



Image : [ABQ](#)

www.groupeageco.ca

REVUE DES TECHNOLOGIES INNOVANTES POUR LE SECTEUR DU BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

NOVEMBRE 2022

Julien Beaulieu, ing., M.ing., PMP | Analyste principal

Rosalie-Maude St-Arnaud, B. Sc. | Directrice – Études économiques

Julie-Anne Chayer, ing. | Vice-présidente – Responsabilité d'entreprise



G R O U P E
AGÉCO

TABLE DES MATIÈRES

1. MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS	p.3
2. MÉTHODOLOGIE	p.8
3. REVUE DES TECHNOLOGIES	p.16
4. ÉVALUATION COMPARATIVE ET CONSTATS	p.50
5. RECOMMANDATIONS	p.56



1

MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS

MISE EN CONTEXTE

L'ABQ regroupe près de 50 producteurs de béton qui, à travers leurs quelque 160 usines réparties dans toutes les régions du Québec, produisent environ 90 % de tout le béton prêt à l'emploi qui y est utilisé.

La mission de l'ABQ consiste notamment à mobiliser ses membres et partenaires envers l'amélioration continue des connaissances et des pratiques.

Dans cet esprit, l'ABQ a sollicité l'expertise du Groupe AGÉCO afin de réaliser une **veille technologique sur les technologies de pointe disponibles et à venir au sein de l'industrie du béton.**





Actifs depuis maintenant
20 ans dans les domaines du
développement durable et de la
**responsabilité sociale des
entreprises¹**, de l'économie
agroalimentaire et des **ressources
naturelles**

Une équipe multidisciplinaire qui
allie expertise, expérience, rigueur
dynamisme et innovation.

35+ experts
professionnels

Ingénieurs | Économistes | Gestionnaires | Agronomes

1000+ mandats
réalisés

au Québec, dans le reste du Canada et à l'étranger

¹ L'acquisition en mars 2015 des activités de Quantis Canada, une entreprise notamment spécialisée en analyse du cycle de vie (ACV) nous permet d'offrir un service complet en responsabilité d'entreprise. Quantis Canada a essaimé (spin-off) en 2009 du CIRAIQ de l'École Polytechnique de Montréal, un centre de recherche spécialisé en ACV.

ÉQUIPE DE PROJET



Julien Beaulieu, ing., M.Ing., PMP
Analyste principal

Rosalie-Maude St-Arnaud, B. Sc.
Conseillère – études de marché

Julie-Anne Chayer, ing.
Contrôle technique et qualité



Luc Bédard, ing., M.Ing., M.B.A.
Directeur général

Yves Dénommé, ing., M.Sc.A.
Directeur technique

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE



Recenser des technologies innovantes ou à venir dans le secteur du béton prêt à l'emploi

Réaliser une évaluation critique de ces technologies en considérant leur bénéfice et leur faisabilité

Fournir des recommandations quant à l'application de ces technologies pour les producteurs québécois



MÉTHODOLOGIE



MÉTHODOLOGIE RÉALISÉE

1. Recherche documentaire

- Recherche par mots-clés de la littérature scientifique (ex.: articles scientifiques et chapitres de livres revus par des pairs) ainsi que de la littérature grise (ex.: livres blancs, site web de fournisseurs de technologies, blogues techniques, etc.)

2. Entretiens et sélection

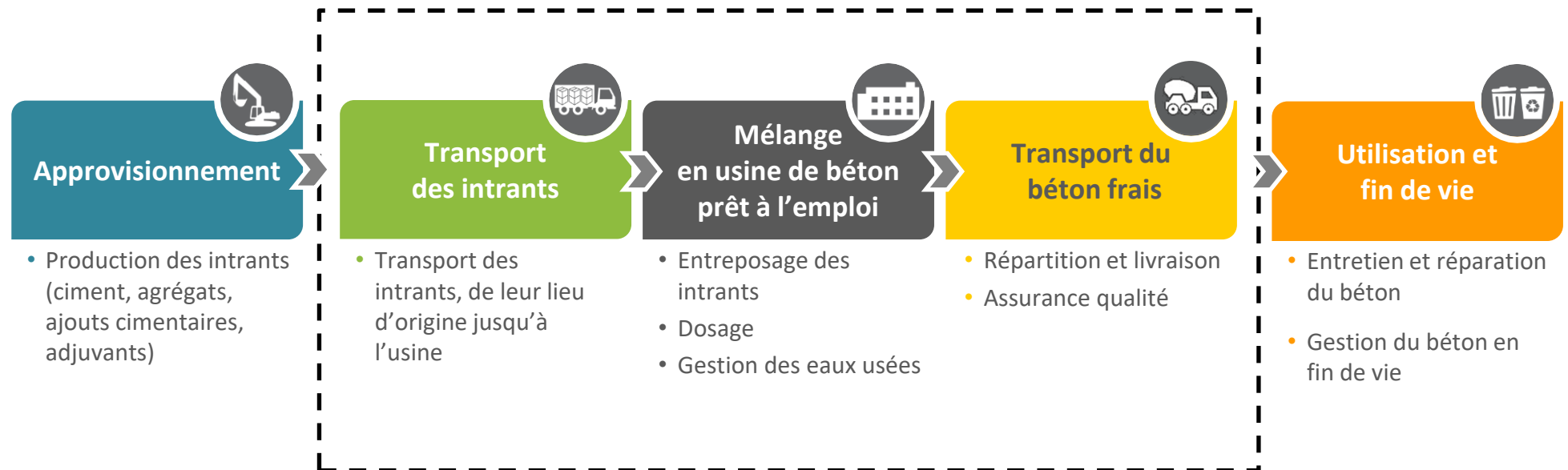
- 4 entretiens avec des chercheurs universitaires issus du CRIB et de l'ÉTS
- 1 entretien avec un fournisseur de technologies
- Consultation de l'ABQ et sélection de 9 technologies selon leur pertinence pour le secteur et leur degré de maturité
- Cadrage des technologies selon 3 thématiques

3. Évaluation technologique

- Sélection de 8 critères d'évaluation tirés du Emerging Technology Analysis Canvas ([WSO2, 2019](#))
- Évaluation des 9 technologies à l'étude, incluant:
 - une évaluation rapide de l'impact sur les frais d'exploitation
 - une appréciation qualitative des réductions de gaz à effet de serre (GES)
- Validation de la faisabilité technique en consultant 2 fournisseurs de béton prêt à l'emploi

SÉLECTION DES TECHNOLOGIES

L'étude s'est concentrée sur les technologies permettant d'améliorer la productivité et de diminuer l'impact environnemental direct (plus particulièrement la réduction des GES) des producteurs de béton prêt à l'emploi. Ces technologies ont été retenues parce que les producteurs de béton ont une influence directe sur leur adoption. Bien que pertinentes, les technologies visant la production des intrants ou la fin de vie du béton ont été exclues.



TECHNOLOGIES RÉPERTORIÉES

L'inventaire a porté sur **3 thématiques**, soit les technologies embarquées, les applications de l'intelligence artificielle et des procédés permettant de réduire l'impact environnemental des entreprises. Les **9 technologies** disponibles ou en développement ont été sélectionnées conjointement avec l'ABQ.

TECHNOLOGIES EMBARQUÉES



Sondes
pour camion-toupie

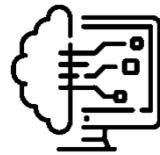


Capteurs intégrés au
béton



Télématique

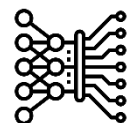
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



Usine autonome



Optimisation des
routes de transport



Algorithmes de
prédiction

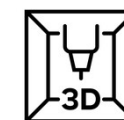
ENVIRONNEMENT



Camion-toupie
à faibles émissions



Épandage aux champs
des sédiments



Impression 3D

CRITÈRES D'ÉVALUATION

Une évaluation en **8 critères**, inspirée du Emerging Technology Analysis Canvas ([WSO2, 2019](#)), a été réalisée pour chaque technologie retenue :



DESCRIPTION ET BESOIN

- Comment fonctionne la technologie proposée?
- À quels besoins répond-elle?



MATURITÉ ET ADOPTION

- En 2022, à quel stade est rendu son développement : recherche fondamentale, prototypage, démonstration, adoption précoce ou adoption massive?



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Quels sont les gains environnementaux, en particulier sur la question des changements climatiques?



FAISABILITÉ TECHNIQUE

- Quels sont les freins au niveau technique?



LEVIERS

- Quels facteurs externes (politiques, économiques techniques, etc.) encouragent son développement et expliquent son déploiement?



EXEMPLES

- Quels sont les principaux joueurs, dans un contexte nord-américain?
- Existe-t-il des exemples à l'international?



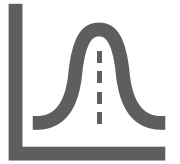
IMPACT ÉCONOMIQUE

- Quel impact a la technologie sur les coûts de production?
- Quels sont d'autres bénéfices économiques pour le secteur du prêt à l'emploi ou leur clientèle?

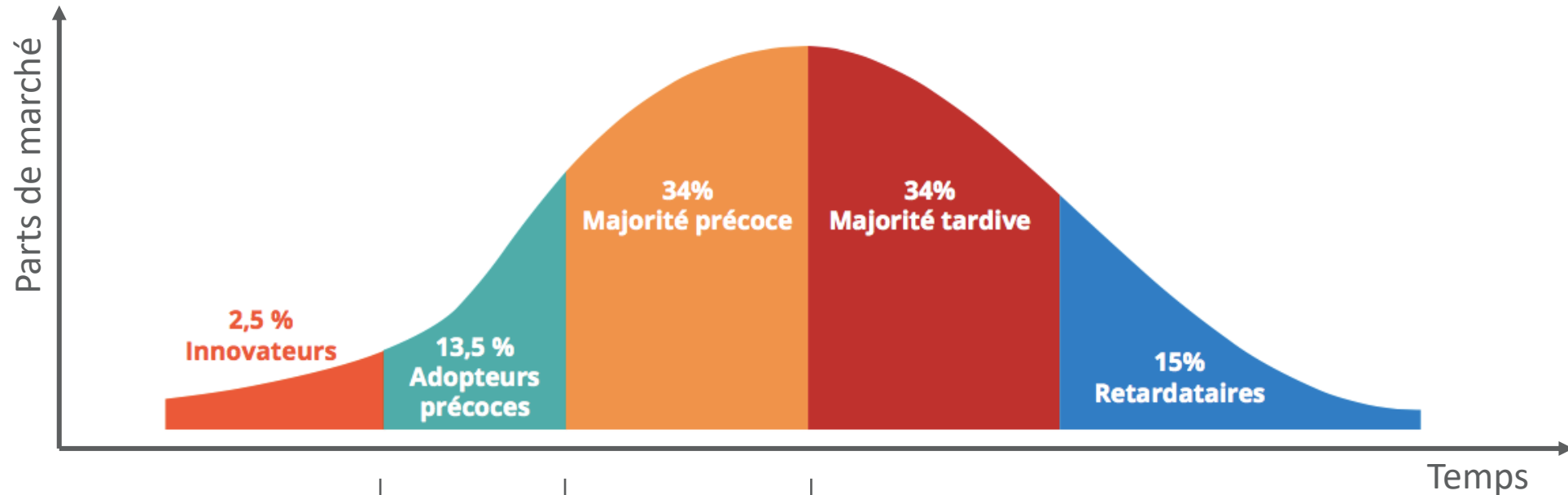


FAISABILITÉ DE MARCHÉ

- Quelles sont les barrières au niveau administratif, commercial ou légal?



La **théorie de la diffusion de l'innovation** étudie l'adoption d'une technologie par une population ([Rogers, 1995](#)). Tout simplement, la proportion des entreprises ayant adopté une technologie est un indicateur à savoir si une technologie est en émergence ou fait maintenant partie des processus habituels.



Échelle utilisée dans
le présent rapport :

● faible

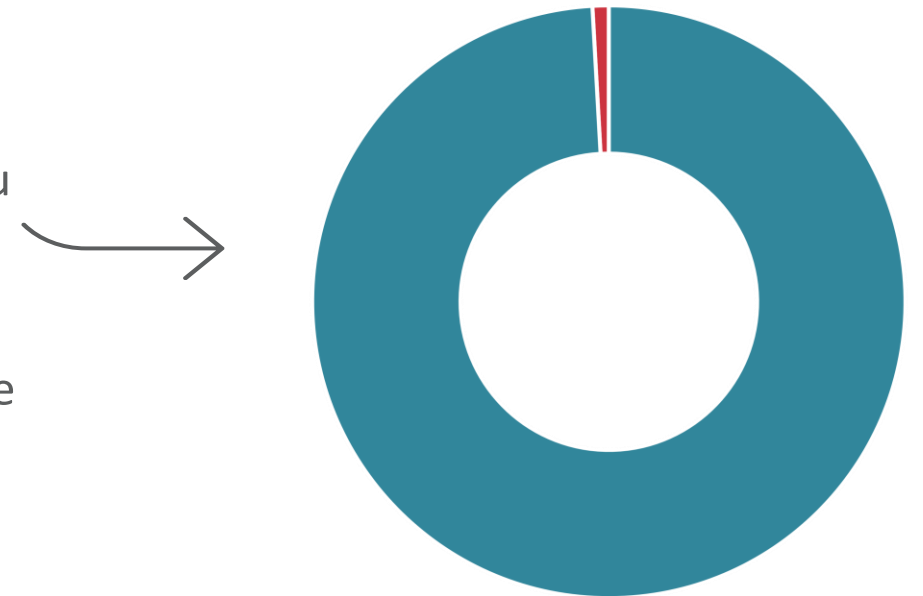
● moyen

● élevé



- La production canadienne d'un mètre cube de béton 26-30 MPa génère en moyenne 350 kg CO₂ éq. Cette quantité varie notamment selon la proportion d'ajouts cimentaires ([CRMCA, 2017](#)). La production du ciment est le principal contributeur du béton sur les changements climatiques.
- Les technologies innovantes permettent de réduire l'empreinte carbone en minimisant les pertes ou en réduisant les impacts du transport.
- L'effet de chaque technologie sur l'**empreinte carbone** du béton a été sommairement évalué:

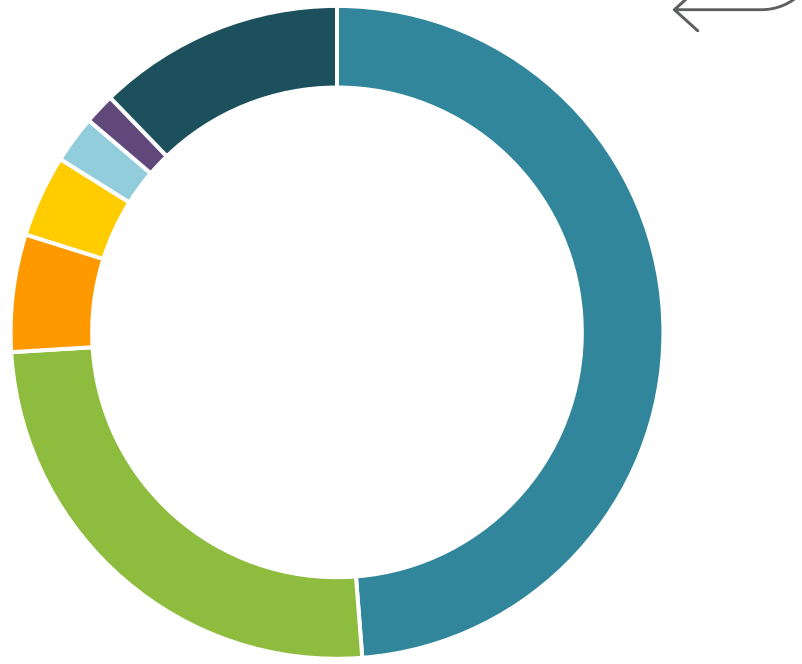
Échelle utilisée dans le présent rapport :	● faible	● moyen	● élevé
Réduction de l'empreinte carbone (estimation):	0 – 1%	1 - 5%	> 5%



- A1- A3 - Production
- A4-A5 - Transport et construction

Contribution des étapes du cycle de vie sur les changements climatiques (kg CO₂ eq.)

Source: [BRMCA, 2018](#)



- Matériaux
- Salaires
- Amortissements
- Réparation
- Services publics
- Assurances
- Autre

Coûts de production, fabrication de béton préparé, adapté de ([Gouvernement du Canada, 2020](#))

- ← • L'industrie canadienne du béton préparé a dépensé en 2020 1,59 M\$ pour des recettes totales de 1,66 M\$. Les principaux centres de coût sont l'achat de matériaux (ex.: ciment) ainsi que les coûts de main-d'œuvre
- Les technologies évaluées permettent notamment de réduire les coûts de main-d'œuvre et l'achat de matériaux dû aux pertes.
- L'impact économique des technologies a été évalué sur la base de leur impact sur le **coût de production** du béton:

Échelle utilisée dans le présent rapport :	● faible	● moyen	● élevé
Réduction des frais d'exploitation (estimation):	0 – 1%	1 - 2%	> 2%



REVUE DES TECHNOLOGIES





1

SONDES POUR CAMION-TOUPIE



CONTEXTE



- Au Québec, la plupart du béton prêt à l'emploi est mélangé en usine puis transporté par camion-toupe aux chantiers de construction. Près de 2 heures peuvent s'écouler la livraison, pendant laquelle l'ouvrabilité du béton peut se dégrader:
 - Le temps de délai, la vitesse de rotation, le nombre de révolutions de la bétonnière ont un effet sur l'affaissement, la température et la teneur en air du béton ([WSDOT, 2014](#))
- De l'eau est parfois ajoutée dans la bétonnière afin d'atteindre l'affaissement prescrit, selon des conditions précises ([APCHQ, 2016](#)). En trop grande quantité, l'eau aura toutefois un effet néfaste sur les propriétés structurantes du béton.
- Jusqu'à tout récemment, les producteurs de béton n'avaient aucune visibilité sur le béton lors de la livraison ou de l'arrivée au chantier.



Image : [concretenetwork](#)

DESCRIPTION



- Différentes sondes, installées à l'intérieur ou à l'extérieur de la bétonnière, permettent de mesurer:
 - Taux d'humidité et température
 - Résistance hydraulique
 - Vitesse et accélération de la toupie
 - Poids et niveau restant de béton
 - Pression sur un capteur et propagation du son
 - Débitmètre (ajout d'eau)
- Par analyse statistique, l'affaissement, l'homogénéité ([Siccardi et coll., 2019](#)) ou la teneur en air ([Tregger et coll., 2013](#)) peuvent être évalués. L'ajout d'eau non autorisé peut également être détecté.

Les sondes pour camion-toupie sont des technologies accessibles, puisque l'installation peut être faite rapidement sur des camions existants.



Image : [Command Alkon](#)



DESCRIPTION ET BESOIN

Mesure en temps réel de plusieurs paramètres lors du transport du béton frais :

- Taux d'humidité
- Vitesse/rotation de la toupie
- Température
- Niveau restant de béton
- Homogénéité
- Affaissement
- Ajouts d'eau

Affichage des données au conducteur et relais des informations.



LEVIERS

- ↓ Coût de production des sondes
- ↑ Pression de clients pour une meilleure traçabilité
- Impact de l'ajout d'eau sur la qualité



MATURITÉ ET ADOPTION

Moyenne :

- Sondes proposées par plusieurs fournisseurs
- En essai avec quelques entreprises québécoises
- Ne sont toutefois pas adoptées massivement



EXEMPLES

- [COMMANDassurance](#) (Command Alkon)
- [eSlump](#) (elettrondata)
- [Verifi](#) (GCP)



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Moyenne :

- ↓ pertes et résidus de constructions dus à des livraisons non conformes
- ↓ consommation du diésel vu une détection plus rapide de la fin du mélange
- Facilite la gestion de bétons performants étant moins stables en toupie



IMPACT ÉCONOMIQUE

Moyenne:

- ↓ coût de main-d'œuvre
- ↑ productivité des camions (réduction du temps d'ajustement de l'affaissement)

Autre impact:

- ↓ compétences attendues des techniciens, dans un contexte de pénurie de main-d'œuvre



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Élevée :

- D'un point de vue technique, les sondes sont relativement simples
- Les sondes peuvent s'installer sur des camions existants
- Il y a généralement peu de bris ou de corrosion
- Les températures froides en condition hivernale peuvent toutefois endommager les sondes



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Moyenne :

- L'obligation par les clients ou les règlements de réaliser des tests d'affaissement décourage l'adoption des sondes



2

CAPTEURS INTÉGRÉS AU BÉTON



CONTEXTE



- Avec l'avènement de l'internet des objets et des technologies sans fil de cinquième génération, plusieurs capteurs pouvant être intégrés au béton sont développés.
- Parmi les capteurs proposés, les capteurs de température permettent un **suivi de la maturité** du béton en temps réel.
- La méthode de la maturité (*maturity method*) a été inventée dans les années 40-50 puis popularisée par le Federal highway association ([Carino et coll., 2001](#)). Cette méthode permet de réduire les coûts d'assurance de la qualité du béton, évalué par des tests de résistance à la compression.



Image : [Concrete Construction](#)

CAPTEURS INTÉGRÉS AU BÉTON

MATURITÉ 101

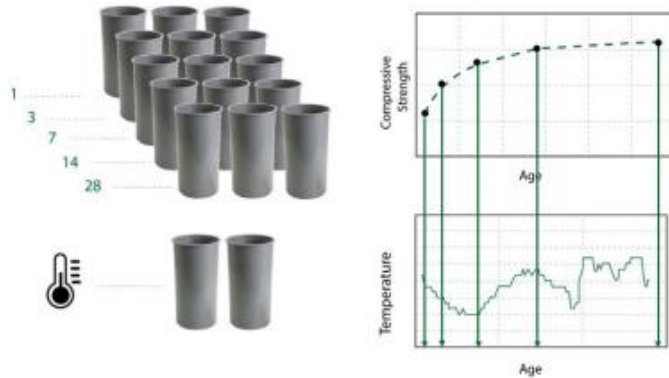


Figure 5-3: Correlating strength to maturity data

Develop Maturity Curves

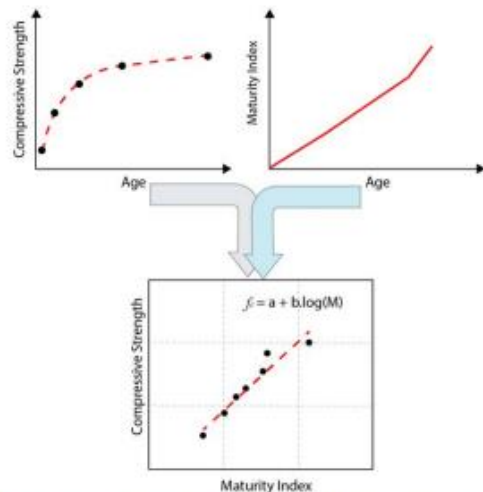


Figure 5-4: Combining strength and maturity to obtain a calibration

- La résistance en compression d'un béton suivant sa mise en place augmente en fonction de la température. En condition chaude, un béton peut atteindre sa résistance en compression finale bien avant les quelques jours normalement attendus.
- Pour **calibrer le système**, un minimum de 17 cylindres sont préparés, dont 2 incluant des sondes de température. Des tests en compression sont effectués à des intervalles déterminés (ex.: 1, 3, 7, 14 et 28 jours).
- Les données sont traitées de manière à suivre l'évolution de la résistance en compression (MPa) selon la maturité (degrés-jours).
- **Sur le chantier**, les capteurs intégrés permettent de suivre en continu la température du béton. Avec la courbe de calibration, il est possible de déterminer en temps réel la résistance en compression du béton.



Le suivi de la maturité est habituellement un service offert par le producteur de béton prêt à l'emploi, qui prend en charge l'étalonnage en laboratoire. Ceci crée **une valeur ajoutée pour le client**, qui peut retirer plus rapidement le coffrage et les supports temporaires ([Giatec Scientific, 2018](#)).

Comme cette technique demande une préparation préalable, elle est surtout pertinente pour les **grands chantiers** (économies d'échelle).

Le suivi de la température est aussi pertinent pour le **bétonnage en temps froid**, afin de vérifier quand les couvertures isolantes peuvent être retirées. Le suivi de la température est aussi critique pour le **béton de masse** (éléments aux dimensions larges), puisqu'un différentiel de température peut causer des fissures ([ACI, 2022](#)).



Image : [PERI Canada](#)



DESCRIPTION ET BESOIN

Suivi de la température et de la maturité du béton à l'aide de capteurs fixés aux armatures.

Ceci permet aux constructeurs d'accélérer les étapes de leur chantier ou encore de valider les propriétés structurantes du béton en condition hivernale.



MATURITÉ ET ADOPTION

Moyenne :

- Sondes proposées par plusieurs fournisseurs
- Service offert par quelques entreprises québécoises



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Faible :

- ↓ transport par le client (suivi à distance de la maturité)



IMPACT ÉCONOMIQUE

Moyenne :

- ↑ revenus par livraison (nouveau service offert)
- ↑ coûts de calibration

Autre impact:

- Avantage concurrentiel du producteur de béton

Bénéfices tirés par le constructeur:

- ↓ coût de non-qualité
- Différentiation de la compétition par un échancier de construction plus court qu'en utilisant les délais standards de prise



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Élevée :

- Technologie disponible et facile à installer
- Demande une étape de calibration, ce qui diminue sa pertinence pour des petits chantiers ou pour des éléments structuraux simples



LEVIERS

- Méthode normée et reconnue: [ASTM C1074-17 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method](#) et [CSA A23.1-14/A23.2-14 Béton : Constituants et exécution des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton](#)
- ↓ coût de production des capteurs



EXEMPLES

- [SmartRock](#) (Giatec)
- [HCS T1](#) (Hilti)
- [H-2682](#) (M&L testing équipements)
- [vOrb](#) (vOrb)



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Moyenne :

- Sans barrière réglementaire
- Demande une revue des processus de contrôle qualité du producteur
- Demande une éducation des clients sur la technologie

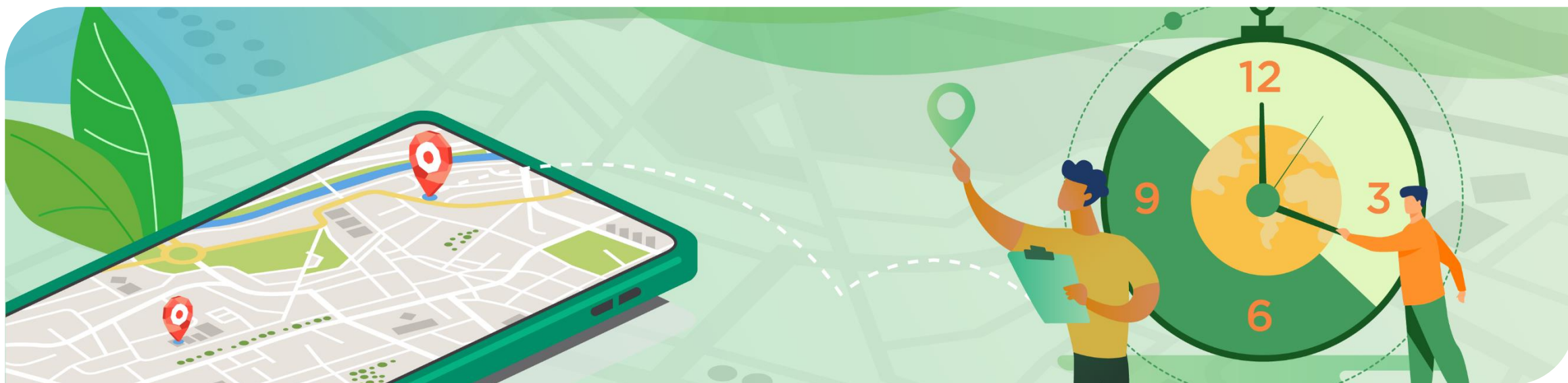


TÉLÉMATIQUE





- Les camions-toupiés sont des véhicules coûteux et les producteurs de béton veulent maximiser leur productivité. La télématique, soit l'utilisation de la technologie GPS pour localiser les mouvements des véhicules, permet un meilleur suivi de la flotte.
- Plusieurs fournisseurs proposent des solutions de télémétrie adaptées à l'industrie du béton; la télématique est en voie de devenir la norme chez les producteurs. Ces solutions pourront faciliter la consignation des heures de service, qui deviendra obligatoire pour les conducteurs de véhicules lourds en 2023.



ÉVALUATION TECHNOLOGIQUE

TÉLÉMATIQUE



DESCRIPTION ET BESOIN

Suivi GPS de la flotte:

- Géorepérage
- Gardiennage virtuel
- Données sur les départs, arrêts, distance parcourue, arrivée au chantier, etc.

Suivi du conducteur:

- Protection antiviol et confirmation de l'identité
- Consignation des habitudes de conduite
- Caméras portées vers l'avant et vers l'habitacle



LEVIERS

- 2023: dispositif de consignation électronique obligatoire au Canada pour les véhicules lourds



MATURITÉ ET ADOPTION

Élevée :

- Utilisation très répandue au Québec, sauf exception de petits producteurs avec flotte plus limitée
- Il existe des applications spécifiques pour l'industrie du béton



EXEMPLES

- TitanGPS (TitanGPS)
- RoadkingGPS (Roadking technologies)
- Geotab (Sysdyne)
- Coretex (Eroad)



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Faible :

- ↓ consommation d'essence



IMPACT ÉCONOMIQUE

Faible :

- *Peu d'impact sur les coûts de production*

Autres impacts:

- Intelligence d'affaires: aide à l'optimisation des routes
- Facturation plus détaillée des livraisons
- ↓ communications avec le chauffeur pour connaître leur emplacement
- Empêche le détournement de béton frais (pratique vue à l'international)
- Protège contre le vol des camions-toupies (risque faible)



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Élevée :

- *Peu d'enjeux techniques*
- Technologie GPS très répandue
- Puisque les camions-toupies ont peu de traction, les habitudes de conduite sont moins critiques que dans d'autres secteurs (ex.: transport de marchandises)



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Élevée :

- *Peu d'enjeux administratifs*
- Antécédents judiciaires par rapport à la protection de la vie privée des employés

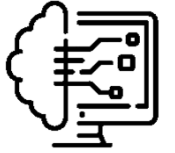


4

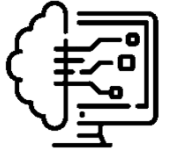
USINE AUTONOME



VERS UNE USINE SANS OPÉRATEURS?

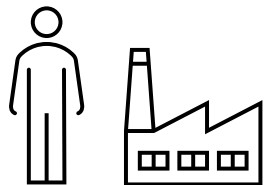


- Dans le secteur des transports, les véhicules autonomes, pouvant se déplacer sans intervention du conducteur, sont en plein déploiement. Les mêmes technologies peuvent également être utilisées pour automatiser les usines de béton.
- Une **usine autonome** est « un système technique délimité qui, de manière systématique et sans intervention extérieure, atteint les objectifs fixés malgré des conditions ambiantes incertaines. » ([De Gruyter, 2021](#)).
- Autrement dit, une usine autonome est capable de :
 - Gérer de manière indépendante les procédés et les inventaires,
 - Poser un diagnostic et trouver des solutions en cas de problème,
 - S'adapter à de nouvelles conditions.
- Dans le secteur manufacturier, 89% des entreprises prévoient augmenter le niveau d'autonomie de leurs installations, et 79% des entreprises testent présentement le contrôle à distance ([Yokogawa, 2020](#))



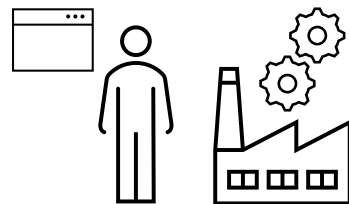
- L'autonomie est une trajectoire en plusieurs stades, passant de l'automatisation des procédés à une délégation plus complète des procédés. Présentement, les usines de prêt à l'emploi sont au stade 0 ou 1, alors que des pilotes sont proposés pour les stades 2 et 3 ([Marcotte, 2022](#)). L'autonomie est également développée dans le secteur du préfabriqué ([Reinchenbach, 2021](#)).

0. SANS AUTONOMIE



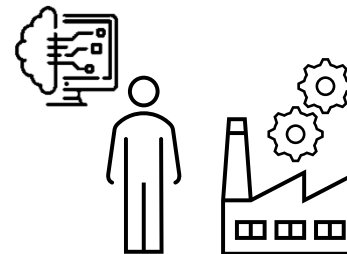
Panneaux de contrôle analogues, sans intelligence artificielle (IA), opérateurs en plein contrôle

1. AUTOMATISÉ



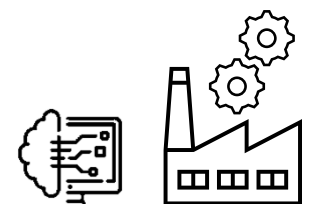
Logiciel de contrôle des procédés, capteurs connectés, automatisation de procédés dans des limites définies, opérateurs en plein contrôle

2. ASSISTÉ



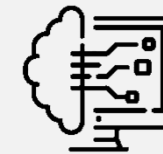
Opérateurs et IA en collaboration, IA en charge des tâches usuelles, opérateurs en intervention pour des tâches critiques, spécifiques ou spécialisées

3. AUTONOME



IA en plein contrôle de l'usine, de la maintenance et des opérations, opérateurs en supervision à distance

Adapté de ([Microsoft, 2020](#)) et ([Gamer et coll., 2019](#))



DESCRIPTION ET BESOIN

Usine automatisée:

- Automatisation des temps de chute
- Caméras
- Graissage automatique
- Suivi du niveau des matériaux
- Contrôle à distance
- Simulation de l'usine

Usine autonome :

- Contrôle, maintenance et planification de l'usine par intelligence artificielle (IA)
- Spécialisation des opérateurs



LEVIERS

- Automatisation avancée dans le secteur de l'énergie
- Numérisation des usines de ciment
- Pénurie de main-d'œuvre



MATURITÉ ET ADOPTION

Faible :

- Quelques usines au stade 0 (sans autonomie)
- La plupart des usines au stade 1 (automatisé)
- Quelques pilotes pour les stades 2 et 3 (usine autonome), déploiement possible d'ici 5-7 ans



EXEMPLES

Automatisation:

- COMMANDOptimize
- Pioneer
- eBATCH
- Marcotte Batch

Usine autonome:

- Marcotte



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Faible :

- ↓ pertes, dues à un meilleur contrôle des procédés
- ↓ consommation d'essence (déplacement des employés)



IMPACT ÉCONOMIQUE

Élevé :

- ↓ coût de main-d'œuvre: supervision à distance de plusieurs usines, implication ponctuelle d'opérateurs
- ↓ risques d'erreur, due à un meilleur contrôle des procédés

Autre impact:

- ↑ coûts de capitalisation et amortissements



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Faible :

- Besoin de données massives pour entraîner les modèles d'IA
- L'IA est encore en développement, les systèmes manquent d'adaptabilité à des situations inattendues
- Usines de béton: procédés unitaires relativement simples. Toutefois, la cadence de la production est affectée par beaucoup de variables (variabilité des intrants, état des chantiers, saisonnalité, etc.)



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Moyenne :

- Enjeux éthiques en cas d'accidents
- Demande des compétences en IA



5

AUTOMATISATION DES ROUTES DE TRANSPORT

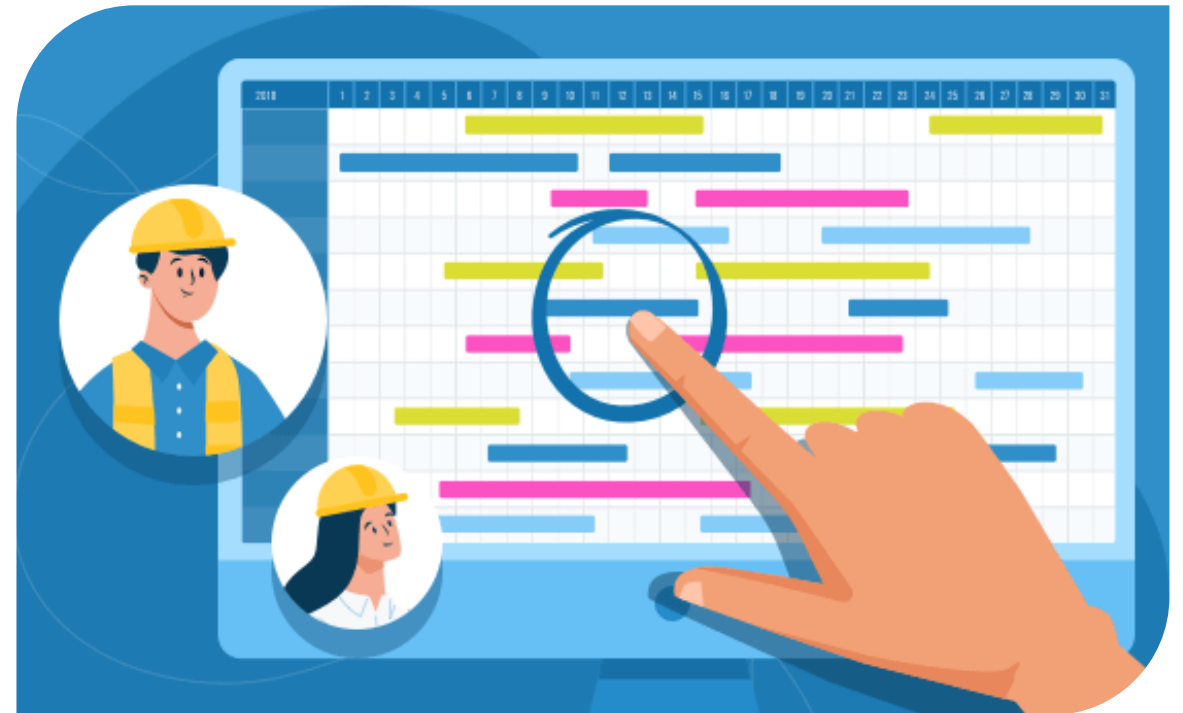


AUTOMATISATION DES ROUTES DE TRANSPORT



- La livraison est une étape déterminante pour la qualité du béton : le temps de livraison a un effet important sur l'affaissement et la teneur en air du béton ([WSDOT, 2014](#))
- Plusieurs applications de l'apprentissage automatisé et de l'intelligence artificielle permettent d'optimiser la gestion des routes de transport:
 - [Planification automatisée et adaptative des commandes](#)
 - Prédiction du trafic (ex.: [Google Maps API](#))
 - Prédiction de la [consommation d'essence](#)
 - Communications automatisées au conducteur
 - [Coordination de la logistique avec le client](#)

Une majorité de producteurs de béton utilisent déjà des logiciels pour gérer les livraisons. Certains fournisseurs de technologies intègrent progressivement des fonctionnalités d'optimisation.



Images: [Geo](#)



DESCRIPTION ET BESOIN

- Le béton frais doit être livré le plus rapidement au chantier
- Un béton placé en continu demande une livraison juste à temps

Optimisation des routes de transport:

- Planification automatisée et adoptive des commandes
- Prédiction du trafic et de la consommation d'essence
- Communications automatisées au conducteur
- Coordination de la logistique avec le client



LEVIERS

- CSA A23.1-09 : temps de livraison limité à 120 minutes ou selon le client



MATURITÉ ET ADOPTION

Moyenne :

- Logiciels de gestion des commandes largement adoptés par les entreprises
- Peu de fonctionnalité permettant d'optimiser les routes de transport



EXEMPLES

Logiciels :

- Readymix360
- Eagle eye 2.0
- ConcreteGO (Sysdyne)
- Insight dispatch (MPAQ)
- Geonext (Geo)

Optimisation :

- Marcotte Dispatch (Marcotte)
- INFORM (Sysdyne)
- AMCS
- CommandOptimize (Alkon)



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Moyen :

- ↓ pertes de béton (ex.: béton produit en double dû à des livraisons non conformes)
- ↓ consommation d'essence



IMPACT ÉCONOMIQUE

Moyen :

- ↓ pertes de béton (livraisons non conformes)
- ↓ coût des carburants
- ↑ productivité des camions-toupies



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Moyenne :

- La livraison du béton est étudiée depuis plusieurs années en recherche opérationnelle
- Les répartiteurs prennent en compte plusieurs variables (météo, historique du client, type de chantier), rendant l'optimisation par un algorithme plus difficile



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

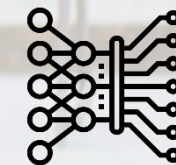
Élevée :

- *Peu d'enjeux organisationnels*
- Logiciels déjà utilisés
- Les fonctionnalités avancées peuvent nécessiter une collaboration des clients

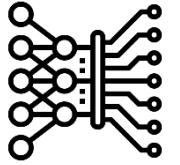


6

ALGORITHME DE PRÉDICTION DE LA PERFORMANCE DU BÉTON



ALGORITHME DE PRÉDICTION DE LA PERFORMANCE DU BÉTON



- Une des applications convoitées de l'intelligence artificielle à l'industrie béton est les algorithmes de prédiction de la performance.
- Ces algorithmes se basent sur les résultats d'essais obtenus par le passé et permettent de prédire les propriétés du béton à partir d'une recette. Des paramètres comme l'affaissement ([Zhang et coll., 2022](#)) ou la résistance en compression ([Young et coll., 2019](#)) peuvent être estimés.
- L'utilisation de l'intelligence artificielle est surtout pratique pour développer de nouvelles formulations, que ce soit pour l'intégration d'ajouts cimentaires ([Song et coll., 2021](#)) ou l'impression 3D ([Charrier et Quellet-Plamondon, 2022](#))
- Quelques logiciels permettent d'optimiser la performance environnementale ou les coûts du béton en fonction des contraintes du client (ex.: SmartMix et Concrete.ai).

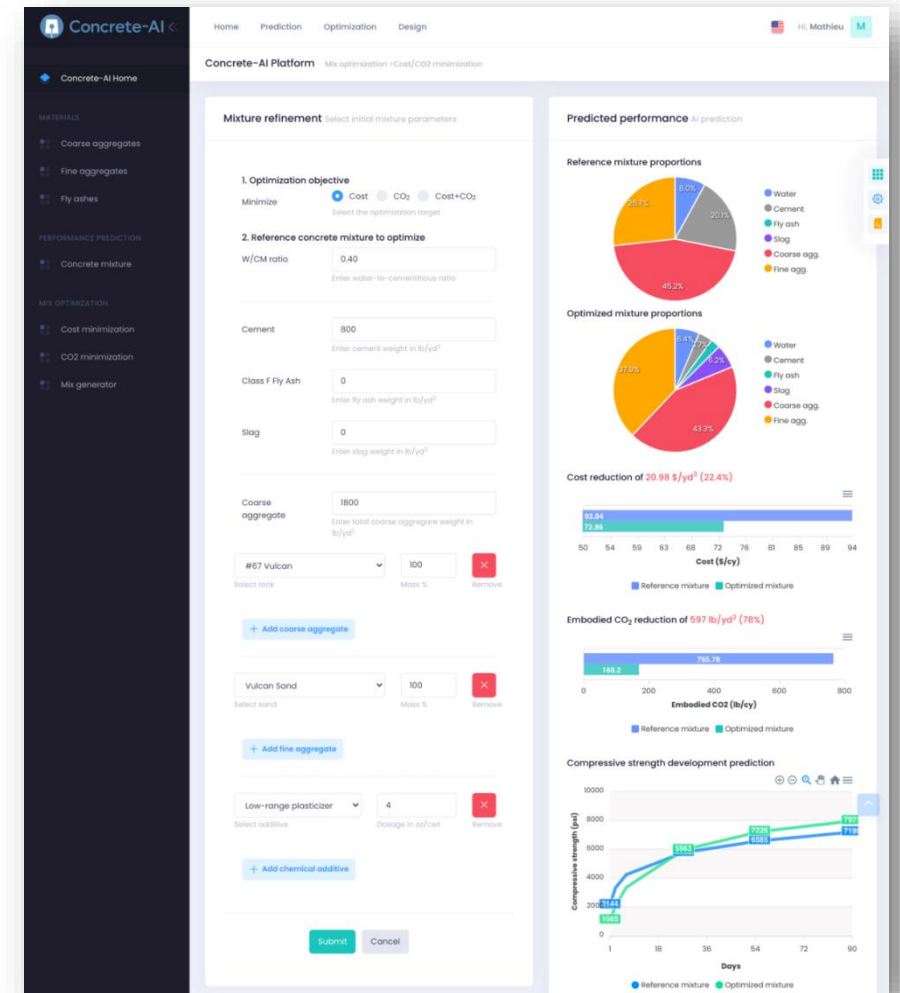
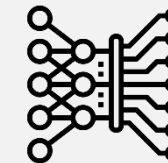


Image : concrete.ai



DESCRIPTION ET BESOIN

Recette automatisée:

- Utilisation de l'apprentissage automatisé pour prédire les propriétés à l'état frais ou structurantes du béton
- Utilisation de l'intelligence artificielle pour trouver une formulation idéale pour l'impression 3D

Avancé:

- -Utilisation de l'ensemble des informations collectées (capteurs, télémétrie, usine automne) pour prédire les capacités structurantes du béton



LEVIERS

- Démocratisation de l'apprentissage automatisé et de l'intelligence artificielle



MATURITÉ ET ADOPTION

Faible :

- Quelques brevets déposés ou en cours de l'être par des producteurs d'adjuvant
- Quelques exemples récents proposés par Giatec (2021) et Concrete.ai (2022)



EXEMPLES

- Performance prediction (Concrete.ai)
- SmartMix (Giatec scientific)

Recherche:

- Deep learning: teneur en eau
- Prédiction des propriétés à l'état frais



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Faible :

- Facilite l'introduction d'ajouts cimentaires pour un béton plus faible en carbone



IMPACT ÉCONOMIQUE

Élevé :

- ↓ des coûts d'assurance qualité (tests de résistance en compression)
- ↓ des coûts de recherche et développement, en réduisant le nombre d'essais à effectuer

Autres impacts:

- Différentiation par des recettes personnalisées
- Permet d'opérer dans des conditions atypiques (ex.: délai de livraison de 6 heures)



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Moyen :

- Algorithmes d'apprentissage automatisé déjà développé
- L'intelligence artificielle a besoin de données détaillées (appelées jeux d'entraînement, de validation et de test) pour calibrer le modèle de prédiction. Ces informations doivent être captées et valorisées.
- Dans plusieurs cas, la variabilité faible des paramètres (ex.: intrants stables, fournisseurs constants) ne justifie pas l'implantation d'un système complexe.



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Faible :

- Par expérience, les opérateurs d'usine adaptent leurs recettes aux conditions changeantes



Up to 22kW


>60 min

7

CAMION-TOUPEIE À FAIBLES ÉMISSIONS

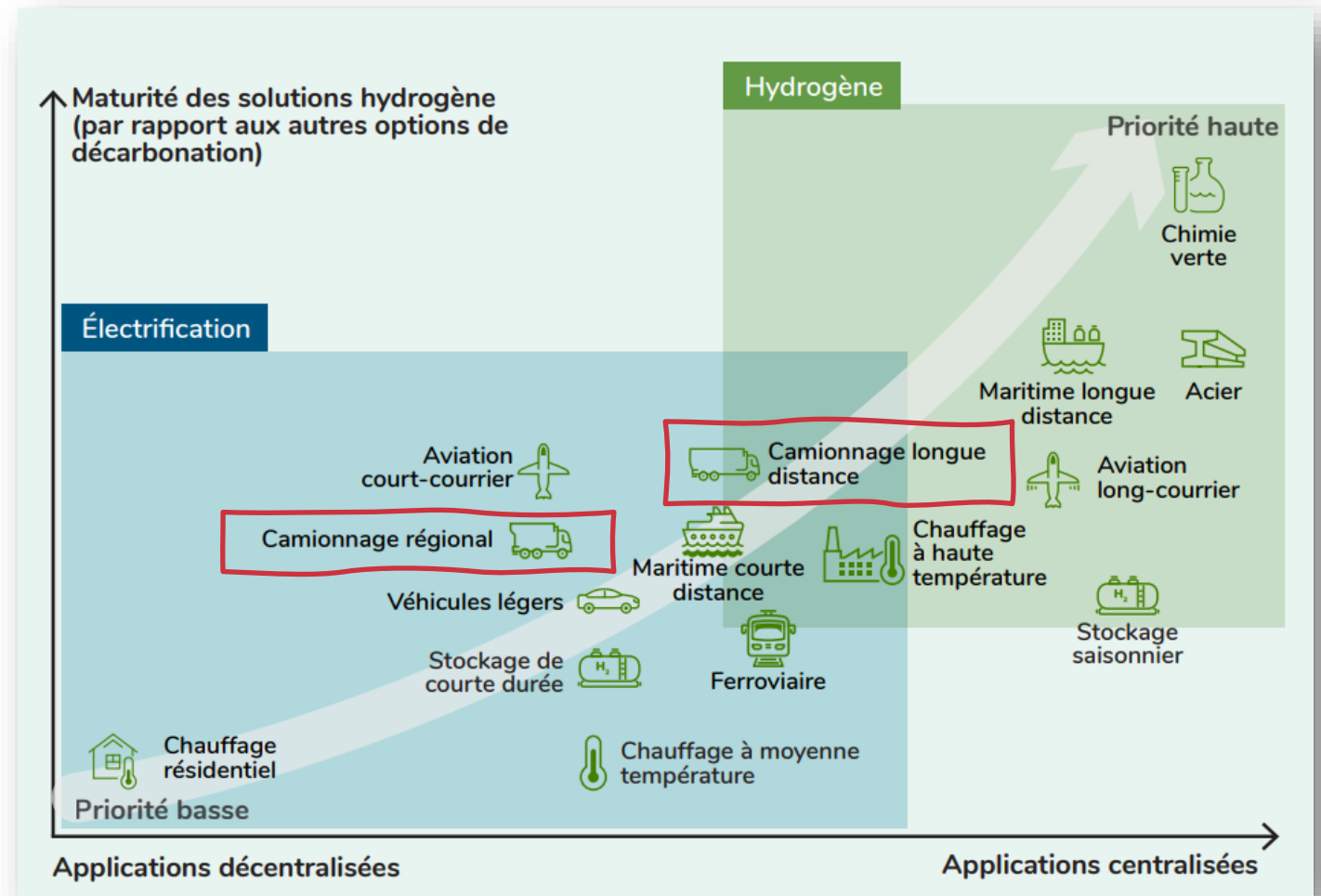


CAMION-TOUPIE À FAIBLES ÉMISSIONS



- L'électrification et l'utilisation de biocarburants sont deux solutions étant encouragées pour le secteur du transport ([Gouvernement du Québec, 2022](#)).
- Quelques modèles de camion-toupie fonctionnant à l'électricité, au gaz naturel renouvelable ou à l'hydrogène vert, sont présentement à l'essai à l'international.

L'utilisation de carburant ne représente qu'une faible fraction de l'impact carbone et du coût de production du béton prêt à l'emploi, limitant la portée de cette innovation.



Applicabilité de l'électrification et de l'hydrogène vert ([Gouvernement du Québec, 2022](#))



DESCRIPTION ET BESOIN

Camion-toupipe fonctionnant en mode hybride ou en totalité par des énergies propres:

- Gaz naturel renouvelable
- Hydroélectricité
- Hydrogène vert

Les batteries peuvent être rechargées ou remplacées pendant le chargement.



MATURITÉ ET ADOPTION

Faible

- Électrique : quelques modèles proposés depuis 2020 et testés par Holcim (2021), Unicon (2022) et Tarmac (2022)
- GN : Quelques modèles depuis 2017
- hydrogène : Premier camion proposé par SANY en 2021



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Faible :

- ↓ consommation d'essence (mais faible impact du transport sur l'empreinte carbone du béton)
- ↓ du bruit
- Camions visibles: mets de l'avant les efforts de l'entreprise en environnement



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Moyenne :

- Diminution de la capacité des batteries en hiver
- Temps de chargement long: 7-15h
- Chargement des batteries possible puisque les véhicules terminent toujours au même point
- Gaz naturel/hydrogène: réseau non développé
- Poids à l'essieu limité au Québec, réduisant la capacité du camion (ex.: 7 m3)



LEVIERS

- Électrification des transports encouragée au Québec
- Filière de l'hydrogène vert en développement au Québec
- Présence de constructeurs automobiles électriques (ex.: Lion)
- Développement de la filière lithium



EXEMPLES

Électrique:

- ETM 1005, ETM 1205 (Liebherr)
- Futuricum (Designwerk)
- FMX Electric (Volvo)
- Energya (Cifa)

Gaz naturel/hydrogène:

- W900S, T880S (Kenworth)
- Empire Hydrogen



IMPACT ÉCONOMIQUE

Faible :

- ↓ consommation d'essence (mais faible contribution des carburants aux coûts de production)

Autre impact:

- Surcoût d'acquisition des voitures électriques (Coût total de possession à valider)



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

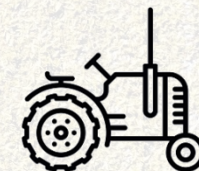
Élevée :

- *Peu de barrières réglementaires*
- Pourrait demander un changement dans les procédés (ex.: chargement et gestion des batteries)



8

ÉPANDAGE AUX CHAMPS DES SÉDIMENTS

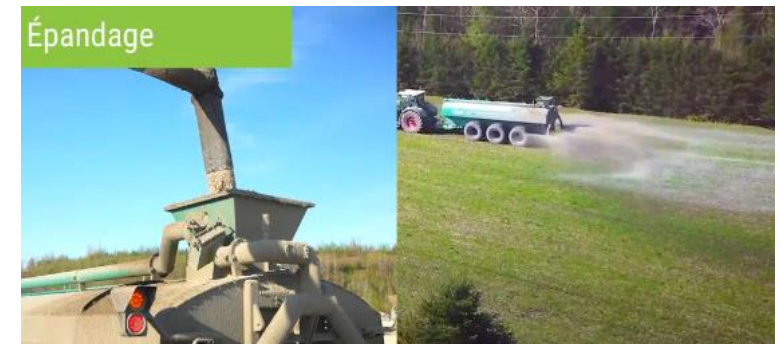




ÉPANDAGE AUX CHAMPS DES SÉDIMENTS

- De 2015 à 2022, l'ABQ a réalisé plusieurs essais afin de valoriser les résidus de béton provenant des bassins de sédimentation ([ABQ, 2022](#)). Leur utilisation comme amendement calcique en agriculture substitue à la chaux traditionnellement utilisée ([BNQ, 2015](#)).
- Le Groupe AGÉCO a réalisé en 2022 une étude de marché sur les amendements calcaires. Cette analyse révèle que:
 - Le marché des amendements calciques est très compétitif
 - Les producteurs agricoles sont ouverts à l'utilisation des résidus de béton, mais peuvent avoir certaines appréhensions quand à leur qualité ou leur efficacité
 - Vu les coûts de transport, les producteurs agricoles à proximité de l'usine doivent être priorités

L'épandage aux champs des sédiments est réaliste d'un point de vue technique. Toutefois, les prix faibles des amendements calciques, les coûts de transport et les coûts de certification ne facilitent pas sa mise en œuvre.





DESCRIPTION ET BESOIN

Valorisation des résidus de bassin de sédimentation comme amendement calcique (AC) en agriculture.

En mode humide :

- extraction avec pompe à lisier, application aux champs avec épandeur à lisier

En mode sèche :

- Assèchement des boues, tamisage, application aux champs avec épandeur à fumier



LEVIERS

- Augmentation du coût de l'enfouissement
- ↑ de l'utilisation des AC
- Producteurs de chaux non disponibles dans certaines régions



MATURITÉ ET ADOPTION

Faible :

- Pratique peu commune chez les producteurs de béton
- 8 ans d'analyses et d'essais par l'ABQ et ses membres
- Normalisation des amendements calciques et magnésiques (ACM) depuis 2005



EXEMPLES

- ABQ



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Moyen :

- ↓ transport (potentiel de livrer les résidus dans des champs à proximité plutôt qu'à des sites d'enfouissement)
- ↓ production de chaux agricole (produit substitué)



IMPACT ÉCONOMIQUE

Faible :

- *Contribution faible des coûts d'enfouissement à l'ensemble des coûts de fonctionnement*
- ↓ coût d'enfouissement
- Marché compétitif: prix peu élevé des ACM
- Coût de certification élevé



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Élevée :

- Comptabilité avec la machinerie agricole
- Disponible au moment de l'application (printemps et automne)
- Indice de valeur agricole plus faible que d'autres ACM



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Moyenne :

- Appréhension des producteurs agricoles à utiliser un résidu de béton
- Clientèle fidèle à leur fournisseur actuel
- Influence des agronomes pour les plans de fertilisation

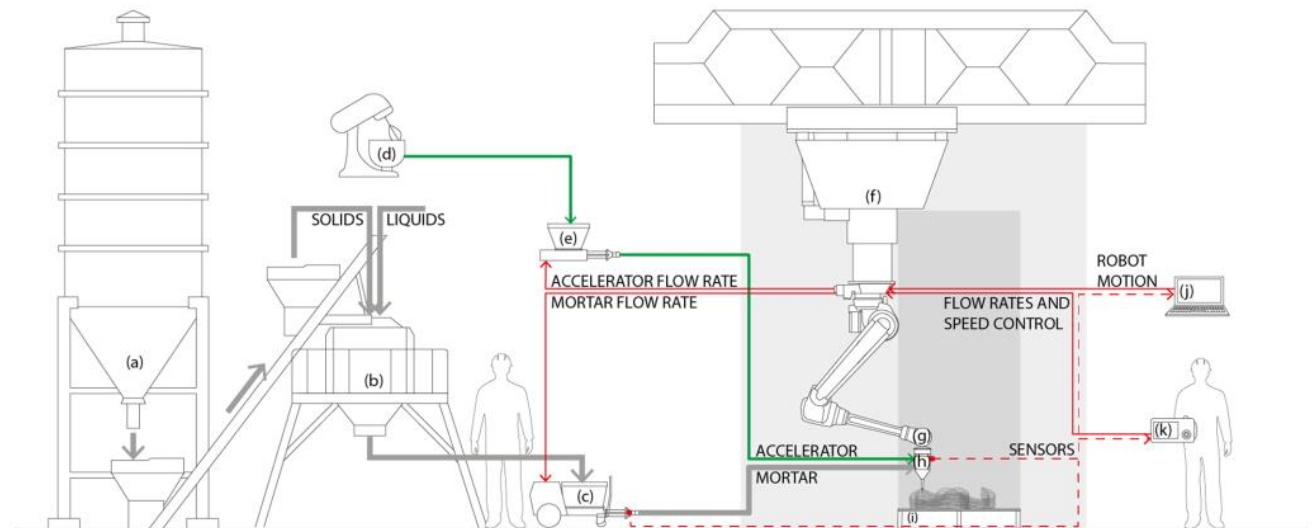


IMPRESSION 3D

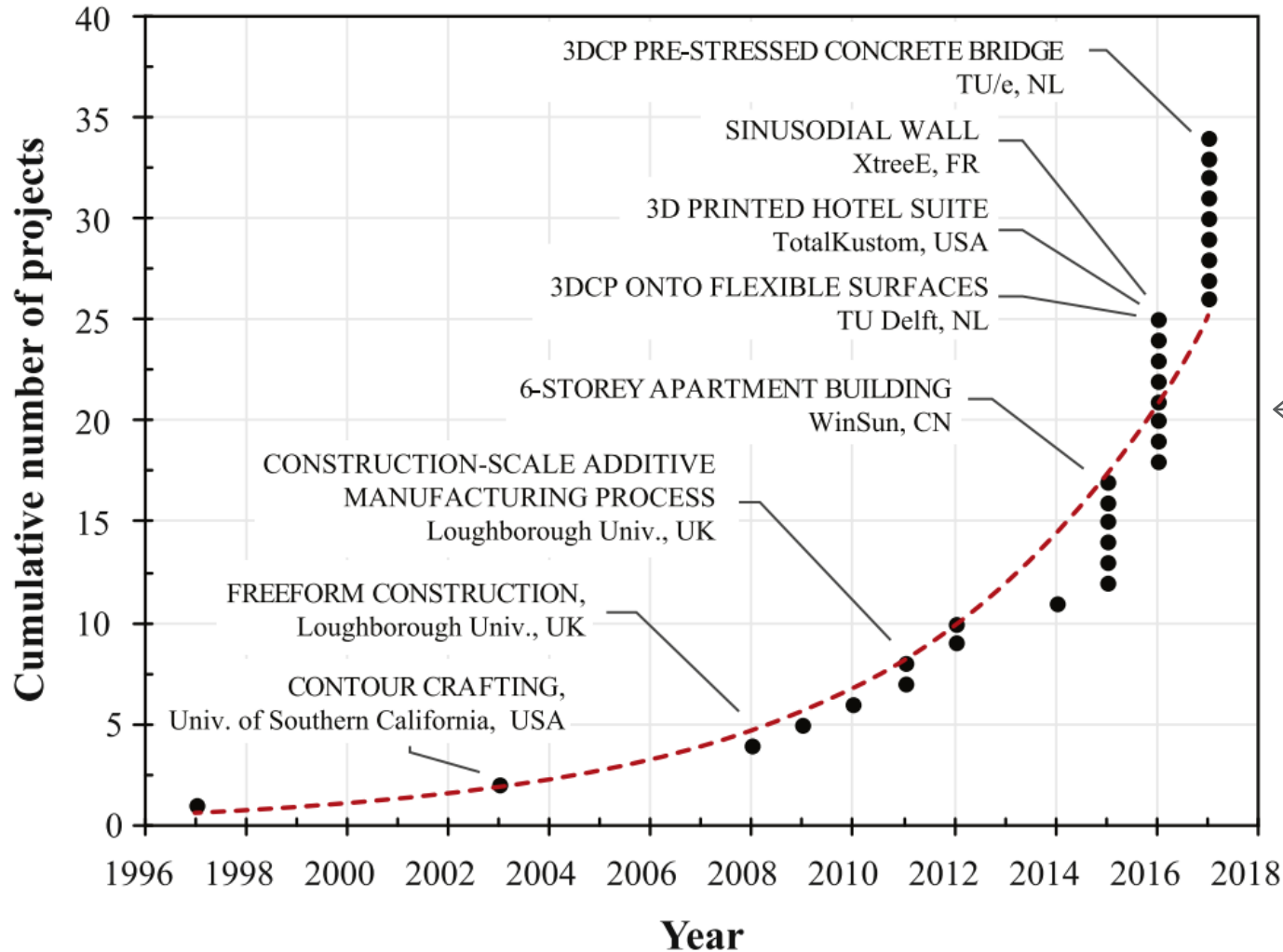
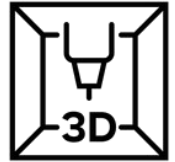




- La fabrication additive, surnommée impression 3D, consiste à extruder une matière en fines couches de manière à fabriquer un objet.
- Les applications dans le secteur du béton sont nombreuses:
 - Préfabrication d'éléments architecturaux
 - Remplacement des coffrages temporaires de bois par des coffrages permanents en béton
 - Impression de murs en béton avec cavités ([Buswell et coll., 2021](#))
- Le béton peut être transporté sur le site ou encore être produit sur place dans une usine temporaire ([Xiao et coll., 2021](#))



Images: [3D printing media network](#) et ([Anton et coll., 2021](#))



- Les avantages de l'impression 3D sont nombreux tels que : possibilité de créer des formes complexes, construction rapide, réduction de la main-d'œuvre et réduction de l'utilisation du béton.

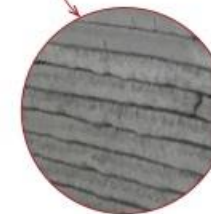
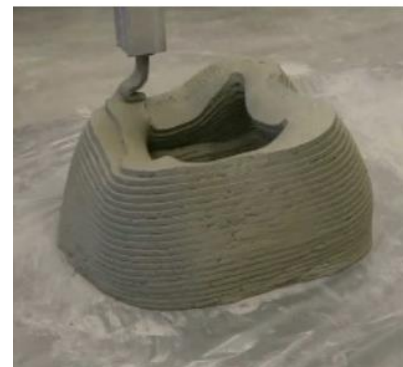
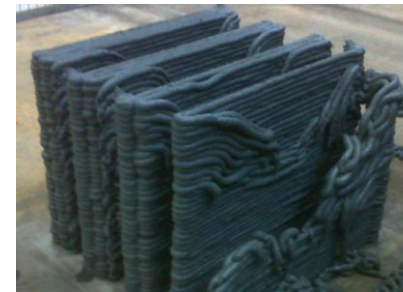
- Le marché de l'impression 3D est en croissance:

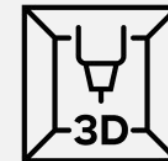
- De plus en plus de projets pilotes sont construits.
- Le marché américain du béton imprimé était estimé à 40 millions \$ en 2016 et passera à 40 milliards \$ en 2027 ([Deloitte, 2019](#)).
- Des villes comme Dubaï prévoient que 25% des nouvelles constructions en 2030 feront appel à l'impression 3D.



- L'impression 3D demande une précision au mélange et à l'extrusion:
 - Le béton doit à la fois être pompable et ne pas s'affaisser →
 - Les accélérateurs de prise doivent être dosés afin que les premières couches puissent rapidement soutenir les couches subséquentes
 - Les interruptions doivent être minimisées de manière à éviter les joints secs entre les couches ([Buswell et coll., 2018](#)).

L'impression 3D est une technologie prometteuse pour l'industrie du béton. Vu les enjeux techniques, il faudra attendre quelques années avant qu'elle soit adoptée à plus grande échelle.





DESCRIPTION ET BESOIN

Extrusion sur chantier de béton.

Plusieurs applications:

- Coffrage en béton imprimé, puis rempli par un béton armé conventionnel
- Impression sur site d'éléments aux formes complexes

Deux modèles de déploiement:

- Mélange en usine, transport, puis ajout d'additifs sur chantier
- Mélange sur place et en continu (usine mobile)



LEVIERS

- Numérisation de l'industrie de la construction
- Contexte de pénurie de main-d'œuvre



MATURITÉ ET ADOPTION

Faible :

- Plusieurs barrières techniques demandant à être soulevées
- Quelques exemples à l'international
- 2021: premier projet résidentiel au Canada (H4H Windsor-Essex)



EXEMPLES

- COBOD 3D printer (COBOD)
- BigDelta 3D printer (WASP)
- StroyBot 6.2 (Total Kustom)
- Berlin-1, Leonardo-2 (TAM)

Applications:

- Maison de 3 étages (PERI)
- Fibonacci house (TAM)



IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Élevé :

- ↓ pertes: seul le béton nécessaire est produit
- ↓ béton par élément structurel (structures avec cavités)
- ↓ matériaux de coffrage



IMPACT ÉCONOMIQUE

Élevé :

- ↓ coûts de main-d'œuvre
- ↓ coûts des matériaux
- Développement d'un nouveau marché

Pour les clients:

- ↓ coûts de main-d'œuvre
- ↓ temps de construction
- ↓ accidents de travail



FAISABILITÉ TECHNIQUE

Faible :

Plusieurs défis techniques:

- Rhéologie et pompabilité du béton
- Intégration d'agrégats
- Dosage des accélérateurs de prise, écroulement à l'état frais
- Intégration des matériaux de renforcement
- Limitation de la hauteur des bâtiments et difficulté de mise à l'échelle



FAISABILITÉ DE MARCHÉ

Faible :

- N'est pas reconnu par le Code national du bâtiment
- Absence de support gouvernemental



ÉVALUATION COMPARATIVE ET CONSTATS



ÉVALUATION COMPARATIVE



	Sondes pour camion-toupie	Capteurs intégrés au béton	Télématique	Usine autonome	Optimisation des routes de transport	Algorithmes de prédiction	Camion-toupie à faibles émissions	Épandage aux champs des sédiments	Impression 3D
Maturité	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bénéfices environnementaux	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bénéfices économiques	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Faisabilité technique	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Faisabilité de marché	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Les lecteurs peuvent consulter la section « 2. Méthodologie » pour les échelles employées et « 3. Revue des technologies » pour plus de détails sur l'évaluation de chaque technologie.

Échelle: ● faible ● moyen ● élevé

GAINS RAPIDES (« QUICK WINS »)



Sondes pour camion-toupie

Capteurs intégrés au béton

Télématique

Usine autonome

Optimisation des routes de transport

Algorithmes de prédiction

Camion-toupie à faibles émissions

Épandage aux champs des sédiments

Impression 3D



Maturité



Bénéfices environnementaux



Bénéfices économiques



Faisabilité technique




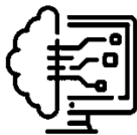

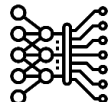










Faisabilité de marché



Les technologies embarquées ainsi que les logiciels de gestion des livraisons sont présentement disponibles et ont peu d'enjeux de faisabilité. Elles permettent des gains modestes au niveau de la productivité des ressources.

TECHNOLOGIES EN ÉMERGENCE

	 Sondes pour camion-toupie	 Capteurs intégrés au béton	 Télématique	 Usine autonome	 Optimisation des routes de transport	 Algorithmes de prédiction	 Camion-toupie à faibles émissions	 Épandage aux champs des sédiments	 Impression 3D
 Maturité	●	●	●	●	●	●	●	●	●
 Bénéfices environnementaux	●	●	●	●	●	●	●	●	●
 Bénéfices économiques	●	●	●	●	●	●	●	●	●
 Faisabilité technique	●	●	●	●	●	●	●	●	●
 Faisabilité de marché	●	●	●	●	●	●	●	●	●

D'autres technologies sont présentement en développement et demanderont des compétences spécialisées pour être mises en place. Les producteurs de béton peuvent tout de même dès maintenant initier des pilotes afin d'être en avant de la vague technologique.

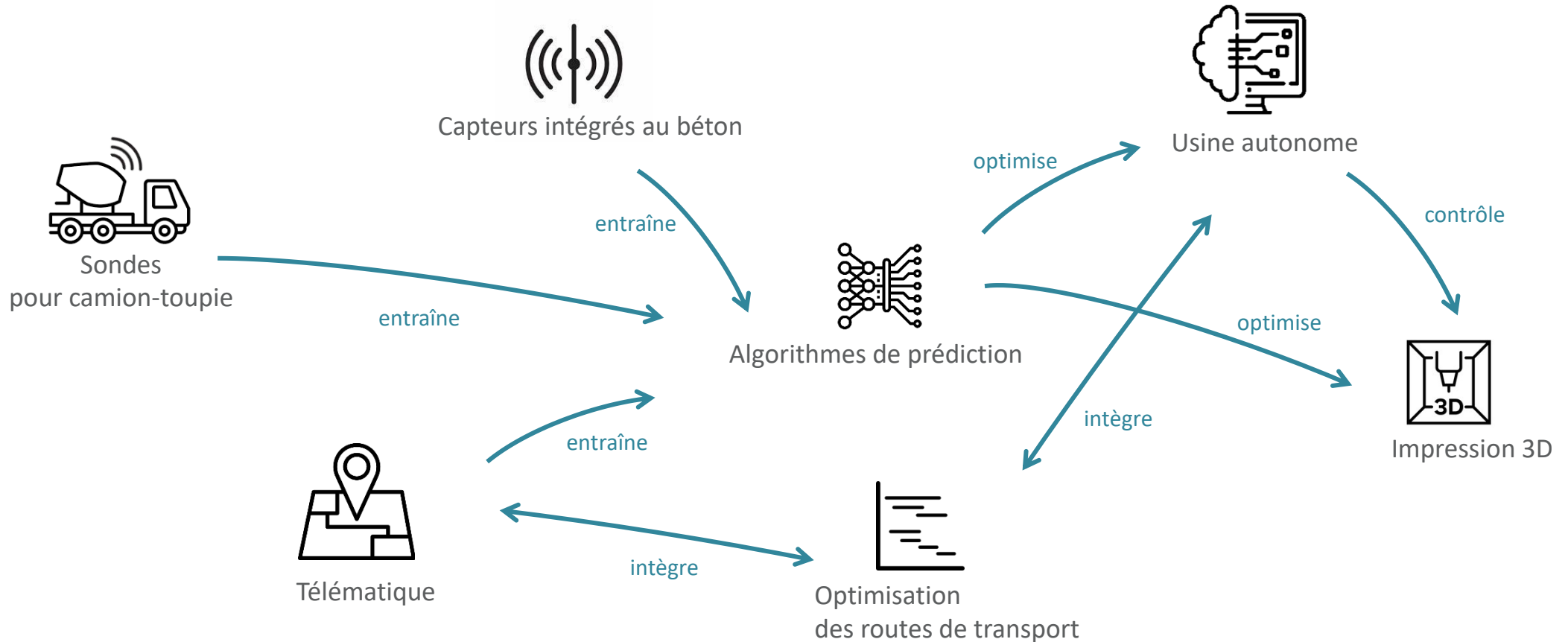
BARRIÈRES À L'INNOVATION ET PISTES DE RÉFLEXION POUR LES SOULEVER

L'évaluation des neuf technologies a permis de relever des barrières communes à l'innovation aux niveaux **règlementaire**, **organisationnel** et **technologique**:

Barrière	Des procédures coulées dans le béton	Des décisions complexes	Des technologies d'IA en développement
Description	<ul style="list-style-type: none">• Procédures normalisées• Devis prescriptifs (c.-à.-d. imposant une méthode)• Limitations règlementaires, pratiques non reconnues	<ul style="list-style-type: none">• La cadence de production dépend des clients• Les opérateurs prennent en compte plusieurs paramètres difficiles à automatiser	<ul style="list-style-type: none">• Données nécessaires à l'apprentissage• L'IA demande de nouvelles compétences
Léviers	<ul style="list-style-type: none">• Support gouvernemental, projets pilotes• Bac à sable règlementaire pour tester des innovations	<ul style="list-style-type: none">• Éducation des clients sur les technologies• Coordination de la logistique avec les clients	<ul style="list-style-type: none">• Collaboration avec les fournisseurs de technologie• Collaboration avec des centres de recherche

MISER SUR L'EFFET POTENTIEATEUR DES INTERRELATIONS

Les technologies étudiées ont des interrelations intéressantes entre elles: les technologies embarquées permettent de collecter des données qui sont valorisées par l'intelligence artificielle, ce qui facilite des solutions complexes comme l'impression 3D





RECOMMANDATIONS



RECOMMANDATIONS

Plusieurs technologies peuvent dès maintenant être intégrées aux pratiques de l'industrie; d'autres demandent à mettre en place des pilotes avant d'être pleinement déployées. Comment passer à l'action? La section suivante présente 8 recommandations aux producteurs de béton prêt à l'emploi, groupé en deux thématiques:



Intégrer les technologies innovantes à ses pratiques



Explorer les opportunités de collaboration

INTÉGRER LES TECHNOLOGIES INNOVANTES À SES PRATIQUES



Image : pexels

Installer des **sondes** sur une partie ou sur l'ensemble de la flotte

Mettre en place la **méthode de la maturité** pour certaines applications: grands chantiers, béton de masse et bétonnage en temps froid

Réaliser un **audit des technologies de l'information** et s'assurer d'utiliser les logiciels les plus performants pour la gestion de l'usine ou des livraisons

Rester à l'affut des développements technologiques, notamment au niveau de l'usine autonome et de l'impression 3D

RECOMMANDATIONS

EXPLORER LES OPPORTUNITÉS DE COLLABORATION

Profiter de projets pilotes sur **l'électrification et l'utilisation d'hydrogène vert** dans le secteur des transports lourds

Collaborer avec d'autres producteurs de béton, notamment sur **l'épandage aux champs des sédiments**

Profiter des **financements disponibles** sur la transformation numérique

S'associer à des **centres de recherche** universitaires (ex.: CRIB) ou des centres de transfert technologiques (AgriNova, CTTÉI, IVI, etc.)



Merci!

G R O U P E
AGÉCO

25, Avenue Mozart Est, bureau 310 Montréal
(Québec) H2S 1B1

Tél. : 514 439-9724

www.groupeageco.ca

Julien Beaulieu

julien.beaulieu@groupeageco.ca

Julie-Anne Chayer

julie-anne.chayer@groupeageco.ca