

2013

# Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine

## *Rapport synthèse final*

DURBECQ T., TAGNIT-HAMOU A. et TITA G.

*Étude réalisée en collaboration avec PYROGENESIS CANADA INC.*

### PARTENAIRES TECHNIQUES



Hubert Cabana, David Harbec,  
Donaldo Lopez Martelo, Lionel Muraz  
et Ammar Yahia

### PARTENAIRES FINANCIERS

*Un des Laboratoires ruraux  
de la Politique nationale  
de la ruralité*



Avec la participation du :

- Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
- Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie



**Municipalité des  
Îles-de-la-Madeleine**



# Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine

## Rapport synthèse final

Thibaud DURBECQ<sup>1</sup>, Arezki TAGNIT-HAMOU<sup>2</sup> et Guglielmo TITA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM)  
37, chemin Central  
C.P. 2280, Havre-aux-Maisons  
Îles-de-la-Madeleine (Québec) Canada G4T 5P4  
Courriel : [cermim@uqar.ca](mailto:cermim@uqar.ca)

<sup>2</sup> Université de Sherbrooke  
Faculté de génie – Département de génie civil  
Groupe de recherche sur le ciment et le béton

Soumis au ministère de l'Éducation supérieure, de la Recherche, de la Science et de la Technologie (MESRST)

Le 1<sup>er</sup> juin 2013 (version révisée le 17 juin 2013)

ISBN 978-2-9814153-0-1 (PDF)  
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2013  
Bibliothèque et Archives Canada, 2013

Autres partenaires financiers du CERMIM :

 UQAR



 Desjardins

Coopérer pour créer l'avenir



SADC  
Société d'aide au développement de la collectivité  
des Îles-de-la-Madeleine

---

Ce document doit être cité comme suit :

Durbecq T., Tagnit-Hamou A. et Tita G. (2013). *Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : rapport synthèse final*. Rapport soumis au ministère de l'Éducation supérieure, de la Recherche, de la Science et de la Technologie (MESRST). Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine (Québec), vi, 33 pages + annexes.

Nous pouvons ajouter à nos connaissances, nous ne pouvons rien en retrancher.

Arthur Koestler

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CARACTÉRISATION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE ET ANALYSE DES ÉMISSIONS DE GES (VOLET A).....</b>	<b>2</b>
2.1 Caractérisation des matières résiduelles .....	2
2.2 Préévaluation des émissions de GES.....	3
<b>3. LA BIOMÉTHANISATION AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE (VOLET C).....</b>	<b>5</b>
3.1 Le principe de la biométhanisation .....	5
3.2 Le potentiel de biométhanisation aux Îles-de-la-Madeleine .....	6
3.2.1 <i>Le traitement en voie cuvée-sèche</i> .....	7
3.2.2 <i>Le traitement en voie liquide-continu</i> .....	8
3.3 Coût d'opportunité de l'implantation de la biométhanisation.....	9
<b>4. LA GAZÉIFICATION AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE (VOLET B ET D).....</b>	<b>11</b>
4.1 Le principe de la gazéification au plasma .....	11
4.2 Le potentiel de la gazéification au plasma aux Îles-de-la-Madeleine .....	11
4.3 Les modalités d'implantation de la gazéification au CGMR .....	13
4.4 Le potentiel de couplage avec la biométhanisation .....	14
4.4.1 <i>Traitement du digestat par gazéification</i> .....	14
4.4.2 <i>Valorisation conjointe du syngaz et du biogaz</i> .....	15
4.5 La valorisation du vitrifiat.....	16
4.5.1 <i>La valorisation cimentaire du vitrifiat</i> .....	17
4.5.2 <i>La valorisation du vitrifiat comme inclusion granulaire dans du béton</i> .....	18
4.5.3 <i>Conclusion</i> .....	19
4.6 Retombées pour le territoire des Îles-de-la-Madeleine .....	20
4.7 Coûts d'opportunités associés à l'implantation d'un PRRS aux ÎdM .....	20
4.7.1 <i>Coût d'un PRRS valorisant les MR ultimes et sèches</i> .....	20
4.7.2 <i>Coûts d'un PRRS valorisant les MR ultimes, sèches et recyclables</i> .....	22
4.8 Étude de la maturité du PRRS.....	24
4.8.1 <i>Aspects technologiques</i> .....	24
4.8.2 <i>Aspects réglementaires</i> .....	27
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>30</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>32</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>34</b>

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Paramètres et résultats des modélisations pour le fonctionnement d'un biodigesteur aux Îles-de-la-Madeleine .....	6
Tableau 2 : Impact de la saisonnalité sur le fonctionnement de la biométhanisation .....	7
Tableau 3 : Budget cumulé pour chaque scénario de traitement des MR putrescibles selon le taux d'intérêt .....	9
Tableau 4 : Résultats de la modélisation du fonctionnement d'un procédé de gazéification aux Îles-de-la-Madeleine.....	12
Tableau 5 : Résultats des essais de performance du béton avec un taux de substitution cimentaire de 20 % de vitrifiat.....	18
Tableau 6 : Scénarios de traitement évalués pour l'analyse d'opportunité économique selon le taux d'intérêt .....	21
Tableau 7 : Scénarios de traitement évalués pour l'analyse d'opportunité économique (incluant les recyclables) selon le taux d'intérêt .....	23
Tableau 8 : Récapitulatif des résultats d'échantillonnage sur le PRRS .....	28

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Évolution des quantités de MR traitées par le CGMR de 2000 à 2010 .....	2
Figure 2 : Émissions de GES du CGMR .....	3
Figure 3 : Représentation des principaux éléments d'une centrale en voie cuvée-sèche .....	7
Figure 4 : Principes de la gazéification au plasma.....	11
Figure 5 : Plan d'implantation du PRRS au CGMR.....	13
Figure 6 : Valeur calorifique des intrants selon les différents scénarios .....	15
Figure 7 : Valeur calorifique des intrants du scénario 1 selon la siccité du digestat.....	15
Figure 8 : Schéma de contrôle pour un moteur à gaz avec combustible d'appoint .....	16
Figure 9 : Variations du volume de syngaz produit par le PRRS et moyenne mobile du volume de syngaz valorisé .....	25
Figure 10 : Taux de disponibilité horaire entre le 15 janvier et le 14 octobre 2011 .....	27

## LISTES DES ANNEXES

---

<b>Annexe 1</b> – Coût d'opportunité de la biométhanisation des MR putrescibles .....	34
<b>Annexe 2</b> – Coût d'opportunité de la gazéification des MR ultimes et sèches.....	36
<b>Annexe 3</b> – Coût d'opportunité de la gazéification des MR ultimes, sèches et recyclables	38

## LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES

---

<b>3RV-E</b>	Réemploi, réduction, recyclage, valorisation et élimination
<b>BFS</b>	Boues de fosses septiques
<b>CERMIM</b>	Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes
<b>CGMR</b>	Centre de gestion des matières résiduelles
<b>CRD</b>	Construction, rénovation et démolition
<b>CRÉGÎM</b>	Conférence régionale des élus Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>GÎM</b>	Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine
<b>GJ</b>	Giga-Joules
<b>GMR</b>	Gestion des matières résiduelles
<b>ICI</b>	Industries, commerces et institutions
<b>ÎdM</b>	Îles-de-la-Madeleine
<b>ISQ</b>	Institut de la statistique du Québec
<b>MAMROT</b>	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
<b>MDEIE</b>	Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation
<b>MWh</b>	Méga Watt.heure
<b>Nm<sup>3</sup></b>	Mètre-cube aux conditions standards de pression et température
<b>MR</b>	Matières résiduelles
<b>PSVT</b>	Programme de soutien à la valorisation et au transfert
<b>UQAR</b>	Université du Québec à Rimouski

## 1. INTRODUCTION

---

De par leur éloignement géographique et la taille réduite du territoire, les Îles-de-la-Madeleine sont contraintes d'envisager des stratégies novatrices dans la gestion des matières résiduelles (MR).

À ce propos, en décembre 2009, la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a mandaté le Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM) pour l'aider dans l'élaboration et la mise en œuvre d'une approche de gestion intégrée des matières résiduelles sur son territoire.

Le CERMIM s'est ainsi mobilisé pour élaborer une programmation de recherche et pour rassembler un partenariat opérationnel avec l'Université de Sherbrooke et l'entreprise PyroGenesis Canada inc. Le CERMIM a aussi œuvré pour la recherche et l'obtention du financement provenant du MAMROT (400 k\$ /5 ans, Programme des Laboratoires ruraux), du MDEIE (390 k\$ /3 ans, PSVT-2 – puisé dans le Fonds Vert) et de la Conférence régionale des élus de la Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine (60 k\$ /3 ans). À ces contributions, s'ajoute celle de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (132 k\$ /5 ans).

Le programme de recherche s'est articulé en deux volets principaux. Le premier visait l'application des stratégies de 3RV par une approche d'innovation sociale, tandis que le second consistait en une approche d'innovation technologique par une étude de faisabilité sur l'intégration de technologies permettant l'obtention d'un taux de valorisation record des MR (>90 %).

Le volet d'innovation technologique, faisant l'objet du présent rapport, a eu pour objectif spécifique l'étude du potentiel de couplage de deux technologies, soit la gazéification et vitrification au plasma des MR ultimes, développée par PyroGenesis Canada, avec la biométhanisation des MR putrescibles. Ce volet visait aussi à identifier des pistes de valorisation du vitrifiat issu de la technologie au plasma.

Ce rapport est une synthèse des résultats obtenus dans le cadre du volet d'innovation technologique du programme de recherche coordonné par le CERMIM. Les activités de ce volet se sont déroulées entre novembre 2010 et mars 2013.

## 2. CARACTÉRISATION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE ET ANALYSE DES ÉMISSIONS DE GES (VOLET A)

L'évaluation de nouvelles approches de valorisation des matières résiduelles nécessite une bonne connaissance du système de gestion actuel. C'est pourquoi un portrait de la situation actuelle a été complété en procédant à une caractérisation des matières résiduelles et à une préévaluation des émissions de GES du service.

### 2.1 Caractérisation des matières résiduelles

La caractérisation des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine a été réalisée en deux étapes : (1) une compilation des données historiques d'arrivages au Centre de gestion des matières résiduelles (CGMR) des Îles-de-la-Madeleine et (2) une caractérisation de la composition des bacs de matières recyclables et ultimes.

Plusieurs observations ressortent de cette caractérisation (Durbecq *et al.*, 2012). Tout d'abord, les quantités de matières résiduelles reçues sont stables depuis une dizaine d'années, tout comme les proportions entre les différentes catégories de résidus (Figure 1). Par ailleurs, les résultats de caractérisation montrent que près de 50 % des contenants de bac noir (déchets ultimes) sont toujours constitués de matières qui auraient pu être détournées vers le compostage ou le recyclage. Ce constat démontre qu'il y a un potentiel d'amélioration du tri à la source, dans les résidences comme dans les ICI (industries, commerces et institutions). Finalement, il ressort que les quantités reçues au CGMR sont sujettes à une très grande variabilité intersaisonnière qui suit le cycle annuel de la pêche et du tourisme.

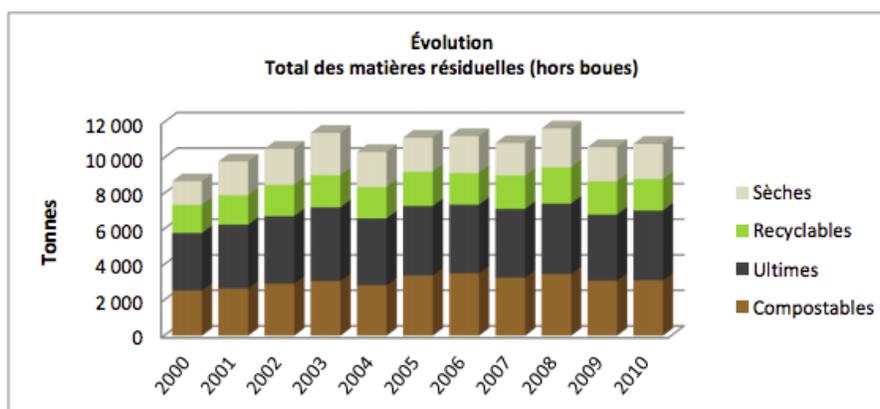


Figure 1 : Évolution des quantités de MR traitées par le CGMR de 2000 à 2010

Les résultats de la caractérisation des MR issues de la collecte municipale sont disponibles dans deux rapports produits par la firme Roche, dont un porte sur un échantillonnage en période hivernale (Roche, 2011A) et l'autre en période estivale (Roche, 2011B).

## 2.2 Préévaluation des émissions de GES

Une préévaluation des émissions de GES du système de gestion des matières résiduelles a été réalisée en s'inspirant des recommandations de la norme ISO 14064-1 (Thibodeau *et al.*, 2013). Les résultats suggèrent que, toutes sources confondues, les émissions de GES proviennent majoritairement (1) du processus de compostage, (2) de la consommation d'électricité provenant de la centrale thermique d'Hydro-Québec et (3) des collectes porte-à-porte et de boues réalisées en sous-traitance. Toutefois, les émissions liées au transport des déchets jusqu'au site d'enfouissement près de Victoriaville ainsi que les émissions fugitives résultant de cet enfouissement ne sont pas considérées.

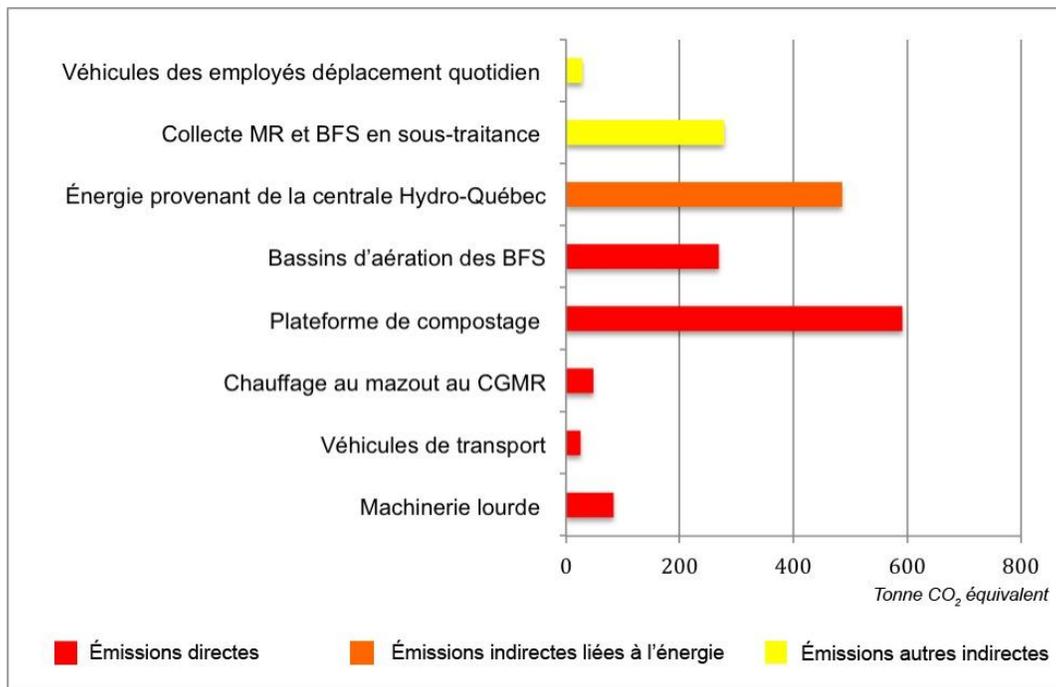


Figure 2 : Émissions de GES du CGMR (2010)

L'analyse des résultats démontre que des technologies de valorisation énergétique des matières résiduelles telles que la biométhanisation et la gazéification au plasma paraissent intéressantes puisqu'elles permettraient de faire diminuer les émissions issues de la consommation d'électricité. À ce propos, il est pertinent de mentionner que le facteur d'émission associé à la consommation d'électricité aux Îles-de-la-Madeleine est de

670 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh alors qu'il est de 2 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh pour le réseau principal du Québec. La production d'électricité à partir d'énergie renouvelable est donc un moyen pour réduire les émissions de GES du territoire, ce qui pourrait éventuellement générer des revenus par la vente de crédits de carbone.

De plus, il est constaté qu'une fraction importante des émissions de GES est issue des processus de traitement des matières résiduelles organiques par compostage et traitement aérobie (boues). La biométhanisation des matières résiduelles permettrait certainement de faire diminuer ces émissions dans une proportion qui reste à définir.

### 3. LA BIOMÉTHANISATION AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE (VOLET C)

---

#### 3.1 Le principe de la biométhanisation

La biométhanisation, ou digestion anaérobie, est une dégradation bactériologique de la matière organique qui convertit cette dernière en un combustible (le biogaz) et un coproduit ayant une valeur agronomique (le digestat). Le biogaz est un combustible qui peut être valorisé sous forme de chaleur et d'électricité, dans un réseau de gaz ou comme carburant dans des véhicules adaptés. Selon certaines études (Moletta, 2008) et des discussions téléphoniques avec des experts, il semble que la valorisation comme gaz naturel ou comme carburant ne soit pas rentable pour de faibles quantités (seuil de rentabilité à 250 Nm<sup>3</sup>/h de méthane). La voie de valorisation retenue est donc la cogénération (électricité plus chaleur).

Le digestat peut être valorisé comme amendement agronomique sous forme liquide (épandage aux champs) ou sous une forme solide après compostage ou séchage. Toutefois, aux Îles-de-la-Madeleine, l'épandage du digestat est difficilement envisageable en raison des odeurs (proximité avec l'habitat), des contraintes règlementaires<sup>1</sup> et de l'acceptabilité sociale du produit. Le compostage semble donc être la voie à privilégier même si elle est la plus onéreuse des solutions de traitement.

La biométhanisation s'effectue en milieu anaérobie liquide (siccité <20 %) ou « sec » (siccité >20 %). Elle est réalisée aux gammes de température psychrophile (15 °C), mésophile (30 °C) ou thermophile (45 °C) et en mode cuvée ou continu. Généralement, les conditions d'opérations sont choisies selon les caractéristiques des intrants.

Le développement progressif de ce type de traitement des matières putrescibles à l'échelle internationale a permis la mise au point de nombreuses technologies déclinant les différentes conditions d'opérations possibles. Un survol de ces différentes options a été effectué par l'Université de Sherbrooke (Amarante, 2010).

Afin de favoriser le développement de cette filière, le gouvernement du Québec a publié un programme qui subventionne les investissements des municipalités dans de nouvelles installations de biométhanisation (MDDEFP, 2013).

---

<sup>1</sup> La réglementation du MAPAQ ne permet pas l'épandage de matières résiduelles fertilisantes (MRF) contenant des matières fécales humaines sur des cultures destinées à l'alimentation humaine, sauf si ces MRF sont certifiées par le BNQ.

### 3.2 Le potentiel de biométhanisation aux Îles-de-la-Madeleine

Les Îles-de-la-Madeleine disposent de différentes MR aptes à la biodigestion : les résidus putrescibles de la collecte municipale (~1 700 t/an), les produits marins (~1 200 t/an), les boues des fosses septiques (~5 000 t/an liquide, ou 500 t/an si partiellement déshydratées) et diverses autres MR (~100 t/an). Ceci permettrait une exploitation de petite échelle.

Puisque les boues de fosses septiques peuvent être ajoutées sous forme liquide (pour diluer le mélange) ou après déshydratation (pour conserver une structure solide), cette étude a porté sur l'analyse des performances de deux modes d'opération, soit en *cuvée-sec* et en *continu-liquide*<sup>2</sup>. De plus, les modélisations ont considérées des scénarios de traitement intégrant 100 %, 50 % et 0 % du total des produits marins reçus.

Les conclusions de deux approches, l'une par l'Université de Sherbrooke (Cabana et Lopez, 2013) et l'autre par l'entreprise sous-traitante (Electrigaz, 2012), sont assez similaires et suggèrent que le potentiel de production de biogaz des Îles-de-la-Madeleine varie entre 252 450 et 408 550 Nm<sup>3</sup>/an selon les technologies et les scénarios. Ce biogaz permettrait une production nette d'électricité variant entre 356 et 589 MWh/an en plus d'une production de chaleur comprise entre 1 420 et 2 235 GJ/an (tableau 1).

La saisonnalité des arrivages aurait des conséquences importantes puisque l'installation fonctionnerait à moins de la moitié de sa capacité durant la saison hivernale et produirait deux fois moins de biogaz (par rapport à la période estivale). Cette situation impliquerait inévitablement une hausse des dépenses d'immobilisations par rapport aux quantités traitées, ainsi que des difficultés supplémentaires à valoriser la chaleur produite (plus de deux fois plus de chaleur disponible en été qu'en hiver, voir tableau 2).

**Tableau 1 : Paramètres et résultats des modélisations pour le fonctionnement d'un biodigester aux Îles-de-la-Madeleine**

Mode	Source	Produits marins	Intrants		Biogaz Nm <sup>3</sup> /an	Électricité MWh/an	Chaleur GJ/an	Digestat solide	
			t/an	siccité				t/an	siccité
Cuvée-sec	Electrigaz	100%	4 200 <sup>3</sup>	40,1 %	252 971	356	1 772	3 858	35,2 %
Continu-liquide	Electrigaz	100%	8 500 <sup>4</sup>	9 %	317 311	589	2 235	2 700	20,0 %
	UdeS	100%	7 900 <sup>5</sup>	15 %	408 550	556	2 072	2 055	29,6 %
	UdeS	50%	7 300 <sup>5</sup>	12,1 %	340 002	499	1 666	1 510	29,2 %
	UdeS	0%	6 700 <sup>5</sup>	8,6 %	271 455	396	1 420	920	30,2 %

<sup>2</sup> Les descriptions du fonctionnement de ces deux technologies sont disponibles aux sections 3.2.1 et 3.2.2

<sup>3</sup> Incluant 800 tonnes/an de copeaux de bois

<sup>4</sup> Incluant 600 t/an d'eau de dilution (lixiviat de la plateforme de compostage ou eau fraîche), excluant la recirculation de 2 300 t/an de digestat liquide.

<sup>5</sup> Sans compter les besoins en eau

**Tableau 2 : Impact de la saisonnalité sur le fonctionnement de la biométhanisation**

Mode	Source	Produits marins	Intrants t/mois		Biogaz Nm <sup>3</sup> /mois		Électricité MWh/mois		Chaleur GJ/mois	
			Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Cuvée-sec	Electrigaz	100%	515	159	30 240	10 080	39	12	226	39
Continu-Liquide	Electrigaz	100%	1 164	204	37 440	12 240	65	21	272	61
	UdeS	100%	1 412	236	48 709	13 303	50	16	211	93
	UdeS	50%	934	236	38 078	12 962	44	15	184	91
	UdeS	0%	879	236	32 777	12 732	39	15	166	60

### 3.2.1 Le traitement en voie cuvée-sèche

La majorité des technologies opèrent en continu avec des systèmes de brassage; ce n'est pas le cas des technologies en mode cuvée-sec. Le mode de traitement y est le suivant : les matières résiduelles putrescibles sont préalablement mélangées avec du digestat et du structurant (p. ex. copeaux de bois) par des pelles mécaniques. Le mélange d'une siccité de 50 % est ensuite entassé dans un conteneur étanche. Les étapes de méthanisation s'y effectuent durant environ 21 jours (en mode mésophile), sans aucun brassage. Les lixiviats sont automatiquement récupérés, réchauffés et ré-aspergés sur le tas. Plusieurs conteneurs sont opérés en parallèle pour obtenir une production continue de biogaz. Différentes firmes proposent ce type de technologie, comme BEKON et BIOFERM (figure 3).



**Figure 3 : Représentation des principaux éléments d'une centrale en voie cuvée-sèche**

Source : site Internet BiofermEnergy.com

Les avantages de cette approche sont : (1) la simplicité des installations, (2) la simplicité des opérations qui s'apparentent à du compostage, (3) le moindre coût d'implantation et (4) le fonctionnement en voie sèche qui élimine le traitement de boues et facilite le compostage.

Les résultats des modélisations d'Electrigaz (2012) montrent que cette technologie aux Îles-de-la-Madeleine permettrait une production de près de 356 MWh/an d'électricité et de

1 772 GJ/an de chaleur. Le coût d'immobilisation est évalué à 2,73 M\$ (hors subventions) avec un coût d'opération estimé à 93 000 \$/an (hors compostage).

Toutefois, bien que cette technologie présente des avantages indéniables pour les Îles-de-la-Madeleine, il semble qu'elle ne puisse pas être adaptée à un si faible volume et une si forte variabilité saisonnière. Ainsi, cette forme de biométhanisation ne paraît pas être une option viable pour l'archipel.

### **3.2.2 Le traitement en voie liquide-continu**

Les technologies opérant en voie liquide sont actuellement les plus matures, les plus connues et les plus utilisées de par le monde. Ces procédés sont constitués d'un système de broyage et d'humidification des intrants qui produisent un substrat liquide. Celui-ci est acheminé vers un réacteur mélangé où il y est dégradé biologiquement pour produire le biogaz. Le digestat est extrait pour être déshydraté puis composté.

Selon Electriganz (2012), l'ajout des boues de fosses septiques permettrait de réduire le besoin en eau pour la dilution, ce dernier étant d'environ 2 900 m<sup>3</sup>/an, dont 80 % proviendrait du digestat liquide et le reste du lixiviat de compostage (si disponible). Par ailleurs, il semblerait possible d'utiliser les installations existantes du CGMR (système DAB et champs de polissage) pour la déshydratation et le traitement du digestat liquide. Ce faisant, le procédé s'intégrerait efficacement dans le système de traitement actuel.

La possibilité de traiter les coproduits marins reste incertaine. Si, d'une part, ils sont considérés comme indispensables par Electriganz pour atteindre une masse critique, d'autre part, ils ne paraissent pas contribuer significativement à la production de biogaz selon les modélisations de Cabana et Lopez (2013). Leur utilisation accentuerait tout de même les problèmes de saisonnalité des volumes à traiter.

Selon les scénarios d'opération choisis et la configuration (1 ou 2 biodigesteurs), il est estimé que le coût d'implantation d'un tel système aux Îles-de-la-Madeleine varierait entre 1,9 et 3,1 M\$ (hors subventions). Les coûts d'exploitation s'établiraient aux alentours de 120 000 dollars par année et génèreraient des revenus de vente d'électricité entre 100 000 et 160 000 dollars par an<sup>6</sup>. Il y aurait également une réduction des dépenses de chauffage du CGMR d'environ 12 000 \$/an<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> Selon le prix de rachat de l'électricité, variant ici entre 150 et 250 \$/MWh.

<sup>7</sup> Économie basée sur la demande actuelle de chauffage du CGMR et la disponibilité de chaleur durant la saison hivernale. Toute l'énergie thermique hivernale peut être utilisée pour chauffer le CGMR.

### 3.3 Coût d'opportunité de l'implantation de la biométhanisation

Si on compare le coût total des scénarios de biométhanisation<sup>8</sup> et de compostage pour le traitement des matières putrescibles aux Îles-de-la-Madeleine sur un horizon de 15 ans, on s'aperçoit que les résultats sont très similaires et se situent à l'intérieur de la marge d'erreur des analyses effectuées par l'Université de Sherbrooke et Electrigaz ( $\pm 30\%$ ) (Durbecq *et al.*, 2013B).

**Tableau 3 : Budget cumulé pour chaque scénario de traitement des MR putrescibles selon le taux d'intérêt de l'emprunt**

Scénarios de traitement des MR putrescibles	Budget cumulé sur 15 ans (M\$) <sup>9</sup>				Coût moyen à la tonne (\$/t) <sup>10</sup>			
	5%	4%	3%	2%	5%	4%	3%	2%
<b>Taux d'intérêt appliqué aux emprunts</b>								
Scénario 1 : <i>Statu quo</i>	18,79	18,79	18,79	18,79	348	348	348	348
Scénario 2 : Investissement au compostage (0,5 M\$) <sup>11</sup>	19,15	19,13	19,11	19,09	355	354	354	353
Scénario 3A :Biométhanisation à 150 \$/MWh	19,82	19,74	19,67	19,59	367	366	364	363
Scénario 3B :Biométhanisation à 200 \$/MWh	19,32	19,24	19,16	19,09	358	356	355	353
Scénario 3C :Biométhanisation à 250 \$/MWh	18,81	18,73	18,66	18,58	348	347	345	344

Note : Des graphiques comparant, sur la période d'étude, le budget annuel de chacun des scénarios (pour chaque taux d'intérêt) sont présentés à l'annexe 1.

Toutefois, quel que soit le prix de vente de l'électricité, le coût de traitement des matières résiduelles par un procédé de biométhanisation (avec valorisation du biogaz par cogénération) semble être supérieur au *statu quo*. Le scénario du compostage avec investissement pour amélioration du système actuel présente un bilan financier généralement similaire à la biométhanisation.

Par ailleurs, bien que l'option de composter le digestat semble être l'option la plus viable sur le plan technique, elle représente une part importante des dépenses annuelles des scénarios de biométhanisation<sup>12</sup>. Un mode de valorisation alternatif pourrait donc rendre cette technologie plus intéressante.

Il est à préciser qu'aucun revenu de vente de crédit carbone n'a été considéré dans cette analyse. Néanmoins, la production de 550 MWh d'électricité à partir de la biométhanisation nous permet d'estimer un **potentiel de réduction de 368 tonnes de CO<sub>2</sub> par année** sur la

<sup>8</sup> Avec un système liquide-continu.

<sup>9</sup> Somme des budgets annuels sur 15 ans

<sup>10</sup> Sur la base du budget cumulé sur 15 ans. Considérant une quantité stable de 3600 t/an de MR putrescibles.

<sup>11</sup> Pour le scénario 2, le montant d'investissement envisagé de 0,5 M\$ pour la mise à niveau des équipements de compostage a été défini de manière arbitraire et n'est basé sur aucune analyse précise de l'état des équipements. Le montant réellement nécessaire à la mise à niveau des installations de compostage pourrait être supérieur ou inférieur à cette estimation dépendamment du mode de compostage envisagé, des équipements...

<sup>12</sup> Pour la première année, les dépenses estimées de déshydratation et compostage sont de 195 000 \$ sur un budget total d'environ 1,1 M\$, soit près de 18 % des dépenses annuelles associées à la gestion des matières résiduelles putrescibles.

base d'un facteur d'émission de 670 g<sub>CO2</sub> pour la centrale Hydro-Québec des Îles-de-la-Madeleine (voir section 2.2).

Finalement, l'opportunité d'implanter un procédé de biométhanisation devrait aussi être considérée à la lumière des nouvelles lignes directrices encadrant les activités de compostage lesquelles exigent de revoir le système de compostage des Îles-de-la-Madeleine (MDDEFP, 2012), comme l'interdiction d'accepter des sacs compostables pour les systèmes de traitement en andains extérieurs.

## 4. LA GAZÉIFICATION AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE (VOLET B ET D)

### 4.1 Le principe de la gazéification au plasma

Le PRRS (Plasma Resource Recovery System) est un procédé de gazéification et de vitrification au plasma développé par la firme PyroGenesis Canada qui permet de valoriser les matières résiduelles (MR) en gaz de synthèse (syngaz), en lingots de métaux et en vitrifiat.

Le syngaz est un combustible qui permet de produire de l'électricité dans un moteur à combustion interne. Les lingots de métaux sont recyclables tandis que le vitrifiat peut être valorisé comme substitut cimentaire ou comme granulat.

Le fonctionnement est divisé en 4 étapes principales (figure 4) : (1) prétraitement des MR pour la réduction de la taille des particules et l'homogénéisation de leur composition, (2) gazéification dans la fournaise, (3) purification du syngaz sortant de la fournaise et (4) valorisation énergétique du syngaz dans un moteur. La composante non gazéifiée des MR est vitrifiée après fusion dans la fournaise.

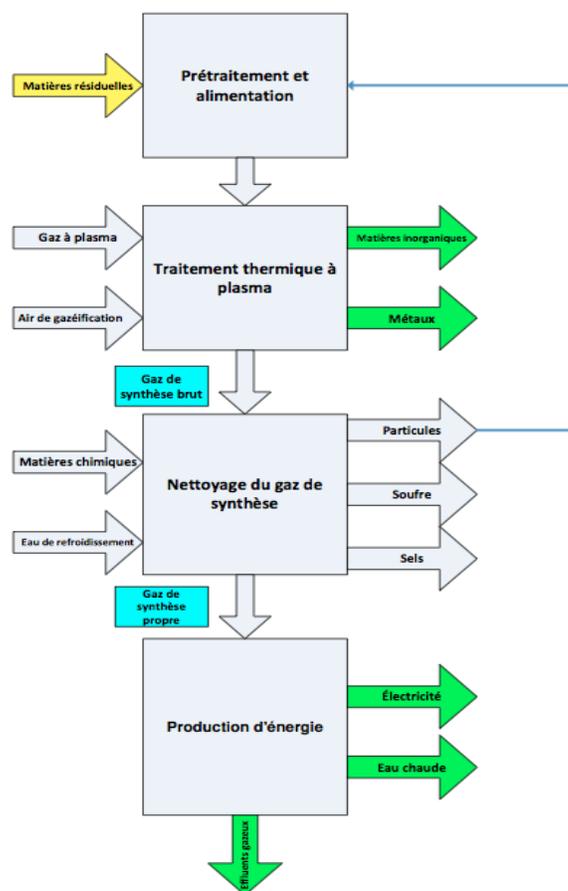


Figure 4 : Principe de la gazéification au plasma (PyroGenesis, 2013)

### 4.2 Le potentiel de la gazéification au plasma aux Îles-de-la-Madeleine

Les Îles-de-la-Madeleine disposent de différentes MR pouvant être traitées par ce procédé, notamment les MR ultimes (4 000 t/an) et les MR sèches (1 200 t/an, dont 800 t/an de bois). Le digestat de biométhanisation et les MR recyclables pourraient être traités également.

Trois scénarios d'étude ont été considérés et modélisés pour la haute et la basse saison, dont chacun représente un regroupement de MR traitées (voir tableau 4). De plus, pour chaque scénario trois options de valorisation énergétique ont été étudiées : (1) moteur seul, (2) moteur plus préchauffage de l'air de gazéification et (3) moteur plus préchauffage de l'air de

gazéification et ajout d'un cycle de Rankine à fluide organique (ORC). Les deux dernières options permettent de récupérer et valoriser la chaleur produite en réduisant le besoin de chauffage et en augmentant la production d'électricité.

Les résultats de modélisation (PyroGenesis, 2012A) suggèrent que la gazéification plasmatisque pourrait être consommatrice ou productrice nette d'électricité selon les scénarios considérés (tableau 4). En plus de sa production électrique, le procédé génère une quantité d'énergie thermique importante qui pourrait être valorisée selon les besoins à proximité. Le scénario permettant la meilleure production électrique est celui de traitement des MR ultimes, sèches et recyclables (scénario 2).

**Tableau 4 : Résultats de la modélisation du fonctionnement d'un procédé de gazéification aux Îles-de-la-Madeleine.**

	Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3	
	MR ultimes, sèches et digestat		MR ultimes, sèches et recyclables		MR ultimes et sèches	
	HS <sup>(i)</sup>	BS <sup>(i)</sup>	HS <sup>(i)</sup>	BS <sup>(i)</sup>	HS <sup>(i)</sup>	BS <sup>(i)</sup>
Taux d'alimentation (t/h)	0,927	0,781	0,936	0,806	0,641	0,601
<b>Production (kg/h)</b>						
Métaux	56	23	72	31	56	23
Vitrifiat	120	161	118	158	70	117
Eau traitée	1 397	1 034	1 519	1 105	1071	813
Impuretés captées	52	45	60	48	41	36
<b>Puissance électrique (kW)</b>						
Moteur à gaz	487	491	741	562	519	406
Récupérée	114	96	128	102	89	77
ORC	0	0	81	81	81	0
<i>Puissance nette délivrée</i>	<i>HS Annuel BS</i>		<i>HS Annuel BS</i>		<i>HS Annuel BS</i>	
<i>Option 1</i>	-205	-160 -70	111	73 -3	-3	-21 -58
<i>Option 2</i>	-74	-36 40	257	209 111	96	74 29
<i>Option 3</i>	-106	-64 22	292	252 170	165	119 26
<b>Puissance thermique (kW)</b>						
T > 80°C (Op. 2 - Op 3)	638-752	662-758	904-952	745-766	704-711	589-666
T < 80°C (Op. 2 - Op 3)	1330-1340	1023-1024	1325-1329	1057-1059	916-917	797-797

Adapté de PyroGenesis (2012A) en appliquant un facteur de disponibilité de 85 % sur les résultats bruts de simulation.  
(i) HS : haute saison (8 mois, avril à novembre). BS : Basse saison (4 mois, décembre à mars).

La production de vitrifiat varie entre 750 et 1 200 tonnes/an selon les scénarios et celle de métal entre 400 et 500 tonnes/an. Une certaine quantité d'impuretés est aussi produite et doit être disposée, tout comme les eaux traitées.

Puisque la scénario de valorisation énergétique des MR recyclables (scénario 2) représente une modification très importante du système de gestion des MR des Îles-de-la-Madeleine, avec des retombées potentiellement importantes sur le plan de l'acceptabilité sociale, il a été convenu, après consultation avec des partenaires municipaux, de privilégier le scénario 3



On estime que la **réduction d'émission de GES pourrait atteindre 2 600 tonnes de CO<sub>2</sub>/an** (PyroGenesis, 2013 – Annexe D), dont la valeur plancher en avril 2013 est estimée à 10 \$/tonne<sup>13</sup>. Cette diminution des émissions pourrait donc se traduire par des revenus.

#### **4.4 Le potentiel de couplage avec la biométhanisation**

Plusieurs options de couplage entre le système de traitement plasmatique et la biométhanisation sont envisageables, dont (i) le traitement du digestat dans la fournaise de gazéification et (ii) la valorisation conjointe du biogaz et du syngaz dans un même moteur.

Dans tous les cas, le couplage de la biométhanisation et de la gazéification au plasma pourrait permettre la réduction de certaines dépenses d'investissement et d'exploitation des infrastructures.

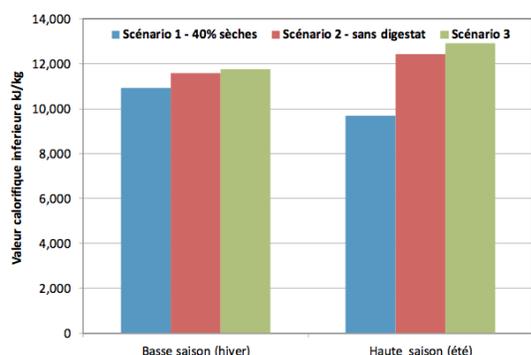
##### **4.4.1 Traitement du digestat par gazéification**

Le digestat de biométhanisation est une matière organique dont le potentiel biométhanogène est épuisé. Toutefois, il peut être gazéifié pour produire du syngaz. L'avantage identifié pour une telle combinaison de procédés est de réduire les dépenses de traitement du digestat tout en maximisant la production de combustible en forme de syngaz.

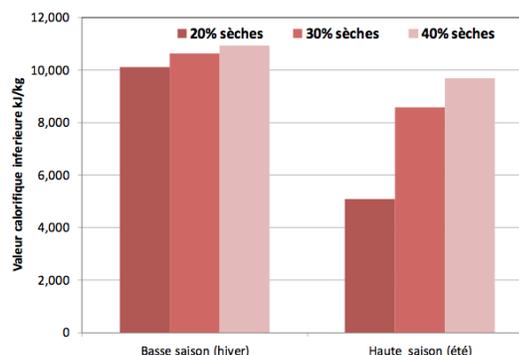
Selon les résultats de modélisation de PyroGenesis, l'énergie requise pour l'évaporation de l'eau contenue dans le digestat rendra le procédé consommateur net d'électricité, alors qu'il est producteur pour les autres scénarios (tableau 4). En effet, la valeur calorifique du mélange entrant dans la gazéification diminue fortement lorsque le digestat est traité, et ce, dépendamment du taux d'humidité (figures 6 et 7). Par ailleurs, un PRRS de plus grande capacité sera nécessaire pour gazéifier le digestat, ce qui représente aussi un coût en capital plus conséquent.

---

<sup>13</sup> Le devoir (2013). Lutte contre les GES, les grands pollueurs doivent s'activer afin de ne pas rater le rendez-vous. [<http://www.ledevoir.com/economie/actualites-economiques/373416/les-grands-pollueurs-doivent-s-activer-afin-de-ne-pas-rater-le-rendez-vous>] [En ligne] (Consulté le 16 avril 2013).



**Figure 6 : Valeur calorifique des intrants selon les différents scénarios**



**Figure 7 : Valeur calorifique des intrants du scénario 1 selon la siccité du digestat**

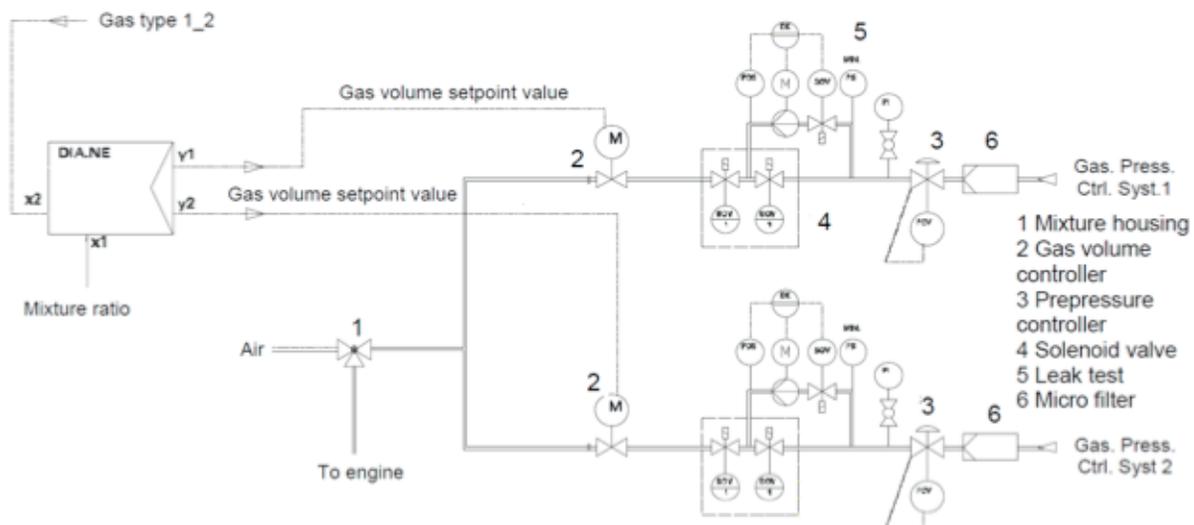
Source : PyroGenesis 2011B – Composition estimée des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine  
 Note : La siccité du digestat est de ~20 % pour les technologies humides et de près de 40% pour les technologies sèches.

Si la gazéification du digestat est techniquement réalisable, sa réalisation dépendra des objectifs de l'utilisateur. Par exemple, si le traitement du digestat est une priorité, car onéreux ou techniquement trop exigeant, et que la production d'électricité ne l'est pas, cette alternative trouverait sa justification.

#### 4.4.2 Valorisation conjointe du syngaz et du biogaz

Le biogaz est un gaz combustible qui peut être valorisé dans un moteur, tout comme le syngaz. L'utilisation conjointe du biogaz et du syngaz est donc intéressante puisqu'elle permet de réduire les coûts en capitaux liés aux équipements de valorisation.

La valorisation conjointe est techniquement réalisable sans coûts ajoutés (PyroGenesis, 2013). En effet, le moteur utilisé par le PRRS peut être modifié pour ajouter un second train d'alimentation permettant la valorisation de biogaz (figure 8).



**Figure 8 : Schéma de contrôle pour un moteur à gaz avec combustible d'appoint**

Source : PyroGenesis, 2013

Ce couplage entraînera toutefois une interdépendance des procédés, chacun devant assurer une stabilité de production. En effet, une instabilité des systèmes couplés pourrait entraîner un arrêt du moteur, des dysfonctionnements des équipements de purification et un envoi à la torchère de tous les combustibles le temps que le système se stabilise de nouveau. Il s'agit ici d'un élément important devant faire l'objet d'une analyse des risques d'une éventuelle installation.

#### 4.5 La valorisation du vitrifiat

La gazéification des matières résiduelles des ÎdM générerait environ 750 t/an de vitrifiat pour le scénario 3 et 1 150 t/an pour les scénarios 1 et 2 (voir tableau 4), et ce, en tenant compte d'un coefficient de disponibilité de 0,85 du système de traitement plasmique. L'équipe de l'Université de Sherbrooke a étudié le potentiel de valorisation de ce vitrifiat selon deux avenues : (i) comme substitut cimentaire (Tagnit-Hamou *et al.*, 2013A) et (ii) comme granulat pour le béton (Tagnit-Hamou *et al.*, 2013B).

Les vitrifiats étudiés provenaient, en partie, de l'usine pilote de PyroGenesis en Floride et, en partie, de l'usine expérimentale de Montréal. Dans ce dernier cas, ils étaient issus de la vitrification des cendres de l'incinérateur de Québec.

#### **4.5.1 La valorisation cimentaire du vitrifiat**

Lorsqu'il a une structure dite amorphe, c'est-à-dire ne présentant aucun réseau cristallin<sup>14</sup>, le vitrifiat peut présenter des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'il peut réagir avec la chaux générée par hydratation du ciment pour former des liants additionnels (C-S-H) dans le béton. Ses caractéristiques chimiques sont alors susceptibles d'en faire un substitut cimentaire adéquat ayant deux avantages principaux : (1) la réduction de la demande en ciment classique (Portland) et (2) l'amélioration de la microstructure et de la densité du béton.

Les travaux de l'équipe de l'Université de Sherbrooke ont été divisés en 3 principales étapes (Tagnit-Hamou *et al.*, 2013B) :

##### **1. Caractérisation physico-chimique des vitrifiats**

Cette étape avait pour objectif de vérifier si le vitrifiat issu du traitement plasmique de MR a les caractéristiques d'un ajout cimentaire. Les analyses chimiques et les tests de réactivité confirment le potentiel du produit.

##### **2. Essai sur mortiers**

Ces essais avaient pour objectif d'étudier le comportement du vitrifiat comme substitut cimentaire ainsi que de tester des mélanges, afin d'identifier des scénarios de valorisation prometteurs. Les résultats suggèrent qu'un taux de substitution de 20 % à 30 % du ciment classique par du vitrifiat pulvérisé permettrait d'obtenir des bétons ayant des performances égales ou supérieures aux bétons classiques.

##### **3. Essais préliminaires sur des bétons**

Les essais préliminaires avaient pour objectifs d'étudier le comportement et les performances, à l'état frais et à l'état durci, des bétons produits avec 20 % ou 30 % de taux de substitution du ciment par du vitrifiat. Les premiers résultats de performances à l'état durci confirment un bon potentiel du vitrifiat, notamment dans les tests de compression du béton et de perméabilité aux chlorures. Toutefois, ce substitut semble ne pas être compatible avec un certain nombre de superplastifiants, en raison d'un trop fort entrainement d'air.

Finalement, le taux de substitution idéal a été identifié comme étant de 20 %.

---

<sup>14</sup> Le vitrifiat amorphe est obtenu à la suite d'une trempe brutale à sa sortie du procédé de gazéification.

#### 4. Études des propriétés mécaniques et de durabilité

Ces essais avaient pour objectifs de définir les performances de béton produit avec un taux de substitution de 20 % dans le but d'en définir le potentiel d'usage (tableau 5).

**Tableau 5 : Résultats des essais de performance du béton avec un taux de substitution cimentaire de 20 % de vitrifiat (Tagnit-Hamou *et al.*, 2013B)**

Essais réalisés	Norme	Performance du béton de vitrifiat
Résistance en compression	ASTM C-39/C39M	Comparable au béton classique
Perméabilité aux chlorures	ASTM C1202-97	Meilleure que le béton classique
Résistance en traction	ASTM C496/C496M	Comparable au béton classique
Résistance en flexion	ASTM C78-02	Comparable au béton classique
Retrait de séchage	ASTM C157M-04	Comparable au béton classique
Résistance au cycle gel/dégel	ASTM C666/C666M-03	Supérieure au minimum requis
Résistance à l'écaillage	ASTM C672/C672M-03	Inférieure au béton classique
Carbonatation		Effet pouzzonaliqum confirmé
Réaction alcalis-silice	CSA A23.2-14A	<i>Aucune conclusion à ce jour</i>
Lixiviation	EAP 1311	Absence de risques confirmée

Les résultats démontrent que le vitrifiat a un fort potentiel de valorisation comme substitut cimentaire puisqu'il apporte des avantages au niveau de la durabilité des bétons. Par ailleurs, les performances de résistance sont généralement comparables aux bétons classiques. Seule la résistance à l'écaillage est inférieure, ceci pouvant être dû à une cinétique d'hydratation plus lente du vitrifiat qui nécessiterait un temps de maturation plus long du béton.

La valorisation du vitrifiat comme substitut cimentaire présente un intérêt additionnel pour l'industrie du béton, qui verrait réduire ses émissions de GES d'environ de **1 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment substituée**. On souligne que l'industrie bétonnière génère environ 5 % des émissions anthropiques de GES à l'échelle planétaire (Tagnit-Hamou *et al.*, 2013B).

##### **4.5.2 La valorisation du vitrifiat comme inclusion granulaire dans du béton**

Lorsque le vitrifiat a une structure cristalline, c'est-à-dire qu'il a été refroidi lentement, ses caractéristiques physicochimiques le rendent apte à en faire un granulats. Ce dernier serait utilisé en substitution aux granulats classiques dans la composition du béton ou de la fondation de routes. Les essais ont été divisés en 2 principales étapes :

##### **1. Caractérisation physicochimique des granulats et classification**

Cette étape avait pour objectif de définir si le vitrifiat a les caractéristiques d'un granulats ainsi que de vérifier l'absence de contre-indications. Les analyses chimiques et les tests de réactivité confirment ce potentiel.

Par ailleurs, la classification vise à caractériser les granulats de vitrifiat selon les normes du Ministère des transports du Québec (MTQ) afin d'en déterminer le potentiel

d'utilisation. Les résultats des essais de Los Angeles (LC 21-400) et de Micro-Deval (LC 21-070) montrent que ce produit a une excellente résistance à l'abrasion et une très bonne résistance aux chocs. Les essais pour la classification (LC 21-100 et LC 21-265) indiquent que ces granulats se classent dans la **catégorie 1a** de la norme du MTQ, ce qui les rend admissibles aux bétons destinés à la construction de routes.

## **2. Étude des propriétés mécaniques et de durabilité des bétons**

Cette étape avait pour objectif de déterminer les performances des bétons incluant des granulats de vitrifiat par rapport à des granulats classiques.

Les tests de performance sont les mêmes que pour la substitution cimentaire (résistances en compression, traction, flexion, aux cycles gel/dégel...), auxquels s'ajoutent diverses mesures propres à ce type de valorisation (résistance à l'abrasion, proportion de granulats vitrifiés...). Toutefois, en raison du court délai de temps pour la réalisation de ces tests, on ne dispose que de résultats préliminaires.

Ces derniers suggèrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les bétons de granulats de vitrifiat et de granulats naturels, laissant entendre un bon potentiel de valorisation comme granulat pour un béton de ciment.

Puisque les normes sur les granulats exigent des périodes d'essais définies (tests au 7, 28, 56 ou 91 jours), ces tests devront être prolongés au-delà de la fin du projet dont ce rapport final fait l'objet.

### **4.5.3 Conclusion**

Les vitrifiats produits par le procédé de gazéification et de vitrification au plasma de PyroGenesis sont un sous-produit ayant un fort potentiel de valorisation dans le secteur de la construction, notamment de l'industrie du béton. Les résultats obtenus par l'équipe de l'Université de Sherbrooke démontrent en effet que ce matériau a des caractéristiques physicochimiques appropriées à la valorisation cimentaire lorsqu'il est amorphe et appropriées à la valorisation granulaire lorsqu'il est cristallin.

Les résultats obtenus suggèrent que des performances comparables à des bétons classiques peuvent être obtenues pour la valorisation cimentaire lorsqu'on applique un taux de substitution de 20 %.

En ce qui concerne la valorisation granulaire du vitrifiat, les résultats préliminaires sont très prometteurs. Toutefois, les tests en cours devront être complétés afin de répondre aux exigences normatives.

#### **4.6 Retombées pour le territoire des Îles-de-la-Madeleine**

La firme PyroGenesis a évalué qu'elles pourraient être les retombées découlant de la réalisation du projet d'acquisition et d'installation d'un procédé de gazéification et vitrification au plasma aux Îles-de-la-Madeleine.

Dans un premier temps, l'installation du procédé génèrerait une activité économique pour l'archipel autant dans les secteurs de la construction (bâtiment, électricité, matières premières, main d'œuvre...) que dans les secteurs économiques adjacents (hôtellerie, restauration...).

Par ailleurs et en phase d'exploitation, le procédé de gazéification génèrerait de l'emploi pour une dizaine d'opérateurs, mais participerait aussi à la consolidation du tissu économique des Îles-de-la-Madeleine en raison des retombées économiques indirectes auprès des sous-traitants pour la maintenance, l'achat d'équipement, le suivi opérationnel et environnemental...

#### **4.7 Coûts d'opportunités associés à l'implantation d'un PRRS aux ÎdM**

##### **4.7.1 Coût d'un PRRS valorisant les MR ultimes et sèches**

Le coût d'achat et d'installation, incluant l'ingénierie, le matériel, l'implantation et la gestion de projet pour un système de traitement plasmique PRRS est de 19,4 M\$ (PyroGenesis, 2013)<sup>15</sup>. Différents programmes de subventions pourraient participer à cet investissement (PyroGenesis - annexe I).

Les frais d'opération et d'entretien de ces équipements s'établiraient à 1,1 M\$ annuellement. Les revenus suivants peuvent être envisagés :

- 46 000 \$/an pour la vente de substitut cimentaire (vitrifiat);
- 26 000 \$/an pour la vente de crédit de carbone (sur une base de 10 \$/tonne CO<sub>2</sub> et un horizon de 20 ans);
- 148 000 \$/an pour la vente de chaleur à d'éventuels clients (à identifier);
- Possibilité de revenu pour la vente d'électricité dont le montant variera selon la production d'électricité excédentaire et son prix de rachat fixé avec Hydro-Québec.

---

<sup>15</sup> L'investissement considère l'ajout d'un ORC (en option à 0,5 M\$) pour maximiser la production d'électricité (voir tableau 4).

Les coûts de traitement reliés à l'implantation d'un système de gazéification ont été comparés au système actuel (exportation et enfouissement) selon divers scénarios. La méthodologie utilisée est inspirée de celle établie en collaboration avec la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Durbecq et al., 2013B). Les résultats sont présentés au tableau 6 pour les scénarios suivants, qui tiennent compte du taux d'inflation de 2012 (2,1 %) :

- Scénarios d'exportation des MR :
  - 1A : *Statu quo*
  - 1B : *Statu quo* + exportation des MR sèches
  - 2A : *Statu quo* avec augmentation du prix de 33 %<sup>16</sup>
  - 2B : *Statu quo* avec augmentation du prix de 33 % + exportation des MR sèches
- Scénarios de traitement local des MR par gazéification plasmatisée :
  - 3A : 50 % de subvention et prix de l'électricité de 150 \$/MWh
  - 3B : 50 % de subvention et prix de l'électricité de 200 \$/MWh
  - 3C : 50 % de subvention et prix de l'électricité de 250 \$/MWh
  - 4A : 80 % de subvention et prix de l'électricité de 150 \$/MWh
  - 4B : 80 % de subvention et prix de l'électricité de 200 \$/MWh
  - 4C : 80 % de subvention et prix de l'électricité de 250 \$/MWh

**Tableau 6 : Scénarios de traitement évalués pour l'analyse d'opportunité économique selon le taux d'intérêt de l'emprunt.**

		Scénarios d'exportation				Scénarios de gazéification plasmatisée					
		1A	1B	2A	2B	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Taux de subvention	%					50	50	50	80	80	80
Matières traitées	Déchets	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	MR sèches	-	x	-	x	x	x	x	x	x	x
Prix de l'exportation	\$/t	123	123	165	165	-	-	-	-	-	-
Valeur de l'électricité vendue	\$/MWh	-	-	-	-	150	200	250	150	200	250
<b>Budget cumulatif sur 15 ans (hors taxes)</b>											
Taux d'intérêt de 5 %	M\$	33,0	35,6	34,6	38,1	46,1	45,0	43,9	37,7	36,6	35,5
Taux d'intérêt de 4 %						45,1	44,1	43,0	37,3	36,2	35,2
Taux d'intérêt de 3 %						44,2	43,2	42,1	36,9	35,9	34,8
Taux d'intérêt de 2 %						43,4	42,3	41,2	36,6	35,5	34,5
<b>Coût annuel moyen à la tonne</b>											
Taux d'intérêt de 5 %	\$/t	512	431	537	461	558	546	533	456	444	431
Taux d'intérêt de 4 %						547	535	521	452	439	426
Taux d'intérêt de 3 %						536	523	510	448	435	422
Taux d'intérêt de 2 %						526	513	500	443	430	418

Note : Des graphiques comparant, sur la période d'étude, le budget annuel de chacun des scénarios (pour chaque taux d'intérêt) sont présentés à l'annexe 2.

<sup>16</sup> Le facteur de 33 % d'augmentation du prix de l'exportation est basé sur les résultats de l'étude réalisée par M. Jean Hubert en 2007 concernant le futur du système de traitement des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine. Ces travaux avaient démontrés que le prix moyen pour l'élimination des matières résiduelles dans les sites d'enfouissement du Québec et des maritimes était 33 % plus élevé que le prix négocié par la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine pour son contrat d'exportation.

Les résultats suggèrent que l'avantage économique d'un scénario de valorisation par gazéification et vitrification au plasma pour la Municipalité dépend de la fraction subventionnée du financement ainsi que du prix négocié avec Hydro-Québec pour l'électricité.

Comparativement au *statu quo* (scénario 1A), la gazéification sera toujours significativement plus onéreuse. En considérant l'exportation des MR sèches (scénario 1B), seul un scénario de gazéification est compétitif (4C). Dans le cas où les dépenses liées à l'exportation venaient à augmenter (scénarios 2A et 2B), l'option de la gazéification pourrait devenir compétitive en cas de financement par subvention à 80 %. Avec un taux de subvention de 50 %, la gazéification sera toujours plus onéreuse que tous les scénarios d'exportation des MR.

Il est à préciser que cette analyse n'a pas considéré de revenu de vente de chaleur, mais seulement la valorisation d'une partie de la chaleur pour le chauffage du CGMR, car aucune usine ne se trouve actuellement en proximité de ce dernier. Pourtant, une telle valorisation pourrait réduire le désavantage financier de la gazéification, par exemple dans l'éventualité du développement d'un réseau de chaleur dans un parc industriel autour du CGMR.

Dans tous les cas, le PRRS permettrait d'atteindre un taux de détournement des MR record de près de 90 %. Aucune augmentation des redevances gouvernementales qui valoriserait cette performance de détournement de l'enfouissement n'a été considérée.

#### **4.7.2 Coûts d'un PRRS valorisant les MR ultimes, sèches et recyclables**

Pour le scénario de valorisation des matières résiduelles ultimes et recyclables, le montant à investir pour l'achat et l'installation des équipements a été estimé par PyroGenesis de manière sommaire. Le coût d'achat et d'installation, incluant l'ingénierie, le matériel, l'implantation et la gestion de projet pour un système de traitement plasmique PRRS est de 20,6 M\$ (PyroGenesis, 2013). Les programmes de subventions pourraient participer à cet investissement (annexe I). L'évaluation économique est basée sur l'option énergétique # 2 (tableau 4). L'ajout d'un ORC ferait augmenter légèrement le coût total de l'investissement mais permettrait de générer des revenus d'électricité plus importants.

Les coûts d'opération et d'entretien de ces équipements sont estimés à 1,2 M\$ annuellement. Les revenus envisagés pour la vente de substitut cimentaire (vitrifiat) sont évalués à 78 000 \$ par an. Le procédé générerait de plus de l'électricité (210 kW) dont le revenu de vente varierait selon le prix de rachat de l'électricité négocié avec Hydro-Québec.

Les coûts de traitement liés à l'implantation d'un système de gazéification valorisant les matières recyclables ont été comparés au système actuel (exportation et enfouissement) en

adaptant la méthodologie, les scénarios, les données et les résultats de l'analyse financière, réalisés en collaboration avec la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Durbecq et al., 2013B). Les résultats sont présentés au tableau 7. Ils tiennent compte du taux d'inflation moyen des trois dernières années (2,1 %).

**Tableau 7 : Scénarios de traitement évalués pour l'analyse d'opportunité économique (incluant les recyclables) selon le taux d'intérêt**

		Scénarios d'exportation				Scénarios de gazéification plasmatisque						
		1A	1B	2A	2B	3A	3B	3C	4A	4B	4C	
Taux de subvention	%					50	50	50	80	80	80	
Matières traitées	Déchets	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Recyclables	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	MR sèches	-	x	-	x	x	x	x	x	x	x	
Prix de l'exportation	\$/t	123	123	165	165	-	-	-	-	-	-	
Valeur de l'électricité vendue	\$/MWh	-	-	-	-	150	200	250	150	200	250	
<b>Budget cumulatif sur 15 ans (hors taxes)</b>												
Taux d'intérêt de 5 %		M\$	46,8	49,4	48,4	51,9	54,7	53,1	51,5	45,7	44,1	42,5
Taux d'intérêt de 4 %							53,7	52,1	50,5	45,3	43,7	42,1
Taux d'intérêt de 3 %							52,7	51,1	49,5	44,9	43,3	41,7
Taux d'intérêt de 2 %							51,8	50,2	48,6	44,6	43,6	41,4
<b>Coût annuel moyen à la tonne</b>												
Taux d'intérêt de 5 %		\$/t	495	439	512	461	486	472	457	406	392	378
Taux d'intérêt de 4 %							477	463	449	403	389	374
Taux d'intérêt de 3 %							469	454	440	399	385	371
Taux d'intérêt de 2 %							460	446	432	396	382	368

Note : Des graphiques comparant, sur la période d'étude, le budget annuel de chacun des scénarios (pour chaque taux d'intérêt) sont présentés à l'annexe 3.

Comme précédemment, les résultats suggèrent que l'avantage économique d'un scénario de valorisation par gazéification et vitrification au plasma pour la Municipalité dépend de la fraction subventionnée du financement ainsi que du prix négocié avec Hydro-Québec pour la revente d'électricité.

Les résultats préliminaires suggèrent que l'implantation d'un procédé de valorisation des matières résiduelles ultimes, recyclables et sèches aurait un impact positif sur le budget annuel de gestion des matières résiduelles de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine lorsque le taux de subvention de 80 % s'applique. Avec un taux d'intérêt de 5 % et un tarif de rachat de l'électricité de 250 \$/MWh, la gazéification permettrait de faire des économies de près de 4 M\$ sur 15 ans comparativement au *statu quo* (scénario 1), et de 7 M\$ comparativement avec le scénario d'exportation des MR sèches (scénario 2). Bien sûr, les économies pourraient être plus importantes avec des taux d'intérêt inférieurs.

Il est important d'ajouter que les dépenses associées à la collecte sélective des recyclables (224 000 \$/an) sont conservées dans le cadre de cette modélisation économique, tout comme la compensation gouvernementale qui y est attachée (210 000 \$/an).

Les mêmes considérations que dans le cas décrit à la section 4.6.1 s'appliquent au sujet de la disponibilité de chaleur.

Pour conclure, la gazéification des MR recyclables permet de réaliser des économies financières dans des conditions de subventions précises (80 %). La décision de valoriser les matières résiduelles recyclables est toutefois contraire au principe des 3RV bien qu'elle pourrait être justifiée par une analyse de cycle de vie. Une telle décision engendrerait tout de même un tournant important dans la gestion des MR des Îles-de-la-Madeleine.

## **4.8 Étude de la maturité du PRRS**

L'acquisition et l'exploitation d'un procédé de valorisation des matières résiduelles représentent un engagement financier important pour une petite municipalité. C'est pourquoi il est nécessaire de s'assurer au préalable du niveau de développement de la technologie en question ainsi que de sa conformité avec les réglementations en vigueur. Ces deux points ont fait l'objet d'une analyse et sont synthétisés dans les sections suivantes (Durbecq *et al.*, 2013A).

### **4.8.1 Aspects technologiques**

L'étude du fonctionnement et des performances du PRRS s'est basée sur (i) les rapports de production de l'usine pilote de PyroGenesis située dans la base militaire de Hurlburt Field, en Floride, couvrant la période entre le 15 janvier et le 14 octobre 2011, ainsi que sur (ii) les résultats obtenus durant des essais pilotes réalisés en août 2011. Cette usine représente une version améliorée de l'usine expérimentale que PyroGenesis possède dans ses installations à Montréal. Il est aussi à préciser que le système préconisé pour les Îles-de-la-Madeleine constituerait une version améliorée de l'usine pilote en Floride.

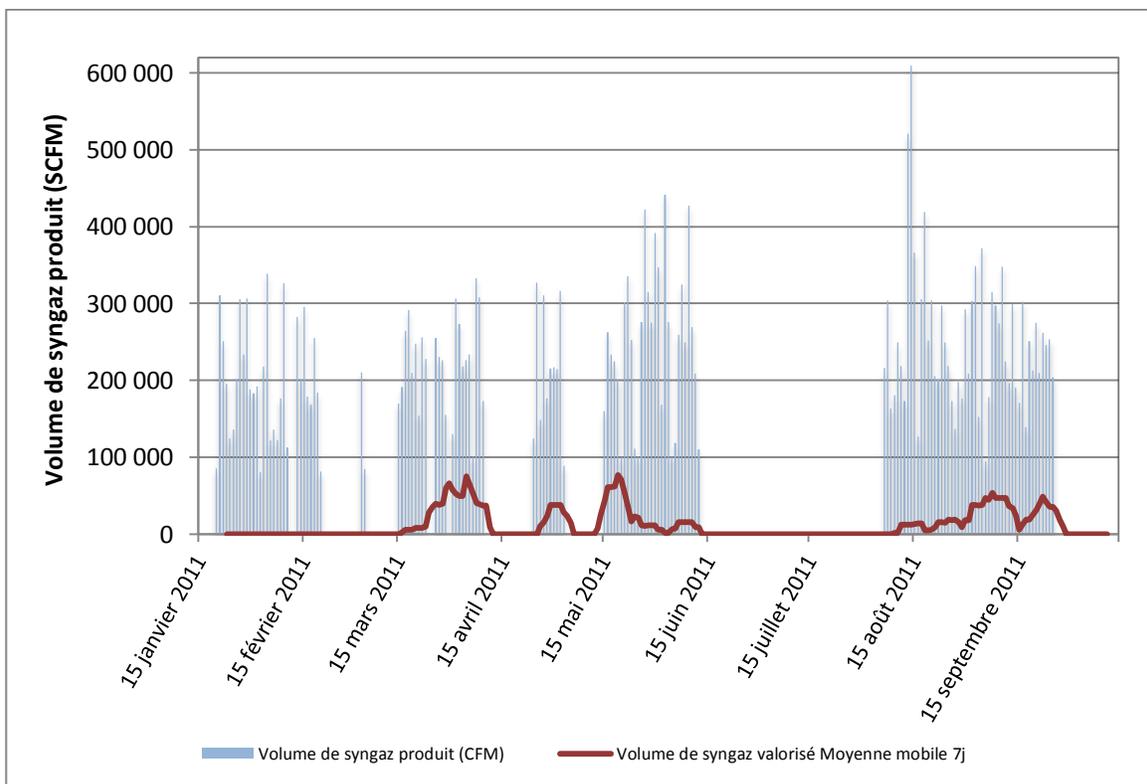
Les informations rassemblées semble démontrer que le processus de gazéification se déroulant dans la fournaise et à la torche est globalement fonctionnel, produit un syngaz de qualité stable et n'est pas sujet à des dysfonctionnements importants.

Toutefois, ces informations suggèrent aussi que les unités de prétraitement (en amont) et d'épuration du syngaz (en aval) peuvent occasionner des arrêts de l'alimentation du système. Bien que ces arrêts puissent être dus à des blocages sans complexité technique, la principale

source d'arrêt semble être l'entraînement de particules qui finissent par colmater les équipements d'épuration et nécessitent une maintenance plus importante que prévu. Pour cette raison, PyroGenesis envisage de résoudre ce problème en ajoutant un capteur de particules (cyclone) entre la fournaise et la torchère dans l'éventuelle installation aux Îles-de-la-Madeleine.

Par ailleurs, l'ensemble des résultats de l'étude ne permet pas de démontrer la capacité du procédé à être électriquement autosuffisant, puisque le syngaz produit pendant la période d'analyse a été majoritairement brûlé à la torchère (figure 9). D'après les informations fournies par PyroGenesis, un trop faible approvisionnement en déchets pourrait être à l'origine de cette sous-utilisation observée du moteur qui ne fonctionnait pas dans sa plage de fonctionnement nominale.

La dépendance électrique du PRRS pourrait rendre le procédé vulnérable en cas de pannes de courant électrique.



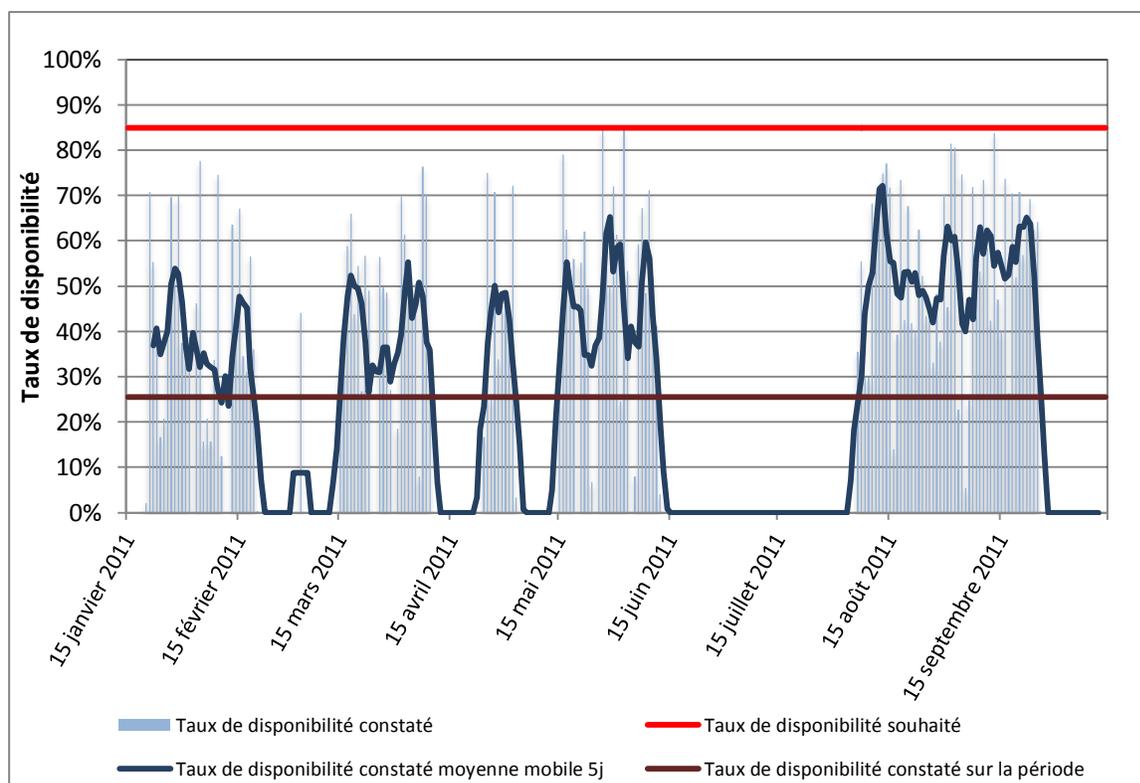
**Figure 9 : Variations du volume de syngaz produit par le PRRS et moyenne mobile du volume de syngaz valorisé**  
 Note : les essais pilotes se sont déroulés les 24 et 25 août 2011

Le taux de disponibilité correspond à la proportion d'heures durant lesquelles le procédé est alimenté. PyroGenesis a pour cible une alimentation de son procédé durant 85 % du temps, le restant du temps étant dévolu à la maintenance. Toutefois, le taux de disponibilité constaté a été de 23 % sur l'ensemble de la période analysée et a varié entre 25 % et 70 % pendant les différentes périodes de fonctionnement (figure 10). Ce faible taux de disponibilité a été dû à : (i) un manque de déchets qui a causé une discontinuité de l'alimentation, (ii) des causes inhérentes au procédé (p. ex. défaillances du système d'alimentation et du système d'épuration du syngaz) et (iii) d'autres causes externes.

De plus, le nombre de jours de fonctionnement sur la période étudiée, indépendamment du nombre d'heures d'alimentation par jour, a été de 58 % au lieu de 85 %, la différence entre le temps de fonctionnement réel (58 %) et ciblé (85 %) étant due à des problèmes imprévus externes (p. ex. coupures d'électricité à la base militaire).

Ces conditions de fonctionnement pendant la période analysée ne permettent donc pas de bien évaluer la maturité technologique du PRRS.

Finalement, on observe aussi une tendance à l'augmentation du taux de disponibilité au fil des mois de la période analysée (figure 10), qui serait en partie expliquée par des améliorations apportées par PyroGenesis à son procédé.



**Figure 10 : Taux de disponibilité horaire entre le 15 janvier et le 14 octobre 2011**

En conclusion, l'information disponible sur la performance de fonctionnement du PRRS de PyroGenesis en Floride peut difficilement être interprétée pour les raisons citées qui n'ont jamais permis une exploitation du procédé à sa capacité nominale.

Seul un ultérieur test pilote d'une durée relativement prolongée (2-3 mois) sur le procédé fonctionnant à son régime nominal pourrait prouver la maturité technologique du PRRS.

#### **4.8.2 Aspects réglementaires**

##### Réglementation applicable

Le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (L.R.Q., c. Q-2, a. 31, 53, 109.1, 124.0.1 et 124.1) définit les normes d'émissions pour l'incinération (Chapitre VII) et les moteurs fixes (Chapitre V). Ces deux chapitres pourraient s'appliquer à un procédé de gazéification de matières résiduelles valorisant son syngaz dans un moteur. Suite à la préparation et au dépôt d'un argumentaire produit par le CERMIM (Durbecq et Tita, 2012), il a été précisé par le MDDEFP que les deux chapitres s'appliquent conjointement, le critère le plus permissif étant celui appliqué en cas de double réglementation sur un paramètre.

### Résultats d'analyses

Les mesures des émissions atmosphériques du PRRS de Floride devaient permettre de déterminer clairement si le procédé de PyroGenesis couplé à un moteur respecte la réglementation lorsqu'il fonctionne dans des conditions similaires à celles qu'il rencontrerait aux Îles-de-la-Madeleine. Pour réaliser cette validation, le CERMIM avait mandaté une firme spécialisée, Environmental Source Samplers (ESS) qui devait collecter et analyser les échantillons des émissions atmosphériques produites par l'unité de valorisation énergétique (moteur) du PRRS. Les problèmes techniques survenus n'ont pas permis d'atteindre cet objectif puisque le MDDEFP a jugé le résultat de ces mesures non représentatif pour une demande de certificat d'autorisation (Durbecq *et al.*, 2013A).

Toutefois, et en vertu des résultats disponibles, qu'elles soient produits par ESS ou transférés par PyroGenesis (tableau 8), il semble que les émissions atmosphériques à la torchère et au moteur respectent la réglementation pertinente, à l'exception du monoxyde de carbone (CO) qui dépasse la réglementation applicable à un moteur fixe d'une puissance nominale inférieure à 1 MW. Ce dépassement pourrait être dû au fait que les campagnes de tests n'ont jamais été réalisées dans des conditions optimales de fonctionnement (plein régime) et c'est pourquoi il est nécessaire de valider ultérieurement les émissions de CO lors d'un test pilote ultérieur.

**Tableau 8 : Récapitulatif des résultats d'échantillonnage sur le PRRS**

Sous-traitant	Point d'échantillonnage	Particules	HCl	SO <sub>2</sub>	PCDD-F	Mercure	CO	NOx	
		mg/dscm @11% O <sub>2</sub>					g/MJ		
ESS <sup>17</sup>	Moteur	8,16	0,19	7,13	-	0,00045	-	0,92	0,2
CSA <sup>18</sup>	Moteur	-	-	-	-	-	-	1,26	0,13
BodyCote <sup>19</sup>	Torchère	3,50	0,33	18	-	0,001	36	-	-
Règlement (moteur) <sup>(a)</sup>		20	50	150	0,08	0,02	-	0,65 <sup>(c)</sup>	2,2 <sup>(c)</sup>
Règlement (torchère) <sup>(b)</sup>		20	50	150	0,08	0,02	57	-	-

Adapté des résultats des campagnes d'échantillonnage réalisées pour le CERMIM ou fournies par PyroGenesis.

(a) Chapitre V et Chapitre VII (b) Chapitre VII (c). Pour une puissance inférieure à 1 MW

Finalement, les émissions de dioxines et furannes (PCDD-F) n'ont jamais été mesurées sur un PRRS couplé à un moteur. Cependant, des éléments théoriques basés sur des études scientifiques et sur les spécifications des équipements du PRRS amènent les auteurs à croire que les émissions de dioxines et furannes d'un procédé de gazéification et vitrification au plasma n'excèderaient pas la réglementation en vigueur au Québec (Durbecq *et al.*, 2013A).

<sup>17</sup> ESS : Environmental Source Samplers. Firma mandatée par le CERMIM en aout 2011.

<sup>18</sup> CSA : Custom Stack Analysis. Firma mandatée par PyroGenesis en mai 2011.

<sup>19</sup> BodyCote. Firma mandatée par PyroGenesis en novembre 2003.

D'ailleurs, les émissions de dioxines et furannes du procédé plasmatique PAWDS de PyroGenesis sont inférieures à la limite de la réglementation applicable, et ce, alors que ce procédé utilise le même équipement que le PRRS pour éviter la formation de PCDD et de PCDF (*quench*).

## 5. CONCLUSION

---

Ce projet a eu pour objectif d'étudier la faisabilité de coupler deux technologies de valorisation des matières résiduelles afin d'atteindre un taux de valorisation record aux Îles-de-la-Madeleine. De plus, il visait à évaluer la faisabilité de valoriser les vitrifiats produits par le procédé de gazéification et vitrification en forme de substituts cimentaires ou de granulats pour la construction.

Après une étude de contexte (Thibodeau *et al.*, 2011), une caractérisation des matières résiduelles (Roche, 2011 A et B; Durbecq *et al.*, 2012) et une étude des tendances futures de la production des matières résiduelles (Durbecq *et al.*, 2012), le cadre global de la gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine est maintenant très bien connu. Les connaissances générées constituent une aide importante à la prise de décision éclairée pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine.

Une étude technico-économique a permis d'évaluer la viabilité et les options du traitement des MR par un couplage de la biométhanisation et la gazéification et vitrification au plasma. Les résultats de cette étude suggèrent qu'un couplage des combustibles (biogaz et syngaz) est possible et que la gazéification du digestat (résidu de la biométhanisation) est techniquement faisable, mais avec un effet négatif sur le potentiel de production électrique. De plus, les résultats suggèrent qu'un traitement plasmatique des déchets et des recyclables permettrait de générer des économies importantes sur un horizon de 15 ans, mais qu'un traitement des déchets uniquement (sans les matières recyclables) aurait un coût pour la Municipalité.

Les travaux ont aussi permis d'évaluer la puissance nominale de la production électrique des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine, qui serait d'environ 50 kW pour la biométhanisation et de près de 250 kW pour la gazéification. Cette production d'énergie verte permettrait de générer des crédits de carbone puisqu'elle diminuerait la production de la centrale thermique d'Hydro-Québec.

De plus, ce projet a aussi permis d'identifier, analyser et évaluer deux filières de valorisation du vitrifiat issu du traitement plasmatique développé par PyroGenesis sous forme de substitution cimentaire et de substitution granulaire dans le béton. Les résultats confirment un bon potentiel de ce produit, ce qui permet d'en faire un coproduit à valeur ajoutée.

Finalement, les travaux réalisés dans le cadre de ce projet permettent de statuer sur la réglementation applicable aux émissions atmosphériques d'un PRRS au Québec. L'évaluation de la performance et de la maturité technologique du procédé n'a toutefois pas pu être

complétée avec les données disponibles. Seul un test pilote d'une durée relativement prolongée (2-3 mois) sur un procédé fonctionnant à son régime nominal permettrait de démontrer cette maturité technologique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

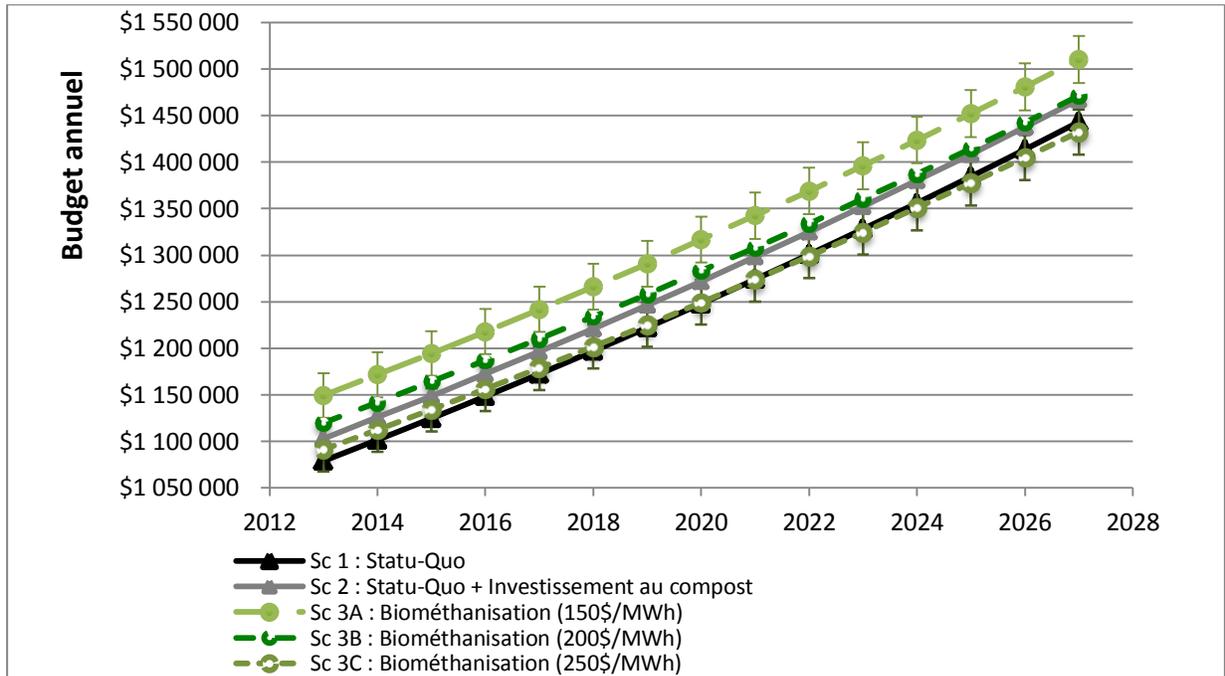
---

- Amarante J. (2010). *Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux – Technologies disponibles et enjeux pour le Québec*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec). viii, 74 p. + annexes
- Cabana H. et Lopez D. (2013). *Gestion intégrée des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine. Analyse technico-économique préliminaire visant l'implantation d'un système de biométhanisation aux Îles-de-la-Madeleine*. Université de Sherbrooke (Québec). 52 p. + annexes.
- Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM) (2010). *Gestion intégrée des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine, Plan d'action 2010-2014*. Îles-de-la-Madeleine, 18 p.
- Durbecq T., Thibodeau M., Hubert J. et Tita G. (2012). *Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : profil quantitatif et caractéristique*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine, xiii, 68 p. + annexes.
- Durbecq T. et Tita G. (2012). *Argumentaire pour la continuité du projet sur la gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine, 9 p. + annexes.
- Durbecq T., Tagnit-Hamou A. et Tita G. (2013A). *Évaluation du fonctionnement du procédé PRRS développé par PyroGenesis Canada*, Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine, 51 p.
- Durbecq T., Hubert J. et Hubert D. (2013B). *Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : Portrait économique*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine, v, 32 p. + annexes.
- Electrigaz (2012). *Évaluation préliminaire de deux scénarios de digestion anaérobie (sèche et humide)*. v, 31 p. + annexes.
- Environmental Source Samplers (2011). *Plasma gasification waste to energy facility – Air emissions test report*, iii, 13 p. + annexes.
- Hubert J. (2007). *À l'heure des choix de traitement de NOS matières résiduelles*. Rapport d'étude, Analyse et recommandations, Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Îles-de-la-Madeleine, 50 p. + annexes.
- MAPAQ (2012). *Guide de recyclage des matières résiduelles fertilisantes*. Gouvernement du Québec, x, 101 p. + annexes.
- MDDEFP (2012). *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostages*. Gouvernement du Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 52 p. + annexes.
- MDDEFP (2013). *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage (phase 2) 2012-2019*. Gouvernement du Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- Moletta R. (2008). *La méthanisation*. Editions TEC&DOC Lavoisier, 525 p. + annexes

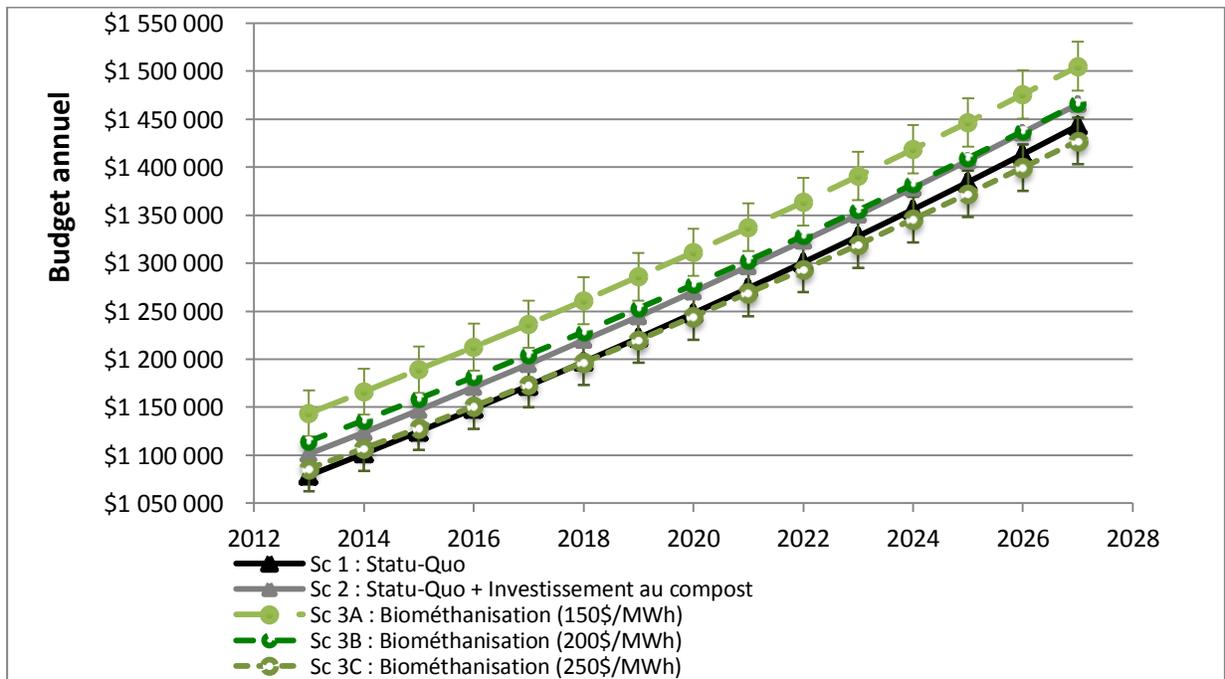
- PyroGenesis Canada (2011A). *TPWES- Technical report (TR-2011-151)*, 64 p. + annexes.
- PyroGenesis Canada (2011B). *Composition estimée des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine (TR-2011-129)*, 15 p.
- PyroGenesis Canada (2011C). *Procédure pour tests d'émissions (TM-2011-160)*, 4 p.
- PyroGenesis Canada (2011D). *Rapport sur les tests d'émissions du 24, 25 et 26 aout 2011 (TR-2011-130)*, 16 p.
- PyroGenesis Canada (2012A). *Les résultats des simulations PRRS pour différents scénarios d'alimentation (TR-2012-216)*, 19 p. + annexes.
- PyroGenesis Canada. (2012B) *Émissions de dioxines et furannes du PRRS (TR-2012-224)*, 7 p.
- PyroGenesis Canada. (2013) *Rapport final (TR-2012-225)*, 88 p. + annexes.
- Annexe A : Détail de l'équipement PRR*
  - Annexe B : Horaire du projet*
  - Annexe C : Diagramme d'écoulements (Process flow diagram)*
  - Annexe D : Réductions des émissions de CO<sub>2</sub>*
  - Annexe E : Scénarios de gestion des matières résiduelles*
  - Annexe F : Valorisation du vitrifiat*
  - Annexe G : Plan d'installation*
  - Annexe H : Rapport sur les émissions de dioxines et furannes du PRRS*
  - Annexe I : Crédits d'impôts pour entreprise privée exploitant le PRRS*
- Roche (2011A). *Étude de la caractérisation des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine – Avril 2011*. Roche (Québec). 18 p. + annexes.
- Roche (2011B). *Étude de la caractérisation des matières résiduelles des Îles-de-la-Madeleine – Décembre 2011*. Roche (Québec). 17 p. + annexes.
- Tagnit-Hamou A. et Harbec D. (2013A). *Gestion intégrée des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : Valorisation du vitrifiat amorphe provenant de la gazéification par plasma des déchets non-biodégradables dans les matériaux cimentaires*. Université de Sherbrooke (Québec). 47 pages.
- Tagnit-Hamou A., Harbec D., Yahia A. et Muraz L. (2013B). *Gestion intégrée des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : Valorisation du vitrifiat cristallin provenant de la gazéification par plasma des déchets non-biodégradables dans les matériaux cimentaires*. Université de Sherbrooke (Québec). 31 p. + annexes.
- Thibodeau M., DURBECQ T., Tita G. et Hubert J. (2011). *Gestion des matières résiduelles aux Îles-de-la-Madeleine : État de la situation et perspectives de développement*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine, viii, 79 p. + annexes.
- Thibodeau M., Potiez L. et Harnad J. (2013). *Inventaire 2010 des émissions de GES du Centre de gestion des matières résiduelles de Havre-aux-Maisons*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine, vi, 42 p. + annexes.

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Coût d'opportunité de la biométhanisation des MR putrescibles**



**Figure 1-1 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des MR putrescibles avec un taux d'intérêt de 5 % et d'un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération**



**Figure 1-2 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des MR putrescibles avec un taux d'intérêt de l'emprunt de 4 % et d'un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération**

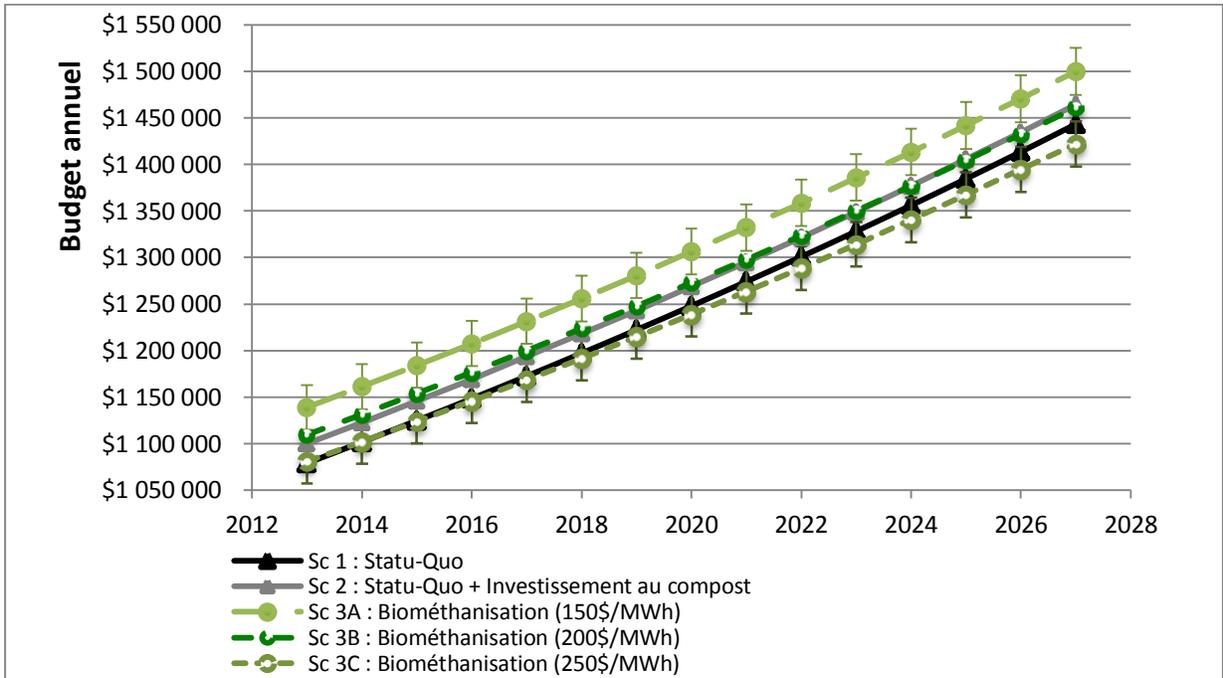


Figure 1-3 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des MR putrescibles avec un taux d'intérêt de 3 % et d'un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

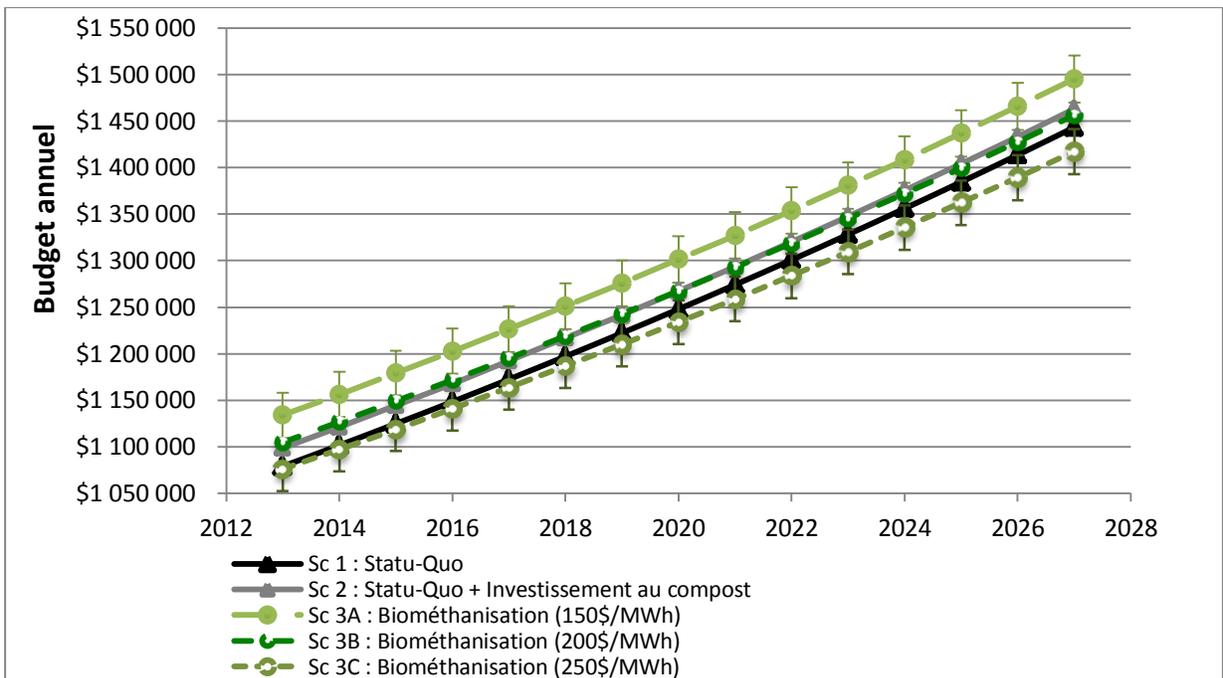


Figure 1-4 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des MR putrescibles avec un taux d'intérêt de 2 % et d'un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

## Annexe 2 : Coût d'opportunité de la gazéification des MR ultimes et sèches

Les modélisations se basent sur l'option énergétique 3 (voir tableau 4).

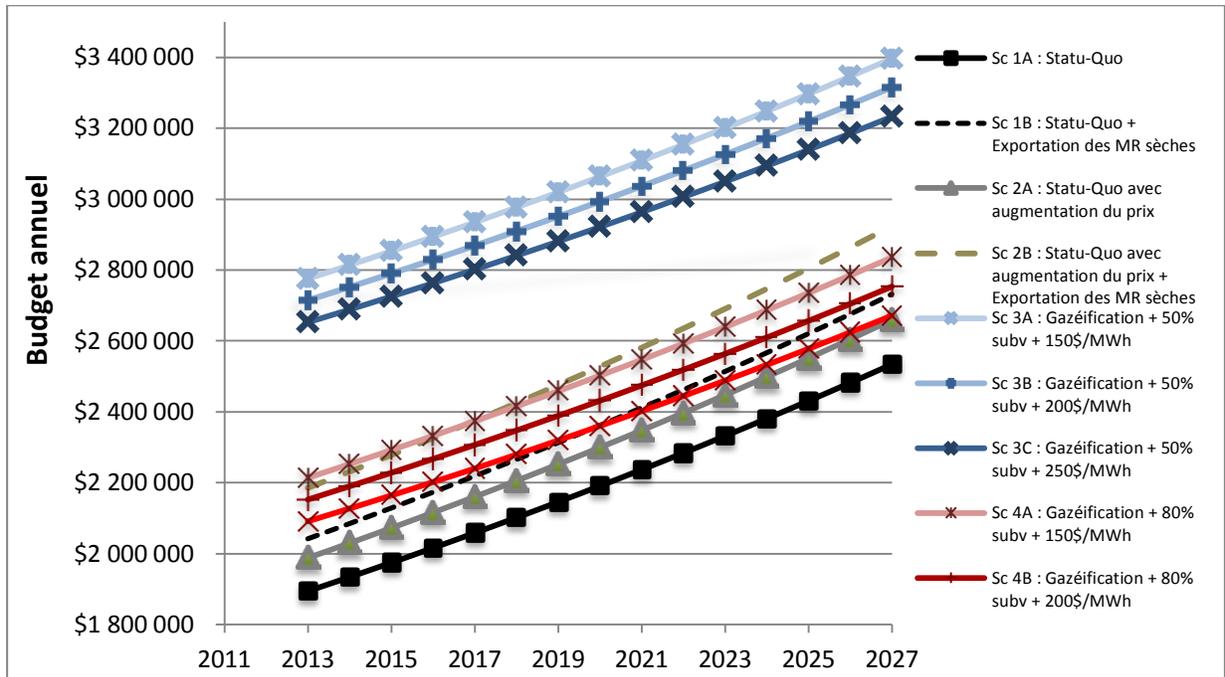


Figure 2-1 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets avec un taux d'intérêt de 5 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

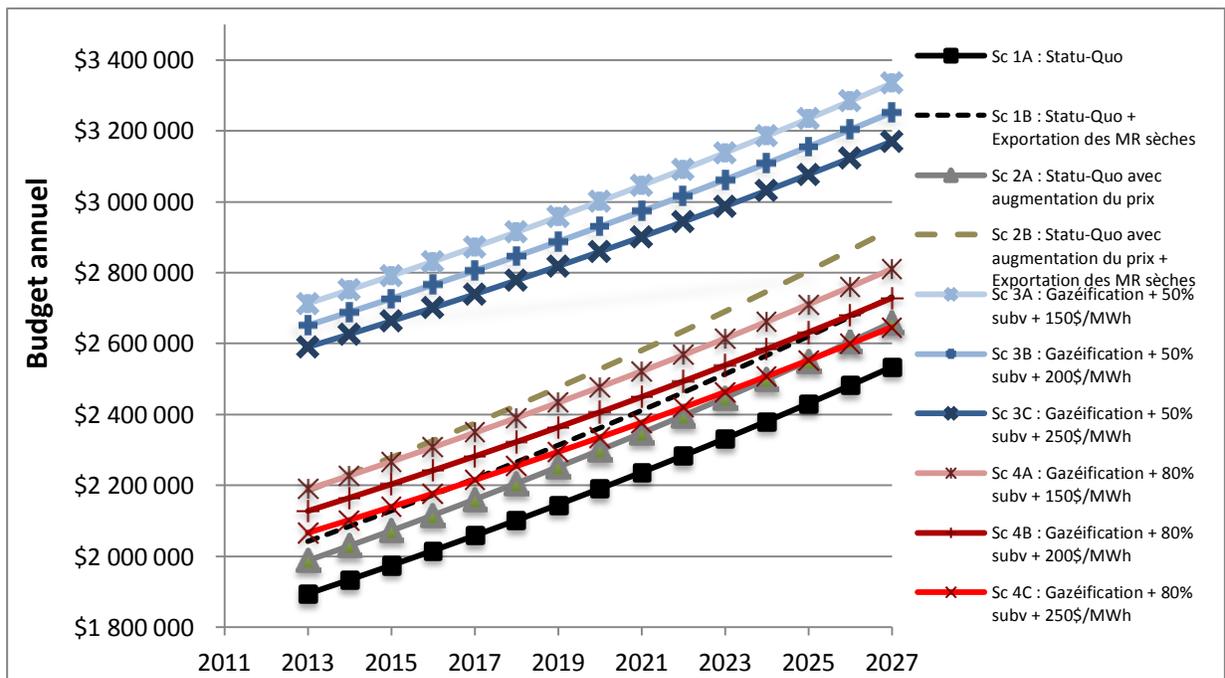


Figure 2-2 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets avec un taux d'intérêt de 4 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

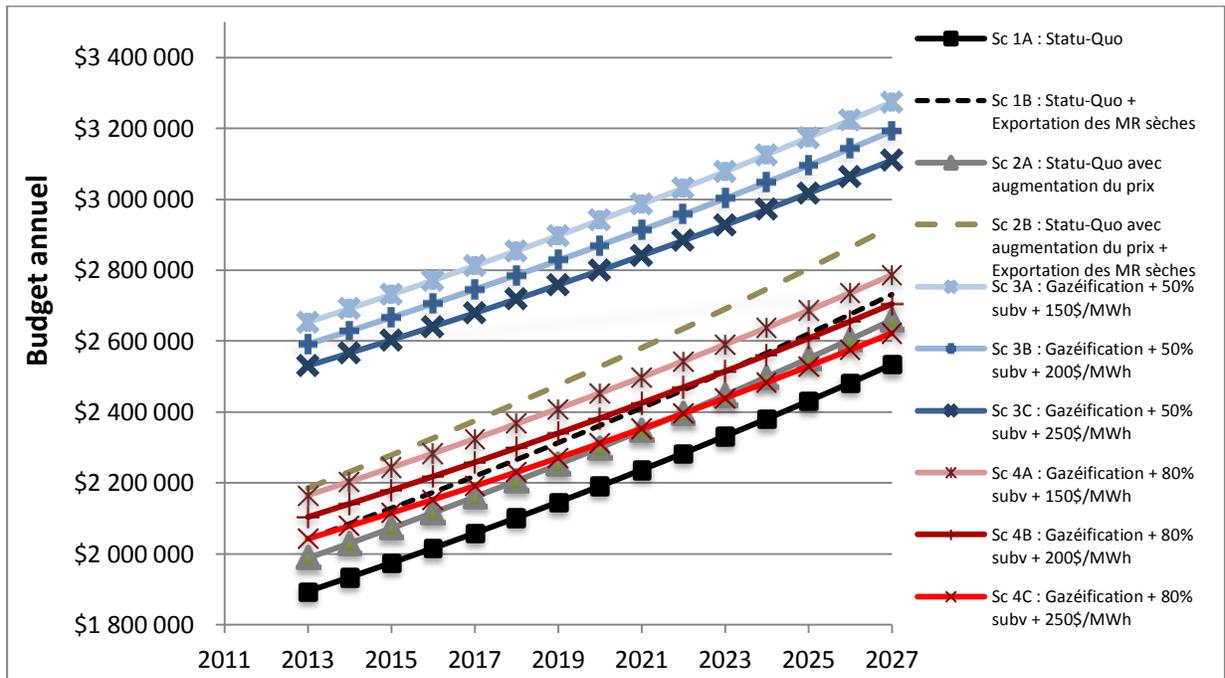


Figure 2-3 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets avec un taux d'intérêt de 3 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

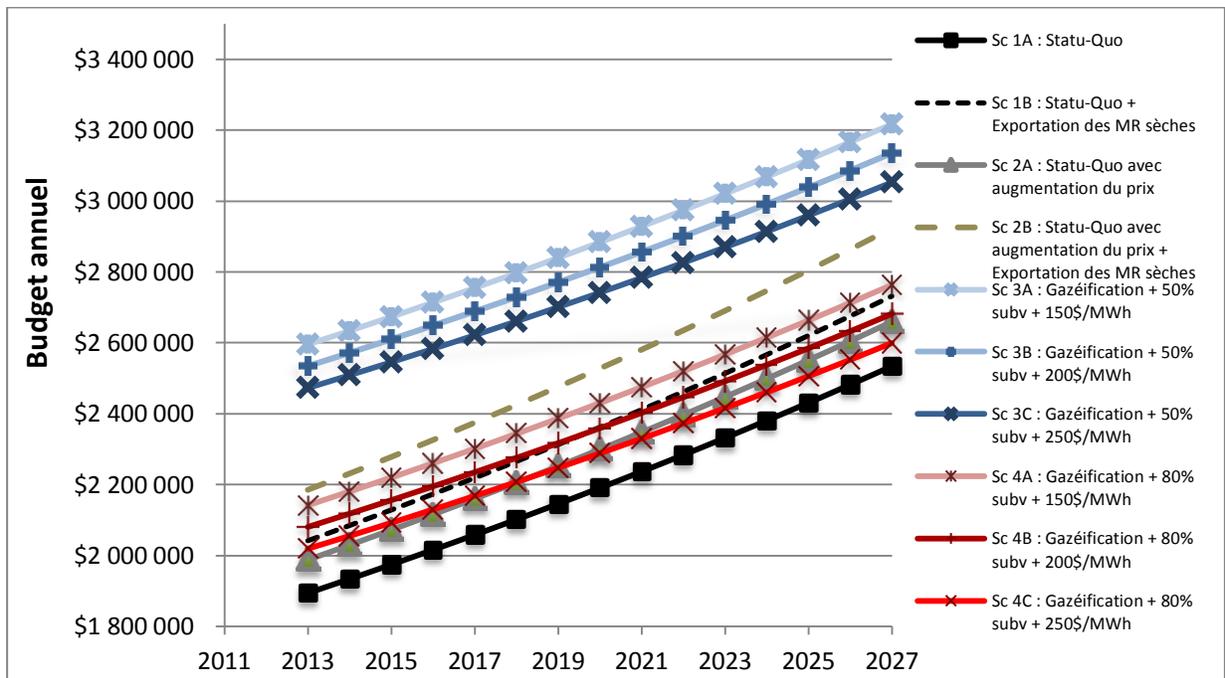
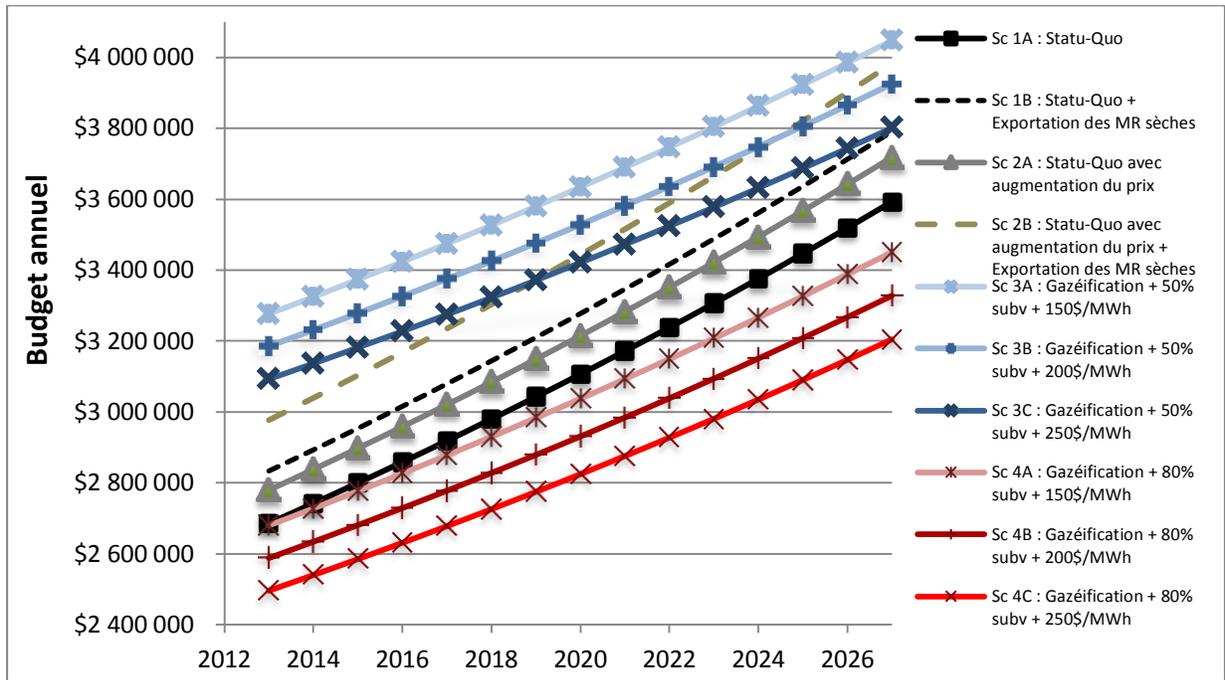


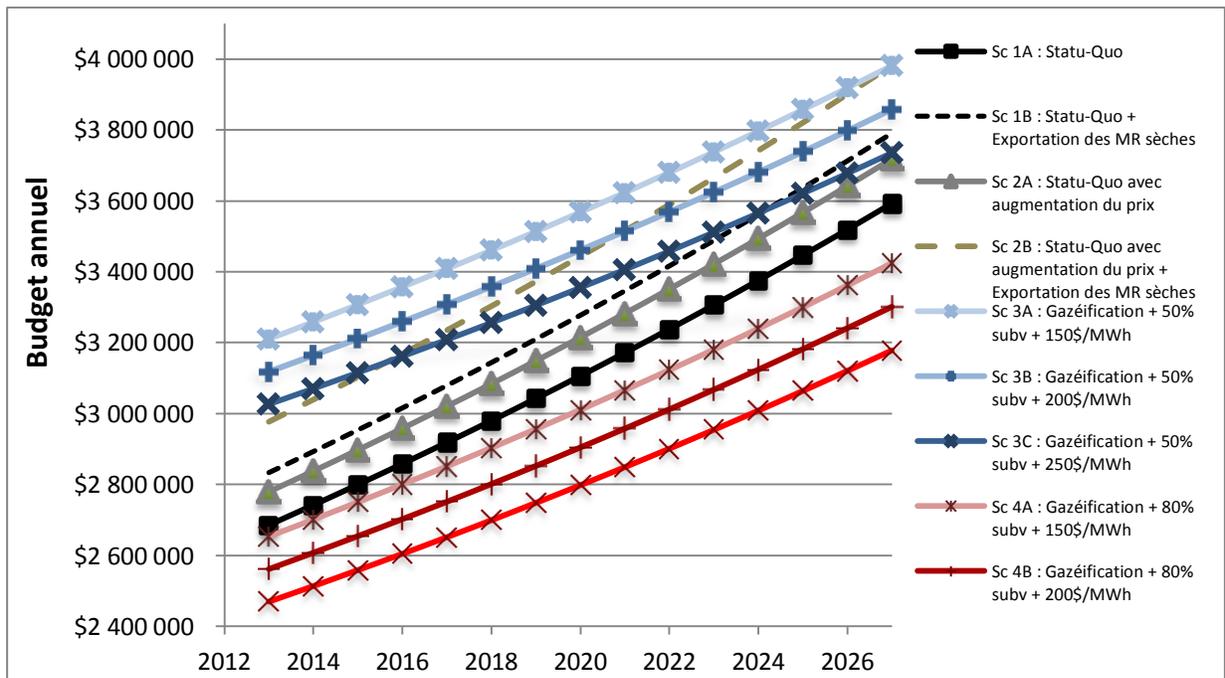
Figure 2-4 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets avec un taux d'intérêt de 2 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

**Annexe 3 : Coût d'opportunité de la gazéification des MR ultimes, sèches et recyclables**

Les modélisations se basent sur l'option énergétique 3 (voir tableau 4).



**Figure 3-1 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets et recyclables avec un taux d'intérêt de 5 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération**



**Figure 3-2 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets et recyclables avec un taux d'intérêt de 4 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération**

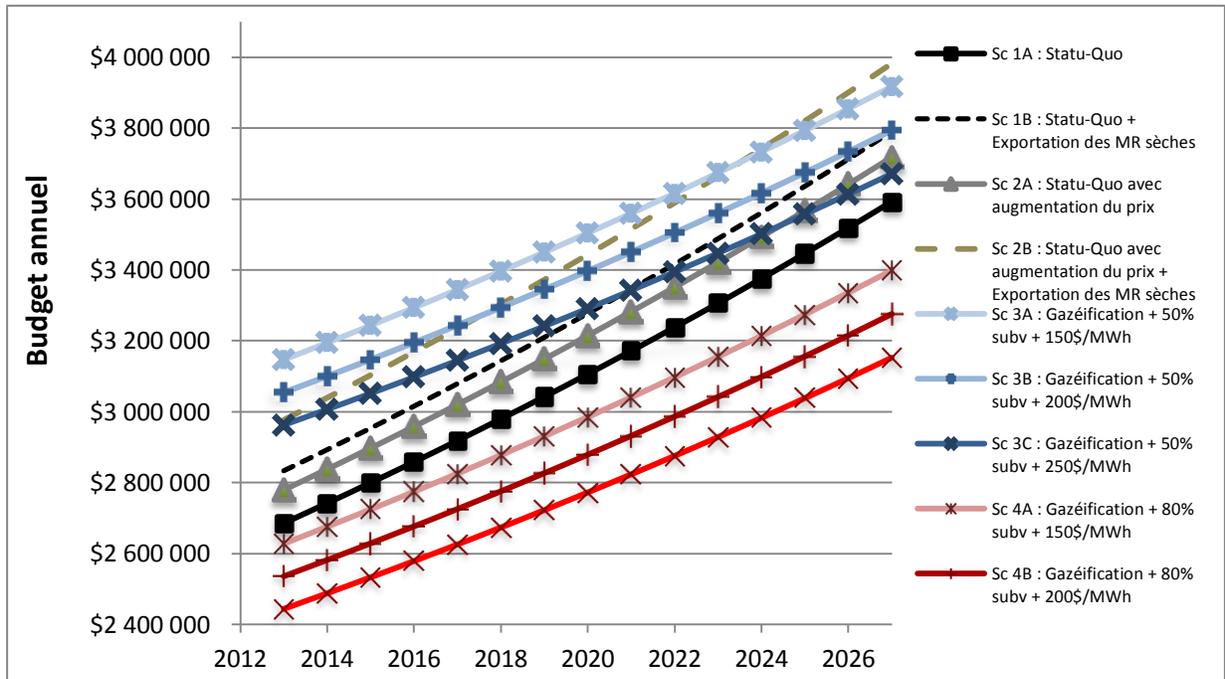


Figure 3-3 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets et recyclables avec un taux d'intérêt de 3 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération

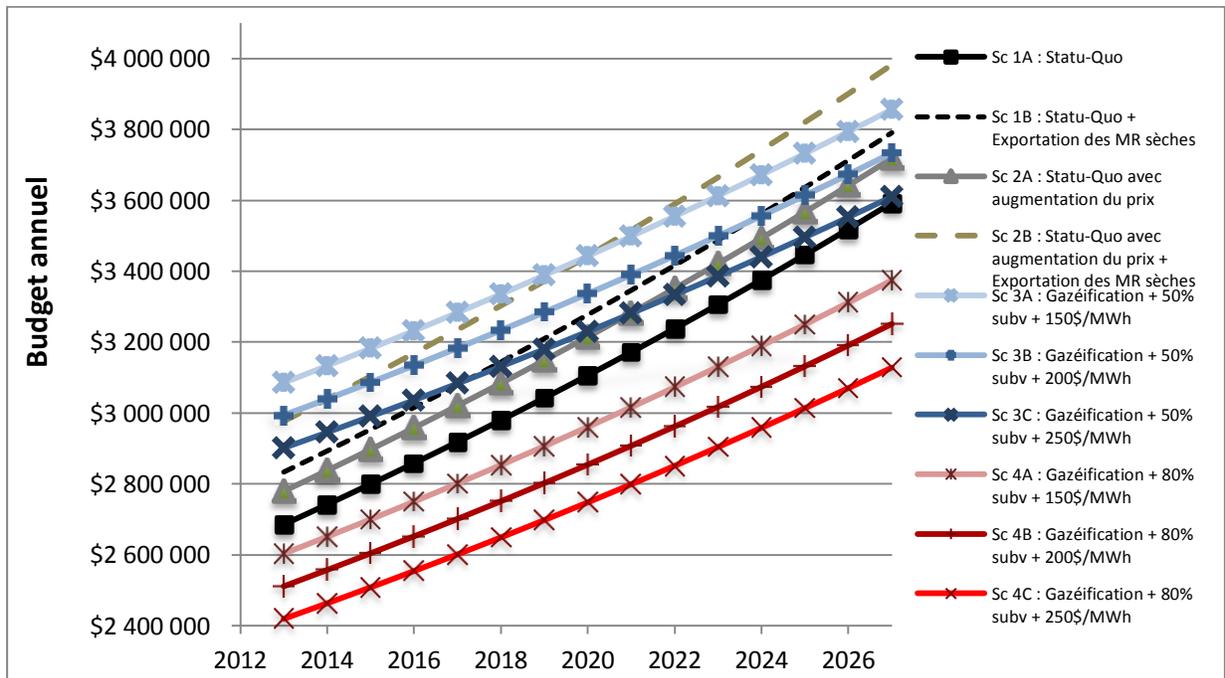


Figure 3-4 : Budget annuel des différents scénarios de traitement des déchets et recyclables avec un taux d'intérêt de 2 % et un taux d'inflation de 2,1 % sur les charges et revenus d'opération