



OBSERVATOIRE
DE LA GESTION INTÉGRÉE
DE L'ESPACE PUBLIC URBAIN



Réduction de l'empreinte environnementale des projets d'infrastructures routières

Joanderson Morais, postdoctorant, Polytechnique Montréal

Rafika Lassel, directrice de l'Observatoire de la gestion intégrée de l'espace public urbain du CERIU

Les travaux de recherche sont encadrés par le professeur Benoît Courcelles, Professeur titulaire,
Polytechnique Montréal

Sommaire de la présentation

- 1 – Mise en contexte et introduction
- 2 – Objectifs
- 3 – Description du mandat de recherche
- 4 – Analyse du cycle de vie
- 5 – Écocomparateurs
- 6 – Méthodes multicritères
- 7 – Outil préliminaire d'aide à décision
- 8 – Conclusion





OBSERVATOIRE
DE LA GESTION INTÉGRÉE
DE L'ESPACE PUBLIC URBAIN

Mise en contexte



Mandat de recherche lancé par l'**Observatoire de la gestion intégrée de l'espace public urbain du CERIU** et financé par :

5 partenaires fondateurs de l'Observatoire



Institut national
de la recherche
scientifique

9 partenaires de l'Observatoire



Travaux de recherche menés par



Soutien financier de



Mise en contexte

Justification du mandat de recherche

- Comment les municipalités peuvent-elles **réduire** l'empreinte environnementale de leurs projets d'infrastructures routières ?
- Quels sont concrètement les **critères environnementaux** qui permettront aux villes d'évaluer globalement les propositions lors des appels d'offres?
- Comment les critères environnementaux peuvent-ils être **évalués en concomitance** avec les critères économiques, techniques et sociaux ?...

Équipe de recherche

Expertises recherchées : génie, infrastructures routières, environnement, cycle de vie des matériaux, écoconception, méthode d'aide à la décision, etc.

→ **Benoît Courcelles**, professeur titulaire au département Génies civil, géologique et des mines Polytechnique Montréal qui supervisera les travaux de recherche.

→ **Joanderson Morais**, stagiaire postdoctoral à Polytechnique Montréal.

Période des travaux de recherche : 2024 – 2025



Introduction

Objectifs de recherche

Créer un outil multicritère d'aide à la décision pour la sélection de matériaux dans les projets d'infrastructures routières au Québec, qui puisse être mis à jour pour intégrer les nouveaux matériaux sur le marché.

Livrables attendus

Livrable 1: Revue de littérature sur les méthodes, pratiques et outils pour l'évaluation environnementale des routes municipales.

Livrable 2 : Version beta de l'outil d'aide à la décision

Livrable 3 : Outil d'aide à la décision final, ainsi que l'interface utilisateur et la base de données des matériaux et produits.



Introduction

Contribution des partenaires aux travaux de recherche

- Partage d'exemples et d'expériences terrain.
- Participation aux discussions pour valider ou réorienter les objectifs à atteindre lors de l'état d'avancement des livrables.
- Validation des livrables finaux.

Méthodologie de recherche du stagiaire

- Revue des écrits pour l'analyse des méthodes et pratiques existantes d'aide à la décision dans les projets d'infrastructures.
- Enquête pour l'identification des matériaux récents, émergents ou recyclés pertinents pour les municipalités.
- Entrevues avec les municipalités partenaires et cueillette d'informations.
- Recours aux bases de données.
- Conception de l'outil





Description du mandat de recherche

Objectifs spécifiques

- Déterminer **l'approche multicritère la plus appropriée** pour la sélection de matériaux,
- **Sélectionner les matériaux d'intérêt** pour les municipalités du Québec,
- **Créer un outil d'aide à la décision** basé sur des critères d'impact simples identifiés, sans avoir recours à une Analyse de Cycle de Vie (ACV) complète, et valider l'outil sur un cas d'études pour les matériaux identifiés.
- **Identifier les freins à l'adoption de l'outil** et proposer des mesures compensatoires pour faciliter son déploiement.



Description du mandat de recherche

Contraintes

- Les critères environnementaux doivent être inclus dans les **appels d'offres**, avec un poids non négligeable, tout en respectant les règles d'attribution des contrats municipaux,
- **Il n'est pas possible de faire des Analyses du Cycle de Vie (ACV)** pour chaque ouvrage, mais il est possible de s'inspirer de la méthode (Analyse tronquée).





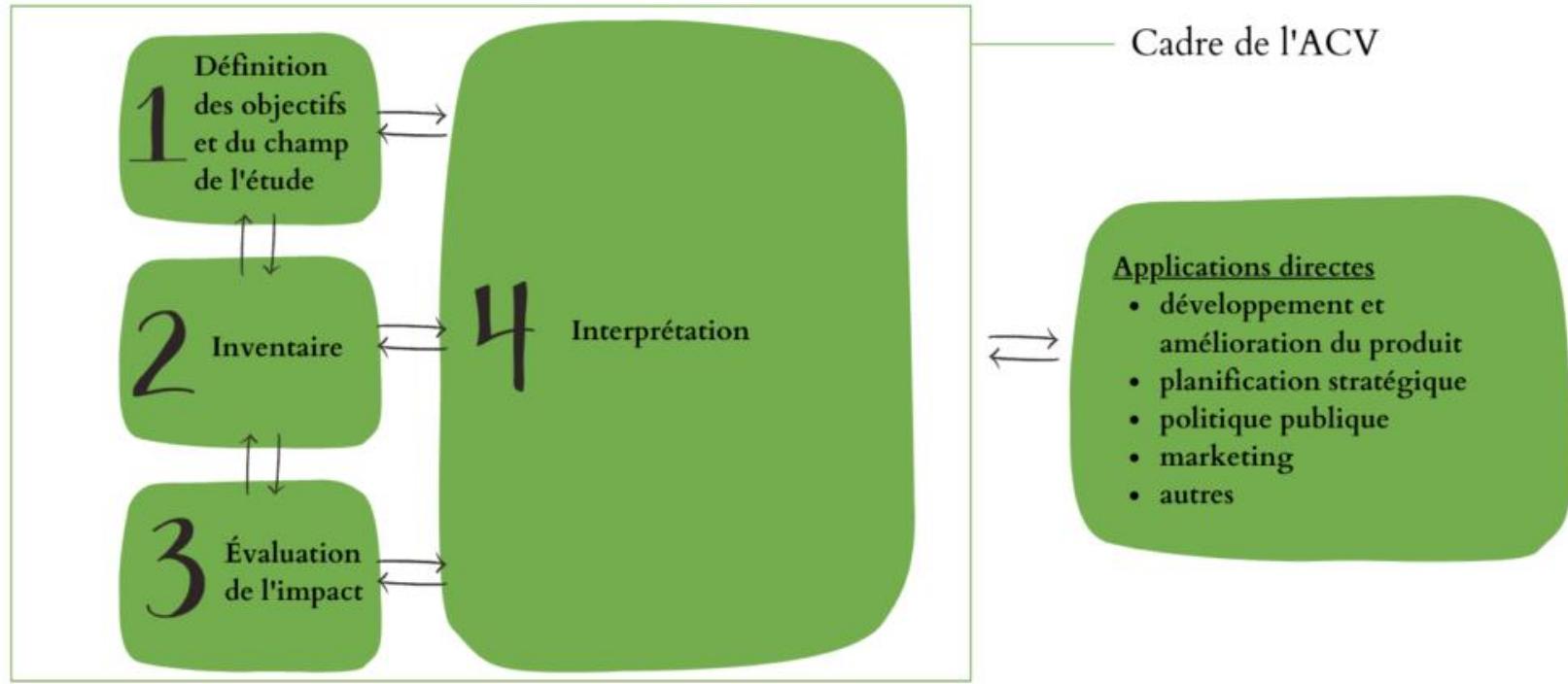
Analyse du cycle de vie (ACV)

- **Méthode d'évaluation globale** des impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un processus depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie.
- Prise en compte de **toutes les étapes du cycle de vie**, notamment l'extraction des matières premières, la production, la distribution, l'utilisation et la gestion des déchets.
- **Quantification des impacts**, tels que les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie et de ressources naturelles, ainsi que la pollution de l'air, de l'eau et des sols.
- **Normes internationales, ISO 14 040 et 14 044**, pour garantir une approche rigoureuse et standardisée.
- **Problème: Complexité et coûts importants**





Analyse du cycle de vie (ACV)



Cadre de l'étude de l' ACV d'après la norme ISO 14040





Écocomparateurs spécialisés

The graphic features the letters S, E, V, E, C, O, R, C, E, P, E, 2, and E, each filled with a different environmental assessment method name. The methods include:

- S: SEVE, AsPECT, VARIWAYS
- E: ECORCE, PE-2, Bridge LCA, DUBOCALC, PERCEVAL, GreenROADS
- V: TRACC, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- E: SEVE, AsPECT, VARIWAYS, DUBOCALC, PERCEVAL, GreenROADS
- C: CIOGEN, PE-2, TRACC, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- O: CIOGEN, PE-2, TRACC, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- R: CIOGEN, PE-2, TRACC, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- C: CIOGEN, PE-2, TRACC, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- E: CIOGEN, PE-2, TRACC, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- P: PaLATE, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- E: PaLATE, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- 2: PaLATE, ATHENA Pavement LCA, Environment IB
- E: PaLATE, ATHENA Pavement LCA, Environment IB





Exemple de l'éco-comparateur SEVE



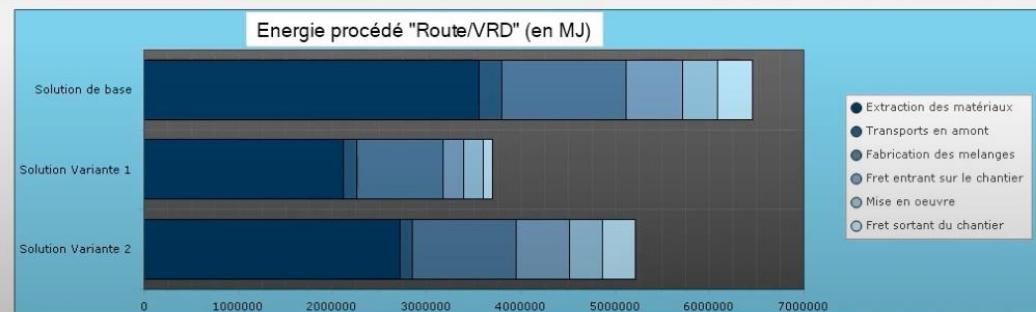
Affichage d'une synthèse environnementale

Retour Générer le PDF de synthèse Extraction Excel

Indicateur : Energie « procédé »

((en Méga-Joules))

		Energie procédé (en MJ)						
		Extraction des matériaux	Transports en amont	Fabrication des mélanges	Fret entrant sur le chantier	Mise en œuvre	Fret sortant du chantier	Sous-total
Solution de base	Route/VRD	3554344.8	242017.05	1319250	598241.56	371007	370338.56	6455199
Solution Variante 1	Route/VRD	2110020.8	151296.36	912227.25	218524.12	202556.75	98444.43	3693069.8
Solution Variante 2	Route/VRD	2713235.8	136152.44	1094873.5	569668.1	349837.2	351587.25	5215354.5



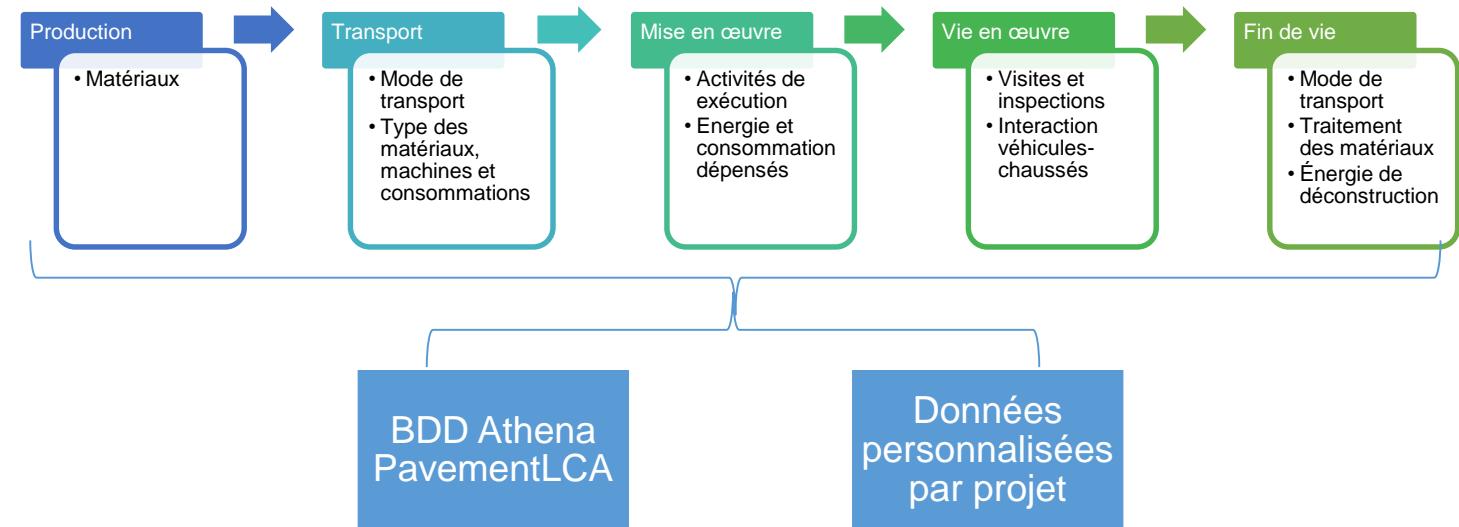


Exemple de l'éco-comparateur PavementLCA



Athena Pavement LCA

- Logiciel gratuit basé sur l'analyse du cycle de vie (ACV) et des coûts du cycle de vie.
- Évalue les impacts environnementaux et les coûts de **construction**, d'**entretien** et d'**utilisation** des routes.
- Élaboré par l'Institut Athena à partir de **données régionales canadiennes**.
- Logiciel mis à jour tous les 6 mois et permettant l'insertion de paramètres externes.



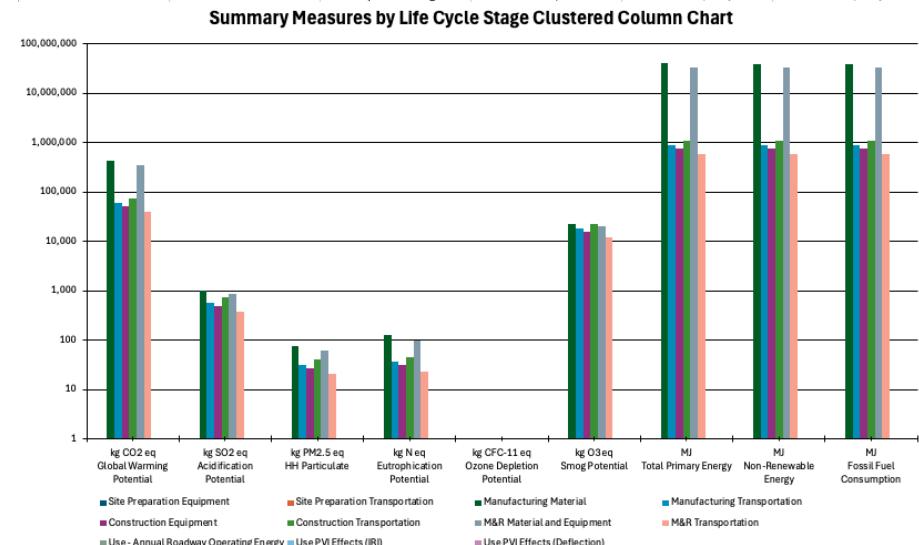
Exemple de l'éco-comparateur PavementLCA

Montage du projet

Project Information	Construction Equipment	Material Transportation	\$ LCCA Cost Items	Operating Energy Consump.
Project Name Example Highway				
Project Type Roadway	Project Location Ontario - Central		Project Currency CAD	
Project Lifespan 50 years	Average Distance Plant to Site 30 km		USD to CAD Exchange Rate ? 1.2500	
Units SI Imperial	Average Distance Site to Stockpile 30 km		Real Inflation Rate ? 2.08 %	
	Average Distance Equipment Depot to Site 30 km		Real Discount Rate ? 1.76 %	
Roadway Cross Section				
Left Side		Lanes		Right Side
Rounding Fore Slope: [4:1]	Shoulder Unpaved	Paved Shoulder Lift 1	Lane 1 Lift 1 Lane 2 Lift 1	Paved Shoulder Lift 1 Shoulder Unpaved Rounding Fore Slope: [3:1]
Granular Layer 1				

Résultats

Year	Category	Sub Category	Specification Description	Total Cost	Total Net Present Value
0	Construction	Initial Construction	NQC-Mun.Maj.Art.-HMA-5,000 AADTT-Mr 30Mpa (copy 01)	\$1,748,970.00	\$1,748,970.00
10	Maintenance	Asphalt Rout & Seal	Rout & Seal	\$1,228.84	\$1,032.18
10	Maintenance	Asphalt Partial Depth Reclamation	Spot Repairs	\$18,432.64	\$15,482.69
10	Maintenance	Asphalt Rout & Seal	Rout & Seal	\$3,072.11	\$2,580.45
20	Maintenance	Asphalt Partial Depth Reclamation	Mill 40mm	\$22,614.57	\$15,955.34
20	Maintenance	Asphalt Paving	Resurface w/ ESG 10	\$293,554.45	\$207,112.55



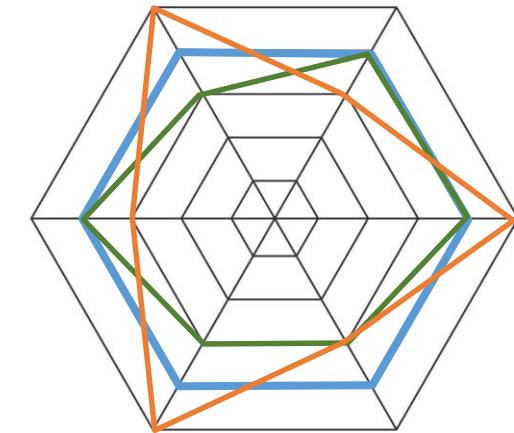
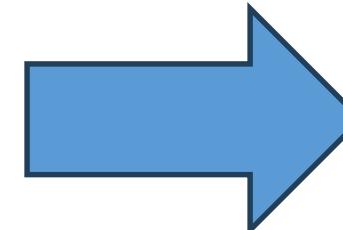


Problème: Que faire avec les résultats de sortie des modèles?



**Athena
Pavement**
LCA

- Ressources en matériaux consommés et produits
- Energie et eau consommés
- Effet de serre
- Acidification
- Eutrophisation
- Ozone troposphérique
- Ecotoxicité
- Toxicité chronique



**ANALYSE
MULTICRITÈRE**





Méthodes d'analyse multicritère

AHP

PROMETHEE

SMART

TOPSYS

ELECTRE

MAUT





SMART

Structure : Directe, sans hiérarchie complexe.

Évaluation : Les critères sont pondérés en fonction de leur importance, puis les alternatives sont notées pour chaque critère.

Méthode SMART

➤ Définition des critères et caractéristiques des alternatives

Critère	Garantie	Prix	Consommation	Technologie
Camion A	7 ans	25 000	15 km/litre	Moyenne - 3
Camion B	5 ans	20 000	10 km/litre	Moyenne - 2
Camion C	10 ans	30 000	12 km/ litre	Excellent - 5
Poids	0.25	0.35	0.25	0.15

➤ Classement final

Critère	Total	Classement
Camion A	57	1 ^o
Camion B	35	3 ^o
Camion C	50	2 ^o





Outil en conception

ACV
(Base de données)



Éco-comparateur



Méthode multicritère

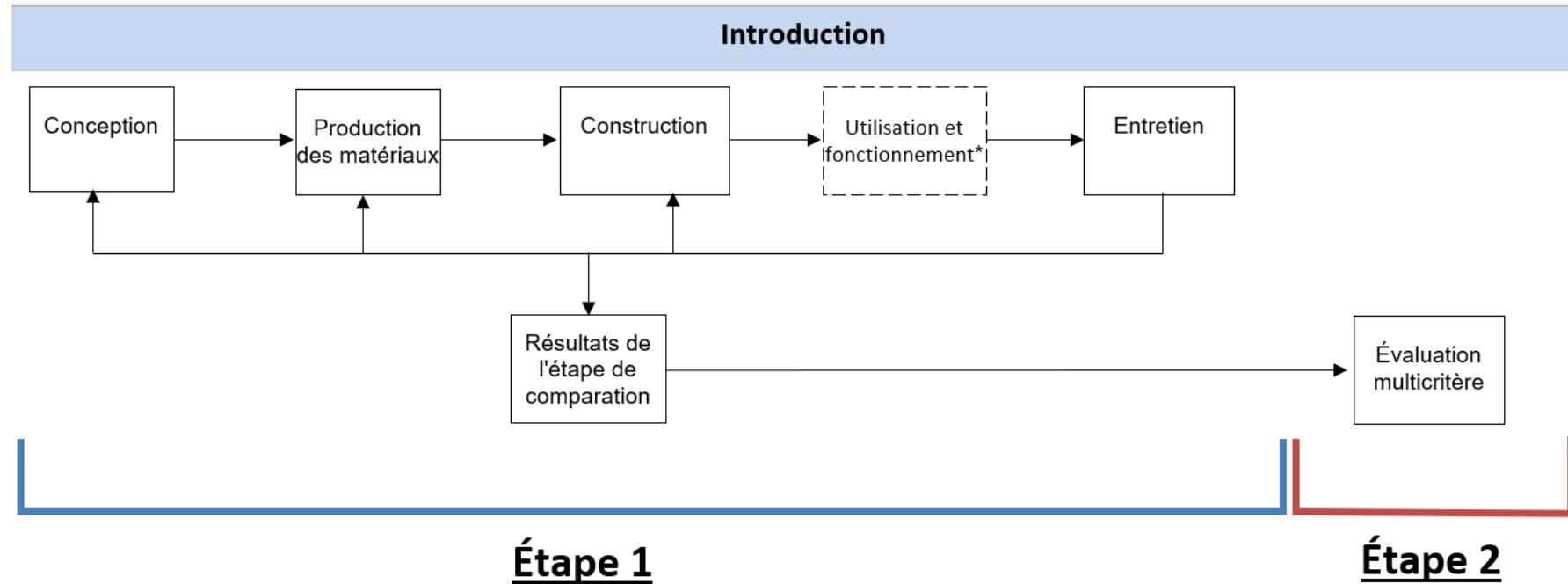


Outil de l'aide à décision





Présentation du concept de l'outil



- **Étape 1** : Développement du concept de comparaison de produits d'un point de vue environnemental et financier.
 - Définition d'un scenario de référence ;
 - Définition d'un scenario alternatif;
- **Étape 2**: Intégration du concept multicritère à l'outil



Détermination de la construction et entretien

Matériel	Densité [tonnes/(y d^3)]	Nouvelle chaussée d'asphalte	Nouvelle chaussée en béton	Construction d'un nouveau sous-fondation et d'un remblai	Transport	
		Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Distance de transport aller simple [mi]	Mode de transport
Agrégat vierge	2,23	38	0		5	dump truck ▾
Bitume	0,84	13			6	tanker truck ▾
Ciment	1,27		0		0	barge ▾
Additifs pour béton	0,84		0		0	tanker truck ▾

- **Transport des matériaux** qui seront utilisés dans la construction et l'entretien, avec prise en compte:
 - de la distance parcourue jusqu'au chantier;
 - du type de camion utilisé pour transporter le matériel.
- Important pour le calcul de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂.





Détermination de la construction et entretien

ACTIVITÉ	Équipement	Marque/Modèle	Capacité du moteur	Productivité	Consommation de carburant	Type de combustible
Pavage en béton	Finisseur à coffrage glissant	Wirtgen SP 250	106 hp	564 tons/h	19,7 l/h	diesel
	Machine de cure de texture	Gomaco T/C 400	70 hp	187 tons/h	20,2 l/h	diesel
Pavage d'asphalte	Paveur	Dynapac F30C	196 hp	2 400 tons/h	49,1 l/h	diesel
	Rouleau pneumatique	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26,1 l/h	diesel
	Rouleau tandem	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel
Recyclage à froid en place	CIR recycleur	Wirtgen 2200 CR	800 hp	1 713 tons/h	150,00 l/h	diesel
	Rouleau pneumatique	Dynapac CP134	100 hp	884 tons/h	25,1 l/h	diesel
	Rouleau tandem	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel
Remise en état sur toute la profondeur	Récupérateur de routes en asphalte	Wirtgen WR 2500 S	670 hp	4 800 tons/h	120,0 l/h	diesel
	Compacteur de sol vibrant	Dynapac CA 262D	150 hp	1 832 tons/h	37,6 l/h	diesel
Recyclage à chaud en place	Machine de chauffage	Wirtgen HM4500	49 hp	256 tons/h	9,1 l/h	diesel
	Remélangeur d'asphalte	Wirtgen 4500	295 hp	208 tons/h	55,0 l/h	diesel
	Rouleau pneumatique	Dynapac CP132	100 hp	668 tons/h	26,1 l/h	diesel
	Rouleau tandem	Ingersol rand DD110	125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel

- Construction et entretien, avec prise en compte:
 - des machines et équipements utilisés pour la production des matériaux;
 - des machines et équipements qui travaillent sur le chantier.
- Important pour le calcul de la consommation d'énergie, d'eau et des émissions de CO₂.





Détermination des coûts

SCÉNARIO DE BASE

Coût d'asphalte installée			Coût du béton installée			Coût de construction de la sous-fodation et du remblai installée			
Année	Volume [yd ³]	Coût unitaire [\$/(yd ³)]	Coût actuel [\$]	Volume [yd ³]	Coût unitaire [\$/(yd ³)]	Coût actuel [\$]	Volume [yd ³]	Coût unitaire [\$/(yd ³)]	Coût actuel [\$]
	Coût prévu [\$/yd ²]:	28,66		Coût prévu [\$/yd ²]:	31		Coût prévu [\$/yd ²]:	11,02	
	Volume initial de construction [yd ³]:	50,54407111		Volume initial de construction [yd ³]:	0		Volume initial de construction [yd ³]:	100,9598578	
	Volume total d'entretien [yd ³]:	0		Volume total d'entretien [yd ³]:	0		Volume total d'entretien [yd ³]:	0	

- Encore en cours de développement;
- Besoin d'obtenir des données sur les coûts unitaires des matériaux;
- Coûts assez variables.

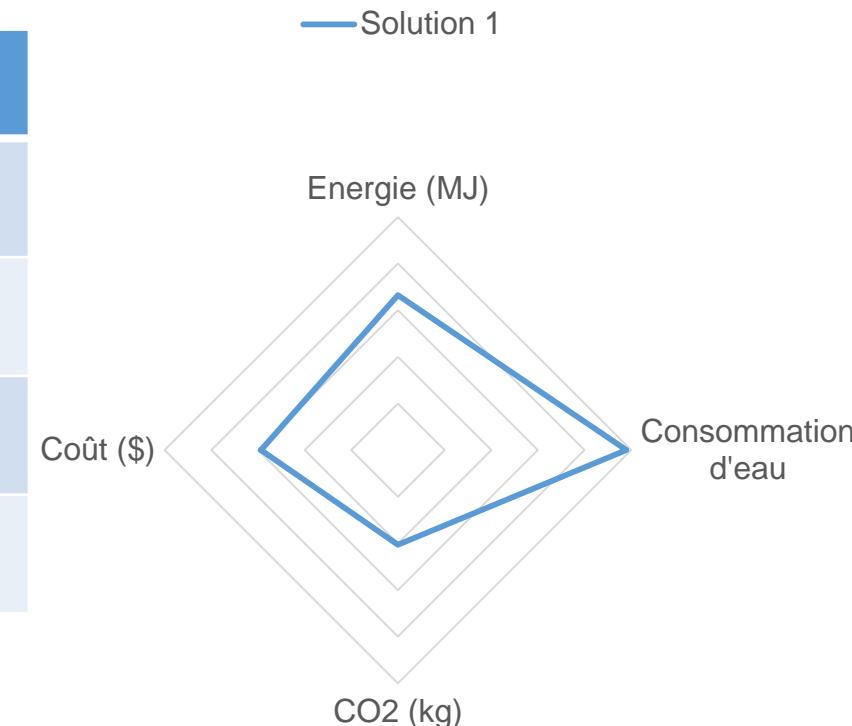




TOTAUX GÉNÉRAUX

Total	Indicateurs	Energie (MJ)	Consommation d'eau (kg)	CO2 (Mg)	Coût (\$)
	Production de matériaux	327 082	333	112	256 500
	Transport des matériaux	2 953	89	52	32 000
	Procédés (équipements)	2 170	68	39	5 359
	Somme (finaux)	332 205	490	203	293 859

Taux généraux



- Exemple de résultats d'une évaluation préliminaire;
- À partir de ces données, une analyse multicritère sera effectuée.



Conclusion

- La revue de littérature a permis de dresser la **liste des éco-comparateurs** disponibles commercialement ou en licence libre.
- Les **bases de données, et leur mise à jour**, constituent la clé d'un outil utilisable et utilisé!
- La multiplicité des critères rend parfois la **décision difficile**.
- Même s'il s'agit d'un outil simplifié et spécialisé, un éco-comparateur nécessite une bonne **compréhension de l'outil**.
- Le couplage d'un éco-comparateur à une **méthode complémentaire d'analyse multicritère** permettra de faciliter l'utilisation de l'outil.





Merci

Des questions ?

