



CONSEIL ET INGÉNIERIE EN DÉVELOPPEMENT DURABLE

Verde **sxm**



Rapport technique de présentation du Procédé PI ECOSITE de Saint-Martin (978)

Novembre 2020



SOMMAIRE

1.	Synthèse	3
2.	Description générale	4
2.1	Flux entrants vers unité valorisation CSR.....	6
2.2	Énergie produite.....	6
2.3	Fonctionnement de l'installation	6
2.4	Origine du projet	7
3.	Description technique détaillée	10
3.1	Note descriptive	10
3.1.1	<i>Implantation</i>	10
3.1.2	<i>Matériaux gérés par l'installation</i>	11
3.1.3	<i>Principe de fonctionnement</i>	12
3.1.4	<i>Étapes de traitement</i>	14
3.1.5	<i>Gestion et sécurité du système</i>	24
3.2	Synoptiques avec bilan matière et bilan énergétique.....	26
3.2.1	<i>Synoptiques généraux du procédé</i> :.....	26
3.2.2	<i>Bilans matière</i>	27
3.2.3	<i>Bilans énergétique</i>	27
3.3	Références.....	29
3.3.1	<i>Module CONVERTER</i>	29
3.3.2	<i>Liste de références</i>	29
4.	Evolutions apportées par le procédé PI	33
4.1.1	<i>Contexte projet</i>	33
4.1.2	<i>Préparation de CSR</i>	33
4.1.3	<i>Valorisation du CSR</i>	34
4.1.4	<i>Communs Préparation et Valorisation du CSR</i>	37

1. SYNTHÈSE

PAYS	France – St Martin
MAITRE D'OUVRAGE (NOM ET PRECISIONS SI PUBLIC, PRIVE OU MIXTE)	VERDE-SXM – Entreprise privée
EXPLOITANT	VERDE-SXM
TYPE D'INSTALLATION	Traitement des déchets
RUBRIQUES ICPE (OU EQUIVALENT POUR LES INSTALLATIONS HORS FRANCE)	<p>Préparation des CSR :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2713 – 2714 - 2716 : Installation de transit, regroupement ou tri déchets non dangereux • 2791 : Installation de traitement de déchets non dangereux • 3532 : Valorisation ou mélange de valorisation et d'élimination, de déchets non dangereux non inertes avec une capacité supérieure à 75t/j <p>Utilisation des CSR :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2971 : Installation de production de chaleur ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération • 3520 : Élimination ou valorisation de déchets dans des installations d'incinération des déchets ou des installations de co-incinération des déchets <p>Reste de l'installation : 2712-2 – 2718-1 – 2791-1 – 2714 – 2711-2 – 2716-2 – 2793-2-b – 2713-2 – 2715 – 2719 – 2780-1-c</p>
DATE D'AUTORISATION	Projet Arrêté préfectoral Activités complémentaires : 2020 Arrêté préfectoral du site : 2012
DESCRIPTION DU PROCEDE / DE L'INSTALLATION	Conception modulaire de traitement des déchets solides par préparation et valorisation de CSR
CONSOMMATION MOYENNE ANNUELLE DE CSR (TOUS TYPES CONFONDUS)	Déchets entrants : 25 000 t/an
ÉTAT DE DEVELOPPEMENT	<p>Chaque module est mature et dispose de plusieurs références. L'alimentation en continu du module <i>SMOLDERING</i> (valorisation des CSR) est une amélioration qui a été testée auprès de l'université La Sapienza de Rome. L'ingénierie de l'équipement dans son ensemble a été développée en détail (plan et calculs) par OMPECO et ses sous-traitants.</p> <p>L'assemblage de ces modules est une innovation nécessaire et particulièrement bien adaptée aux spécificités de ce territoire insulaire.</p>
ADRESSE DU SITE	ECOSITE Lieu-dit « Grand Cayes » 97150 SAINT-MARTIN
CONTACT	Patrick VILLEMIN – Président

2. DESCRIPTION GENERALE

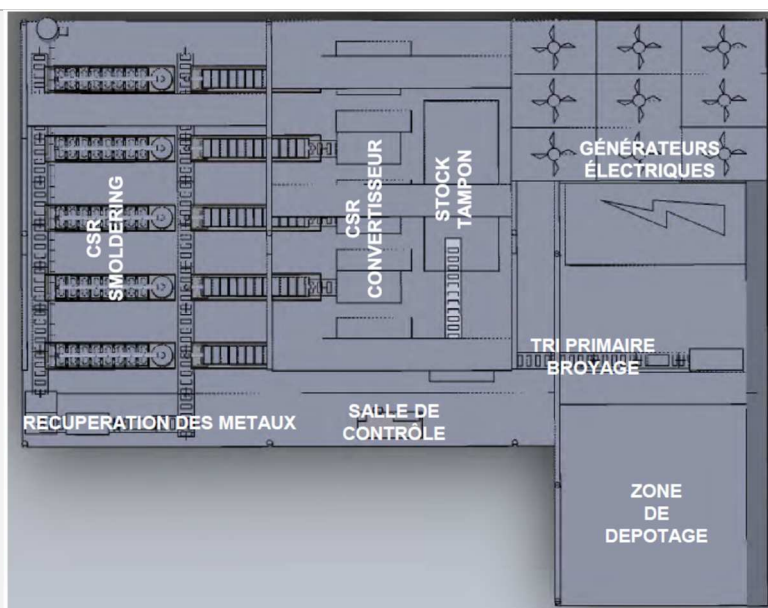


Figure 1 : Vue en plan des modules

PRINCIPE / DESCRIPTION GENERALE

Préparation de CSR :

- Tri sur dalle de réception :
 - Pince à trier (inertes, PVC)
 - Tri manuel
- Module PREPARATION DES CSR :
 - Broyage primaire : déchiquetage 200 mm
 - Séparation magnétique des ferreux + courant de Foucault pour les non-ferreux
 - Broyage secondaire : déchiquetage 30 mm
- Module CONVERTER :
 - Standardisation des CSR par lame rotative pour réduction à 3 mm
 - Chauffage à 98°C par friction et gaz de sortie installation
 - Stockage tampon du FLUFF de capacité 24h
 - Extraction des métaux ferreux et non-ferreux des cendres

Valorisation des CSR :

- Module SMOLDERING :
 - Pyrolyse 330°C
 - Gazéification 450°C
 - Production du syngas
- Module COMBUSTEUR :
 - Oxydation du syngas à 1100°C pour production thermique
 - Echangeur effluents gazeux / huile ORC
 - Echangeur effluents gazeux / air de combustion
- Module PRODUCTION ELECTRIQUE :
 - Turbines ORC (Turboden)
 - Production : 2,4 MWélec + 6 MW thermique
- Module TRAITEMENT DES EFFLUENTS GAZEUX :
 - DÉNOx
 - Injection de chaux et charbon actif (sorbalite)
 - Filtre à manches
 - Mesure en continu
 - Ventilateur de tirage

MODALITES DE RECEPTION

- Utilisation des déchets résiduels et non recyclables réceptionnés sur l'EcoSite :
- Déchets ménagers : 70 %

	<ul style="list-style-type: none"> • Déchets mixtes (DAE) : 25 % • Cartons : 2,5 % • Palettes : 2 % • Pneus : 0,4 % • Meubles : 0,1 % <p>Réception sur dalle et chargement de la trémie pour alimenter le broyeur primaire. Tri et traitement des déchets reçus dans la journée.</p>																								
<p>COMPOSITION CHIMIQUE NOMINALE DES DECHETS ENTRANTS VERS PREPARATION CSR</p>	<p>En amont du projet, un travail de caractérisation des déchets entrants a été réalisé sur l'Ecosite entre septembre et décembre 2019, selon la méthode MODECOM. Composition attendue des déchets entrants :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Composant</th> <th>% dans le déchet brut</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carbone</td> <td>33,1 %</td> </tr> <tr> <td>Eau</td> <td>29,6 %</td> </tr> <tr> <td>Oxygène</td> <td>17,2 %</td> </tr> <tr> <td>Hydrogène</td> <td>4,7 %</td> </tr> <tr> <td>Azote</td> <td>0,6 %</td> </tr> <tr> <td>Chlore</td> <td>0,4 %</td> </tr> <tr> <td>Soufre</td> <td>0,15 %</td> </tr> <tr> <td>Mercure</td> <td>0,000 000 15 %</td> </tr> <tr> <td>Autres</td> <td>14,2 %</td> </tr> <tr> <td>Densité (kg/m³)</td> <td>369</td> </tr> <tr> <td>PCI (kWh/kg)</td> <td>3,67</td> </tr> </tbody> </table>	Composant	% dans le déchet brut	Carbone	33,1 %	Eau	29,6 %	Oxygène	17,2 %	Hydrogène	4,7 %	Azote	0,6 %	Chlore	0,4 %	Soufre	0,15 %	Mercure	0,000 000 15 %	Autres	14,2 %	Densité (kg/m ³)	369	PCI (kWh/kg)	3,67
Composant	% dans le déchet brut																								
Carbone	33,1 %																								
Eau	29,6 %																								
Oxygène	17,2 %																								
Hydrogène	4,7 %																								
Azote	0,6 %																								
Chlore	0,4 %																								
Soufre	0,15 %																								
Mercure	0,000 000 15 %																								
Autres	14,2 %																								
Densité (kg/m ³)	369																								
PCI (kWh/kg)	3,67																								
<p>PREPARATION SUR SITE AVANT UTILISATION</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tri sur dalle de réception • Module PREPARATION DES CSR : 																								
<p>ÉVENTUELLES MODIFICATIONS DU PROCEDE INITIAL POUR UTILISATION DES CSR</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Stockage tampon en cellule fermée sous gaz inerte (sécurité) • Alimentation en continu du module <i>SMOLDERING</i> 																								
<p>CONCEPTEUR DU PROCEDE, SI APPLICABLE</p>	<p>OMPECO</p>																								

2.1 FLUX ENTRANTS VERS UNITE VALORISATION CSR

CARACTERISTIQUES, ORIGINES ET TONNAGES DES CSR UTILISES	TYPE	ORIGINE DES FLUX A PARTIR DESQUELS LES CSR SONT PREPARES	PRODUCTEUR DE CSR	NOMBRE D'INSTALLATIONS PRODUCTRICES ET LOCALISATION	PCI MOYEN	TONNAGES ANNUELS
		PCI 4, CI 1, Hg 1	Déchets résiduels et non recyclables de l'EcoSite	VERDE	EcoSite (préparateur et consommateur)	13,21 MJ/kg
PROCEDURE DE CONTROLE QUALITE MISE EN PLACE PAR L'EXPLOITANT POUR VERIFIER LA QUALITE DES CSR	<ul style="list-style-type: none"> Contrôle visuel et tri sur dalle (pince à trier et tri manuel) des déchets entrants dans le broyeur primaire Suivi de la qualité suivant l'arrêté préparation CSR (système qualité pour assurer le suivi/échantillonnage du CSR produit avant entrée vers unité de valorisation de CSR) 					
AUTRE(S) SPECIFICATION(S)	Les zones de stockage des CSR standardisés sont sous atmosphère en fort défaut d'oxygène par injection de gaz de sortie, prévenant l'auto-combustion du CSR. Le taux de CO ₂ est mesuré en permanence, et s'il descend en dessous d'un seuil critique, les zones de stockage sont remplies de CO ₂ en provenance de bouteilles de sécurité.					

2.2 ÉNERGIE PRODUITE

TYPE(S) D'ÉNERGIE PRODUITE	Electrique / Thermique
QUANTITE D'ÉNERGIE PRODUITE	Valeurs attendues : <ul style="list-style-type: none"> Electricité brute : 18 600 MWh/an Electricité vers le réseau : 13 400 MWh/an Thermique pour process : 55 600 MWh/an

2.3 FONCTIONNEMENT DE L'INSTALLATION

DATE DE MISE EN SERVICE	Dernier trimestre 2022
DUREE ANNUELLE DE FONCTIONNEMENT (EN HEURES)	Attendu : 8000 h/an
GAZ BRUT (AVANT EPURATION ET COMBUSTION)	<ul style="list-style-type: none"> Plage de PCI acceptée des combustibles entrants de 2 à 6 kWh/kg (nominal attendu 3,7 kWh/kg) Vitesse d'avancement du produit régulée par la vitesse de rotation de la vis dans la chambre de <i>SMOLDERING</i> Température – 330°C dans la phase initiale de pyrolyse et jusqu'à 450°C dans la phase de gazéification – régulée par la variation du débit d'air chaud injecté Utilisation des mesures de l'analyseur en cheminée : régulation O₂ et arrêt de l'installation en cas de dépassement des valeurs limites d'émissions
GAZ DE COMBUSTION	<ul style="list-style-type: none"> Contrôle de la température d'oxydation (1100 – 1150°C) : injection d'air pour diminuer la température et utilisation d'un brûleur auxiliaire d'urgence si besoin d'augmenter la température

	<ul style="list-style-type: none"> • Refroidissement du gaz dans des échangeurs et chauffage du fluide (huile diathermique) à 350°C pour alimenter le module ORC ; préchauffage aussi de l'air de combustion et sortie des gaz à 140°C. • Traitement des fumées par pulvérisation d'une solution d'urée (DÉNOx), injection d'un mélange de chaux et de charbon actif (sorbalite) et dépoussiérage dans un filtre à manches • Ventilateur de tirage qui maintient tout le système – <i>SMOLDERING</i> et <i>COMBUSTEUR</i> - en dépression
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure en continu des émissions : débit, température, O₂, H₂O, CO, COT, NO, NO₂, HCl, HF, H₂S et poussières
--	---

RESPECT DES VLE							
		Polluant	Avant le filtre (mg/Nm³)	Limite UE (mg/Nm³)	Efficacité du filtre	Emissions (mg/Nm³)	% sur la limite de l'UEt
	Paramètres calculés	NOx	13.8	200	40%	8.260	4.1
		SO ₂	32.1	50	90%	3.214	6.4
		HCl	43.7	10	95%	2.185	21.9
		Hg	0.0168	0.05	90%	0.002	3.4
	Paramètres estimés	CO		50		5	10
		HF		1		0.219	21.9
		COT		10		0.1	1
		Dioxines		1.10-7		0	1
		Cd + Ti		0.5		0.006	1.1
		Métaux lourds		0.5		0.006	1.1

CENDRES GENEREES	<p>Attendu :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cendres totales : 3 800 t/an, dont 350 t/an de métaux valorisables • Cendres résiduelles : 3 450 t/an, soit 17 % du tonnage CSR valorisé (sans tri sélectif du verre en amont)
-------------------------	--

2.4 ORIGINE DU PROJET

OBJECTIFS INITIAUX DU PROJET	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la quantité de déchets mis en décharge • Mise en place d'une valorisation énergétique des déchets • Définition d'une solution technique adaptée aux spécificités de l'île de St Martin : gisements de déchets limités et besoin de modularité • Réponse à la saturation de l'ISDND
-------------------------------------	--

LOGIQUE ECONOMIQUE A L'ORIGINE DU PROJET	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des charges : Augmentation du coût de la mise en décharge et besoin de travaux d'extension de l'ISDND • Création de recettes : vente d'énergie électrique
---	---

CONTRAINTES SPECIFIQUES LIEES A L'UTILISATION DE CSR EN SUBSTITUTION D'AUTRES SOURCES D'ENERGIE	<p>L'île de St Martin est relativement petite, les sources d'énergies renouvelables pour la combustion et les gisements de déchets sont donc limités.</p> <p>La contrainte principale est la part importante d'ordures ménagères dans les déchets entrants. Le module <i>CONVERTER</i> complète l'installation « classique » de préparation</p>
--	---

de CSR (tri, broyage et déferrailage) et permet d'obtenir un *FLUFF* sec et homogène (CSR standardisé en vue d'optimiser la valorisation énergétique).

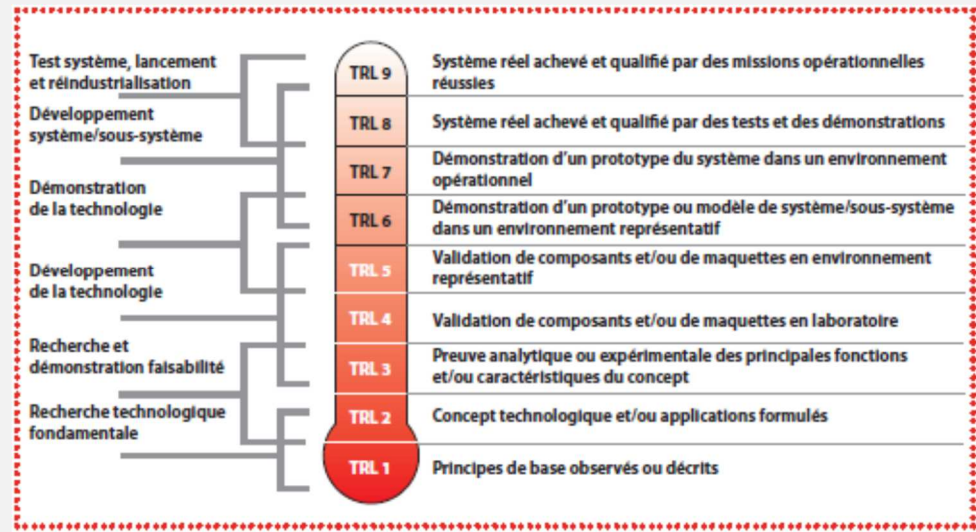
Cette installation est une combinaison innovante de différentes technologies, de façon à répondre aux spécificités du traitement des déchets sur l'île de St Martin.

Analyse TRL des modules (échelle de 1 à 9) :

ANALYSE TRL

Module	Niveau TRL	Justification
PREPARATION DES CSR : broyage primaire et extraction des métaux	9	Technologie classique de préparation de CSR
<i>CONVERTER</i> : broyage secondaire et lame rotative	9	Plusieurs références OMPECO
Stockage tampon CSR et système d'alimentation du <i>SMOLDERING</i>	9	Technologie classique (vis sans fin)
<i>SMOLDERING</i> et <i>COMBUSTEUR</i>	9	Plusieurs références en déchets solides urbains pour des modules en batch
Récupération d'énergie : échangeurs de chaleur, turbine ORC et ses auxiliaires	9	Très nombreuses références Turboden
Traitement et analyse des gaz de sortie : DéNOx, réacteur sorbalite, filtre à manches, ventilateur et analyseur	9	Technologies classiques
Valorisation des cendres : convoyage des cendres et extraction des métaux	9	Technologies classiques
Contrôle commande et régulation	9	Technologies classiques

Définition des niveaux TRL utilisés :

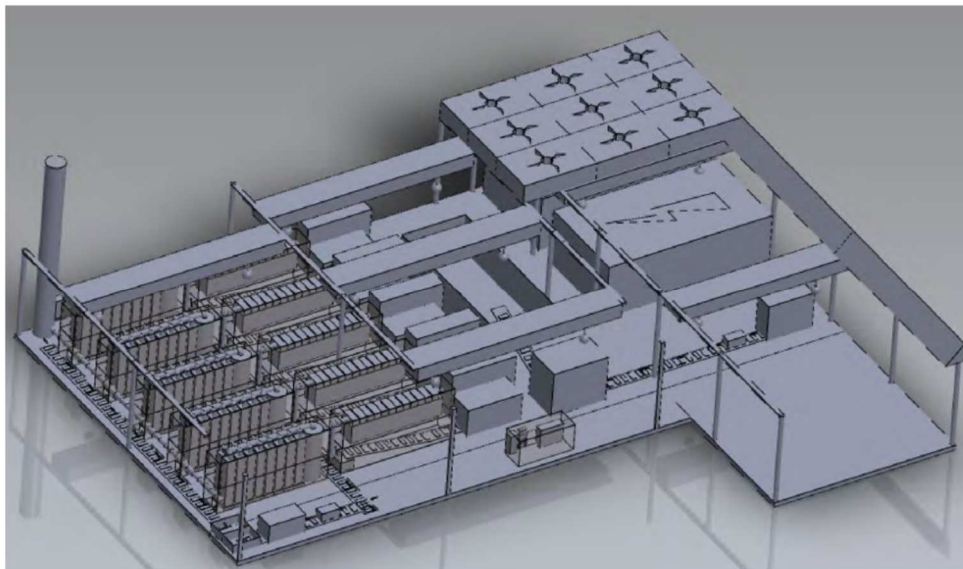
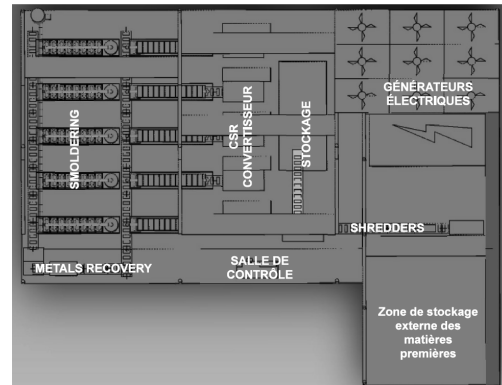


3. DESCRIPTION TECHNIQUE DETAILLEE

3.1 NOTE DESCRIPTIVE

3.1.1 IMPLANTATION

L'installation PI est implantée en partie Ouest de l'ECOSITE de Saint-Martin, au droit de la plate-forme de compostage actuelle.



L'installation PI occupe une superficie totale d'environ 3 100 m², soit une plate-forme principale avec les modules composant le système de 70 mètres de longueur sur 40 mètres de largeur additionnée d'une zone de réception et de tri des intrants où les camions déchargent les déchets à leur arrivée.

3.1.2 MATERIAUX GERES PAR L'INSTALLATION

Le PI a été conçu pour être **flexible**, afin de pouvoir gérer différents types de déchets comme :

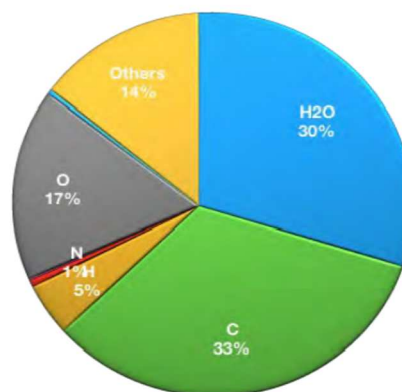
- Déchets solides municipaux ;
- Déchets solides industriels de type municipal ;
- Déchets agricoles ;

ayant au moins les caractéristiques suivantes :

- Matières solides ;
- Humidité relative inférieure à 70% ;
- Contenu énergétique supérieur à 2 kWh/kg.

Pour le projet de VERDE, les flux de déchets attendus sont les suivants :

TYPE D'ENTRÉE	COMPOSITION
Déchets ménagers organiques	49.39%
Déchets de papier	27.24%
Fraction de déchets plastiques	11.59%
Pneu en caoutchouc	1.06%
Copeaux de bois provenant de l'élagage	3.04%
PVC	0.70%
métaux	1.40%
sol	5.58%



UNITÉ	tonne
HEURE	3.13
JOUR (24h)	75.00
MOIS (an/12)	2'083
AN (8000 h)	25'000

3.1.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La solution **PI** intègre différentes technologies et philosophies de gestion des déchets :

- **Neutraliser** l'impact environnemental des déchets ;
- **Valoriser** la teneur énergétique des déchets ;
- **Inerter** les résidus solides ;



avec une stratégie entièrement **durable**, en évitant tout danger pour la santé.

Le système est conçu pour traiter les déchets ménagers et assimilés. Il est précédé d'une étape de tri matière à l'arrivée des déchets non dangereux, sur la dalle de réception.

Les déchets entrants sont traités dans la journée, limitant ainsi les nuisances liées aux stocks. La dalle de réception des déchets entrants est vidée chaque fin de journée. En cas d'arrêt de l'installation (par exemple : panne du broyeur primaire), les DND non recyclables sont envoyés vers l'ISDND.

La constitution de l'installation en modules (5 modules CSR + 2 turbines ORC) permet de réduire au maximum les arrêts inopinés de l'installation.

Les objectifs de cette installation sont les suivants :

- **Trier les matériaux recyclables** à l'entrée de l'installation ;
- Normaliser les déchets en les transformant en matériaux (**CSR normés NF EN 15359**) avec des caractéristiques physiques et chimiques homogènes, afin de simplifier les opérations de transformation ultérieures ;
- Éliminer le carbone, l'oxygène et l'hydrogène contenus dans les déchets, permettant une **réduction volumétrique allant jusqu'à 95 %** ;
- **Récupérer l'énergie thermique** des déchets pour garantir l'indépendance énergétique totale de l'installation et exporter de l'électricité ;
- **Inerter les résidus solides** des déchets.

L'installation est modulaire et constituée de 5 modules PI (*CONVERTER + SMOLDERING + COMBUSTEUR*) et deux turbines ORC : en combinant ces modules indépendants, il est possible de traiter le gisement entrant identifié.

Les modules comprennent :

- **Module de préparation des CSR**, pour extraire les inertes et calibrer les déchets pour obtenir une taille standard de CSR ;
- **Module CONVERTER**, pour standardiser le CSR initial en CSR de type *FLUFF* ;
- **Module valorisation CSR (5 modules PI) composé de :**
 - **Module SMOLDERING**, pour pyrolyser et gazéifier lentement le CSR pour produire un gaz de synthèse de haute qualité (syngas) ;
 - **Module COMBUSTEUR**, pour oxyder le syngas dans une chambre de combustion, pour produire de l'énergie thermique ;
- **Module traitement des effluents gazeux :**
 - **Module de filtration des effluents gazeux**, pour neutraliser les éventuels polluants résiduels contenus dans effluents gazeux ;

- **Module d'analyse en continu des effluents gazeux**, pour contrôler les niveaux d'émission en temps réel ;
- **Module de production d'énergie** (turbines ORC Turboden avec générateurs électriques ABB), pour récupérer l'énergie thermique contenue dans le CSR et la convertir en électricité.

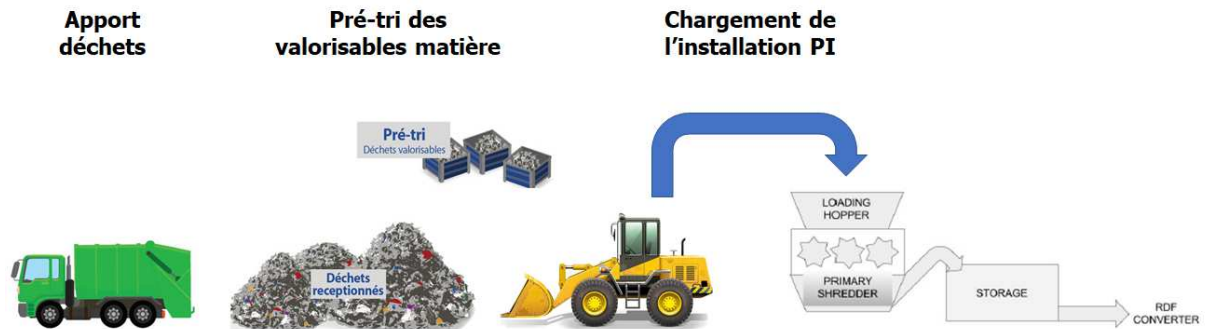
3.1.4 ETAPES DE TRAITEMENT

Les déchets solides entrants sont variables en humidité, pouvoir calorifique, densité, fraction volatile et en composition chimique.

Pour gérer ces variations, le système se décompose en quatre étapes :

ÉTAPE 1 - PREPARATION DES CSR : NORMALISATION DE LA MATIÈRE PREMIÈRE

Les déchets sont transformés en CSR (Combustible Solide de Récupération) homogène grâce à un processus mécanique.



Le module de PREPARATION DES CSR a été conçu pour réduire la taille des déchets à traiter en morceaux de **taille inférieure à 30 mm**, pour permettre au module *CONVERTER* de traiter les matériaux entrants.

Le module contient les composants suivants :

- Une première étape de **tri sur dalle** : pince à trier et tri manuel
- Une grande trémie de chargement, capable de gérer un chargement standard de camion de 18 m³ ;
- Un **broyeur primaire**, capable de réduire à 200 mm tout déchet d'entrée d'une taille allant jusqu'à 1,5 m (avec une épaisseur maximale de 5 mm pour les métaux) ;
- Un moteur électrique d'une puissance de 10 kW à 400 kW, selon le volume des déchets à traiter ;
- Un convoyeur à bande pour retirer le matériau déchiqueté du déchiqueteur primaire et pour remplir le conteneur de stockage déchiqueté ;
- **Séparation des métaux** ferreux par voie magnétique et des non-ferreux par courant de Foucault ;
- Un **broyeur secondaire**, permettant de réduire les déchets en morceaux de 30 mm et en assurer l'homogénéité ;
- Un conteneur fermé de stockage des CSR produits, d'une capacité totale de 360 m³ équipé d'un système d'aspiration pour éliminer les mauvaises odeurs et d'un système de prévention des incendies composé d'un système d'injection de CO₂.



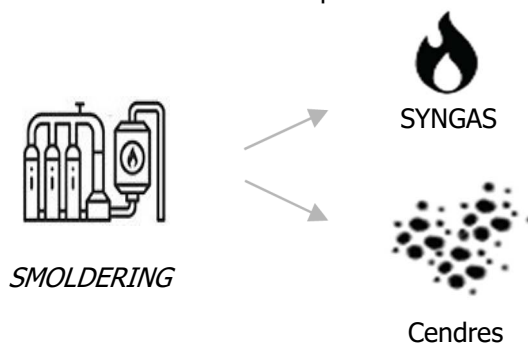
Figure 2 : Images du broyeur primaire et du séparateur magnétique de métaux

ÉTAPE 2 – VALORISATION DES CSR : *CONVERTER, SMOLDERING ET COMBUSTEUR* : AFFINAGE DU CSR, DÉCOMPOSITION, INERTAGE DES RÉSIDUS SOLIDES ET FORMATION DE SYNGAS

Le principe de la valorisation est de produire un CSR de type FLUFF (homogène, et inférieur à 3mm), de le pyrolyser lentement et de le gazéifier à basse température pour éviter la formation de polluants, produisant du syngas (Synthetic Fuel Gas).

Le syngas produit est immédiatement brûlé, pour produire de la chaleur.

Une cendre complètement inerte est libérée à la fin du processus.



Le *CONVERTER* permet de procéder à la transformation du CSR en CSR de type FLUFF (matériau homogène et inférieur à 3mm).

Le concept de *SMOLDERING* et *COMBUSTEUR*, est rendu possible grâce à la standardisation préalable dans le *CONVERTER*, et consiste à réaliser l'oxydation du FLUFF en deux étapes :

- Le *SMOLDERING*, qui cible la séparation des volatiles (transformés en syngas) et des inertes (les cendres),
- Le *COMBUSTEUR*, qui cible l'oxydation des volatiles (syngas) et la récupération de leur énergie thermique.

Un temps de séjour long et une régulation adaptée de l'injection d'air permettent une oxydation poussée des composés volatiles présents, un bon niveau de rendement énergétique et l'absence de particules fines.

Module **CONVERTER**

Le module *CONVERTER* transforme le CSR reçu en CSR de type *FLUFF*.

Le processus se déroule par le **frottement mécanique d'une lame qui tourne à grande vitesse** à l'intérieur du matériau à traiter. La lame, en plus de produire un choc mécanique sur le matériau, génère également une augmentation significative de la température, en raison des forces de friction.



Le résultat de ce procédé conduit à la **production du FLUFF, un produit très fin, aux dimensions inférieures à 3 mm, à haute surface spécifique**. Le CSR de type *FLUFF* est un produit homogène aux dimensions, densité, humidité et pouvoir calorifique calibrés.

La température à l'intérieur du *CONVERTER* augmente à cause de la friction des couteaux avec le produit en mouvement. Selon les consignes opératoires, l'installation pourrait atteindre la stérilisation du produit à 150°C. Dans le cas de l'installation de St. Martin, en revanche, la température de consigne sera maintenue à un peu moins de 100°C. De ce fait, l'eau est transférée à l'étape de *SMOLDERING* (330-450°C), où elle est évaporée aux dépens du pouvoir calorifique du FLUFF, en permettant de réduire significativement (0.1 kWh/kg) l'électricité consommée par le *CONVERTER*. Dans le *SMOLDERING*, l'eau facilitera aussi les réactions « shift », qui permettent d'augmenter le taux d'hydrogène dans le syngas au détriment du taux de monoxyde de carbone.

La température dans le *CONVERTER* est contrôlée en continu, et régulée par la vitesse de rotation des lames et le temps cycle de la conversion.

Une fois produit, le FLUFF est transféré dans une zone de stockage tampon, sous atmosphère en « quasi-absence » d'oxygène, de manière à empêcher l'auto-combustion du produit. L'atmosphère est créée en injectant dans le tampon une part des gaz d'échappement de l'installation, qui ne contiennent pas d'oxygène.

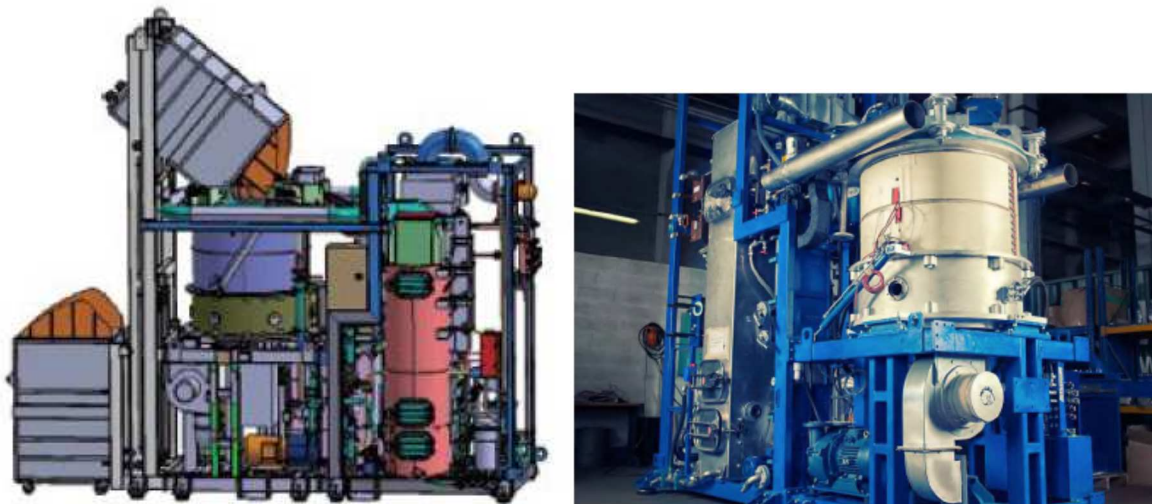
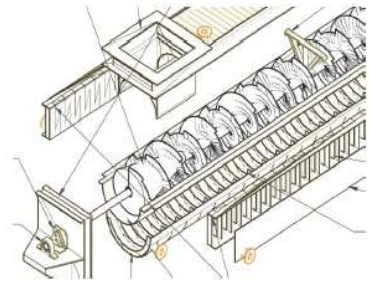


Figure 3 : Vues du *CONVERTER* sur *SKID*

Module **SMOLDERING**

Le module vise à transformer en **gaz de synthèse de haute qualité** la partie volatile du CSR de type FLUFF et consiste en une stratégie en 2 étapes :

- **Pyrolyse** du FLUFF, consistant à transformer jusqu'à 60% de ce FLUFF en gaz de synthèse, en chauffant le FLUFF à 330°C pendant environ 60 minutes ;
- **Gazéification** par gazéificateur à lit fixe quasi-statique destiné à éliminer le carbone restant et à produire un gaz de synthèse. Le procédé se fait avec une quantité sous stœchiométrique d'air préchauffé, à 450°C pendant environ 60 minutes.



Toutes ces conditions empêchent la formation de poussières fines (par oxydation complète des volatiles) et la propagation de vapeurs métalliques, permettant la séparation de la partie volatile du FLUFF de la fraction solide et l'obtention d'un gaz de synthèse très propre déjà à l'origine.

Les cendres sont déchargées et mises à disposition pour d'autres processus de récupération.

Module **COMBUSTEUR**

Le gaz de synthèse est ensuite envoyé dans une **chambre d'oxydation** fonctionnant avec les principaux paramètres suivants :

- Température minimale technique d'oxydation : 850°C
- Température standard et réglementaire d'oxydation : 1 100°C
- Température maximale d'oxydation : 1 200°C
- Temps de séjour : 2,5 secondes
- Excès d'oxygène : > 3%

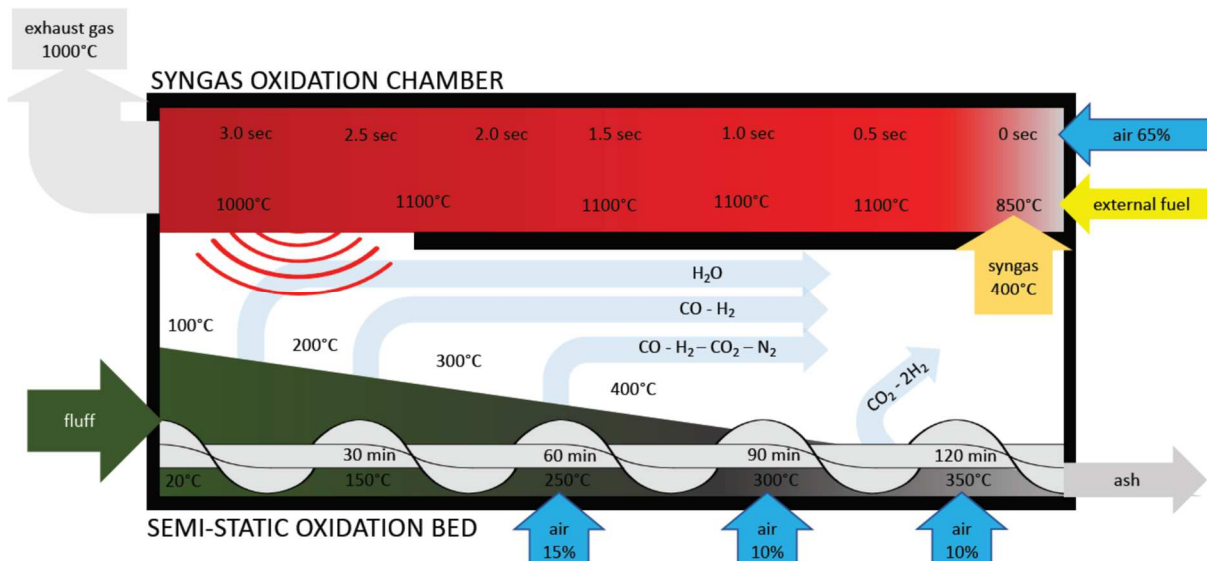


Figure 4 : Schéma de principe du fonctionnement du SMOLDERING

Pendant les opérations de démarrage et en cas d'urgence, si la température de la chambre d'oxydation descend en dessous de la température standard, un brûleur auxiliaire, alimenté avec des hydrocarbures, maintiendra la température au point de consigne.

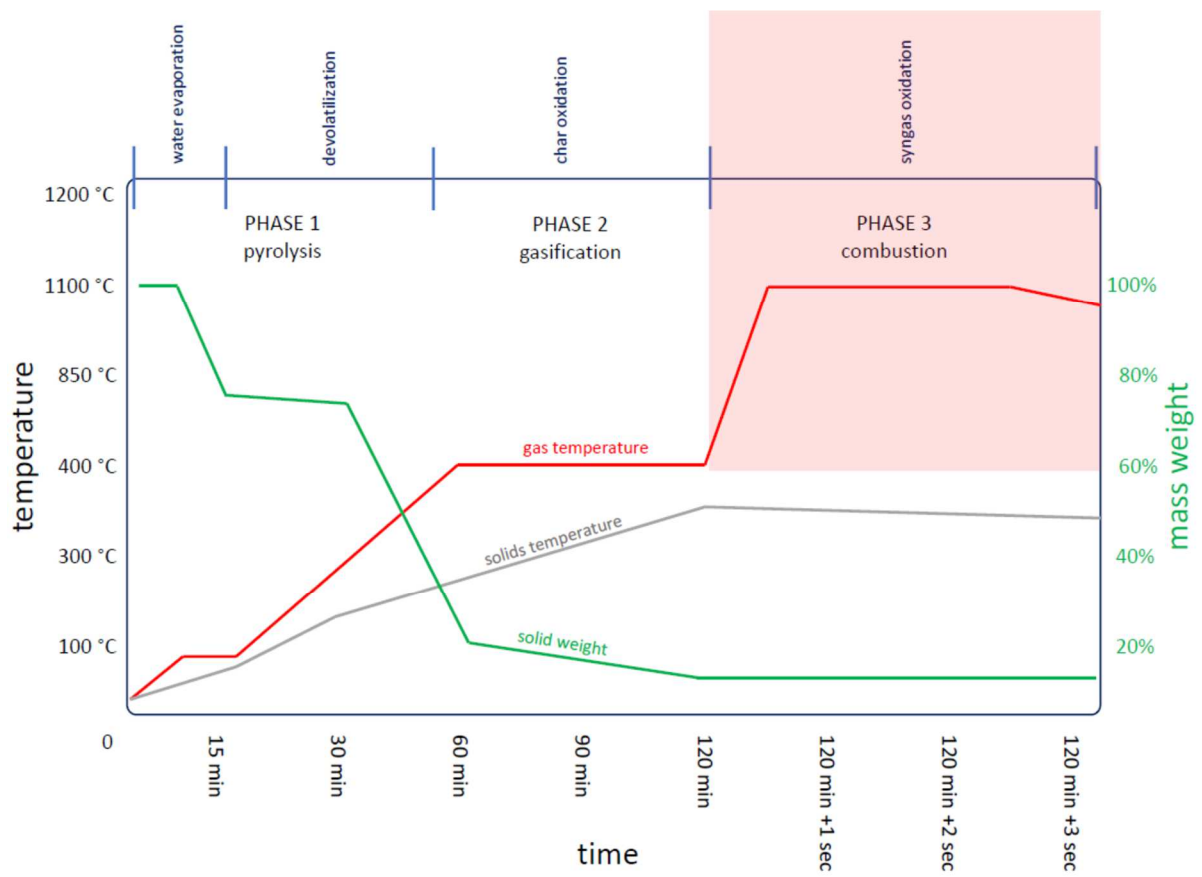
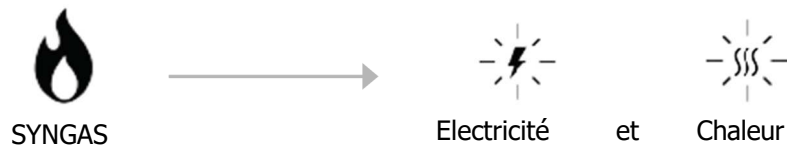


Figure 5 : Graphique de données de fonctionnement du SMOLDERING

ÉTAPE 3 - PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

La chaleur est transformée en électricité par une turbine ORC.



Module de récupération d'énergie

L'électricité est produite par la conversion de l'énergie thermique disponible dans le syngas en électricité. Le système de conversion d'énergie est mis en œuvre selon un cycle qui comprend :

- **Un premier échangeur de chaleur gaz-liquide**, placé immédiatement au-dessus du module *COMBUSTEUR* qui transfère la chaleur des gaz d'échappement à de l'huile diathermique à une température de sortie de 350°C ;
- **Un deuxième échangeur de chaleur gaz-air**, qui préchauffe l'air qui sera injecté dans la chambre de *SMOLDERING* ;
- **Deux turbines ORC** d'une puissance de 1,2 MW chacune ;
- **Un générateur électrique ;**
- Un système onduleur pour stabiliser le courant au niveau de tension et de fréquence souhaitées ;
- Un système de refroidissement et d'évacuation de chaleur pour refroidir le circuit moteur.

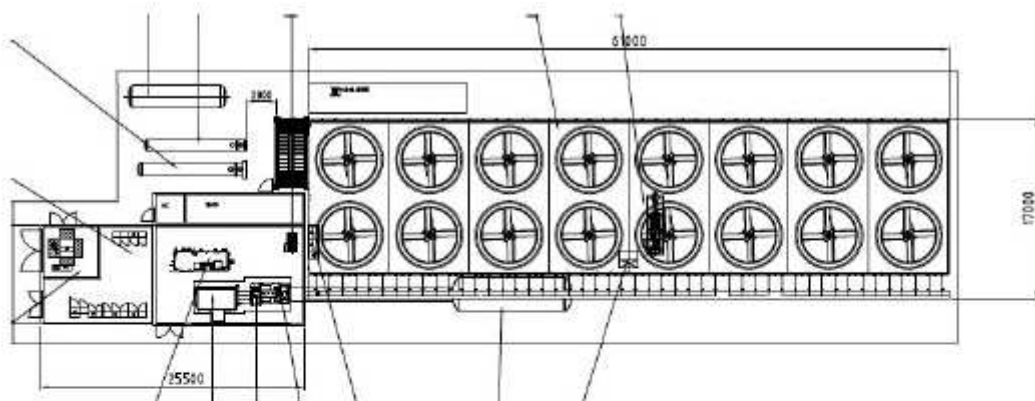


Figure 6 : Vues des modules de l'ORC (Production d'électricité)

ÉTAPE 4 – TRAITEMENT DES EFFLUENTS GAZEUX ET VALORISATION DES CENDRES

Les effluents gazeux sortant de l'échangeur de chaleur du module de production électrique sont à nouveau refroidis dans un échangeur gaz-gaz où ils réchauffent l'air de combustion.

Ces gaz d'échappement, à une température de sortie de 140°C, sont ensuite traités pour réduire les éventuelles traces de polluants. Enfin, leur composition est analysée en continu et les effluents sont évacués en cheminée.

Les métaux sont séparés des cendres et valorisés vers les filières de recyclage.



Module de filtration des effluents gazeux

Le système de filtration des effluents gazeux est conçu pour empêcher toute trace de polluant de porter atteinte à l'environnement et comprend les étapes suivantes :

- **La DéNOx** : placé dans le *COMBUSTEUR* se compose d'un groupe d'injecteurs pulvérisant une solution d'urée sur les gaz de sortie pour réduire les oxydes d'azote ;
- **Réacteur** : il injecte un mélange de chaux et de charbon actif à travers le flux de gaz permettant de neutraliser les gaz acides ;
- **Filtre à manches** : retient les poussières provenant du processus de combustion et récupère les sels de calcium produits dans le réacteur ;
- **Ventilateur de tirage** : aspire les effluents gazeux afin de maintenir l'ensemble du système, de la zone *SMOLDERING* – *COMBUSTEUR* au système de filtration, en dépression pour éviter toute fuite de gaz indésirable ;
- **Cheminée** : évacue les effluents gazeux du système.

Les réactions chimiques de base en charge du module de filtration des effluents gazeux sont les suivantes :

POLLUANT	RÉACTION CHIMIQUE	RÉDUCTION
NOx	$4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	50%
Hydrogène Chlorhydrique	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	95%
Dioxyde de soufre	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	90%
Métaux lourds	Action mécanique du filtre à manches	90%



Figure 7 : Vues de filtre à manches (Traitement des effluents gazeux)

Module d'analyse en continu des effluents gazeux

Le module d'unité de surveillance des effluents gazeux est capable de détecter en continu la qualité des effluents émis par le système et envoie les informations analysées au système de contrôle de l'installation. Il est constitué de :

- Sondes d'échantillonnage
 - Sonde d'échantillonnage pour l'extraction de gaz (600 x 400 x 200 mm ; IP66)
 - Ligne directe pour le transport de gaz (10 m)
- Analyseur multi-gaz
 - FTIR (210 x 600 x 600 mm ; certifié TUV)
 - Analyseur de système de nettoyage d'air
- Analyseur COT UNI EN 12619
 - Analyseur COT à technologie FID
 - Générateur d'hydrogène (qualité du gaz 99.9995%)
- Analyse des poussières UNI EN 13284-2
 - Mesureur de poussière à concentration
- Débitmètre à pression différentielle
- Système de surveillance de la température d'échappement
- Unité de contrôle informatisée



Les paramètres suivants sont contrôlés sur une base continue calculée avec un excès de volume d'oxygène de 11%, sur le débit des effluents gazeux :

- CO : gamme 0-100 mg/Nm³
- NO : gamme 0-400 mg/Nm³
- NO₂ : gamme 0-400 mg/Nm³
- SO₂ : gamme 0-200 mg/Nm³

- HCl : gamme 0-60 mg/Nm³
- HF : gamme 0-4 mg/Nm³
- COT : gamme 0-20 mg/Nm³
- Poussières : gamme 0-30 mg/Nm³
- O₂ : gamme 0-25% en volume
- H₂O : gamme 0-30% en volume
- Température des effluents gazeux : gamme 0-500°C
- Débit des effluents gazeux : gamme plage de pression 600 - 1100 hPa

Les émissions attendues de polluants sont les suivantes :

	Polluant	Avant le filtre (mg/Nm ³)	Limite UE (mg/Nm ³)	Efficacité du filtre	Emissions (mg/Nm ³)	% sur la limite de l'UET
Paramètres calculés	NOx	13.8	200	40%	8.260	4.1
	SO ₂	32.1	50	90%	3.214	6.4
	HCl	43.7	10	95%	2.185	21.9
	Hg	0.0168	0.05	90%	0.002	3.4
Paramètres estimés	CO		50		5	10
	HF		1		0.219	21.9
	COT		10		0.1	1
	Dioxines		1.10 ⁻⁷		0	1
	Cd + Ti		0.5		0.006	1.1
	Métaux lourds		0.5		0.006	1.1

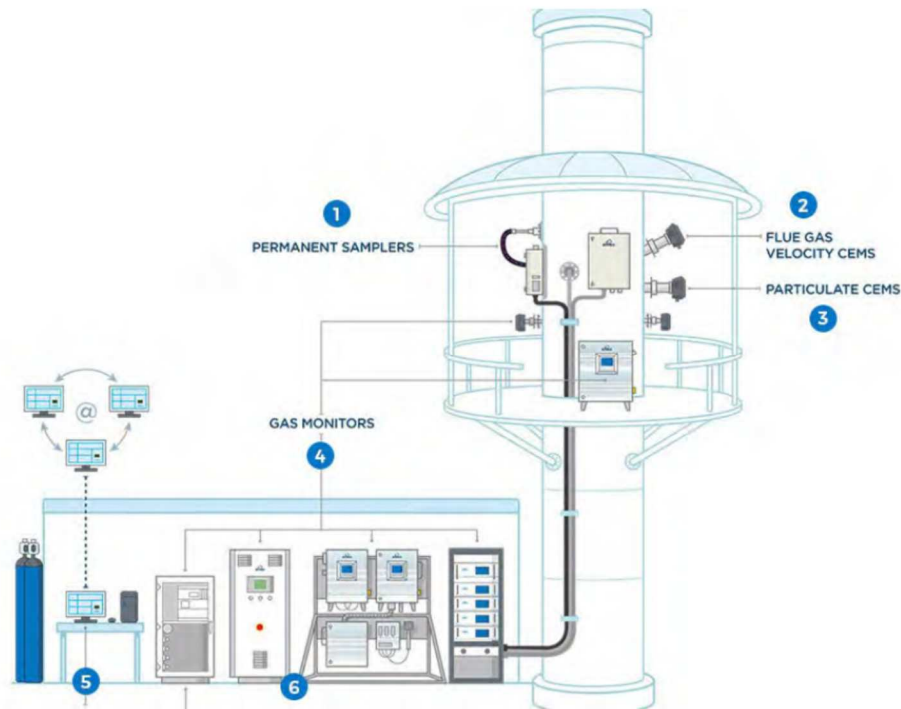


Figure 8 : Module d'analyse en continu des effluents gazeux

Module de valorisation des cendres

Les cendres produites lors du processus de *SMOLDERING* sortent de l'installation PI par une vis sans fin dans un caisson type Ampliroll. Ces cendres sont évacuées au fur et à mesure de leur production vers l'ISDND. La quantité de cendres produites est estimée à 2 000 t/an. La quantité maximale stockée sur le site est de 30 m³, correspondant à 2 bennes.

Les métaux sont extraits de ces cendres :

- Les cendres passent par un **séparateur magnétique** pour extraire les métaux magnétiques, comme le fer et le nickel ;
- Les cendres passent par un **séparateur à courant de Foucault** pour extraire les métaux non ferreux, comme l'aluminium et le cuivre ;
- Les métaux magnétiques et non magnétiques sont placés dans différents conteneurs en vue de leur recyclage.

Les cendres inertes en sortie des filtres à manches, conformément à la loi, sont maintenues séparées des cendres du *SMOLDERING* pour l'analyse chimique de leurs éventuels métaux lourds ; elles seront ensuite enfouies conformément à la réglementation.

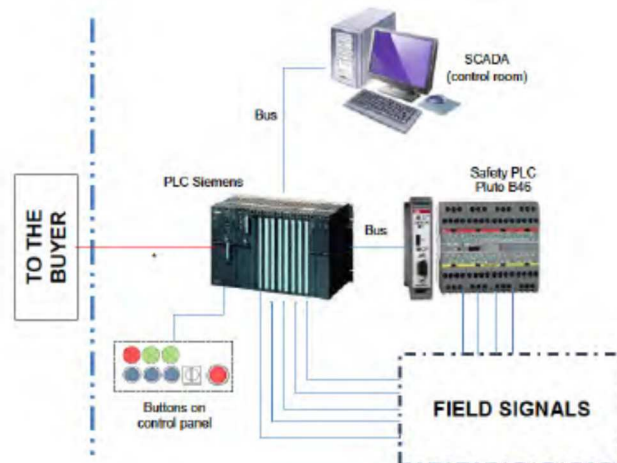
3.1.5 GESTION ET SECURITE DU SYSTEME

Salle de contrôle

L'installation est équipée d'un système SCADA (contrôle de supervision et acquisition de données) pour permettre le contrôle complet de l'installation à partir du poste de travail local et distant.

Le système présente les fonctionnalités suivantes :

- Synoptique de l'installation avec graphiques en couleur, avec identification et valeurs numériques des variables ;
- Visualisation détaillée du sous-système ;
- Visualisation de l'état de l'installation (par exemple phase de démarrage, pannes, alarmes, etc.);
- Enregistrement d'alarmes avec données et heure dans une page de visualisation dédiée ;
- Données enregistrées au format numérique et dans des graphiques ;
- Sauvegarde automatique des principaux signaux analogiques. Les valeurs enregistrées peuvent être affichées dans des diagrammes de temps. La plage d'intervalle de diagramme de temps peut être réglée de 10 secondes à 30 jours ;
- Enregistrement automatique des alarmes et des pannes sur l'ordinateur dans une liste d'alarmes.



Gestion de la sécurité du système

La gestion de la sécurité du système est confiée à un ordinateur approprié, séparé et complètement indépendant de l'unité de commande principale du système.

Le système de sécurité dispose d'une source d'énergie constituée d'une batterie capable de supporter, en cas d'urgence, toutes les procédures nécessaires pour sécuriser et éteindre l'ensemble du système.

Le système de sécurité a pour seul but de surveiller que tous les paramètres du processus restent dans les valeurs par défaut. Les paramètres surveillés comprennent :

- La température ambiante dans les différentes sections de l'installation ;
- L'état des capteurs de sécurité ;
- L'état du capteur de détection d'incendie ;



- L'état des capteurs environnementaux ;
- La disponibilité énergétique du système ;
- Le niveau des émissions de gaz d'échappement ;
- Le niveau des capteurs sonores.

Si le système de contrôle détecte des anomalies de processus, cela désactive le système de contrôle principal et démarre les procédures d'urgence prévues pour le cas d'anomalie, y compris l'arrêt du système, l'activation des systèmes de protection contre les incendies et les avertissements de dysfonctionnement du système.

Risque d'incendie

La structure modulaire du système PI permet un haut niveau de sécurité car tout accident reste confiné dans les modules individuels, qui étant de taille limitée ne représentent pas un risque élevé pour les zones environnantes.

Pour éviter les risques d'incendie les zones de stockage et les modules *CONVERTER* sont saturés avec les gaz d'échappement qui ne contiennent que des traces d'oxygène, empêchant toute combustion et limitant le risque d'incendie au cas de dysfonctionnement de la mise sous atmosphère.

Chaque module PI est équipé d'un système de sécurité, alimenté par batteries, capable d'intervenir de manière autonome en cas de panne du système principal, d'arrêter les systèmes en toute sécurité et d'intervenir en cas d'incendie avec un gaz inerte (CO₂).

La charge maximale d'incendie pour les zones individuelles est calculée comme suit :

- Stockage du flux broyé (primaire et secondaire) 360 m³ → 100 tonnes x 5 MWh / tonne = 500 MWh ;
- *CONVERTER* (cycle unique) 1 m³ → 300 kg x 7 kWh / kg = 2,1 MWh ;
- Stockage CSR 36 m³ → 10 tonnes x 7 MWh / tonne = 70 MWh ;
- Turbine ORC (huile thermique) 10 m³ → 8,5 tonnes x 12 MWh / tonne = 120 MWh.

Risque pour les travailleurs

En ce qui concerne la santé et la sécurité des travailleurs, le système fonctionne automatiquement. La présence d'un opérateur n'est requise que pour la surveillance et les inspections périodiques et pour quelques opérations de maintenance ordinaires à effectuer pendant que les machines fonctionnent.

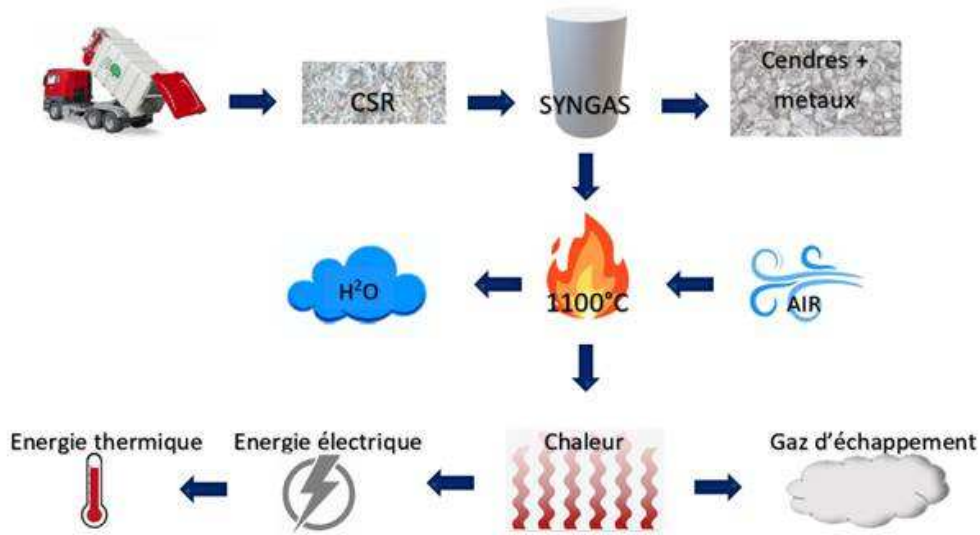
Le système est fourni avec une déclaration de conformité CE et est conforme aux exigences de conception, de fabrication, de sécurité et de mise en service prévues dans l'Union européenne, en outre :

- Les systèmes PI sont constitués de modules fermés qui ne sont pas accessibles aux travailleurs, sauf au personnel de maintenance ;
- La zone de chargement, où des opérations manuelles sont nécessaires, ne commence à fonctionner que si les dispositifs de sécurité électroniques (barrières IR, capteurs de positionnement) ne montrent pas la présence de personnes dans des zones à risque ;
- L'installation respecte pleinement les limites d'émission fixées au sein de l'Union européenne dans le domaine de l'environnement pour éviter tout risque pour la santé ;
- L'installation ne produit aucune pollution olfactive ;
- Le système ne produit pas de pollution acoustique supérieure à 80 dB.

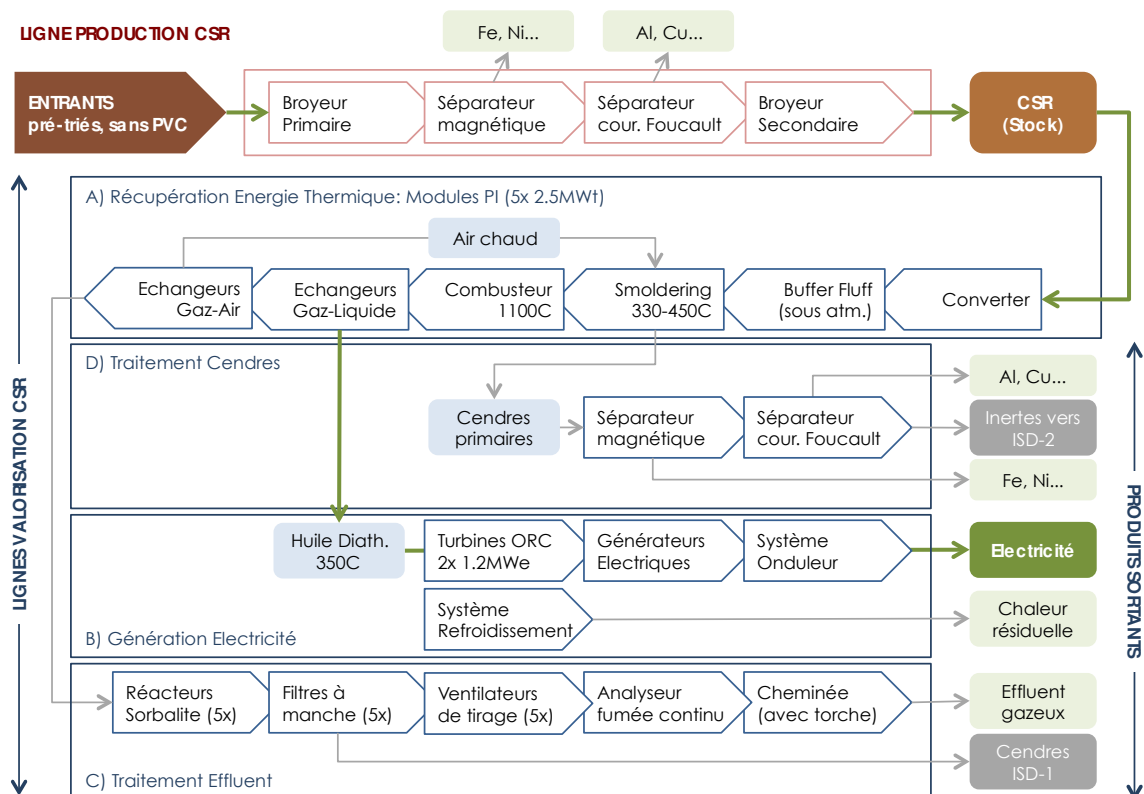
Le système gère 3 niveaux de protection indépendants pour éviter les risques pour la santé humaine.

3.2 SYNOPTIQUES AVEC BILAN MATIERE ET BILAN ENERGETIQUE

3.2.1 SYNOPTIQUES GENERAUX DU PROCEDE :



SYNOPTIQUE PROCEDE: PREPARATION CSR et sa VALORISATION ENERGETIQUE en ELECTRICITE
 Procédé en aval des lignes de recyclage des déchets primaires entrants



3.2.2 BILANS MATIERE

Entrée	Quantité kg/sec	Quantité kg/h	Sortie	Quantité kg/sec	Quantité kg/h
Matière première totale	0.87	3'125	Total des gaz d'échappement	9.09	32'722
<i>H₂O</i>	0.26	925	<i>H₂O</i>	0.62	2'236
Matière volatile	0.49	1'757	CO ₂	1.05	3'794
Matière solides	0.12	443	N ₂	6.42	23'106
			O ₂	0.99	3'560
Air total	8.34	30'040	Autres gaz	0.01	26
Air d'oxydation	4.07	14'654			
Air de dilution	4.27	15'387	Total des solides	0.13	469
			Métaux	0.01	44
Total des réactifs	0.0073	26	Autres solides	0.12	426
Ca(OH) ₂	0.0067	24			
NH ₃	0.0006	2	Total sortie	9.22	33'192
Total entrée	9.22	33'192			

	m ³ /sec	m ³ /h	m ³ /jour
Entrée de matière première	0.0024	9.2	221
Gaz d'échappement @ 140°C	11	39'680	952'323
Métaux récupérables	0.0001	0.3	8
Autres solides	0.0001	0.4	10

3.2.3 BILANS ENERGETIQUE

3.2.3.1 Bilan énergétique global

BILAN ÉNERGÉTIQUE	kWh/h	MWh/An (8000 h)	Bilan énergétique
Apport énergétique des matières premières	11'463	91'705	100%
Puissance électrique nette (vers le réseau)	1'671	13'371	15%
Sortie thermique (à utiliser pour le processus interne)	6'945	55'562	61%
Pertes thermiques du système	2'847	22'772	24%

3.2.3.2 Analyse de sensibilité selon caractéristiques déchets entrants

Analyse de sensibilité, dans les tableaux suivants :

- La quantité d'énergie contenue dans les déchets entrants ;
- L'électricité qui peut être produite à partir des mêmes déchets ;
- L'électricité nette qui peut être transférée au réseau électrique nette de l'autoconsommation de la centrale.

En vert : les valeurs nominales de l'installation,

En jaune : la quantité maximale pouvant être gérée par les modules installés.

Contenu énergétique des déchets entrants

Déchets Quantité d'entrée (kg/h)	Contenu énergétique des déchets 2.5 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 3.0 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 3.7 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 4.0 kWh/kg
1'000	2'500	3'000	3'668	4'000
1'500	3'750	4'500	5'502	6'000
2'000	5'000	6'000	7'336	8'000
2'500	6'250	7'500	9'171	10'000
3'125	7'813	9'375	11'463	12'500
3'500	8'750	10'500	12'839	14'000
4'000	10'000	12'000	14'673	16'000
4'500	11'250	13'500	16'507	18'000

Énergie électrique totale produite

Contenu énergétique des déchets 2..5 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 3.0 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 3.7 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 4.0 kWh/kg
509	610	746	814
763	916	1'120	1'221
1'017	1'221	1'493	1'628
1'272	1'526	1'866	2'035
1'590	1'908	2'333	2'544
1'781	2'137	2'613	2'849
2'035	2'442	2'986	3'256
2'289	2'747	3'359	3'663

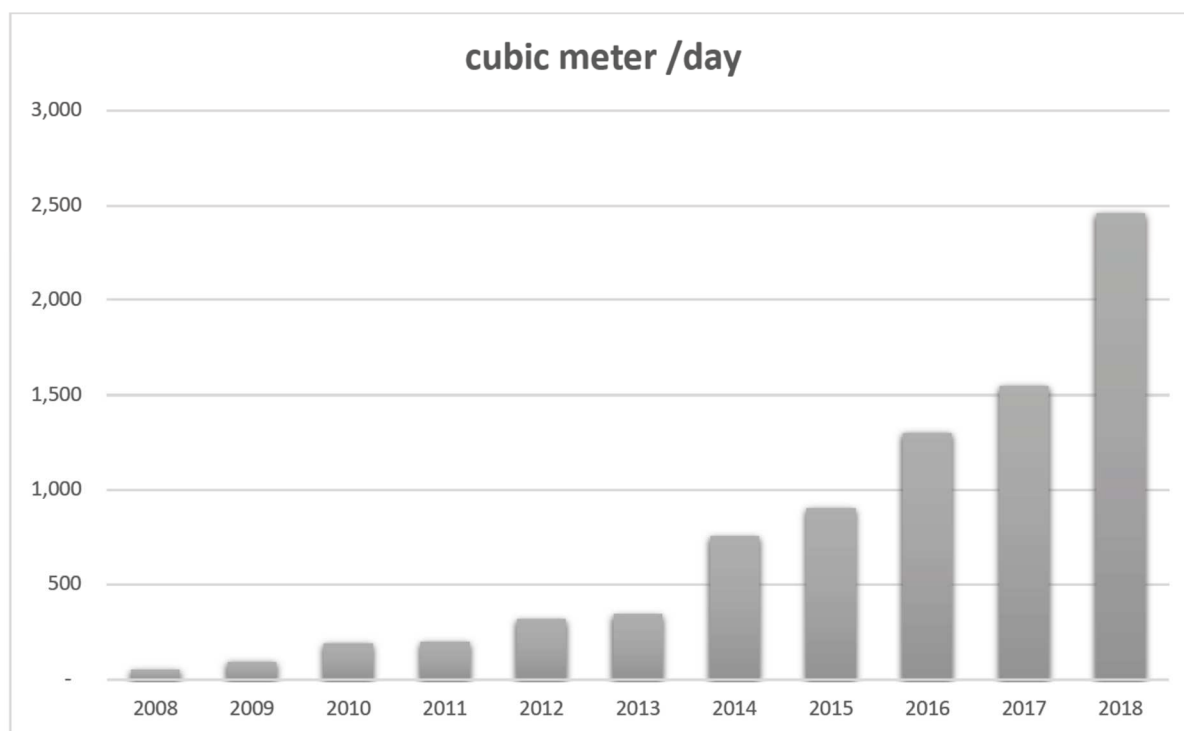
Énergie électrique totale au réseau

Contenu énergétique des déchets 2..5 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 3.0 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 3.7 kWh/kg	Contenu énergétique des déchets 4.0 kWh/kg
272	373	509	577
426	579	783	884
580	784	1'056	1'191
735	989	1'329	1'498
928	1'246	1'671	1'882
1'044	1'400	1'876	2'112
1'198	1'605	2'149	2'419
1'352	1'810	2'422	2'726

3.3 REFERENCES


3.3.1 MODULE *CONVERTER*

Capacité installée des modules *CONVERTER* dans le monde :



3.3.2 LISTE DE REFERENCES

3.3.2.1 Références d'unités dans des hôpitaux (type de déchets : DASRI)

Hôpitaux - Type de déchets : DASRI						
Pays	Ville (ou implantation)	Nom	Nombre d'installations	Tonnage entrant (t/j)	Date de mise en service	Illustration
Panama	Panama	Hospitalar S.A.	2	2	2018	
Botswana	Gaborone	Global Medical	1	2	2018	

Hôpitaux - Type de déchets : DASRI						
Pays	Ville (ou implantation)	Nom	Nombre d'installations	Tonnage entrant (t/j)	Date de mise en service	Illustration
République tchèque	Brno	Siemens Group	1	1	2017	
Lituanie	Taurage	Rebaltus	1	1	2015	
Espagne	Madrid	Cannon Hygiene S.A.		1	2015	
Pakistan	Islamabad	SEED Limited	1	1	2014	
Croatie		Kemis Termoclean	2	2	2014	
Afrique du sud	Limpopo	C.R.C. S.A.	1	5	2014	
Montenegro		Ekomedika D.o.o.	2	6	2013	
Portugal	Iles des Açores	Recolte S.A.	2	2	2011	
Russie	Moscou	Kiel -M	24	24	2010	
Russie	Belgorod	Ecotrans S.A.	1	10	2009	
Italie	Rovigo	SterilAdria SPA	2	4	2008	

Hôpitaux - Type de déchets : DASRI						
Pays	Ville (ou implantation)	Nom	Nombre d'installations	Tonnage entrant (t/j)	Date de mise en service	Illustration
Turquie	Eskisehir	Arieco S.A.	1	10	2008	

3.3.2.2 Références d'unités sur des navires (type de déchets : ménagers)

Navires – type de déchets : ménagers					
Pays	Ville (ou implantation)	Nom	Nombre d'installations	Tonnage entrant (t/j)	Date de mise en service
France	Différents bateaux	Marine militaire française	6	20 au total	2015 et après
Royaume Uni	Différents bateaux	Royal Navy	2	15 au total	2015 et après
Italie	Différents bateaux	Marine militaire italienne	12	30 au total	2012 et après

3.3.2.3 Références d'unités pour des collectivités/privés (type de déchets : ménagers, activités économiques)

Collectivités/Privés - Type de déchets : ménagers, activités économiques						
Pays	Ville (ou implantation)	Nom	Nombre d'installations	Tonnage entrant (t/j)	Date de mise en service	Illustration

Royaume Uni	Londres	Woking Shopping Ltd	1	20	2018	
Guinée	Conakry	Compagnie des Bauxites de Guinée		200	2018	
Emirats Arabes Unis	Plateforme pétrolière (Abu Dhabi)	ADMA OPCO	1	2	2018	
Emirats Arabes Unis	Plateforme pétrolière (golfe Persique)	Marine commerciale	1	2	2018	
Royaume Uni	Manchester	XMET S.A.	1	5	2017	
Emirats Arabes Unis	Dubaï	Marine Assets Corp	2	4	2017	
Royaume Uni	Londres	The Mall Cribbs	1	2	2017	
Vietnam	Ho Chi Minh Ville	VXG Singapore Ltd		150	2016	

4. EVOLUTIONS APPORTEES PAR LE PROCEDURE PI

4.1.1 CONTEXTE PROJET

<i>Problématique</i> Comment résoudre l'équation « sortir de l'enfouissement / contexte insulaire (Saint-Martin) / faible tonnage » ?	<i>Solution prévue par PI</i> Installation modulaire, adaptée aux contraintes du site
---	---

- Installation de petite taille et de faible hauteur au sein de cette zone protégée
- Modulaire : permet le fonctionnement de l'installation même en cas de panne d'un module
- Complexité de l'installation plus faible qu'un incinérateur
- Réduction très importante du volume de déchets ultimes (cendres de four) à stocker dans une ISDND de faible capacité.

<i>Problématique</i> L'île est-elle soumise à des variations saisonnnières des flux et variations de la composition des entrants ?	<i>Solution prévue par PI</i> Adaptabilité de l'installation
--	--

La composition des entrants est assez stable tout au long de l'année à St MARTIN. Le passage par la fabrication de CSR, stocké en zone tampon sur plusieurs heures, augmente l'homogénéité du combustible entrant dans la zone de valorisation énergétique.

La variation des flux (périodes de forte affluence touristique, opération de "cyclonage – nettoyage de l'île avant les périodes cycloniques») peut être facilement absorbée par une variation de tonnage entrant sur chacun des modules.

4.1.2 PREPARATION DE CSR

<i>Problématique</i> Comment l'hétérogénéité du flux entrant est-elle gérée ?	<i>Solution prévue par PI</i> Contrôle visuel et pré-traitement
---	---

Les opérateurs dédiés au chargement réalisent un contrôle visuel des déchets entrants et un tri préliminaire (pince à trier, manuel).

Les deux broyeurs (primaire et secondaire) permettent également d'écarter les déchets indésirables.

<i>Problématique</i>	<i>Solution prévue par PI</i>
Que se passe-t-il en cas d'encrassement / bouchage ?	Inversion automatique des sens de rotation

Les broyeurs sont équipés de systèmes automatiques d'inversion de sens de rotation. Ceux-ci s'enclenchent si la résistance mécanique dépasse un seuil critique, et ainsi ils s'auto-nettoient.

4.1.3 VALORISATION DU CSR

<i>Problématique</i>	<i>Solution prévue par PI</i>
Quelle est la qualité du CSR type FLUFF valorisé ?	Préparation classique de CSR complétée par le module <i>CONVERTER</i>

La préparation du CSR de type FLUFF est réalisée en 2 étapes :

- Une préparation primaire avec tri sur dalle, pré-broyage, déferrailage, broyage secondaire. Cette étape correspond à une préparation de CSR classique. Bien que normé (NF EN 15359 – CSR et Arrêté "Préparation CSR du 23/05/2016) ", à ce stade, le CSR n'est pas suffisamment homogène, au niveau des morceaux individuels produits, eu égard au mode de valorisation énergétique retenu ici.
- Un affinage par le *CONVERTER* pour transformer le CSR en FLUFF et un mélange dans le stockage tampon. Cette étape apporte une large amélioration par rapport aux préparations classiques. Le produit obtenu est homogène, avec une granulométrie des particules <3 mm et une surface spécifique très nettement augmentée. Le *CONVERTER* permet d'assurer un PCI constant, facilite les transferts et surtout assure une combustion parfaite.

<i>Problématique</i>	<i>Solution prévue par PI</i>
Que se passe-t-il en cas de fluctuation importante du PCI du FLUFF ?	Variations acceptées : $\pm 50\%$ du nominal Brûleur d'appoint et arrêt de l'apport d'air

La variation de PCI dépend essentiellement de l'humidité des déchets.

A l'intérieur des limites de la norme, le taux d'humidité du *FLUFF* est normalisé, ce qui lisse complètement les déviations au niveau du *SMOLDERING*.

Le procédé peut traiter des variations jusqu'à +/- 50% de la capacité nominale en énergie sans besoin d'intervention (pour un nominal à 4kWh/kg, donc flexible de 2 à 6 kWh/kg).

Si le PCI tombait vraiment très bas (ex 2kWh/kg), le module *SMOLDERING – COMBUSTEUR* est soutenu automatiquement (en fonction de la température mesurée) par l'injection de combustible fossile (fuel) dans la chambre de combustion, de sorte à garantir une température de 1100°C dans la chambre de combustion : le fuel vient exceptionnellement augmenter le PCI des déchets en cas d'urgence. Cette solution est un élément de sécurité de l'installation mais en aucun cas un mode de fonctionnement dégradé acceptable.

Si le PCI montait significativement (ex 6kWh/kg), le système ajuste (réduit) automatiquement le flux d'air à l'entrée de la chambre de *SMOLDERING* : cela est contrôlé par la température mesurée dans la chambre de *SMOLDERING*.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Quels moyens pour assurer la stabilité des caractéristiques du syngas produit ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Pas d'injection d'air dans la phase de pyrolyse, puis injection d'air dans la phase de gazéification</p>
---	---

Le procédé PI fonctionne sans injection d'air durant la phase de pyrolyse.

Puis une petite quantité d'air est injectée durant la phase de gazéification (environ 35% de la quantité stœchiométrique de combustion). Cela favorise la formation de CO₂, de sorte à maintenir la température de gazéification (400-450°C).

L'eau présente dans le FLUFF entrant s'évapore et, en partie, donne lieu à des réactions shift ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$), en augmentant le taux d'hydrogène et en réduisant le taux de monoxyde de carbone présent dans le syngas final.

En complément, des vannes de régulation assurent une optimisation des flux d'air injectés en fonction des conditions de la combustion.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Quelles limites du procédé pour traiter le syngas produit ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Adaptation du <i>COMBUSTEUR</i> et récupération de l'énergie par échangeur de chaleur</p>
---	--

Le syngas produit dans la chambre de *SMOLDERING* est brûlé immédiatement dans le *COMBUSTEUR*.

Le syngas est un produit intermédiaire. Le PCI du FLUFF se transforme en chaleur en partie dans la chambre du *SMOLDERING* et en partie dans la chambre du *COMBUSTEUR*, le total des deux étant constant.

C'est le *COMBUSTEUR* qui s'adapte ainsi naturellement aux variations du pouvoir calorifique du syngas. Si le syngas a un faible pouvoir calorifique (beaucoup de CO₂ et d'eau), il sort plus chaud de la chambre de *SMOLDERING*, et vice-versa.

Les gaz chauds (1100°C) en sortie de *COMBUSTEUR* passent dans des échangeurs de chaleur où ils chauffent de l'huile diathermique à 350°C qui entraîne les turbines ORC.

Après récupération de la chaleur résiduelle dans des échangeurs gaz-air, les effluents gazeux sont traités dans un réacteur, traverse les filtres à manche et est enfin dirigé en cheminée d'où il sort à 140°C.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Quel type de brûleur est mis en place pour assurer la combustion du syngas ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Combustion du syngas sans brûleur</p>
--	--

Le syngas est brûlé en chambre de combustion, sans brûleur.

Le syngas est envoyé au *COMBUSTEUR* déjà chaud (450°C), à une température suffisante à son auto-inflammabilité. Le seul élément déclenchant la combustion est l'apport d'air (comburant).

Un petit brûleur existe néanmoins à l'entrée de la chambre de combustion pour allumer un combustible fossile d'appoint ajouté en cas d'urgence, si la température descend au-dessous des 1 100°C.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Qu'est-il prévu en cas d'encrassement lié à la présence de goudron dans le syngas ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Maintien d'une température > 350°C</p>
---	--

La température du syngas est toujours maintenue supérieure à 350°C, ce qui empêche la formation de goudron dans le syngas. Cela prévient tout problème d'encrassement. En cas d'accident provoquant l'arrêt de l'installation, l'apport d'air est stoppé et le flux de syngas s'arrête immédiatement.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Que se passe-t-il en cas d'encrassement / bouchage du module ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Systemes d'auto-nettoyage Conception modulaire pour maintenir le traitement des déchets</p>
--	--

Par conception, les flux gazeux ne présentent pas de particules fines ni de goudrons qui pourraient s'accumuler. Néanmoins, les systèmes de filtration et les échangeurs sont tous équipés de système d'auto-nettoyage (décolmatage pour les filtres à manche). Dans l'hypothèse où les filtres à manches venaient à se colmater, une alarme préviendra l'opérateur. La conception modulaire du procédé permet de procéder au remplacement des manches lors des opérations normales de maintenance, tout en continuant à traiter les déchets.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Comment limiter la formation de cendres volantes ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Temps de séjour important</p>
--	--

Le temps de séjour du FLUFF est d'environ 60 minutes pour la phase de pyrolyse, puis à nouveau 60 minutes pour la phase de gazéification. Ces longs temps de séjour, associés à la finesse des particules et à une injection d'air régulée, garantissent une oxydation complète et préviennent toute formation de cendres volantes et de poussières fines. Le syngas produit est ainsi très propre et ne donne pas de problème d'encrassement. Pour la même raison, les effluents gazeux seront exempts de particules fines. Par ailleurs, le taux de carbone résiduel dans les cendres est inférieur à 1%.

<p><i>Problématique</i></p> <p>Comment limiter la présence de métaux lourds dans les effluents gazeux ?</p>	<p><i>Solution prévue par PI</i></p> <p>Température basse de la matière solide</p>
--	---

Durant tout le processus du module *SMOLDERING*, la matière solide est maintenue à une température inférieure à 450°C. Ceci empêche la vaporisation des éléments métalliques et la formation de composés organométalliques.

<i>Problématique</i>	<i>Solution prévue par PI</i>
Sécurité incendie	Arrêt injection d'air, inertage au CO₂ Valorisation énergétique : cloisonné dans un local dédié

Au niveau du *CONVERTER*, le procédé est développé dans une chambre fermée en manque d'oxygène avec une pompe à vide créant une dépression : l'ambiance n'a pas de comburant.

La température des déchets est mesurée en continu et régulée par la vitesse de rotation des lames. En complément, une injection d'eau est déclenchée automatiquement, si cette température dépasse la température de fonctionnement prévue.

En sortie du module *CONVERTER*, le stockage du FLUFF est sous atmosphère inerte par injection (saturation) de CO₂ en provenance des fumées. La concentration de CO₂ est mesurée en continu. En cas d'urgence, des bonbonnes de CO₂ additionnelles se déclenchent automatiquement.

Concernant le module *SMOLDERING*, les gaz chauds sont aspirés par dépression vers l'Oxydation (pas de retour possible vers la chambre de décompression ou vers l'extraction des cendres).

Au niveau de l'ensemble *SMOLDERING* et *COMBUSTEUR*, en cas de température haute, l'injection d'air est automatiquement arrêtée, ce qui arrête toutes les réactions. Un inertage à l'azote est déclenché en cas d'arrêt d'urgence (intervention manuelle).

Au niveau du module de Production électrique, les échangeurs sont équipés de soupapes de sécurité. Les turbines ORC sont cloisonnées dans un local dédié, équipé d'un système anti-incendie, par azote (armoires électriques) et poudres anti-incendie (huile diathermique).

Le module de Traitement des effluents gazeux, traite des gaz à 140°C, dont la température faible limite le risque d'incendie.

4.1.4 COMMUNS PREPARATION ET VALORISATION DU CSR

<i>Problématique</i>	<i>Solution prévue par PI</i>
Maintenance	Réalité augmentée Anticipation des commandes par GMAO

Le fabricant développe des sessions spéciales pour la formation et la qualification du personnel de maintenance. Cependant, les opérations de maintenance les plus complexes sont gérées directement en collaboration avec le personnel technique de l'entreprise grâce à des dispositifs de réalité augmentée portés par les techniciens de maintenance du site de production et partagés par les techniciens du constructeur.

Le système de surveillance et de contrôle informatisé, basé sur les paramètres d'utilisation du système collectés, définit quelles pièces doivent être entretenues ou éventuellement remplacées par de nouveaux composants.

Le système informatisé publie mensuellement la liste des composants qui devront être remplacés dans les mois suivants, afin d'anticiper les commandes et de limiter les contraintes liées aux délais de livraisons (3 semaines à un mois par voie maritime, quelques jours par voie aérienne).

Une analyse AMDEC sera réalisée lors de la phase d'engineering détaillé du projet, et permettra d'optimiser la liste des pièces de rechange en fonction de leur criticité, ainsi que de définir avec précision les opérations de maintenance préventive et les procédures de maintenance curative.