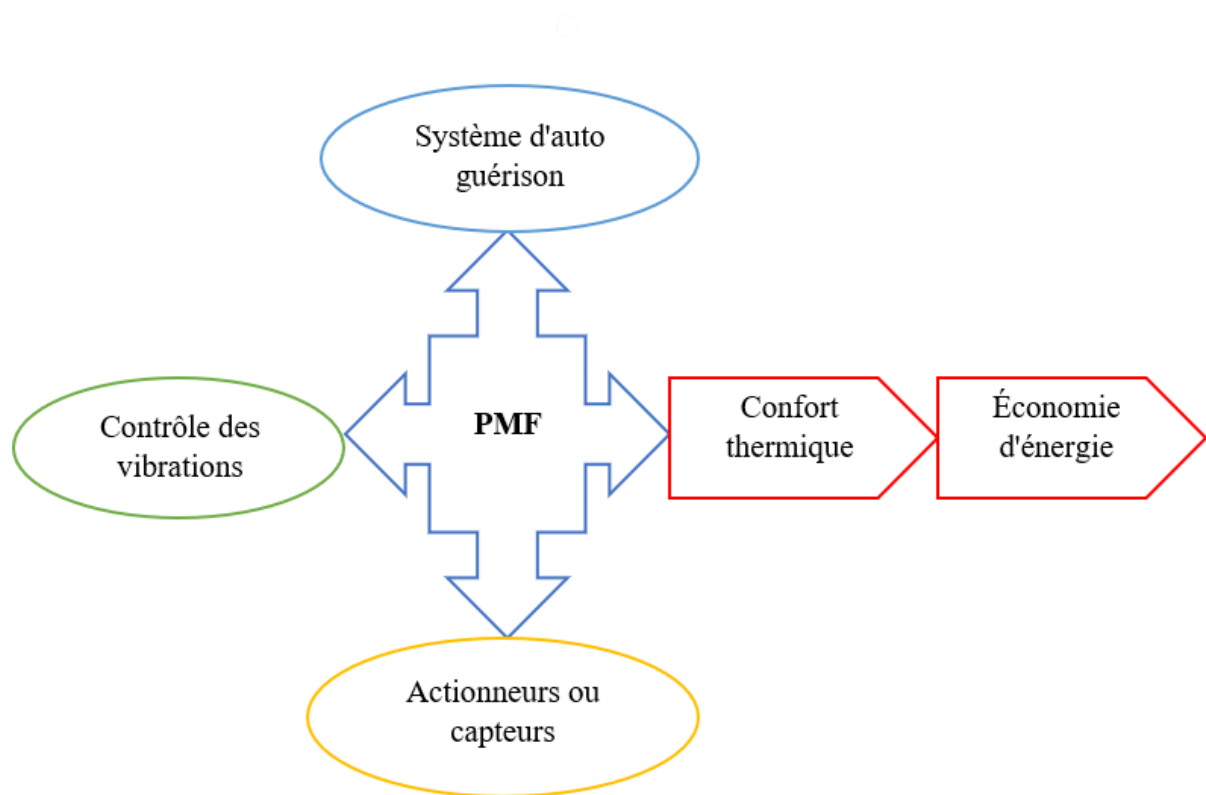


Figure II.2.2 : Applications des PMF en génie civil et architectural [JING et al., 2018].

II.2.5. Applications des polymères à mémoire de forme (PMF) dans le béton [MADDALENA et al., 2022]

Amélioration de l'intégrité structurelle et des capacités d'auto-guérison :

vii. Fibres PET

Les fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) sont largement utilisées pour leurs propriétés de mémoire de forme. Lorsqu'elles sont intégrées dans des poutres en béton, ces fibres, une fois activées (par exemple par chauffage), génèrent des forces de contraction qui permettent de refermer les fissures, renforçant ainsi l'intégrité structurelle du béton.

viii. Fibres PMF nouées

Les fibres aux extrémités nouées peuvent être ajoutées directement au béton. Lorsqu'elles sont activées, ces fibres génèrent des forces qui aident à fermer les fissures, cicatrisant ainsi efficacement le béton.

ix. Tubes PMF

Les tubes creux en PMF peuvent contenir et maintenir des matériaux de renforcement précontraints, tels que les fibres de Kevlar. Lorsqu'ils sont activés, ces tubes se rétractent, libérant des forces de précontrainte dans le béton environnant, ce qui aide à refermer les fissures et à renforcer la résistance globale de la structure.

II.2.6. Applications du Béton Thermoactifs**a. Routes et Autoroutes**

Le béton thermoactif dans la construction des routes permet de réguler la température des surfaces pour prévenir le gel et l'accumulation de neige, réduisant ainsi l'utilisation de produits chimiques déglacants nocifs pour l'environnement. Grâce à ses capacités de gestion thermique, il prolonge également la durée de vie des chaussées. De plus, ce béton peut intégrer des cellules solaires ou des technologies de récolte d'énergie cinétique, comme les systèmes Pavegen, qui exploitent l'énergie générée par les mouvements des véhicules et des piétons, contribuant ainsi à la production d'énergie renouvelable [Net 17].



Figure II.2.3 : Route Thermoactive en Suisse [Net 18].

b. Ponts

Pour la construction des ponts, le béton thermoactif joue un rôle crucial en régulant la chaleur interne, ce qui minimise les risques de fissures thermiques dues à l'expansion et à la contraction du matériau. Le béton renforcé de fibres et auto consolidant, associé à des systèmes de contrôle de température, assure la stabilité structurelle tout en permettant une construction plus rapide et plus sûre. De plus, des sections de béton thermoactif auto surveillantes détectent les signes de détérioration, alertant ainsi les autorités sur la nécessité de réparations avant l'apparition de risques majeurs [Net 17].



Figure II.2.4 : Pont de Sotra, Norvège [Net 19].

c. Bâtiments

Dans la construction de bâtiments, le béton thermoactif permet de réduire la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation traditionnels en régulant la température à l'intérieur des bâtiments. Ce béton peut être intégré dans les façades, panneaux muraux et planchers pour capter et libérer la chaleur, assurant ainsi une température stable et confortable tout au long de l'année. Des capteurs connectés, dans ce qu'on appelle parfois « l'Internet du béton », permettent une surveillance en temps réel de la performance thermique, des conditions d'occupation, de la qualité de l'air intérieur ainsi que de l'intégrité structurelle du bâtiment. Cette technologie facilite une gestion énergétique optimale et contribue significativement à la réduction de l'empreinte carbone du bâtiment [Net 17].



Figure II.2.5: Ville intelligente de Gandhinagar, India [Net 20].

d. Services Publics Souterrains

Le béton thermoactif est également utilisé dans les infrastructures souterraines telles que les tunnels et les fondations de ponts, où il aide à réguler la température des systèmes de câblage et de tuyauterie, empêchant leur gel. Son utilisation dans les segments de tunnels et les zones à espace restreint permet de réduire les risques de fissuration thermique tout en maintenant l'intégrité de la structure. Les systèmes de détection des fuites intégrés dans ce béton peuvent

localiser rapidement les intrusions de fluides avant qu'elles ne causent des inondations ou des contaminations [Net 17].

e. Applications Marines

Le béton thermoactif est également efficace pour les applications marines, notamment dans la construction de brise-lames et de structures de protection côtière. Il aide à prévenir l'érosion en régulant la température des matériaux exposés aux variations extrêmes de chaleur et de froid. Des modules auto-déployant et des systèmes de pieux vibrants peuvent également être utilisés pour compactage et protection dynamique sous l'eau, tout en générant de l'énergie renouvelable via la collecte de l'énergie des vagues [Net 17].

f. Aménagement du Territoire

Dans l'aménagement du territoire, le béton thermoactif joue un rôle clé dans la gestion durable des eaux pluviales en offrant des surfaces perméables qui permettent à l'eau de s'infiltrer tout en maintenant une stabilité structurelle. De plus, les systèmes de nivellement et de compactage peuvent être optimisés grâce aux diagnostics en temps réel fournis par les capteurs intégrés dans le béton. Les murs de soutènement en béton thermoactif régulent les niveaux de saturation et redistribuent la pression de manière dynamique, assurant une meilleure stabilité et durabilité des projets d'infrastructure [Net 17].

II.2.7. Avantages du béton thermoactif

- Réduction des coûts énergétiques : le béton thermoactif permet de réguler plus efficacement la température intérieure, réduisant ainsi le besoin de systèmes de chauffage et de climatisation. Cela conduit à des économies importantes sur les coûts d'exploitation du bâtiment [Net 21].
- Optimisation thermique : la capacité du béton à stocker la chaleur lui permet d'absorber la chaleur pendant les périodes plus froides et de la restituer progressivement pendant les périodes plus chaudes, assurant un climat intérieur stable et confortable [Net 22].
- Prévention de la surchauffe : par temps chaud, le béton thermoactif permet de maintenir une température intérieure modérée, évitant ainsi l'accumulation excessive de chaleur et garantissant le confort [Net 22].

- Efficacité énergétique améliorée : en améliorant les performances thermiques du bâtiment, le béton thermoactif réduit la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation, contribuant ainsi à des économies d'énergie à long terme [Net 22].
- Impact environnemental réduit : l'utilisation de béton thermoactif permet de réduire l'empreinte carbone d'un bâtiment en optimisant la gestion thermique, favorisant ainsi une approche plus durable et plus écologique [Net 22].
- Confort thermique accru : le béton thermoactif assure des températures intérieures constantes sans fluctuations brusques, offrant un niveau de confort plus élevé tout au long de l'année [Net 22].

II.2.8. Inconvénients [Net 21]

- Coût : Le coût initial des matériaux et de la technologie du béton thermodurcissable peut être plus élevé que celui du béton traditionnel, ce qui peut dissuader certains constructeurs.
- Disponibilité : Selon la région, les matériaux du béton thermodurcissable peuvent ne pas être facilement disponibles, ce qui peut entraîner des retards potentiels dans la construction.
- Expertise technique : Une installation et un mélange appropriés nécessitent des connaissances et des compétences spécialisées, qui peuvent ne pas être disponibles sur tous les marchés de la construction.
- Variabilité des performances : Les performances du béton thermodurcissable peuvent varier en fonction de la formulation spécifique et des conditions environnementales, ce qui nécessite des tests et un contrôle qualité minutieux.
- Sensibilisation limitée : En tant que technologie relativement récente, il peut y avoir un manque de sensibilisation ou d'acceptation parmi les constructeurs et les architectes, ce qui peut limiter son adoption.
- Potentiel d'absorption d'eau : Certains mélanges de béton thermodurcissable peuvent avoir des taux d'absorption d'eau plus élevés, ce qui peut entraîner des problèmes s'ils ne sont pas correctement gérés.

II.2.9. Défis et considérations liés à l'utilisation du béton thermoactif [Net 23]

a. Adaptation climatique

L'efficacité de la masse thermique varie selon les conditions climatiques. Elle est particulièrement bénéfique dans les régions où les variations de température diurnes sont importantes.

b. Conséquences financières

Le coût initial de l'intégration de la masse thermique peut être plus élevé en raison des matériaux et des techniques de construction. Cependant, ces coûts sont souvent compensés par des économies d'énergie à long terme.

c. Complexité de la conception

L'intégration de la masse thermique dans la conception des bâtiments nécessite une prise en compte minutieuse de divers facteurs, notamment l'orientation, le gain solaire, l'isolation et la ventilation. Cela peut ajouter de la complexité au processus de conception.

II.2.10. Conclusion

Le béton thermoactif est une technologie novatrice qui révolutionne la construction en apportant des solutions pratiques et écologiques pour la régulation thermique des infrastructures. De la construction des routes aux applications marines, en passant par les bâtiments et les infrastructures souterraines, il permet d'optimiser la performance énergétique, de réduire l'impact environnemental et de garantir la longévité des structures. À mesure que la demande pour des constructions plus durables et intelligentes augmente, l'intégration du béton thermoactif deviendra un élément central dans l'architecture et l'ingénierie des infrastructures de demain [Net 17].

Partie 03 : Les matériaux piézoélectriques

II.3.1. Introduction

La surveillance des contraintes dans le béton sous diverses charges a toujours été un sujet d'intérêt majeur dans le secteur de la construction. Des méthodes fiables de surveillance des contraintes sont importantes pour les mécanismes de confinement du béton, la fissuration massive du béton et la capacité portante des composants. Cette surveillance est généralement obtenue indirectement en fixant des jauges de contrainte à la surface du béton ; cependant, cette approche rend difficile la compréhension précise de la répartition des contraintes au sein de la structure en béton. Les jauges de contrainte intégrées au béton [WU et al., 2022] et les réseaux de Bragg à fibres sont d'autres méthodes de surveillance fiables, mais elles sont assez coûteuses.

Il est donc essentiel de développer de nouveaux capteurs pour surveiller les contraintes dans le béton de manière plus efficace et moins coûteuse. L'utilisation de matériaux intelligents pour surveiller la performance des ouvrages de génie civil est devenue l'un des pôles de recherche les plus importants dans le domaine du génie civil ces dernières années, grâce au développement considérable des nouvelles technologies de détection. Les matériaux piézoélectriques ont attiré l'attention des chercheurs pour surveiller les contraintes dans le béton grâce à leurs avantages, tels que les fonctionnalités de détection et de pilotage, une vitesse de réponse rapide et des performances stables [WANG et al.,2021] ; [WANG et al.,2019]. Les matériaux piézoélectriques donnent l'impulsion aux scientifiques et aux ingénieurs pour développer des structures en béton durables à faible demande en bioénergie. Ce type de matériau a la capacité de convertir l'énergie de contrainte mécanique en tension électrique, et vice versa, afin de convertir l'énergie électrique appliquée en contrainte mécanique. Ce comportement du matériau offre aux matériaux un potentiel élevé d'utilisation dans le domaine de l'ingénierie du bâtiment, contribuant à créer des bâtiments intelligents avec des performances énergétiques renouvelables et durables. D'autre part, les matériaux piézoélectriques peuvent récolter de l'énergie mécanique (généralement à partir des vibrations structurelles environnantes) sous forme d'énergie électrique pour alimenter les appareils électroniques associés [SODANO et al.,2004].

II.3.2. Historique

Les matériaux piézoélectriques, découverts en 1880 par les frères Curie, Pierre et Jacques [CURIE et al., 1880], produisent une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet piézoélectrique direct. Au début du XXe siècle, des chercheurs ont commencé à explorer leurs applications, notamment pour les transducteurs acoustiques, utilisés pour la première fois en 1917 [CURIE et al., 1917] pour produire et détecter des ondes sonores. Dans les années 1940 [JAFFE et al., 1940], ces matériaux ont trouvé des applications militaires, comme la détection de sous-marins et le sonar. Ils ont aussi été utilisés pour mesurer la pression, la force et la tension. Dans les années 1960-70 [NEWNHAM et al., 1969], l'utilisation des matériaux piézoélectriques s'est étendue à la médecine et à la biologie, avec des applications dans les ultrasons, l'imagerie médicale et la simulation nerveuse. Ils ont aussi été intégrés dans des instruments de musique électroniques.

Aujourd'hui, les matériaux piézoélectriques, incluant céramiques, polymères et cristaux synthétiques, sont utilisés dans une vaste gamme d'applications : capteurs, actionneurs, transducteurs, dispositifs d'imagerie et instruments de mesure.

II.3.3. Piézoélectricité

Contraction des mots grec *prezien* (pression) et *électron*, la piézoélectricité est la capacité de certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites) de pouvoir transformer une énergie mécanique en une énergie électrique (et vice-versa) [GAUCHER et al.,2008].

II.3.3.1 Définition

On distingue les effets piézoélectriques direct et inverse. L'effet direct est le phénomène d'apparition de charges électriques lorsqu'on soumet un matériau à une contrainte mécanique. Et l'effet inverse correspond à l'apparition d'une déformation mécanique du matériau lorsqu'on le soumet à un champ électrique figure III.1 [GAUCHER et al.,2008].

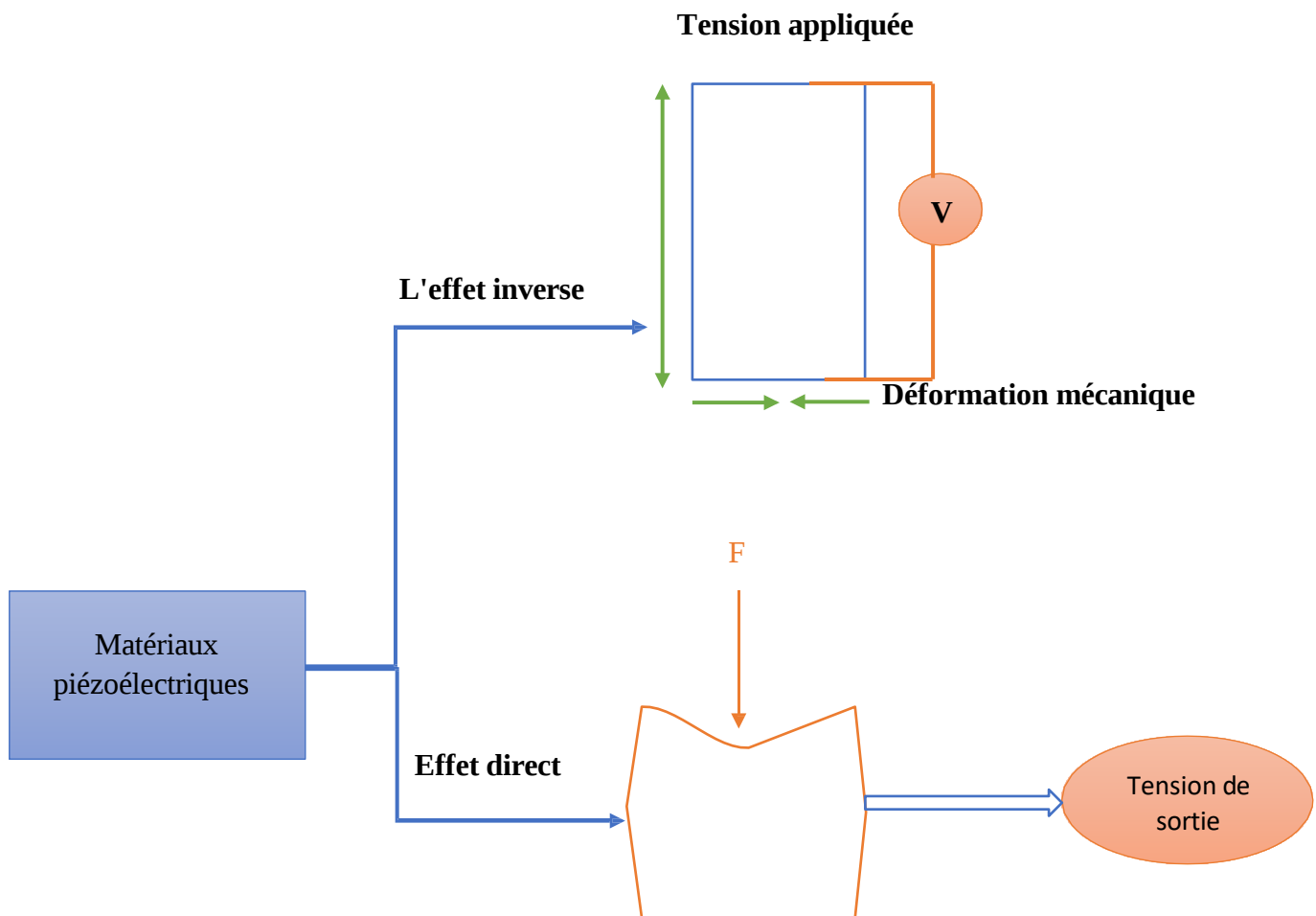


Figure II.3.1 : Le mécanisme de l'effet piézoélectrique [Net 24].

II.3.3.2 Matériaux piézoélectriques [Oğ et al., 2023]

Il existe environ 200 matériaux piézoélectriques utilisés dans les applications de collecte d'énergie, répartis en quatre catégories principales :

- Les monocristaux (sel de Rochelle, niobite de lithium, cristaux de quartz).
- Céramiques (titanate de baryum (BaTiO_3), titanate de plomb-zirconate (PZT), niobate de potassium (KNbO_3)).
- Polymères (acide poly lactique (PLA), fluorure de polyvinylidène (PVDF), co-polymères, cellulose et dérivés).
- Composites ou nano composites polymères (polyfluorure de vinylidène-oxyde de zinc (PVDF-ZnO), cellulose BaTiO_3 , polyimides-PZT).

Une autre classification des matériaux piézoélectriques est :

- **Naturels** : Quartz, sel de Rochelle, Topaze, groupe des tourmalines

- **Synthétiques** : Titanate de baryum, titanate de plomb, niobite de lithium, titanate de zirconate de plomb.

Les matériaux piézoélectriques se répartissent généralement en deux catégories principales :

- **Les cristaux** : Matériaux naturels comme le quartz et le sel de rochelle, qui présentent intrinsèquement des propriétés piézoélectriques.
- **Les céramiques** : Matériaux élaborés comme le titanate de baryum (BaTiO_3) et le titanate de zirconate de plomb (PZT), qui sont traités pour présenter des effets piézoélectriques.

En outre, certains polymères comme le fluorure de polyvinylidène (PVDF) présentent également des effets piézoélectriques lorsqu'ils sont étirés ou comprimés mécaniquement.

II.3.4. Applications des matériaux piézoélectriques dans les structures de construction durables

II.3.4.1. Applications des Capteurs Piézoélectriques dans la Surveillance des Infrastructures

Les bâtiments et infrastructures sont constamment soumis à des impacts environnementaux tels que l'érosion, la fatigue et le vieillissement, nécessitant ainsi une surveillance continue de leur état. Les capteurs traditionnels comme les accéléromètres et les jauges de contrainte, utilisés à cette fin, présentent des défis importants, notamment une durée de vie limitée et des coûts élevés de remplacement. En réponse à ces défis, les capteurs piézoélectriques, qui exploitent les propriétés de récupération d'énergie des matériaux, sont de plus en plus recommandés. Ces capteurs peuvent être intégrés directement dans les matériaux de construction existants, permettant ainsi une surveillance efficace et durable. Dans le domaine des structures civiles, les composites piézoélectriques à base de polymères sont rarement utilisés en raison de leur expansion non uniforme. Cependant, des chercheurs ont développé des composites piézoélectriques céramiques à base de ciment de, ce qui permet l'intégration de capteurs dans le béton. Ces capteurs sont capables de surveiller les vibrations et d'autres réponses structurales, tout en offrant une grande sensibilité et de bonnes performances, notamment dans la détection des activités d'émission acoustique lors de tests de flexion [CHENA et al., 2019] ; [QIN et al., 2010]. D'autres études ont également utilisé des capteurs de contrainte pour surveiller la résistance à la compression des structures en béton [HAN et al., 2007].

L'innovation, telle que l'utilisation de l'impression 3D, a permis la création de systèmes de capteurs intégrés en céramique piézoélectrique, dotés d'excellentes performances de couplage mécanique-électrique [SONG et al., 2017]. Ces capteurs jouent un rôle crucial dans la surveillance de la santé des structures, en particulier pour la détection de la corrosion des armatures et des fissures dans les structures en béton. Des études ont démontré que ces capteurs présentent une grande sensibilité et une large bande de réponse, permettant d'évaluer le taux de corrosion des armatures [LU et al., 2013].

Enfin, un autre domaine d'application important réside dans la surveillance des surcharges structurelles, notamment dans les infrastructures routières. Les composites piézoélectriques à base de ciment sont utilisés pour surveiller en temps réel des paramètres tels que le volume de circulation, la vitesse et le poids des véhicules, tout en récoltant de l'énergie grâce à la pression et à la friction exercées [ZHANG et al., 2015].

II.3.4.2. Détection des charges excessives

Surveillance de la charge dans les structures : Les capteurs piézoélectriques peuvent être utilisés pour mesurer les contraintes et les déformations dans des structures soumises à des charges excessives. Par exemple, dans les ponts ou bâtiments, des capteurs piézoélectriques peuvent surveiller les variations de tension dues à des charges trop importantes, ce qui peut entraîner des déformations ou des ruptures. Si une charge excessive est appliquée sur une structure, cela génère une déformation mécanique qui peut être mesurée en temps réel [CHENA et al., 2018].

II.3.4.3. Surveillance de la santé des structures

L'un des usages les plus prometteurs des matériaux piézoélectriques dans le béton est leur utilisation pour la surveillance en temps réel de l'intégrité structurelle des bâtiments et infrastructures en béton. Les capteurs piézoélectriques peuvent être intégrés dans le béton pour détecter les fissures, les vibrations et d'autres signes de dégradation, permettant ainsi une maintenance préventive et une gestion améliorée des structures [Oğ et al., 2023].

II.3.4.4. Génération d'énergie

Les matériaux piézoélectriques peuvent également être utilisés pour récolter de l'énergie à partir des vibrations ou des pressions exercées sur les structures en béton, comme celles

générées par le passage de véhicules sur des ponts ou des routes en béton. Cette énergie peut être stockée et utilisée pour alimenter des systèmes de capteurs, des dispositifs de communication sans fil ou des éclairages autonomes [Oğ et al., 2023].

II.3.4.5. Amélioration de la durabilité et des performances

En intégrant des matériaux piézoélectriques dans le béton, il est possible d'améliorer ses propriétés en lui conférant la capacité de réagir aux contraintes. Cela pourrait contribuer à la résilience du béton face à des forces extérieures et à sa capacité à se réparer partiellement en cas de fissures, grâce à une réaction piézoélectrique générant un effet d'auto-soudure ou d'auto-réparation [Oğ et al., 2023].

II.3.4.6. Capteurs intégrés pour la détection de stress ou de pression

Les matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés comme capteurs intégrés dans des structures de béton pour mesurer les forces de compression ou les déformations sous des conditions de charge, ce qui est essentiel pour garantir la stabilité des bâtiments et des ponts [Oğ et al., 2023].

II.3.4.7. Applications des tuiles piézoélectriques dans les infrastructures urbaines

Les tuiles piézoélectriques offrent un large éventail d'applications en milieu urbain, notamment pour la récupération d'énergie. Ces tuiles peuvent être intégrées à divers aspects des infrastructures publiques afin de produire de l'électricité sans recourir aux sources renouvelables traditionnelles comme le solaire ou l'éolien [Oğ et al., 2023].

II.3.4.8. Trottoirs et espaces publics

Dans les zones à forte circulation, les tuiles piézoélectriques peuvent être intégrées aux trottoirs, aux passages piétons et aux places. Le mouvement constant des piétons crée une source continue d'énergie mécanique, qui peut être convertie en électricité. Cette énergie peut être utilisée pour alimenter l'éclairage public, les kiosques publics ou la signalisation, réduisant ainsi les besoins en électricité du réseau [Oğ et al., 2023].

II.3.4.9. Pôles de transport

Les aéroports, les gares et les réseaux de métro sont souvent très fréquentés. Ces environnements offrent un cadre idéal pour les dalles piézoélectriques, où chaque pas peut être converti en énergie utile. De plus, les dalles piézoélectriques peuvent alimenter des écrans d'information, des kiosques ou même des bornes de recharge pour appareils mobiles, améliorant ainsi le confort et la fonctionnalité de ces espaces [Oğ et al., 2023].

II.3.4.10. Surveillance de la sécurité des barrages

Des capteurs piézoélectriques peuvent être utilisés pour surveiller l'état structurel des barrages, en détectant les variations de contraintes, de déformations et de vibrations. La détection précoce de problèmes potentiels peut contribuer à prévenir les défaillances catastrophiques et à garantir la sécurité des communautés qui dépendent de ces barrages pour leur approvisionnement en eau et en électricité [Net 25].

II.3.4.11. Infrastructures des villes intelligentes

Les dalles piézoélectriques sont particulièrement adaptées à l'intégration dans les systèmes de villes intelligentes, où l'énergie captée dans les espaces publics pourrait être reliée à un réseau interconnecté d'appareils. Par exemple, les dalles piézoélectriques pourraient alimenter des capteurs de l'Internet des objets (IoT) qui surveillent la qualité de l'air, la température ou la circulation piétonne, alimentant ainsi les systèmes de gestion urbaine en données en temps réel [Net 26].

II.3.4.12. Routes et autoroutes

L'intégration de tuiles piézoélectriques aux routes et aux autoroutes pourrait également contribuer à générer de l'énergie à partir des vibrations causées par le mouvement des véhicules. Cette énergie pourrait être utilisée pour alimenter les feux de circulation, les capteurs ou d'autres dispositifs intégrés à la chaussée. Bien que le coût d'installation des tuiles piézoélectriques à grande échelle puisse être plus élevé, le potentiel de production d'énergie par les véhicules pourrait en faire une solution viable pour les routes [Oğ et al., 2023].



Figure II.3.2: Sols piézoélectriques à l'Université de Bristol (Royaume-Uni) [Net 27].

II.3.5 Applications piézoélectriques dans la conception des bâtiments [Net 24]

Les matériaux piézoélectriques pourraient être intégrés efficacement dans les entrées et les sorties des bâtiments, des pièces ou de tout autre espace similaire. Par exemple, un élément semblable à un paillason, incrusté de matériaux piézoélectriques, pourrait être installé pour capter et stocker l'énergie mécanique chaque fois qu'une personne marche dessus, que ce soit en entrant ou en sortant d'une pièce. Cette énergie pourrait ensuite être exploitée pour alimenter les équipements électriques de cet espace. De plus, les matériaux piézoélectriques étant sensibles aux ondes sonores, ils pourraient être utilisés pour contrôler l'éclairage et la ventilation en fonction de sons tels que des applaudissements ou des commandes vocales des occupants. Les bâtiments exposés à de fortes charges de vent, à des vibrations sismiques ou à d'autres ondes mécaniques peuvent également bénéficier de la récupération de l'énergie mécanique de ces vibrations et de sa conversion en énergie électrique, ce qui pourrait contribuer au développement de technologies hors réseau pour ces bâtiments.

Alors que les immeubles de grande hauteur dépendent principalement de l'énergie vibratoire provenant de facteurs environnementaux, les immeubles de faible hauteur peuvent capter l'énergie mécanique d'activités plus localisées, comme les déplacements des piétons. Ces concepts innovants sont actuellement en cours de recherche et de développement.



Figure II.3.3 : Tapis piézoélectriques dans les gares de Tokyo - Sols générateurs d'énergie au Japon.

II.3.6 Perspectives d'avenir des matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont appelés à devenir des éléments clés du développement durable au XXI^e siècle, en réduisant la consommation de ressources naturelles et en produisant de l'énergie utilisable. L'une de leurs applications les plus prometteuses est la récupération d'énergie à partir des vibrations mécaniques, une solution sans émission de dioxyde de carbone.

Les vibrations constantes de la Terre, notamment les tremblements de terre, offrent une source d'énergie continue qui pourrait être exploitée par ces matériaux. Les catastrophes naturelles telles que les tremblements de terre causent d'importantes destructions et pertes

humaines. Afin de protéger les structures et les personnes, des stratégies d'identification, de surveillance de l'état des structures, et de contrôle structurel ont été mises en place. L'intégration de matériaux piézoélectriques comme capteurs micro électromécaniques (MEMS) permet de surveiller les fissures et la perte de résistance des structures en temps réel, contribuant ainsi à la sécurité des infrastructures. Ces matériaux sont également utilisés dans les systèmes de contrôle structurel, où ils agissent comme des actionneurs, générant des forces de commande sous l'influence de l'énergie électrique. Auparavant, on pensait que l'utilisation combinée de ces matériaux comme actionneurs et capteurs permettrait de réduire les dommages structurels causés par les tremblements de terre tout en générant de l'énergie électrique pour alimenter les systèmes des bâtiments. Ce double rôle de capteur et d'actionneur pourrait également permettre aux bâtiments de produire leur propre énergie en utilisant des éléments structurels conducteurs intégrés à des matériaux piézoélectriques. Parmi les matériaux piézoélectriques les plus utilisés, on retrouve le PZT (piézocéramique) et le PVDF (polymère). Le PZT est particulièrement adapté pour des applications nécessitant une production d'énergie élevée et une surveillance des structures dans des contextes de haute fréquence. Cependant, le PZT a tendance à se fragiliser

sous de fortes vibrations dynamiques. À l'inverse, le PVDF est plus flexible et pourrait donc être une meilleure option pour des environnements soumis à des vibrations plus intenses. Toutefois, la polarisation du PVDF reste un défi technique, et des recherches sont nécessaires pour améliorer ses caractéristiques de polarisation, garantissant ainsi sa résistance aux vibrations dynamiques et sa fiabilité dans des applications à long terme.

En résumé, l'avenir des matériaux piézoélectriques semble prometteur dans plusieurs domaines, notamment la récupération d'énergie, la surveillance de l'intégrité des structures et le contrôle actif, avec un fort potentiel pour des solutions durables et efficaces dans la construction et la gestion des infrastructures. Des études supplémentaires sur le PVDF et d'autres matériaux piézoélectriques permettront de surmonter les défis actuels et d'optimiser leur application dans des systèmes de bâtiments intelligents et autonomes [AYDIN et al., 2023].

II.3.7 Intégration d'agrégats intelligents à base de PZT pour la surveillance du béton

II.3.7.1. Méthodes d'interaction directe et indirecte

Cette partie traite de l'intégration des patches PZT dans le béton pour surveiller la santé des structures. Elle souligne deux méthodes principales d'interaction entre le patch PZT et la structure hôte : directe et indirecte.

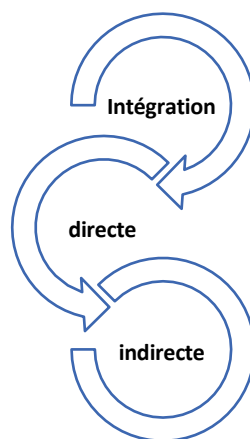


Figure II.3.4 : Schéma des Méthodes d'Interaction.

II.3.7.2. Transducteurs piézoélectriques à base de PZT (SMart Agréâtes (SMAG))

Le patch PZT est utilisé pour actionner et détecter des données dans les approches EMI et WP en étant mis en contact mécanique avec la structure hôte, soit directement, soit

Indirectement (comme illustré dans les figures II.3.6 et II.3.7). Lorsque le patch PZT est placé directement dans du béton frais, il peut se casser en raison de sa fragilité, surtout pendant la phase de compactage. Pour éviter cela, la méthode de contact direct est réalisée en intégrant le patch PZT dans des agrégats intelligents (SMAG) après leur fabrication, ce qui protège le transducteur tout en permettant une surveillance efficace de la structure [Lim et al., 2018]. Le SMart Agrégats (SMAG) utilisé dans l'étude actuelle est illustré dans la figure II.3.5 [WASSEM et al., 2022].



Figure II.3.5: Illustration of surface-bonded PZT to monitor concrete characteristics [WASSEM et al., 2022].

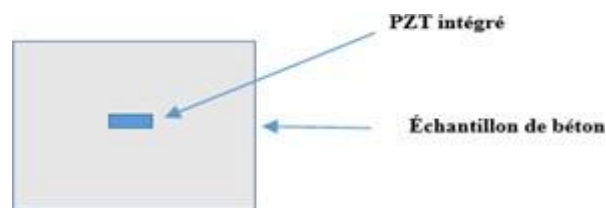


Figure II.3.6 : Illustration du PZT intégré pour surveiller les caractéristiques du béton [WASSEM et al., 2022].



Figure II.3.7: Illustration of indirect interaction of PZT to monitor concrete characteristics [WASSEM et al., 2022].

[PAGET et al., 2002] ont indiqué qu'un arrangement intégré doit être chimiquement inerte dans le milieu hôte, c'est-à-dire le béton. Le SMAG doit également être conservé séparément et scellé afin de ne pas affecter le phénomène d'hydratation du matériau cimentaire, La température du béton, son augmentation de poids pendant le durcissement, ainsi que les

vibrations et impacts mécaniques lors du mélange et du compactage, sont des facteurs essentiels à considérer lors de la conception d'un agrégat intelligent. Selon l'implantation d'un transducteur PZT directement dans la structure en béton est préférable, car cela améliore l'esthétique et la longévité du transducteur, qui est protégée par le béton environnant. Les patches PZT peuvent être installés dans le coffrage avant le coulage du béton, mais doivent être protégés de l'humidité en étant recouverts d'une couche imperméable avant leur incorporation dans le béton frais [ANNAMDAS et al., 2010].

1. Interaction directe du PZT avec des structures ou matériaux en ciment/béton

Cette section aborde les méthodes de collage direct de surface et d'enrobage utilisées pour intégrer les capteurs PZT dans les structures en béton.

i. Collage direct de surface

Le collage direct de surface, avec une substance adhésive comme l'époxy, est la méthode la plus simple pour fixer un transducteur PZT sur un substrat en ciment. Cette technique, illustrée dans la figure II.3.6, Cette technique nécessite une surface propre et nivelée pour optimiser l'enclenchement mécanique et minimiser l'épaisseur de la couche adhésive. Les fils du transducteur PZT peuvent être soudés à l'analyseur d'impédance avant ou après le collage. Pour augmenter la durée de vie du patch, le côté non collé peut être protégé avec un produit spécifique. Les transducteurs PZT permettent de suivre les changements dans les propriétés du béton grâce à leurs signaux collectés via la méthode EMI, ce qui aide à analyser l'évolution de la résistance du béton. Bien que le patch PZT soit fragile et susceptible de se fissurer pendant le mélange et le compactage, il est plus sûr de l'installer après la préparation du béton. Cela garantit une meilleure précision d'installation, un meilleur contrôle de l'épaisseur de la ligne de liaison, et facilite l'entretien à long terme. Toutefois, ce processus présente des défis, comme l'incapacité de poser le transducteur PZT immédiatement après le mélange, car il ne peut pas adhérer au béton humide. Cela empêche également la surveillance du phénomène d'hydratation du béton à un jeune âge. De plus, un personnel qualifié peut être nécessaire pour installer les patches, engendrant des coûts supplémentaires [LIM et al., 2019]. Une fois le patch PZT appliqué au béton, sa fragilité est réduite. Cependant, il peut encore être endommagé par une exposition prolongée à l'eau ou à l'humidité, surtout si le contact dure longtemps. Pour éviter cela, il est courant d'appliquer un revêtement protecteur, souvent à base de colle époxy, afin de

protéger le patch et empêcher que le fil électrique ne se coupe après avoir été soudé [WANG et al., 2009].

ii. Interaction indirecte du PZT avec des structures ou matériaux cimentaires/en béton :

Pour obtenir un contact indirect entre le patch PZT et le béton, une structure intermédiaire (agent) est utilisée, généralement en métal. Une partie du patch PZT doit être liée à cet agent avant d'être implantée dans le béton frais. Cette structure hôte fait vibrer d'abord l'agent, qui transmet ensuite la vibration au béton. Bien que la procédure de détection soit similaire, elle est inversée. Cependant, la présence de l'agent intermédiaire peut réduire la sensibilité de la méthode indirecte. L'activité vibratoire du patch PZT étant modifiée par l'agent, l'interprétation des données devient plus complexe. Pour mieux comprendre ces défis, des études supplémentaires sont nécessaires, notamment en modélisation avancée. La figure 4 montre l'interaction indirecte du patch PZT avec la structure en béton [LIM et al., 2019].

Tableau II.2 : Techniques directes et indirectes de mise en place de patchs PZT sur/dans des structures en béton – une comparaison [WASSEM et al., 2022].

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Liaison Directe en surface	Les patchs PZT collés en surface sont économiques et faciles à installer sur des structures en béton. Ils permettent de surveiller diverses propriétés du béton, telles que la détection de fissures, le module d'élasticité et le gain de résistance.	Les patchs PZT collés en surface ne conviennent pas à une surveillance à long terme en raison du risque de détachement causé par l'humidité et les variations de température, ce qui peut endommager le béton et affecter la précision des données.

Directement Intégré En tant qu'agrégat SMart	L'intégration de patches PZT dans le béton permet une surveillance à long terme. Un prototype d'agrégat intelligent PZT mesure l'impédance et évalue les capteurs d'armature-agrégat, facilitant le suivi du durcissement in situ et la détection précoce de défauts, notamment dans la zone d'ancrage du béton post-tendu.	La fabrication d'agrégats intelligents ou de capteurs intégrés au PZT est complexe et requiert une expertise. Les recherches sur l'efficacité de la technique EMI avec différentes orientations de patches PZT sont limitées. Pour éviter tout dommage dû aux vibrations, le patch PZT doit être intégré à la structure en béton avant le coulage.
Configuration Réutilisable Indirecte	Les patches PZT réutilisables offrent une surveillance précise du durcissement du béton, avec une faible sensibilité aux vibrations ambiantes. Intégrés dans le béton, ils permettent une surveillance à long terme plus efficace et rentable que les méthodes en surface, tout en surveillant également la santé structurelle du béton.	L'intégration des patches PZT dans le béton améliore la surveillance, mais elle nécessite du temps et un équipement spécialisé. Les recherches sur l'efficacité de la technique EMI et la précision des patches PZT pour surveiller le durcissement et la santé du béton sont limitées.
Intelligent Basé sur une sonde	La surveillance du durcissement par sonde intelligente détecte les défauts dans le béton, comme les fissures et les nids d'abeilles, en mesurant les fréquences de résonance avec un patch de titanate de zirconate de plomb. Un modèle analytique prédit le développement de la résistance du béton.	La surveillance par sonde intelligente est influencée par la température et l'humidité, ce qui peut affecter les résultats. Le modèle devient plus complexe avec l'ajout de la rigidité et de la masse, et ne fournit pas de mesure directe de la résistance du matériau.

II.3.8. Défis, opportunités et perspectives d'avenir des capteurs piézoélectriques pour la surveillance de l'état des structures

Malgré le potentiel et les progrès considérables dans l'utilisation des matériaux piézoélectriques pour la surveillance de l'état de santé des structures (SHM), plusieurs défis subsistent dans leur mise en œuvre pratique et leur efficacité à long terme. Ces défis sont essentiels à comprendre et à résoudre avant une adoption généralisée dans la surveillance des infrastructures :

II.3.8.1. Développement de matériaux piézoélectriques hautes performances

Le composant clé des capteurs piézoélectriques est le matériau lui-même. Le développement de matériaux piézoélectriques hautes performances est crucial pour créer des capteurs dotés d'une sensibilité exceptionnelle. Si les matériaux inorganiques présentent de bonnes propriétés piézoélectriques, ils manquent de flexibilité, tandis que les matériaux organiques, bien que flexibles, présentent des coefficients piézoélectriques plus faibles. Les matériaux piézoélectriques composites apparaissent comme une solution prometteuse pour combiner hautes propriétés piézoélectriques et flexibilité, améliorant potentiellement les performances des systèmes SHM, notamment en termes de plage de fonctionnement et de charges mécaniques [XUE et al., 2016].

II.3.8.2. Utilisation pratique des actionneurs PZT

Les actionneurs PZT, utilisés pour contrôler les vibrations et la surveillance, sont également confrontés à des défis dans les excitations structurelles à haute fréquence. Assurer la fiabilité et la répétabilité des actionneurs PZT dans des conditions réelles, en particulier dans les infrastructures vieillissantes ou fortement sollicitées, reste un domaine de recherche en cours [AABID et al., 2021].

II.3.8.3. Problèmes de déploiement et de fiabilité

Les capteurs piézoélectriques sont souvent confrontés à des difficultés de positionnement et de fiabilité. Ces matériaux sont généralement utilisés sous forme de plaquettes empilées, ce qui peut entraîner des problèmes tels que le décollement. Pour résoudre ce problème, des films piézoélectriques peuvent être fixés à la surface de la structure ou intégrés à celle-ci, offrant flexibilité et adaptabilité pour un déploiement dans des configurations complexes [BEKAS et al., 2018] ; [CUI et al., 2022].

II.3.8.4. Autodiagnostic des capteurs et impact environnemental

Un enjeu crucial des systèmes SHM est de garantir la fiabilité des capteurs, en particulier leur autodiagnostic. Sans auto-identification, les défaillances des capteurs peuvent entraîner une détection incorrecte des dommages. La capacité à détecter les défauts grâce à des modifications de la propagation des ondes ou des signatures d'interférences électromagnétiques (EMI) est un domaine de recherche actif. De plus, des facteurs environnementaux tels que les fluctuations de température peuvent altérer les propriétés des matériaux piézoélectriques et affecter leurs performances. Par exemple, les variations de température peuvent affecter la constante diélectrique et le module de Young, entraînant des erreurs dans les systèmes de surveillance ondulatoire. Des méthodes efficaces de sélection de référence sont nécessaires pour prendre en compte ces effets environnementaux, en particulier dans les systèmes SHM à ondes guidées [MUELLER et al., 2017] ; [KONSTANTINIDIS et al., 2006].

II.3.8.5. Défis dans les applications du monde réel

Une grande partie des recherches sur les SHM piézoélectriques a été menée dans des environnements de laboratoire contrôlés, mais le déploiement dans le monde réel de ces matériaux est confronté à des défis supplémentaires. Les conditions environnementales difficiles, la charge dynamique et la stabilité à long terme des capteurs piézoélectriques dans ces conditions ne sont pas encore entièrement comprises et doivent être traitées dans des études ultérieures [AABID et al., 2021].

II.3.8.6. Coûts

Un des obstacles majeurs à l'adoption des matériaux intelligents est leur coût initial élevé. En comparaison avec les matériaux traditionnels, leur investissement initial plus important peut représenter un frein pour les projets à budget limité [Net 28].

II.3.8.7. Complexité des systèmes de surveillance à grande échelle

Les systèmes SHM destinés aux grandes structures comme les ponts nécessitent souvent de nombreux capteurs et une configuration complexe. Les réseaux de capteurs sans fil deviennent une méthode privilégiée pour la collecte et le traitement des données dans ces systèmes. Cependant, la consommation énergétique de ces réseaux constitue un défi majeur, car les systèmes traditionnels reposent sur des batteries volumineuses nécessitant un remplacement fréquent. Les réseaux de capteurs sans fil autonomes constituent une solution prometteuse, car

les dispositifs piézoélectriques peuvent capter l'énergie des vibrations de la structure ou de l'énergie mécanique ambiante, fournissant ainsi une source d'énergie illimitée au système [FENG et al., 2016].

II.3.8.8. Durabilité dans les environnements difficiles

Les matériaux piézoélectriques, en particulier les transducteurs piézocéramiques, sont confrontés à des problèmes de durabilité importants lorsqu'ils sont exposés à des conditions environnementales difficiles telles que l'humidité, les températures extrêmes et les vibrations élevées. Au fil du temps, ces matériaux peuvent se dégrader, affectant leur sensibilité et leurs performances globales, ce qui est crucial pour une détection précise des dommages dans les infrastructures du monde réel [AABID et al., 2021].

II.3.8.9. Tests et validation sur le terrain

Il existe un écart important entre les tests en laboratoire et les applications sur le terrain dans le monde réel. De nombreux systèmes SHM piézoélectriques se sont révélés prometteurs dans des environnements contrôlés, mais les tests sur le terrain dans des conditions réelles, telles que des infrastructures vieillissantes ou des environnements à fortes vibrations, n'ont pas été suffisamment explorés. La validation sur le terrain de ces systèmes est nécessaire pour comprendre l'impact des facteurs environnementaux sur leurs performances [AABID et al., 2021].

II.3.8.10. Intégration avec les technologies avancées

Bien que les transducteurs d'impédance piézoélectrique soient prometteurs, leur intégration avec d'autres outils de surveillance avancés, comme les capteurs à fibre optique, est encore en développement. La combinaison de plusieurs technologies pourrait améliorer la précision de la détection des dommages et fournir un système SHM plus complet. Cependant, cette intégration pose des défis en termes de coût, de complexité et de fiabilité opérationnelle [AABID et al., 2021].

II.3.9. Conclusion :

Les bâtiments durables doivent être respectueux de l'environnement et économes en ressources tout au long de leur cycle de vie. Les matériaux piézoélectriques permettent de concevoir des composants de construction plus durables grâce à la récupération d'énergie issue des contraintes structurelles et des vibrations, à une consommation énergétique réduite et à de faibles émissions de dioxyde de carbone. Comparés à d'autres matériaux, les matériaux piézoélectriques s'intègrent plus facilement aux matériaux de construction et aux systèmes de construction. Une compréhension approfondie de ces méthodes et de leurs applications dans divers composants et systèmes de construction peut inspirer des recherches plus approfondies et encourager des applications plus pratiques. Grâce à ces méthodes, des structures de bâtiment plus autonomes peut être intégrées à des systèmes de construction renouvelables et durables. La littérature existante permet également de conclure que, bien que l'application des matériaux piézoélectriques se soit révélée prometteuse, des recherches futures sont nécessaires pour améliorer l'efficacité énergétique, la fiabilité structurelle, la durabilité et la faisabilité économique des matériaux piézoélectriques dans diverses conditions environnementales [CHENA et al., 2018].

CHAPITRE III

Analyse comparative des matériaux Intelligents

Chapitre III

Analyse comparative des matériaux intelligents

III.1. Introduction

Les matériaux intelligents représentent une avancée significative dans le domaine de la construction moderne, offrant des solutions innovantes pour répondre aux défis croissants liés à l'efficacité énergétique, la durabilité et la surveillance des structures. Parmi les plus prometteurs, les matériaux piézoélectriques et le béton thermoactif jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances des bâtiments et des infrastructures. Les matériaux piézoélectriques, capables de convertir des vibrations mécaniques en énergie électrique, offrent des opportunités uniques pour la récolte d'énergie et la surveillance en temps réel des structures [Oğ et al., 2023] ; [AYDIN et al., 2023]. De leur côté, les bétons thermoactifs, qui régulent la température des bâtiments, permettent de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le confort thermique [Net 29] ; [Net 30].

Ce travail de recherche explore en profondeur l'utilisation de ces matériaux dans les projets de construction modernes, en mettant l'accent sur leur application dans les infrastructures critiques et les immeubles de grande hauteur. Nous analyserons les avantages, les défis et l'impact de l'intégration de ces matériaux dans la construction, en tenant compte des aspects techniques, économiques et environnementaux. L'objectif est de comprendre comment ces technologies peuvent transformer le paysage de la construction en répondant aux besoins énergétiques croissants et en favorisant une gestion plus durable des ressources [GOPI et al., 2015] ; [AABID et al., 2021].

III.2. Comparaison des matériaux intelligents : [Oğ et al., 2023], [Net 29] ; [Net 30] [Net 31]

Tableau III.1 : Tableau comparatif des matériaux intelligents

Critères	Matériaux Piézoélectriques	Matériaux Thermoactifs	Matériaux Auto-réparateurs
Fonction principale	Générer de l'électricité à partir de vibrations ou de pressions	Stocker et libérer de l'énergie thermique pour réguler la température intérieure	Colmater et réparer les fissures du béton de manière autonome
Principe de fonctionnement	Effet piézoélectrique : conversion de contraintes mécaniques en électricité	Inertie thermique via circulation d'eau chaude/froide intégrée dans le béton	Activation d'agents réparateurs (bactéries, polymères, additifs) en présence de fissures ou d'eau
Applications typiques (Capacité)	Capteurs intégrés pour la surveillance structurelle (ponts, immeubles, routes)	Planchers, murs ou plafonds chauffants/refroidissants dans les bâtiments	Protection contre la corrosion de l'armature, maintien de l'étanchéité
Applications typiques (Structures)	Surveillance de l'état des infrastructures (ponts, routes, bâtiments exposés aux vibrations)	Systèmes (Chauffage, Ventilation et Climatisation), CVC intégrés dans les dalles, murs ou fondations de bâtiments résidentiels et tertiaires	Ouvrages d'art (ponts, tunnels), barrages, fondations, structures soumises à des fissurations récurrentes
Avantages techniques	- Surveillance en temps réel des déformations - Autonomie énergétique dans certains cas- Détection précoce des dommages	- Régulation thermique efficace - Confort intérieur accru toute l'année - Réduction des systèmes CVC apparents	- Prolongation significative de la durée de vie des structures - Réduction des besoins d'interventions de maintenance - Amélioration de la résilience du matériau
Avantages économiques / énergétiques	- Récolte d'énergie gratuite (microwatts à watts) - Moins de besoin en sources d'alimentation externes pour les capteurs	- Réduction significative des coûts énergétiques (chauffage/climatisation) - Exploite les énergies renouvelables locales (géothermie, solaire)	- Diminution drastique des coûts de maintenance et de réparation à long terme - Valorisation économique du matériau grâce à sa longévité accrue
Avantages environnementaux	- Réduction de la consommation énergétique externe pour les capteurs	- Réduction de l'empreinte carbone des bâtiments - Meilleure efficacité énergétique globale-	- Réduction de la consommation de ressources pour la fabrication de matériaux de réparation

	- Potentiel de récupération d'énergie verte	Moins de gaz à effet de serre liés à la production d'énergie	- Diminution des déchets de construction- Moins d'émissions de CO2 liées aux réparations
Inconvénients techniques	- Sensibilité à l'intensité et la fréquence des vibrations - Intégration complexe dans les structures existantes - Faible puissance générée pour la récupération d'énergie	- Installation techniquement exigeante et complexe - Nécessite un bon dimensionnement et un suivi rigoureux - Réactivité thermique plus lente que les systèmes conventionnels	- Efficacité limitée à la taille des fissures (souvent < 0,5 mm) - Cycle de réparation parfois unique ou limité - Performance variable selon l'environnement (humidité, température)
Inconvénients économiques / pratiques	- Coût initial élevé des matériaux et des systèmes de collecte d'énergie/données - Nécessite parfois un système d'appui énergétique pour les capteurs	- Coût initial d'installation plus élevé que les systèmes CVC traditionnels - Matériaux parfois indisponibles selon les régions - Retour sur investissement à moyen/long terme	- Coût initial plus élevé des matériaux "intelligents" par rapport au béton traditionnel - Processus de fabrication plus complexe à grande échelle - Nécessite des protocoles de contrôle qualité spécifiques
Limites d'adoption	- Technologies encore émergentes à grande échelle - Faible sensibilisation et formation des professionnels - Manque de normalisation et de cadres réglementaires clairs	- Manque de sensibilisation et d'expertise chez les professionnels - Nécessite une formation spécifique des artisans et ingénieurs pour une installation et une optimisation correctes	- Technologie encore en phase de recherche et développement avancée/démonstration - Perception des risques et réticence au changement dans l'industrie - Nécessité de normes de performance et de durabilité à long terme
Durabilité / Résilience	- Potentiel de résistance dans des environnements extrêmes - Permet la détection précoce des défaillances pour	- Résistance aux cycles gel/dégel (si bien conçu) - Durabilité dépendante de la qualité de l'installation et de l'entretien du système	- Amélioration directe de la durabilité intrinsèque du béton par auto-colmatage - Maintien de l'intégrité structurelle face aux microfissurations et

	prolonger la durée de vie		attaques environnementales
Synthèse d'usage par type de projet	Idéal pour structures critiques (ponts, gratte-ciels, réseaux routiers, éoliennes) nécessitant une surveillance en continu et/ou de la récupération d'énergie cinétique	Idéal pour bâtiments de grande hauteur ou à haute performance énergétique (passifs, zéro énergie), logements collectifs, bureaux, bâtiments publics	Idéal pour les infrastructures où la maintenance est difficile d'accès ou coûteuse (tunnels, ouvrages marins, fondations, éléments enterrés), structures soumises à des agressions chimiques

En résumé :

Matériaux Piézoélectriques : Parfaits pour les projets nécessitant **une surveillance continue**, notamment dans les infrastructures critiques. Leur capacité à produire de l'énergie à partir de vibrations peut offrir une **autonomie énergétique locale**, mais leur coût et leur sensibilité imposent des limites techniques.

Matériaux Thermoactifs : Recommandé pour les **bâtiments résidentiels ou tertiaires** où la **régulation thermique** est prioritaire. Il améliore le **confort thermique** et **réduit les besoins énergétiques**, mais demande une installation soignée et des matériaux spécifiques.

Matériaux Auto réparateurs : Idéaux pour les **infrastructures où la maintenance est difficile** ou coûteuse. Ils prolongent la durée de vie des structures et réduisent les coûts de réparation grâce à leur capacité à colmater les fissures, bien que leur efficacité dépende de la taille des fissures et que le coût initial reste élevé.

III.3. Étude de la durabilité et des coûts :

Tableau III.2 : Tableau comparatif de la durabilité et coûts des matériaux intelligents

Catégorie	Aspect	Matériaux Piézoélectriques	Matériaux Thermoactif	Matériaux Auto Réparateurs
Durabilité	Résilience structurelle	- Récolte d'énergie mécanique : vibrations / pressions → autonomie énergétique accrue [Net 31] - Surveillance en temps réel (fissures,	- Amélioration de la durabilité globale des bâtiments par régulation thermique [Net 36] - Résistance au gel/dégel [Net 29] . - Dépend de l'installation correcte et de la maintenance	- Capacité de cicatrisation autonome des microfissures (0,1-0,3 mm) grâce aux capsules ou bactéries intégrées. - Prolongation significative de la durée de vie structurelle

		déformations) prolongeant la durée de vie des structures [Net 31] ; [Oğ et al., 2023]. - Sensibilité à l'humidité et à la fatigue mécanique [Net 31].	régulière des circuits [Net29].	(Jusqu'à 50% d'extension). - Efficacité limitée aux dommages de faible ampleur. - Performance dégradée après plusieurs cycles de réparation.
Impact environnemental		- Réduction de la dépendance énergétique grâce à l'autonomie locale [Net 31]. - Pas de production directe d'émissions. - Utilisation encore limitée à cause du coût.	- Diminution de l'empreinte carbone grâce à l'optimisation thermique [Net 29] ; [Net 36]. - Possibilité d'intégrer des matériaux recyclés.	- Réduction drastique des interventions de maintenance et réparations. - Diminution des déchets de construction liés aux rénovations. - Certains systèmes utilisent des bactéries naturelles (approche bio-inspirée). - Impact environnemental des agents de guérison encore en évaluation.
Efficacité économique	Coût des matériaux	- Plomb-Zirconate-Titanate (PZT) : 70–100 \$/kg selon la qualité [Net 32]. - Tantalate de lithium : 83–95 \$/pièce (6 pouces) [Net 33].	- Plancher chauffant en béton : 11–25 \$/pièce ² (installation incluse) [Net 34].	- Béton auto réparateur : 25–40% plus cher que le béton traditionnel. - Capsules polymères : 15–30 \$/kg d'additif. - Systèmes bactériens : 20–50 \$/m ³ de béton supplémentaire.
	Production d'énergie	- Coût actualisé : 0,08–0,20 \$/kWh [Hill et al., 2014]. - Systèmes adaptés aux routes, ponts, bâtiments à fort Trafic.	- Pas de production d'énergie, mais réduction de la consommation.	- Pas de production d'énergie, mais économies sur les réparations.
	Coût initial	- Élevé, en raison de la technologie complexe et de l'intégration dans les structures [Net 31].	- Plus élevé que le béton classique à cause des tuyaux, circuits thermiques, expertise technique [Net 37].	- Investissement initial majoré de 20-40% par rapport au béton conventionnel. - Coûts de recherche et développement encore élevés, technologie Émergente.

	Coût d'entretien	- Maintenance régulière nécessaire (fatigue, capteurs) [Net 31].	- Entretien des circuits (fuites, corrosion, etc.) [Net 29].	- Réduction significative des coûts de maintenance (60-80% de diminution). - Interventions principalement préventives. - Surveillance périodique de l'efficacité des agents Réparateurs.
	Retour sur investissement	- Amortissement à long terme grâce aux économies d'énergie et à la réduction des réparations [AABID et al., 2021] ; [Net 31].	- Retour estimé en 5 à 10 ans, selon les économies de chauffage / climatisation [Net 29].	- Retour sur investissement est estimé en 8-15 ans grâce aux économies de maintenance. - Rentabilité accrue pour les infrastructures critiques (ponts, tunnels). - Valeur ajoutée par l'extension de durée de Vie des structures.
	Économie d'exploitation	- Production d'énergie propre pour alimenter des capteurs / systèmes autonomes [Oğ et al., 2023].	- Réduction significative des besoins en chauffage et climatisation traditionnels [Net 29].	- Économies opérationnelles majeures : réduction des arrêts de service, interventions d'urgence limitées. - Optimisation des cycles de maintenance préventive. - Réduction des coûts indirects (fermetures de routes, perturbations d'activité).

En résumé

Les matériaux piézoélectriques : se distinguent par leur capacité à générer de l'énergie à partir de contraintes mécaniques, ce qui offre un avantage unique en autonomie énergétique et en surveillance structurelle. Leur coût reste élevé, principalement à cause des matériaux de haute pureté (PZT, lithium tantalate) et du manque d'économies d'échelle [Net 32] ; [Net 33] ; [Net 35].

Le béton thermoactif : bien que plus mature, représente un **investissement initial lourd**, mais il est rentabilisé par des **économies d'énergie** durables et une **réduction de l'empreinte carbone**. Il est idéal dans les constructions bioclimatiques ou passives.

Matériaux Auto réparateurs : Offrent une solution prometteuse pour la **prolongation de la durée de vie des structures** en colmatant les fissures de manière autonome, ce qui réduit drastiquement les besoins et les coûts de maintenance à long terme. Cependant, leur **coût initial plus élevé** et le fait que la technologie soit encore en **phase de développement avancée** sont des freins à leur adoption généralisée.

III.4. Sélection selon le type de projet :

Les matériaux intelligents, tels que les matériaux piézoélectriques et le béton thermoactif, jouent un rôle essentiel dans divers types de projets de construction. Leur utilisation dans des infrastructures critiques, comme les ponts, et dans des immeubles de grande hauteur permet de répondre aux besoins énergétiques, à la surveillance de la structure et à la régulation thermique. Par exemple, les matériaux piézoélectriques sont utilisés pour la surveillance en temps réel des fissures et déformations dans les structures, ce qui est particulièrement utile pour les infrastructures critiques [CHENA et al., 2018] ; [AYDIN et al., 2023]. De plus, le béton thermoactif contribue à l'efficacité énergétique des bâtiments en régulant la température et en réduisant la dépendance aux systèmes traditionnels de chauffage et de climatisation [Net 29] ; [Net 30]. Voici une analyse détaillée de leur utilisation dans ces contextes spécifiques :

Tableau III.3: Sélection des matériaux selon le type de projet

Type de Projet	Matériaux Thermoactif	Matériaux Piézoélectriques	Matériaux Autoréparateurs
Infrastructures Critiques (ponts, hôpitaux, centres de contrôle, centrales)	Efficacité énergétique : régulation thermique constante, réduction des charges HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) [Net 30] Durabilité environnementale : intégration possible de matériaux recyclés, résilience climatique [Net 30].	Surveillance structurelle : détection continue des fissures/déformations Surveillance de la Santé Structurelle [CHENA et al., 2018]. Production d'énergie : conversion des vibrations (trafic) en électricité pour alimenter capteurs/équipements [AYDIN et al., 2023].	Continuité de service : réparation autonome des microfissures sans intervention humaine, essentielle pour les infrastructures critiques. Sécurité renforcée : réduction drastique des risques de défaillance structurelle par cicatrisation préventive. Maintenance minimale : interventions réduites

	Légèreté et résistance : réduction de la masse des structures et bonne tenue au gel/dégel [Net 29].		de 60-80%, crucial pour les sites sensibles ou difficiles d'accès. Durée de vie prolongée : extension jusqu'à 50% de la durée de service des structures critiques.
Immeubles de Grande Hauteur (tours, gratte-ciel, bâtiments commerciaux)	Efficacité énergétique : réduction des systèmes traditionnels de chauffage/climatisation [Net 30]. Durabilité : résistance accrue aux conditions extrêmes et mouvements du sol [Net 30]. Polyvalence : planchers, murs et toitures [Net 29].	Surveillance en temps réel : anticipation des défauts structurels, réduction des réparations [Oğ et al., 2023]. Autonomie énergétique : fonctionnement sans alimentation externe [Net 31]. Récupération d'énergie interne : capte les vibrations humaines ou du bâtiment [CHENA et al., 2018].	Maintenance complexe simplifiée : réduction des interventions en hauteur coûteuses et dangereuses. Résistance aux mouvements : capacité d'adaptation aux déformations dues au vent, séismes, ou tassements différentiels. Économies opérationnelles : réduction significative des coûts de maintenance préventive et corrective. Fiabilité structurelle : autoréparation des fissures de fatigue dues aux charges cycliques (vent, occupation variable). Accessibilité réduite : particulièrement avantageux pour les zones difficiles d'accès (façades, fondations profondes).



Figure III.1: Université de Saint-Gall en Suisse [Net 38].

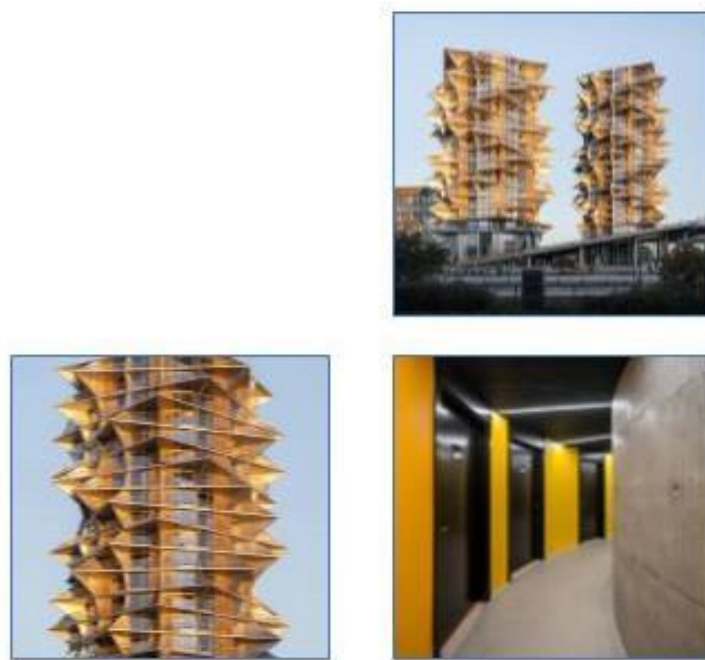


Figure III.2: La Cactus Tower (Copenhague, Danemark) [Net 39].

III.5. Applications avancées dans l'innovation architecturale et la construction durable

Tableau III.4: Applications avancées dans l'innovation architecturale et la construction durable

Pays / Projet	Matériau utilisé	Description de l'application	Référence
Pays-Bas – Sola Road	Piézoélectrique	Tuiles piézoélectriques testées sur route ; convertissent les vibrations piétonnes/vehiculaires en énergie pour alimenter l'éclairage.	[Net 40] ; [Net 41]
Japon – Gare de Shibuya	Piézoélectrique	Dalles piézoélectriques au sol produisent de l'électricité pour les écrans, LED, signalisations.	[Net 42]
Japon – Métro de Tokyo	Piézoélectrique	Dalles intégrées dans les quais ; énergie récupérée utilisée pour l'éclairage, détecteurs, escalators.	[Net42] ; [Net 40]
Pays-Bas – The Edge	Thermoactif	Système de planchers thermoactifs pour le stockage thermique saisonnier ; réduction majeure des consommations énergétiques.	[Net 43] ; [Net 44]

Université de Saint-Gall	Thermoactif	Exemple académique de régulation thermique par dalle active dans un contexte institutionnel.	[Net 38]
Cactus Tower, Danemark	Thermoactif	Tour résidentielle intégrant le béton thermoactif pour un confort thermique et une efficacité énergétique maximisés.	[Net 39]
Delft University - Projet HealtConcrete	Auto réparateur	Béton auto réparateur avec bactéries <i>Bacillus</i> dans les bâtiments universitaires ; démonstration de cicatrisation autonome des fissures.	[Net 45]
Chine – Pont de Taicang	Auto réparateur	Premier pont routier intégrant des capsules d'agents réparateurs ; projet pilote pour infrastructures critiques à grande échelle.	[Net 45]
Allemagne – A8 Autoroute	Auto réparateur	Section d'autoroute avec béton auto réparateur à base de capsules polymères ; test de durabilité sous trafic intense.	[Net 46]
Pays-Bas – Projet ReSHEALience	Auto réparateur	Programme européen testant différentes formulations de béton auto réparateur dans des infrastructures portuaires et routières.	[Net 47]
Royaume-Uni – Université de Bath	Auto réparateur	Bâtiment de recherche intégrant du béton avec agents de guérison encapsulés ; monitoring à long terme des performances.	[Net 48]
Belgique – Tunnel de Liefkenshoek	Auto réparateur	Application pilote de revêtement auto réparateur dans un tunnel sous-marin ; environnement extrême pour validation technologique.	[Net 49]

En résumé

Les **matériaux piézoélectriques** : conviennent parfaitement aux projets où la **surveillance structurelle** continue et la **production locale d'énergie** sont cruciales — notamment pour les **infrastructures critiques** et les **immeubles techniques sensibles**.

Le **béton thermoactif** : est davantage adapté aux projets visant une **performance énergétique élevée**, un **confort thermique passif**, et une **réduction des émissions carbone**, surtout pour les **bâtiments tertiaires et résidentiels de grande hauteur**.

Matériaux Auto réparateurs : Sont particulièrement indiqués pour les ouvrages qui requièrent une **durabilité exceptionnelle** et une **autonomie de maintenance**, comme les infrastructures

difficiles d'accès (tunnels, ponts) ou celles exposées à des environnements agressifs, grâce à leur capacité à colmater les fissures de manière autonome.



Figure III.3 : Projet SolaRoad [Net 41].



Figure III.4: la gare de Shibuya [Net 42].



Figure III.5: Sols piézoélectriques à « The Edge » (Amsterdam, Pays-Bas) [Net 44].

III.6. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, nous avons exploré l'utilisation des matériaux intelligents, notamment les matériaux piézoélectriques, les matériaux auto réparateurs et les matériaux thermoactifs, dans le domaine de la construction moderne. Ces matériaux innovants ont le potentiel de transformer les infrastructures en apportant des solutions durables et efficaces pour la gestion de l'énergie, la surveillance structurelle et la régulation thermique.

Les matériaux piézoélectriques offrent une approche prometteuse pour la récolte d'énergie et la surveillance en temps réel des structures. En convertissant les vibrations et pressions en électricité, ils permettent une autosuffisance énergétique tout en facilitant la détection des fissures et autres déformations dans les matériaux de construction [Oğ et al., 2023] ; [AYDIN et al., 2023]. Cependant, des défis tels que la sensibilité aux facteurs environnementaux et la nécessité d'une maintenance régulière doivent être pris en compte pour garantir leur efficacité à long terme [Oğ et al., 2023] ; [AABID et al., 2021].

D'autre part, le béton thermoactif se distingue par sa capacité à réguler la température des bâtiments, ce qui entraîne des économies d'énergie substantielles et une réduction de l'empreinte carbone. L'intégration de systèmes de chauffage et de refroidissement dans le béton permet de réduire la dépendance aux systèmes traditionnels de climatisation et de chauffage, tout en offrant un confort thermique optimal. Toutefois, des considérations comme le coût initial élevé, la maintenance des systèmes de circulation thermique et la gestion des variations de performance doivent être prises en compte pour assurer une adoption à grande échelle [Net 29] ; [Net 30].

Enfin, les matériaux auto réparateurs représentent une avancée majeure pour la durabilité intrinsèque des constructions. Grâce à des agents réparateurs intégrés (qu'il s'agisse de capsules de polymères, de bactéries productrices de calcite ou d'additifs minéraux), ils sont capables de colmater de manière autonome les microfissures dès leur apparition. Cette capacité d'auto-guérison prolonge significativement la durée de vie des ouvrages, réduit les besoins en interventions de maintenance coûteuses et minimise les risques de corrosion des armatures. Cependant, leur efficacité est souvent limitée à la taille des fissures, et la technologie, bien que prometteuse, est encore en développement, nécessitant des investissements initiaux plus élevés et des validations à long terme.

Bien que les coûts des matériaux piézoélectriques et du béton thermoactif soient plus élevés que ceux des matériaux de construction traditionnels, les économies d'énergie à long terme et les bénéfices en termes de durabilité peuvent justifier cet investissement. L'avancement technologique et la réduction des coûts de production pourraient, à terme, rendre ces matériaux plus accessibles, favorisant ainsi leur adoption à plus grande échelle **[HILL et al., 2014] ; [Net 37]**.

En conclusion, l'intégration de ces matériaux intelligents dans la construction moderne représente une réponse efficace aux défis environnementaux actuels. Cependant, leur adoption nécessitera une réflexion approfondie sur leur durabilité, leur entretien, et une coordination parfaite avec les systèmes de construction existants pour garantir un impact maximal en termes de performance, de confort et d'efficacité énergétique **[GOPI et al., 2015]**.

CHAPITRE IV

Études de cas réels des matériaux intelligents en génie civil

Chapitre IV

Études de cas réels des matériaux intelligents en génie civil

IV.1. Introduction

L'intégration des matériaux intelligents dans le domaine du génie civil représente une révolution technologique majeure qui transforme notre approche de la construction durable. Les matériaux auto-réparateurs, piézoélectriques et thermoactifs ne sont plus seulement des concepts théoriques, mais des technologies éprouvées à travers diverses applications réelles. Ce chapitre présente une analyse détaillée de six études de cas significatives qui démontrent l'efficacité et la viabilité de ces matériaux innovants. Ces recherches, menées par des institutions prestigieuses et validées par des applications concrètes, illustrent les avancées technologiques et les bénéfices tangibles obtenus dans différents contextes d'application.

IV.2. Matériaux Auto-réparateurs

IV.2.1. Étude de Cas 1 : Développement du Bio-Béton par Henk Jonkers (TU Delft, 2010-2015) [JONKERS et al., 2010]

Cette recherche pionnière menée à l'Université Technologique de Delft a développé un béton auto-réparateur utilisant des bactéries alcalifiles du genre *Bacillus*. L'équipe de recherche dirigée par le Dr. Henk Jonkers a intégré des spores bactériennes dormantes et du lactate de calcium dans la matrice cimentaire. Lorsque des fissures apparaissent et permettent à l'eau de pénétrer, les bactéries s'activent et précipitent du carbonate de calcium, obturant automatiquement les fissures.

L'étude a été menée sur une période de 5 ans avec des tests en laboratoire suivis d'applications pilotes. Les chercheurs ont testé différentes souches bactériennes et optimisé les formulations pour maximiser la survie des micro-organismes dans l'environnement alcalin du béton.

i. Résultats trouvés

Les résultats ont démontré une capacité de cicatrisation remarquable :

- **Efficacité de réparation** : Cicatrisation complète de fissures jusqu'à 0,8 mm de largeur en 7-28 jours
- **Durabilité des bactéries** : Survie des spores jusqu'à 200 ans dans la matrice cimentaire
- **Résistance mécanique** : Maintien de 95% de la résistance à la compression initiale après autoréparation
- **Étanchéité** : Réduction de 100% de la perméabilité à l'eau dans les zones réparées
- **Applications pilotes** : Tests réussis sur des murs de bassins portuaires aux Pays-Bas avec réduction significative des coûts de maintenance

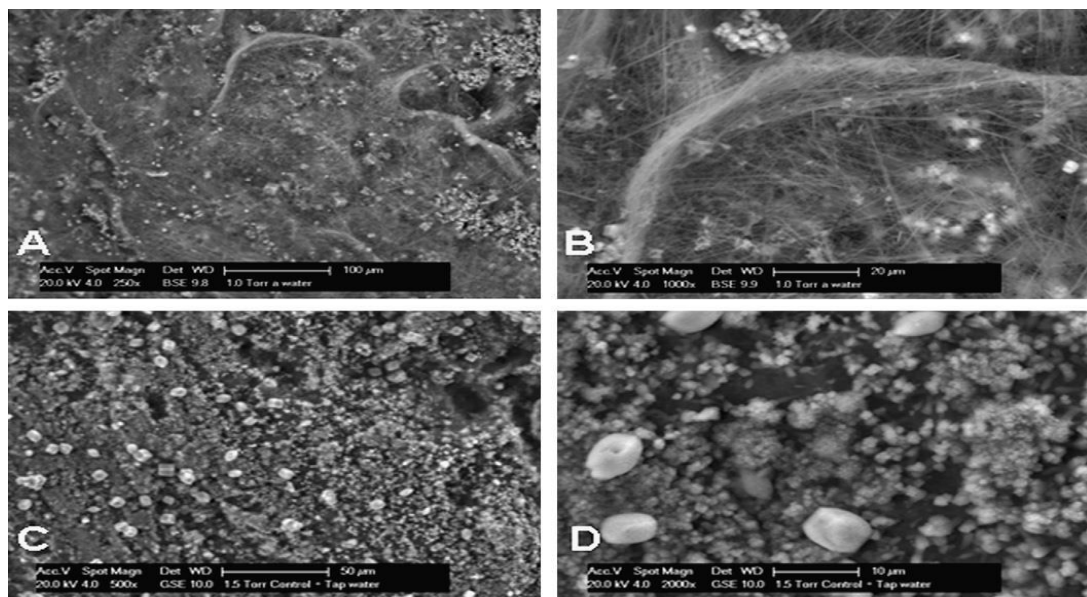


Figure IV.1 : Échantillons de pierre de ciment sans agent de cicatrisation incorporé (témoins), fissurés après 7 (panneaux A : grossissement 250× et B : grossissement 1000×) ou 28 jours de durcissement (panneaux C : grossissement 500× et D : grossissement 2000×).

IV.2.2. Étude de Cas 2 : Béton Auto-réparateur à Capsules Polymères (Université de Cardiff, 2018) [JEFFERSON et al., 2018]

L'équipe de l'Université de Cardiff a développé un système innovant utilisant des capsules polymères contenant des agents de guérison. Ces microcapsules, intégrées dans la matrice cimentaire, se brisent lors de la formation de fissures et libèrent des polymères réactifs qui polymérisent au contact de l'air et de l'humidité. L'étude a exploré différents types de capsules et d'agents de guérison pour optimiser l'efficacité de la réparation.

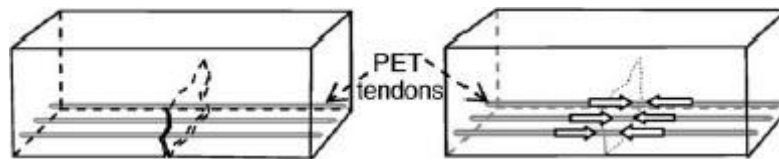


Figure IV.2 : Illustration schématique du concept d'un nouveau système de matériaux composites.

La recherche comprenait des tests de durabilité sur 3 ans, avec des cycles de charge-décharge simulant les conditions réelles d'exploitation des structures.

ii. Résultats trouvés

L'étude a révélé des performances prometteuses :

- **Taux de guérison :** 85% de récupération de la résistance à la flexion dans les 24 heures.
- **Capacité de réparation :** Fissures jusqu'à 0,5 mm efficacement obturés.
- **Cycles de réparation :** Jusqu'à 3 cycles de fissuration-guérison possibles..
- **Impact sur les propriétés :** Réduction minimale (5%) de la résistance initiale du béton.
- **Coût-efficacité :** Retour sur investissement estimé à 8-12 ans pour les infrastructures critiques.

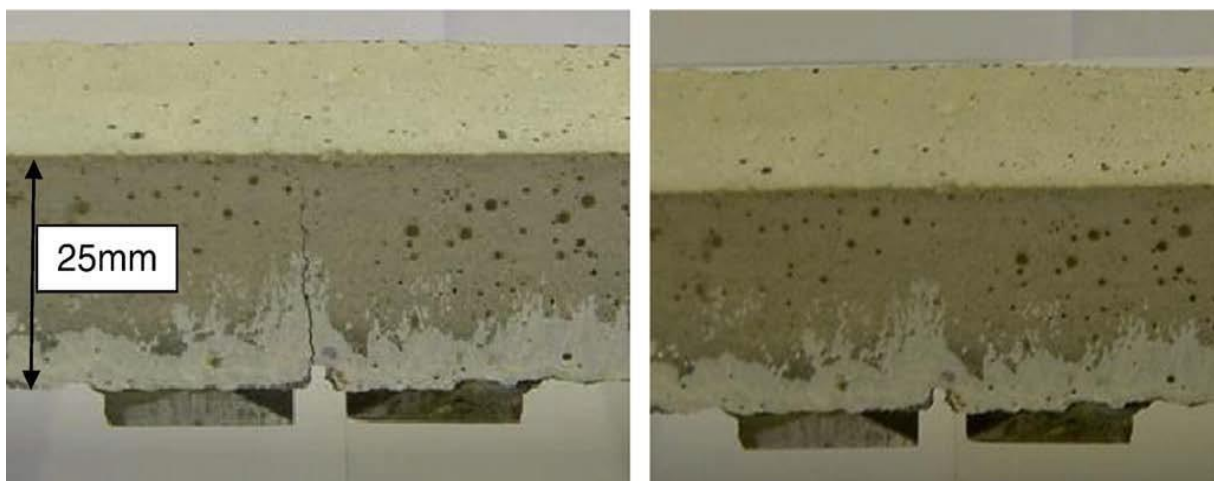


Figure IV.3 : Échantillon du groupe PET (à gauche) fissuré après le chargement de l'étape 1 (à droite) avec fissure fermée après l'activation du polymère

IV.3. Matériaux Piézoélectriques

IV.3.1. Étude de Cas 3 : Système de Surveillance Structurelle Intégrée (MIT, 2019) [ROVIDAKIS et al., 2019]

iii. Résultats trouvés

Les résultats ont confirmé l'efficacité du système :

- **Précision de détection** : Identification de fissures dès 0,1 mm avec 95% de fiabilité
- **Surveillance continue** : Monitoring 24h/24 sans intervention humaine
- **Prédiction précoce** : Détection des signes de dégradation 3-6 mois avant l'apparition visible
- **Économies de maintenance** : Réduction de 60% des coûts d'inspection traditionnelle
- **Autonomie énergétique** : Fonctionnement pendant 5 ans avec la batterie intégrée

IV.2.3. Étude de Cas 4 : Récupération d'Énergie dans les Chaussées (Université de Technology de Tokyo, 2020) [MOURE et al., 2020]

iv. Résultats trouvés

L'expérimentation a généré des données significatives :

- **Production énergétique** : 2,3 kWh/m²/jour avec un trafic de 2000 véhicules
- **Efficacité de conversion** : 12% de l'énergie mécanique convertie en électricité
- **Durabilité** : Aucune dégradation significative après 1 million de passages
- **Applications pratiques** : Alimentation de l'éclairage public et de la signalisation routière
- **Rentabilité** : Amortissement en 15 ans avec les économies d'énergie générées

IV.3. Matériaux Thermoactifs

IV.3.1. Étude de Cas 5 : Système TABS dans le Bâtiment "The Edge" (Pays-Bas, 2014) [OLESEN et al., 2014]

Cette étude de cas porte sur l'implémentation d'un système de dalle thermoactive (TABS -

Thermally Activated Building System) dans "The Edge", considéré comme l'un des bâtiments les plus durables au monde, situé à Amsterdam. Le système utilise des serpentins d'eau intégrés dans les dalles de béton pour le chauffage et la climatisation du bâtiment. L'étude a monitored les performances énergétiques pendant 3 ans, comparant la consommation avec des bâtiments similaires équipés de systèmes HVAC conventionnels. L'analyse incluait des mesures de confort thermique et de qualité de l'air intérieur.

v. Résultats trouvés

Les performances mesurées ont dépassé les attentes :

- **Réduction énergétique** : 70% de diminution de la consommation pour le chauffage/climatisation
- **Confort thermique** : Maintien de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ de la température de consigne toute l'année
- **Efficacité énergétique** : Coefficient de performance (COP) de 6,2 pour le système global
- **Qualité de l'air** : Amélioration de 40% par rapport aux systèmes conventionnels
- **Coûts opérationnels** : Économies annuelles de 180 000€ sur les factures énergétiques

IV.3.2. Étude de Cas 6 : Stockage Thermique Saisonnier (ETH Zurich, 2017) [ASTE et al., 2017]

vi. Explication de l'étude

Cette recherche de l'ETH Zurich a étudié l'implémentation d'un système de stockage thermique saisonnier utilisant des masses thermiques en béton thermoactif dans un complexe résidentiel de 120 logements. Le système combine des capteurs solaires thermiques avec des dalles thermoactives pour stocker l'énergie solaire estivale et la restituer en hiver.

L'étude expérimentale s'est étalée sur 4 saisons complètes avec des mesures détaillées des flux thermiques, des températures intérieures et de la consommation énergétique globale.

vii. Résultats trouvés

L'analyse a révélé des bénéfices substantiels :

- **Stockage thermique** : Capacité de stockage de 45 kWh/m³ de béton thermoactif
- **Autonomie énergétique** : 85% des besoins de chauffage couverts par le stockage saisonnier
- **Stabilité thermique** : Variations de température intérieure réduites de 60%
- **Impact environnemental** : Réduction de 75% des émissions de CO₂ liées au chauffage
- **Viabilité économique** : Retour sur investissement de 9 ans comparé aux systèmes traditionnels

IV.4. Conclusion

Les six études de cas analysées dans ce chapitre démontrent de manière convaincante que les matériaux intelligents ne relèvent plus du domaine expérimental mais constituent des solutions technologiques matures et viables pour l'industrie de la construction.

Les **matériaux auto réparateurs** ont prouvé leur capacité à prolonger significativement la durée de vie des structures, avec des applications réussies allant du bio-béton de Delft aux systèmes à capsules polymères de Cardiff. Ces technologies offrent des perspectives d'économies substantielles en maintenance tout en améliorant la durabilité des infrastructures.

Les **matériaux piézoélectriques** ont démontré leur double potentiel en tant que systèmes de surveillance structurelle et sources d'énergie renouvelable. Les recherches du MIT et de l'Université de Tokyo illustrent comment ces matériaux transforment les structures passives en systèmes intelligents capables d'autodiagnostic et de production énergétique.

Les **matériaux thermoactifs** représentent une révolution dans la gestion thermique des bâtiments, comme le prouvent les excellents résultats obtenus dans "The Edge" et les projets de stockage saisonnier de l'ETH Zurich. Ces systèmes offrent une alternative efficace et durable aux systèmes HVAC conventionnels.

L'ensemble de ces études confirme que l'intégration des matériaux intelligents dans le génie civil constitue une voie prometteuse vers une construction plus durable, plus efficace et plus résiliente. Les retours sur investissement documentés, combinés aux bénéfices environnementaux et opérationnels, positionnent ces technologies comme des éléments clés de l'avenir de la construction. La transition de la recherche fondamentale vers les applications

Industrielles est désormais amorcée, ouvrant la voie à une adoption plus large de ces innovations dans les années à venir.

Cette recherche du Massachusetts Institute of Technology a développé un système de surveillance structurelle utilisant des capteurs piézoélectriques intégrés dans le béton. L'équipe a implanté des patches piézoélectriques PZT dans des poutres en béton armé pour monitorer en temps réel l'évolution de la résistance du béton et détecter l'apparition de fissures.

L'étude a suivi le comportement de 50 spécimens sur 18 mois, avec des mesures continues de l'impédance électromécanique. Les capteurs étaient connectés à un système de télémétrie sans fil pour la transmission des données.

Cette étude japonaise a investigué l'intégration de dalles piézoélectriques dans les chaussées urbaines pour la récupération d'énergie à partir des vibrations du trafic. L'équipe a installé un système pilote de 100 m² incorporant des transducteurs piézoélectriques sous une section de route à fort trafic à Tokyo.

La recherche a mesuré la production énergétique sur une année complète, avec différents types de véhicules et conditions météorologiques. L'étude incluait également une analyse économique complète du système.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le paysage contemporain du génie civil évolue résolument vers le développement d'infrastructures plus résilientes, durables et économes en énergie. Ce mémoire a exploré en profondeur le potentiel transformateur des matériaux intelligents, les positionnant comme pierre angulaire de cette évolution cruciale du secteur de la construction. Notre objectif principal était d'analyser minutieusement les principes fondamentaux et les propriétés distinctives de ces matériaux avancés, de comprendre leurs mécanismes de fonctionnement complexes et d'évaluer leur intégration harmonieuse dans les systèmes structurels pour un suivi des performances en temps réel, une prévention proactive des défaillances et une amélioration globale de l'intégrité structurelle.

Notre étude, fondée sur une recherche bibliographique approfondie et une analyse thématique, a permis de comprendre clairement les matériaux intelligents comme des systèmes dynamiques capables de percevoir, de répondre et de s'adapter à divers stimuli environnementaux ou internes [ELATTAR et al., 2013]. Nous avons catégorisé systématiquement ces matériaux, en nous concentrant sur des types clés tels que les matériaux piézoélectriques, thermoactifs et auto réparatrice [CHERGUI et al., 2000]. Cette exploration fondamentale a mis en évidence les conditions techniques, économiques et environnementales essentielles à leur adoption à grande échelle [AKHRAS et al., 2000]. Les avantages démontrables, notamment des améliorations marquées de l'efficacité énergétique, des réductions significatives des coûts de maintenance et une intégrité structurelle renforcée, soulignent sans équivoque leur rôle prometteur dans la création d'environnements bâtis intelligents et autonomes. Malgré cet immense potentiel, notre analyse a également révélé des défis considérables, notamment les coûts d'investissement initiaux élevés, la complexité inhérente aux processus d'estimation, la prévalence de cadres réglementaires obsolètes et une résistance persistante au sein du secteur de la construction traditionnelle [Net 3]. Ces obstacles constituent collectivement des obstacles à leur mise en œuvre généralisée.

Une analyse plus approfondie d'applications spécifiques a révélé l'impact profond du béton thermoactif, qui apparaît comme l'une des avancées les plus innovantes. Ce matériau exploite stratégiquement sa masse thermique élevée et l'intégration intelligente de matériaux à changement de phase (MCP) [Net 12] ; [GASCA et al., 2019], ainsi que les polymères à

mémoire de forme (SMP) [TEALL et al., 2016], pour obtenir une régulation thermique passive supérieure et des capacités d'auto-réparation remarquables. Nous avons démontré de manière concluante comment le béton thermoactif peut réduire considérablement la consommation d'énergie, améliorer le confort thermique et prolonger significativement la durée de vie des infrastructures critiques [Net 21] ; [Net 22]. Sa remarquable polyvalence est évidente dans un large éventail d'applications, des routes et ponts aux bâtiments et services publics souterrains [Net 17]. Néanmoins, les défis liés à son coût initial, à sa disponibilité régionale et à la demande d'expertise technique spécialisée [Net 21] soulignent l'impératif de poursuivre la recherche et le développement, ainsi qu'une sensibilisation accrue de l'industrie, afin d'optimiser sa pénétration sur le marché.

En approfondissant notre étude, le rôle essentiel des matériaux piézoélectriques dans la surveillance de l'état des structures (SHM) et la récupération d'énergie est devenu évident [Oğ et al., 2023]. Grâce à leur capacité inhérente à interconvertir l'énergie mécanique et électrique [GAUCHER et al., 2008], ces matériaux offrent des solutions révolutionnaires pour la surveillance précise des contraintes [WANG et al., 2021] ; [WANG et al., 2019], la détection efficace des charges excessives [CHENA et al., 2018] et l'identification précoce cruciale des dommages structuraux [CHENA et al., 2019] ; [QIN et al., 2010]. L'intégration de capteurs piézoélectriques directement dans le béton permet une surveillance en temps réel des fissures et des vibrations, permettant ainsi des stratégies de maintenance véritablement proactives [Oğ et al., 2023]. De plus, leur capacité à générer de l'énergie utilisable à partir des vibrations ambiantes, qu'elles proviennent du trafic automobile ou des mouvements piétonniers [Oğ et al., 2023], ouvre une voie prometteuse vers des infrastructures auto-alimentées et la réalisation de villes intelligentes plus autonomes. Si les perspectives d'avenir de matériaux comme le PZT et le PVDF sont indéniablement prometteuses [AYDIN et al., 2023], la poursuite des recherches est essentielle pour surmonter les limites actuelles telles que la fragilité des matériaux et les défis de polarisation.

En conclusion, ce mémoire établit clairement que les matériaux intelligents transcendent la simple curiosité scientifique ; ils représentent une nécessité indispensable pour façonner l'avenir de notre environnement bâti. Malgré les défis actuels, leurs avantages incontestables en termes de durabilité accrue, de performance énergétique supérieure et de sécurité renforcée sont incontestables. L'adoption généralisée de ces technologies révolutionnaires dépendra d'efforts de recherche soutenus visant à réduire les coûts, à

normaliser les applications et à adapter dynamiquement les cadres réglementaires **[GOPI et al., 2007]**. Le génie civil est au bord d'une profonde transformation, où les structures ne fonctionneront plus comme des constructions inertes et passives, mais plutôt comme des entités dynamiques, intelligentes et réactives, contribuant activement à un paysage bâti mondial plus résilient et durable.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[ANNAMDAS et al., 2009] : ANNAMDAS, V. G. M., & SOH, C. K. (2009). Application of Electromechanical Impedance Technique for Engineering Structures: Review and Future Issues: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21(1), 41–59. <https://doi.org/10.1177/1045389X09352816>.

[ANNAMDAS et al., 2010]: ANNAMDAS, V. G. M., YANG, Y., & SOH, C.K. (2010). Impedance based Concrete Monitoring using Embedded PZT Sensors. International Journal of Civil and Structural Engineering, 1(3). <https://doi.org/10.6088/ijcser.00202010033>.

[AYDIN et al., 2023] : AYDIN, A. C., & ÇELEBI, O. (2023). Piezoelectric materials in civil engineering applications: A review. ACS Omega, 8(20), 19189–19206.

[AYDIN et al., 2023] : AYDIN, A. C., & ÇELEBI, O. (2023). Piezoelectric materials in civil engineering applications: A review. ACS Omega, 8(20), 19172–19187.

[ASTE et al., 2017] : ASTE, N., ANGELOTTI, A., & BUZZETTI, M. (2017). The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well-insulated buildings. Energy and Buildings, 133, 315–324.

[AABID et al., 2021] : AABID, A., PARVEEZ, B., RAHEMAN, M. A., IBRAHIM, Y. E., ANJUM, A., HRAIRI, M., PARVEEN, N., & ZAYEN, J. M. (2021). A review of piezoelectric material-based structural control and health monitoring techniques for engineering structures: Challenges and opportunities. Actuators, 10(1), 17–18. <https://doi.org/10.3390/act10010017> .

[AGYENIM et al., 2010]: AGYENIM, F., HEWITT, N., EAMES, P., & SMYTH, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(2), 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015> .

[AL-SSHANNAQ et al., 2016]: AL-SSHANNAQ, R., KURDI, J., AL-MUHTASEB, S., & FARID, M. (2016). Innovative method of metal coating of microcapsules containing phase change materials. Solar Energy, 129, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.043>.

[AKHRAS et al., 2000] : AKHRAS, G. (2000). Smart materials and smart structures. Canadian Military Journal, 1(3), 25.

[BHATNAGAR et al., 2022]: BHATNAGAR, M., GOYAL, S. N., AGARWAL, N., & (2022). A review on self-healing polymers for applications. Wiley Periodicals LLC, 12.

[BEKAS et al., 2018]: BEKAS, D. G., SHARIF-KHODAEI, Z., & ALIABADI, M. H. F. (2018). An innovative diagnostic film for structural health monitoring of metallic and composite structures. Sensors, 18(7), 2084. <https://doi.org/10.3390/s18072084> .

[CUI et al., 2022] : CUI, H. C., YAO, D. S., HENSLEIGH, R., Lu, H. T., CALDERON, A., XU, Z. P., DAVARIA, S., WANG, Z., MERCIER, P., TARZAGA, P., et al. (2022). Design and printing of proprioceptive three-dimensional architected robotic metamaterials. *Science*, 376(6595), 1287–1293. <https://doi.org/10.1126/science.abn0090> .

[CURIE et al.,1880] CURIE, P., & CURIE, J. (1880). Développement par pression de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées. Bulletin de la Société Minéralogique de France, 3, 90–93.

[CURIE et al.,1917] : CURIE, P., & CURIE, J. (1917). Sur un nouveau genre de phénomènes mécaniques : La piézoélectricité réversible. Journal de Physique, 6(1), 70–76.

[CHERGUI et al., 2000] : CHERGUI, C. (2021). Incubateur de startups dans le domaine des Matériaux intelligents à Boumerdes (Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[CHENA et al., 2019] : CHENA, J., QIUA, Q., HANB, Y., & LAUA, D. (2019). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 14–15.

[CHENA et al., 2018] : CHENA, J., QIUA, Q., HANB, Y., & LAUA, D. (2018). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 20–23.

[DHANASEKARAN et al., 2018]: DHANASEKARAN, R., REDDY, S. S., & KUMAR, A. S. (2018). Application of self-healing polymers to overcome impact, fatigue and erosion damages. *Materials Today: Proceedings*, 5, 21373–21377. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.542> .

[DELMAS et al., 2022] : DELMAS, L. (2022). Étude des matériaux à changement de phase (MCP) dans la réhabilitation de bâtiments : Analyse de l'impact sur le confort estival et sur les consommations énergétiques des solutions intégrant les MCP (Travail de fin d'études). 19 Rue de la Villette, 69003 Lyon.

[ELATTAR et al., 2013] : ELATTAR, S. M. S. (2013). Smart structures and material technologies. Scientific Research and Essays, 8(18), 1512–1523.

[FENG et al., 2016]: FENG, R. F., WEI, T., & ZHONG, L. W. (2016). Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics. Advanced Materials, 28(22), 4283–4305. <https://doi.org/10.1002/adma.201504299> .

[GASCA et al.,2019]: GASCA-Tirado, J. R., MANZANO-RAMIREZ, A., VELAZQUEZ-CASTILLO, R. R., GOMEZ-LUNA, B. E., NAVA-MENDOZA, R. F., LOPEZ-ROMERO, J. M., APATIGA-CASTRO, L. M., & RIVERA-MUNOZ, E. M. (2019). Porous geopolymer as a possible template for a phase change material. Materials Chemistry and Physics, 236, 121785. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121785> .

[GILABERT et al., 2017]: GILABERT, F. A., VAN TITTELBOOM, K., TSANGOURY, E., VAN HEMEIRIJCK, D., De BELIE, N., & VAN PAEPEGEM, W. (2017). Determination of strength and debonding energy of a glass–concrete interface for encapsulation-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 79, 76–93. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.011> .

[GWON et al., 2020]: GWON, S., AHN, E., & SHIN, M. (2020). Water permeability and rapid self-healing of sustainable sulfur composites using superabsorbent polymer and binary cement. Construction and Building Materials, 265, 120306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120306>

[GHOSH et al., 2011]: GHOSH, B., CHELLAPAN, K. V., & Urban, M. W. (2011). Journal of Materials Chemistry, 21(37), 14473. <https://doi.org/10.1039/C1JM13702A> .

[GAUCHER et al.,2008]: GAUCHER, B., AGIUS, R., BOURQUIN, S., BASROUR, P. C., RICHARD, A., & BOSSEBOEAFO, L. T. (2008). Apport des nouveaux matériaux [Doctoral dissertation, Université de Paris-Sud]. Université de Paris-Sud.

[GOPI et al., 2015]: GOPI KRISHNA, J., & THIRUMAL, J. R. (2015). Smart materials and their applications. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(5), 1234–1239.

[GOPI et al., 2007]: COPI KRISHNA, J., & THIRUMAL, J. R. (2007). Application of smart materials in smart structures. *International Journal of Innovative Research in Science*, 6(7), 5022–5025.

[HAN et al., 2007] : HAN, B., & OU, J. (2007). Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 138(1), 294–298. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.05.011>.

[HILL et al., 2014]: HILL, D., AGARWAL, A., & TONG, N. (2014). Assessment of piezoelectric materials for roadway energy harvesting: Cost of energy and demonstration roadmap (Research report). California Energy Commission.

[JAFFE et al., 1940]: JAFFE, B., COOK, W. R., & JAFFE, H. (1971). *Piezoelectric ceramics*. Academic Press.

[JONKERS et al., 2010]: Jonkers, H. M., THIJSEN, A., MUYZER, G., COPUROGLU, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230–235. Explication de l'étude.

[JEFFERSON et al., 2018]: JEFFERSON, A., JOSEPH, C., LARK, R., ISAACS, B., DUNN, S., & WEAGER, B. (2018). A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymer tendons. *Cement and Concrete Research*, 103, 112–121. Explication de l'étude.

[JAMEKHORSHID et al., 2014]: JAMEKHORSHID, A., SADRAMELI, S. M., & FARID, M. (2014). A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 531–542. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.033>.

[JING et al., 2018]: JING, L., DUAN, Q., ZHANG, E., & WANG, J. (2018). Applications of shape memory polymers in kinetic buildings. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, Article 5.

[KONSTANTINIDIS et al., 2006]: KONSTANTINIDIS, G., DRINKWATER, B. W., & WILCOX, P. D. (2006). The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems. *Smart Materials and Structures*, 15(4), 967–976. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/4/010> .

[KUO et al., 2013]: KUO, W.-T., CHEN, S.-H., WANG, H.-Y., & LIN, J.-C. (2013). A study on the mechanical and electrical properties of cement mortar added with GGBFS and piezoelectric powder. *Construction and Building Materials*, 49, 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.036> .

[KANELLOPOULOS et al., 2017]: KANELLOPOULOS, A., GIANNAROS, P., PALMER, D., KERR, A., & AL- TABBAA, A. (2017). Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: Synthesis, characterisation and proof of concept. *Smart Materials and Structures*, 26(4), 045025. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa516c> .

[LV et al., 2016]: LV, L., SCHLANGEN, E., YANG, Z., & XING, F. (2016). Micromechanical properties of a new polymeric microcapsule for self-healing cementitious materials. *Materials*, 9(12), 1025. <https://doi.org/10.3390/ma9121025> .

[LONE et al., 2021]: LONE, M. I., & JITLE, R. (2021). A review on phase change materials for different applications. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10980–10986. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.224> .

[LU et al., 2013]: LU, Y. Y., ZHANG, J. R., LI, Z. J., & DO, N. B. Q. (2013). Corrosion monitoring of reinforced concrete beam using embedded cement-based piezoelectric sensor. *Magazine of Concrete Research*, 65(19), 1265–1276. <https://doi.org/10.1680/macr.13.00071> .

[ŁACH et al., 2019]: ŁACH, M., PLawecka, K., BAK, A., AGNIESZK, M., BAZAN, P., KOZUB, B., KORNIEJENKO, K., & LIN, W.-T. (2021). Review of solutions for the use of phase change materials in geopolymers. *Materials*, 14(3), Article 3.

[LIM et al., 2019]: LIM, Y. Y., SMITH, S. T., PADILLA, R. V., & SOH, C. K. (2019). Monitoring of concrete curing using the electromechanical impedance technique: Review and path forward. *Structural Health Monitoring*, 20(2), 604–636. <https://doi.org/10.1177/1475921719893069> .

[LIM et al., 2018]: LIM, Y. Y., SMITH, S. T., & SOH, C. K. (2018). Wave propagation-based monitoring of concrete curing using piezoelectric materials: Review and path forward. *NDT & E International*, 99, 50–63. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2018.06.002> .

[MUELLER et al., 2017] : MUELLER, I., & FRITZEN, C. P. (2017). Inspection of piezoceramic transducers used for structural health monitoring. *Materials*, 10(1), 71. <https://doi.org/10.3390/ma10010071> .

[MADDALENA et al., 2022]: MADDALENA, R., SWEENEY, J., WINKLESS, J., TUINEA Bobe, C., BALZANO, B., THOMPSON, G., ARENA, N., & JEFFERSON, T. (2022). Applications and life Cycle assessment of shape memory polyethylene terephthalate in Concrete for crack closure. *Polymers*, 14(5), 933.

[MAGENDRAN et al., 2019]: MAGENDRAN, S. S., KHAN, F. S. A., MUBARAK, N. M., VAKA, M., WALVEKAR, R., KHALID, M., ABDULLAH, M. C., NIZAMUDDIN, S., & KARRI, R. R. (2019). Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano Structures & Nano Objects*, 20, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399> .

[MOURE et al., 2020]: MOURE, M. M., OTERO, F., GONZALEZ-Rellán, A. M., PAZ, E., & GARCIA-Loureiro, A. J. (2020). Feasible numerical modeling for the piezoelectric energy harvesting from traffic induced vibrations. *Applied Energy*, 279, 115799. Explication de l'étude

[OLESEN et al., 2014] : OLESEN, B. W., & BONNEFOY, X. (2014). Temperature and thermal comfort. In **D. Swinburne & R. Howarth (Eds.)**, *Environmental health in the 21st century* (pp. 155–181). De Gruyter. Explication de l'étude.

[Oğ et al., 2023] : Oğ, A. C. (2023). Piezoelectric materials in civil engineering applications: A review. *ACS Omega*, 8(26), 19172–19187.

[PAGET et al., 2002] : PAGET, C. A., LEVIN, K., & DELEBARRE, C. (2002). Actuation performance of embedded piezoceramic transducer in mechanically loaded composites. *Smart Materials and Structures*, 11(6), 886. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/6/309>.

[PERNIGONI et al., 2020]: PERNIGONI, L., & GRANDE, A. M. (2020). Development of a supramolecular polymer based self-healing multilayer system for inflatable structures. *Acta Astronautica*, 177, 697–706.

[PALIN et al., 2016]: PALIN, D., WIKTOR, V., & JONKERS, H. (2016). A bacteria-based bead for possible self-healing marine concrete applications. *Smart Materials and Structures*, 25(8), 084008.

[QIN et al., 2010]: QIN, L., LU, Y., & LI, Z. (2010). Embedded cement-based piezoelectric sensors for acoustic emission detection in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(11), 1323–1327.

[REHOU et al.; 2013]: REHOU. (2013). Activation thermique de la dalle béton [Brochure technique ou guide de conception].

[ROVIDAKIS et al., 2019]: ROVIDAKIS, C., LIARAKOS, E., & KAMPIANAKIS, E. (2019). Nondestructive wireless monitoring of early-age concrete strength gain using an innovative electromechanical impedance sensing system. *Smart Materials and Structures*, 28(1), 015048. Explication de l'étude.

[SONG et al., 2017]: SONG, S., HOU, Y., GUO, M., WANG, L., TONG, X., & WU, J. (2017). An investigation on the aggregate shape embedded piezoelectric sensor for civil infrastructure health monitoring. *Construction and Building Materials*, 131, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.050>

[SODANO et al., 2004]: SODANO, H. A., INMAN, D. J., & PARK, G. (2004). A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials (2003–2006). *Shock and Vibration Digest*, 36(3), 197–205. <https://doi.org/10.1177/0583102404043275>

[SHIRZAD et al., 2019]: SHIRZAD, S., HASSAN, M. M., AGUIRRE, M. A., MOHAMMAD, L. N., COOPER, S. Jr., & NEGULESCU, I. I. (2019). Rheological properties of asphalt binder modified with recycled asphalt materials and light-activated self-healing polymers. *Construction and Building Materials*, 220, 187–195.

[SUN et al., 2018]: SUN, D., SUN, G., ZHU, X., GUARIN, A., LI, B., DAI, Z., & LING, J. (2018). *Advances in Colloid and Interface Science*, 256, 65.

[TABAKOVI et al., 2017]: TABAKOVI, A., SCHUYFFEL, L., KARAC, A., & SCHLANGEN, E. (2017). *Applied Sciences*, 7(6), 647.

[TEALL et al., 2016]: TEALL, O. R. (2016). Crack closure and enhanced autogenous Healing of structural concrete Using shape memory polymers. School of Engineering, Cardiff University, United Kingdom.

[VICTOR et al., 2012]: VICTOR C. Li, EMILY Herbert. «Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure.» *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2012: 212.

[VAN et al., 2015]: VAN TITTELBOOM, K., TSANGOURI, E., VAN HEMELRIJCK, D., & De BELIE, N. (2015). The efficiency of self-healing concrete using alternative manufacturing procedures and more realistic crack patterns. *Cement and Concrete Composites*, 57, 142–152.

[WANG et al.,2021]: WANG, H., DAI, J., & WANG, X. (2021). Improved temperature compensation of fiber Bragg grating-based sensors applied to structures under different loading conditions. *Optical Fiber Technology*, 63, Article 102506.

[WANG et al.,2019]: WANG, H., & DAI, J. (2019). Strain transfer analysis of fiber Bragg grating sensor assembled composite structures subjected to thermal loading. *Composites Part B: Engineering*, 162, 303–313.

[WU et al., 2022]: WU, C., XIANG, H., JIANG, S., & MA, S. (2022). Stress monitoring of concrete via uniaxial piezoelectric sensor. *Sensors*, 22(11), 4041. <https://doi.org/10.3390/s22114041> .

[WANG et al., 2009]: WANG, D. S., LI, Q. C., ZHU, H. P., & JING, K. (2009). Experimental study on waterproof technology of piezoelectric impedance transducers in concrete. In 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA) and China Symposium on Frequency Control Technology (pp. 157–160). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPAWDA.2009.5428965>

[WASSEM et al., 2022]: WASSEM., Y. (2022). High-strength concrete curing (strength gain) monitoring using piezoelectric-based wave propagation and electromechanical impedance techniques (Master's thesis). Southern Cross University.

[XUE et al., 2016]: XUE, D. Z., BALACHANDRAN, P. V., YUAN, R. H., HU, T., QIAN, X., Dougherty, E. R., & LOOKMAN, T. (2016). Accelerated search for BaTiO₃-based piezoelectrics with vertical morphotropic phase boundary using Bayesian learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(47), 13301–13306. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607412113> .

[XUE et al., 2019] : XUE, C., LI, W., Li, J., TAM, V. W. Y., & YE, G. (2019). A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. *Structural Concrete*, 20(1), 198–212. <https://doi.org/10.1002/suco.201800177> .

[ZHANG et al., 2017] : ZHANG, J., Liu, Y., FENG, T., ZHOU, M., ZHAO, L., ZHOU, A., & LI, Z. (2017). Construction and Building Materials, 148, 610.

[ZHOU et al., 2015]: ZHOU, Z., ZANG, Z., ZUO, J., HUANG, K., & ZHANG, L. (2015). Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 692–703. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.048> .

[ZHANG et al., 2015] : ZHANG, Z., XIANG, H., & SHI, Z. (2015). Modeling on piezoelectric energy harvesting from pavements under traffic loads. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 27(5), 567–578. <https://doi.org/10.1177/1045389X15575081> .

Netographie

[Net1] : <http://tdvib.com/terfenol-d/> consulté le 02/02/2025.

[Net2] : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nitinol_draht.jpg?uselang=fr consulté le 02/02/2025.

[Net3] : <https://www.kreo.net/news-2d-takeoff/are-smart-materials-feasible-for-widespread-usage> Consulté le 01/02/2025.

[Net4] : <https://www.techsciresearch.com/blog/benefits-and-applications-of-self-healing-materials/4511.html> consulté 03/03/2025.

[Net5] : <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-mecanique/materiaux-auto-cicatrisants/> consulté 04/03/2025.

[Net6] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_auto-cicatrisant consulté 04/03/2025.

[Net7] : <https://sourcezon.com/articles/the-rise-of-self-healing-polymers> consulté 05/03/2025.

[Net8] : <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8067859/figure/polymers-13-01194-f001/> consulté 05/03/2025.

[Net9] : <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/architecture/building-materials/self-healing-materials/> consulté 06/03/2025.

[Net10] : <https://betterpros.com/betterinsights/smart-materials/> consulté 07/03/2025.

[Net11] : <https://polymerexpert.fr/r-d/comment-un-materiau-peut-il-se-reparer/> consulté 07/03/2025.

[Net12] : <https://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass> consulté 04/02/2025.

[Net13] : <https://plussat.eu/fr/blog/2024/03/07/mcp-micro-encapsule/> consulté 06/02/2025.

[Net14] : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/pour-une-climatisation-passive-des-batiments-les-materiaux-a-changement-de-phase-68> consulté 08/02/2025.

[Net15] : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/9490873?msocid=39b8f2bdab2b6375155de7d0aaa96210> consulté 09/02/2025.

[Net16] : <https://www.linseis.com/en/wiki/pcm-phase-change-material> consulté 13/02/2025.

[Net17] : <https://cloudely.com/smart-concrete-innovations-and-applications-in-the-digital-age/> consulté 01/03/2025.

[Net18] : <https://www.ca-frontaliers.com/transport/code-de-la-route-les-differences/> consulté 03/03/2025.

[Net19] : <https://fr.aroundus.com/p/8937526-storseisundet-bridge> consulté 03/03/2025.

[Net20] : <https://oizom.com/case-study/gandhinagar-smart-city-online-pollution-monitoring> consulté 03/03/2025.

[Net21] : <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-thermocrete-technology-using-construction> consulté le 14/02/2025.

[Net22] : <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/la-dalle-de-beton-thermoactive-une-innovation-pour-le-chauffage-des-batiments-47362> consulté 13/02/2025.

[Net23] : <https://durablevintage.com/case-studies-in-thermal-mass-applications?> Consulté le 02/03/2025.

[Net24] : <https://www.re-thinkingthefuture.com/sustainable-architecture/a4096-how-can-piezoelectric-materials-be-used-in-sustainable-architecture/> consulté le 17/03/2025.

[Net25] : <https://www.xdbsensor.com/news/piezoelectric-sensors-for-structural-integrity-monitoring-in-civil-engineering/> Consulté le 20/02/2025.

[Net26] : <https://www.linkedin.com/pulse/potential-piezoelectric-tiles-revolutionizing-urban-singh-tharran-ji4ic> Consulté le 16/03/2025.

[Net27] : <https://www.ncuk.ac.uk/our-universities/the-university-of-bristol/> consulté le 14/03/2025.

[Net28]: <https://www.kreo.net/news-2d-takeoff/are-smart-materials-feasible-for-widespread-usage> Consulté le 19/03/2025.

[Net29] : <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/la-dalle-de-beton-thermoactive-une-innovation-pour-le-chauffage-des-batiments-47362> consulté 13/02/2025.

[Net30] : <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-thermocrete-technology-using-construction> consulté 14/02/2025.

[Net31] : <https://blogging2k19.blogspot.com/2020/03/working-pros-cons-of-piezoelectricity.html> consulté 15/02/2025.

[Net32] : <https://www.yhpiezo.com/piezoelectric-material/> consulté le 12/03/2024.

[Net33] https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Piezoelectric_Crystal_Price.html consulté le 12/03/2024.

[Net34] : <https://homeguide.com/costs/radiant-floor-heating-cost> consulté le 13/03/2024.

[Net35] : <https://www.gminsights.com/industry-analysis/piezoelectric-ceramics-market> consulté le 13/03/2024.

[Net36] : <https://www.lenergiétoutcompris.fr/actualites-conseils/la-dalle-de-beton-thermoactive-une-innovation-pour-le-chauffage-des-batiments-47362> consulté 13/02/2025.

[Net37] : <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-thermocrete-technology-using-construction> consulté le 14/02/2025.

[Net38] : <https://businessabc.net/wiki/university-of-st-gallen> consulté le 13/03/2025.

[Net39] : <https://www.archdaily.com/1012359/bigs-kaktus-towers-near-completion-in-copenhagen> consulté le 14/03/2025

[Net40] : <https://www.linkedin.com/pulse/potential-piezoelectric-tiles-revolutionizing-urban-singh-tharran-ji4ic> consulté le 14/03/2025.

[Net41] : <https://www.engineeringnews.co.za/article/dutch-solar-road-proves-successful-moves-on-to-heavy-traffic-road-trial-2018-10-19> consulté le 15/03/2025.

[Net42] : <https://www.istockphoto.com/photos/shibuya-station> consulté le 15/03/2025.

[Net43] : <https://archinspires.com/2024/08/12/case-study-sustainable-features-of-the-edge-in-amsterdam/> consulté le 20/03/2025

[Net44] : <https://www.bbc.com/news/technology-35746647> consulté le 15/03/2025.

[Net45] : <https://basiliskconcrete.com/en/> consulté le 08/06/2025.

[Net46] : <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7079619/> consulté le 08/06/2025.

[Net47] : <https://basiliskconcrete.com/en/how-does-it-work/> consulté le 08/06/2025.

[Net48] : <https://bukhatirgroup.com/news/conmix-signs-agreement-with-basilisk-self-healing-concrete-as-their-exclusive-agents-for-uae> consulté le 09/06/2025.

