OBJET	Rapport d'étude des technologies de gazéification appliquées à la micro-cogénération (puissances inférieures à 300 kW) dans le cadre d'une étude de faisabilité pour la production d'énergie d'un complexe hôtelier
DATE	Mercredi 17 juillet 2019
RÉDACTEUR	Victor VASTRA
DIFFUSION	EXERGIA : Michel LEFORT, Alexandre BALESTRUCCI, Juliette BODIN LERMAB : Yann ROGAUME

ÉTABLISSEMENT	17/07	VV					0
MODIFICATIONS	DATE	ETABLI	DATE	VERIFIE	DATE	APPROUVE	REV.

I. INTRODUCTION

Dans le cadre d'une étude de faisabilité de solutions de production d'énergie pour un complexe hôtelier, nous tâcherons d'établir un état de la technique actuelle dans le domaine de la gazéification appliquée à la micro-cogénération à travers ce dossier.

Avant toute chose, il semble important de définir les termes de ce sujet, ce que nous ferons au cours de cette introduction.

- **Qu'est-ce que la micro-cogénération ?**

On appelle cogénération la production simultanée de deux formes d'énergie, à savoir la production d'**électricité** et la production de **chaleur**, au sein d'un même système de transformation énergétique. Cette génération simultanée de deux énergies secondaires est rendue possible par la consommation d'une énergie primaire en entrée, c'est l'exemple typique d'un moteur thermique qui consomme du carburant (pétrole raffiné) et qui produit simultanément une énergie mécanique utile et de la chaleur dite « fatale », c'est-à-dire qui n'est pas toujours recherchée (ou seulement dans une moindre mesure). Le principe de cogénération, illustré sur la FIGURE 1, cherche quant à lui à valoriser cette part fatale de chaleur induite par la production parallèle d'électricité.

La hausse des prix des énergies, mais surtout l'urgence de la transition énergétique que doit opérer notre société dans un monde qui se développe à pas de géant – démographiquement et technologiquement – force depuis quelques années les entreprises industrielles mais aussi les particuliers à se tourner vers des solutions alternatives quant à leur consommation énergétique. C'est dans ce contexte de développement durable que s'inscrit l'initiative de la cogénération énergétique.

Sur ce principe, la micro-cogénération qualifie des solutions de cogénération de faible puissance électrique, globalement inférieures à 300 kW.

Figure 1. Moteur à combustion interne illustrant le principe de la cogénération

❖ Qu'est-ce que la gazéification ?

La gazéification est un processus à haute température (800 – 1200 °C) permettant de générer du gaz, appelé par la suite **syngaz**, à partir d'un combustible généralement organique. On retrouve le plus souvent le bois est ses dérivés, les CSR (Combustibles Solides de Récupération) ou encore les boues d'épuration parmi les combustibles les plus utilisés dans ce procédé.

Le combustible subit d'abord une pyrolyse (env. 300°C – atmosphère inerte) au sein du réacteur, ce qui va générer des gaz et un résidu solide riche en carbone. Ce dernier résidu sert à son tour de combustible lors d'une étape de combustion dont les conditions (température, vitesse de montée en température, composition de l'atmosphère réactionnelle) varient en fonction des produits finaux recherchés. Cette étape de combustion, au sein du même réacteur, apporte en général l'énergie nécessaire pour entretenir l'étape de pyrolyse effectuée en amont : le processus présente donc l'avantage d'être **auto-suffisant** en termes de consommation énergétique. Le couplage de ces deux étapes permet d'obtenir le syngaz contenant des composés en proportions variables en fonction des conditions réactionnelles, notamment du monoxyde de carbone CO et du dihydrogène H_2. Les différentes étapes du processus sont identifiées sur la FIGURE 2.

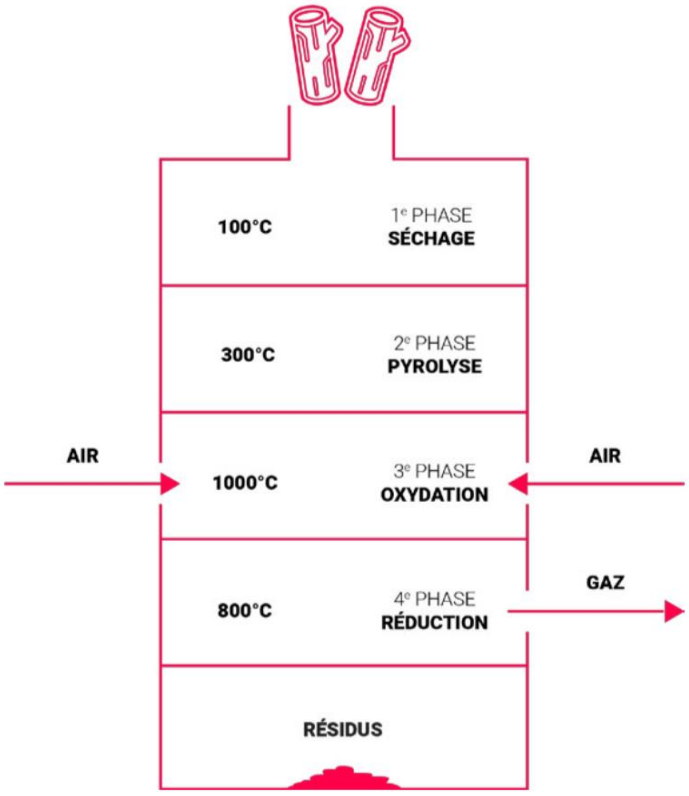


Figure 2. Processus de gazéification de la biomasse

Il existe différents types de procédés de gazéification, se distinguant principalement par le type de lit mis en place au niveau du réacteur (lit fixe co et contre-courant ; lit étagé ; lit fluidisé dense, circulant ou double ; lit entraîné). Quelques exemples sont illustrés par la FIGURE 3.

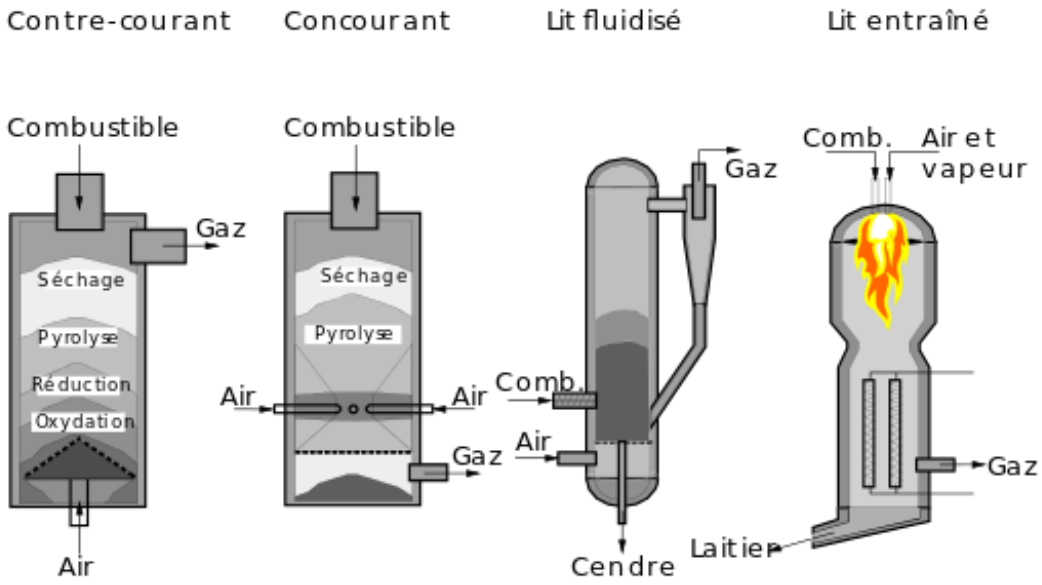


Figure 3. Différents types de gazéifieurs

Dans une optique de cogénération, le mélange gazeux obtenu au terme de ce procédé est filtré afin d'en éliminer les composés volatils indésirables tels que les NO_x , l'ammoniac NH_3 ou encore l'acide isocyanique $HNCO$ qui sont des composés nocifs pour la santé et corrosifs envers les moteurs de cogénération.
Le gaz purifié est ensuite acheminé vers un moteur (ou une turbine à combustion interne illustrée en FIGURE 4) où il sert de carburant à ce dernier qui génère alors de l'électricité et de la chaleur.

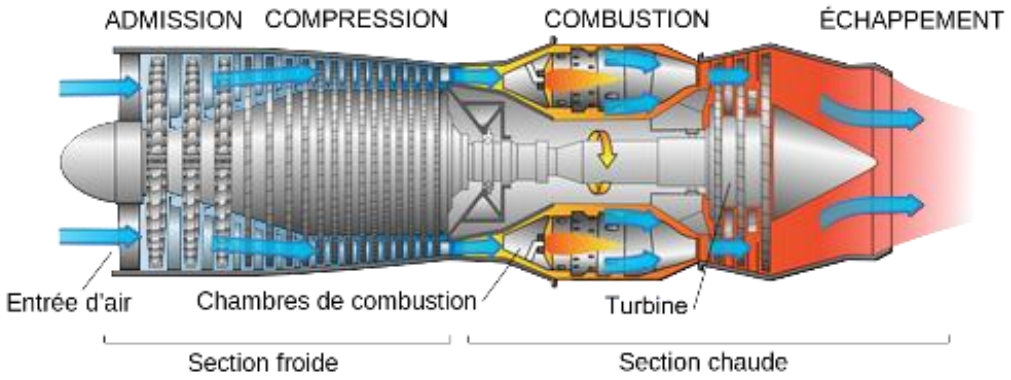


Figure 4. Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

Il existe différentes technologies de ce genre adaptées à la micro-cogénération. Les divers fournisseurs proposent des modèles de gazéifieurs couplés à des moteurs de cogénération variant selon leur efficacité énergétique (puissances ; rendements) mais aussi selon leurs caractéristiques techniques (encombrement du système ; approvisionnement, humidité et granulométrie du combustible).

Dès lors, il convient d'étudier les caractéristiques du projet avant d'opter pour le système de production d'énergie le plus adapté à ce dernier, ce que nous ferons dans la partie suivante.

II. ÉTUDE DU PROJET ET ANALYSES DES TECHNOLOGIES DE GAZEIFICATION/COGENERATION ADAPTEES

A. Caractéristiques succinctes du projet

Le projet étudié correspond à un complexe hôtelier d'une superficie avoisinant les 1500 m^2 et dont les besoins annuels en énergie ont été évalués à :

- **Besoins électriques de 262 MWh**
- **Besoins thermiques de 286 MWh**

L'ensemble du complexe comprenant 25 chalets, un restaurant, un spa et 11 piscines ne nécessite ainsi pas plus de **550 MWh/an**. Nous étudierons donc des solutions de production d'énergie de relativement faibles puissances, suffisantes pour couvrir ces besoins, afin d'optimiser la solution par gazéification et cogénération d'un point de vue économique.
Un espace de 50 m^2 est réservé à l'accueil d'une centrale de cogénération sur le site.

Dans les paragraphes suivants, nous développerons les différentes solutions retenues sur ces critères.

B. Caractéristiques techniques des différentes technologies étudiées

1) NAODEN – Gamme Imperium :

La société NAODEN implantée à Nantes (44) offre une gamme de centrales déclinée en deux puissances de production de cogénération :

Solution	*Imperium 50*	*Imperium 100*
Puissance électrique	45 kW	90 kW
Puissance thermique	90 kW	160 kW

Chacune de ces solutions est composée des modules suivants :

- **Une unité de stockage (USB)** de la biomasse
- **Un système de convoyage (UTB)** des combustibles vers le gazéifieur
- **Une unité de gazéification (UGZ)**, produisant le syngaz brûlé dans le moteur de cogénération
- **Une unité de filtration (UFL)**, éliminant les polluants des gaz en sortie de gazéifieur
- **Une unité torchère (UTO)** garantissant la qualité optimale du syngaz avant passage sur le moteur
- **Une unité de production d'énergie (UPE)** constituée d'un moteur à combustion interne couplé à un alternateur (production électrique) et un récupérateur de chaleur (production thermique)

La disposition type de cet ensemble est illustrée par la FIGURE 5.

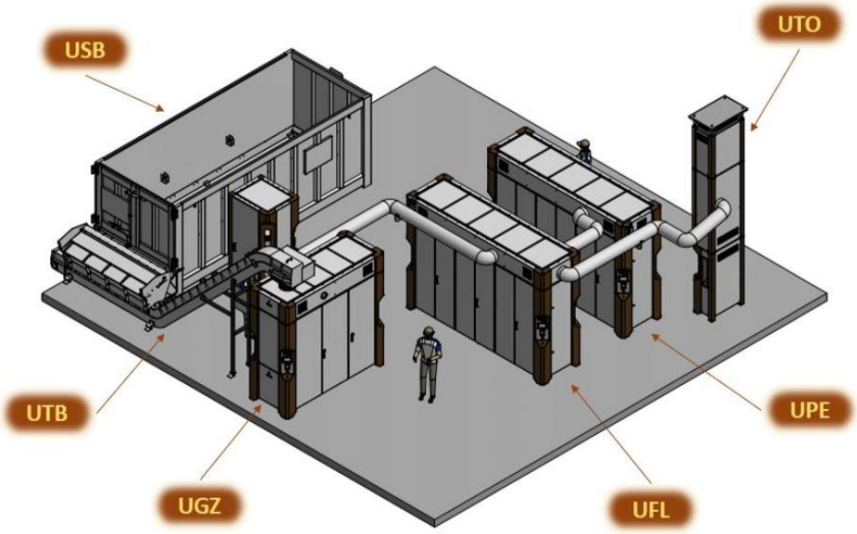


Figure 5. Vues 3D d'une implantation type

Dans l'idéal, il faut compter une emprise au sol de **100** m^2 pour une telle implantation, pour **3** m de hauteur. Cette superficie dépasse largement celle autorisée par les données du projet mais l'étude de ces solutions a tout de même été réalisée. Tous les modules sont adaptés à une utilisation en extérieur. Cependant, la standardisation des produits autorise une certaine modularité dans la disposition ainsi que l'augmentation de la capacité de production en ajoutant plusieurs modules UGZ, UFL, UTO et UPE en parallèle.

NB : l'unité de filtration permet de diminuer la vitesse de dégradation du moteur par corrosion en éliminant les polluants du syngaz issus du gazéifieur. Le traitement des fumées semble être réalisé au sein de l'unité de production d'énergie (information à demander au fabricant).

Différents types de combustibles sont acceptés par le système, parmi lesquels on retrouve :

- Broyats de palettes / palox
- Fraction ligneuse de déchets verts – sciures de bois – écorces
- Déchets de bois de classes A et B
- Noyaux et coquilles de fruits
- Combustibles Solides de Récupération (hors résidus de Tri Mécano-Biologique et Déchets Industriels Banals)
- Boues de stations d'épuration des eaux usées

- Digestats de méthanisation et coproduits agricoles
- Pneus usagés
- Gros de magasins (emballages mélangés de taille importante issus des commerces)

Ces combustibles doivent répondre à plusieurs critères afin de pouvoir être valorisés dans le gazéifieur :

- Taux d'humidité maximum de **20%**
- Granulométrie de la fraction principale limitée à **80 mm**
- Taux de fines (granulométrie < 1 mm) limité à **30 % de la masse du combustible**

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes caractéristiques de la centrale :

DONNÉES DU SYSTÈME – **NAODEN Imperium (50 & 100)**		
Rendements		
Rendement du gazéifieur	82,5	%
Rendement électrique	30	%
Rendement thermique	52,5	%
Puissances		
Puissance électrique	45 ou 90	kW
Puissance thermique	90 ou 160	kW
Granulométries acceptées		
Fraction ppale (80% m.)	3,15 - 80	mm
Taux de fines (gran. < 1 mm) max.	30	%
Humidité		
Humidité max. du combustible	20	%
Réservoir		
Volume silo	30	m3
Autonomie	6 à 9	jours
Viabilité		
Durée de vie min.	15	ans
Heures de fonctionnement max.	8200	h/an
Encombrement		
Volume occupé	300	m^3
Surface au sol	100	m^2
Hauteur max.	3	m
Longueur max.	Non pertinent	
Largeur max.	Non pertinent	

2) VOLTER OY – Volter 40 Indoor:

La société finlandaise Volter Oy propose une solution de cogénération par pyrogazéification de la biomasse composée des éléments suivants :

- **Un sécheur BioDry 35**, dont le rôle est de diminuer l'humidité du combustible afin d'optimiser le rendement du système
- **Une vis de transfert** du combustible assurant l'approvisionnement du gazéifieur
- **L'unité de gazéification et production d'énergie Volter 40 Indoor**

On trouvera en FIGURES 6 ET 7 les schémas relatifs à cette dernière unité.

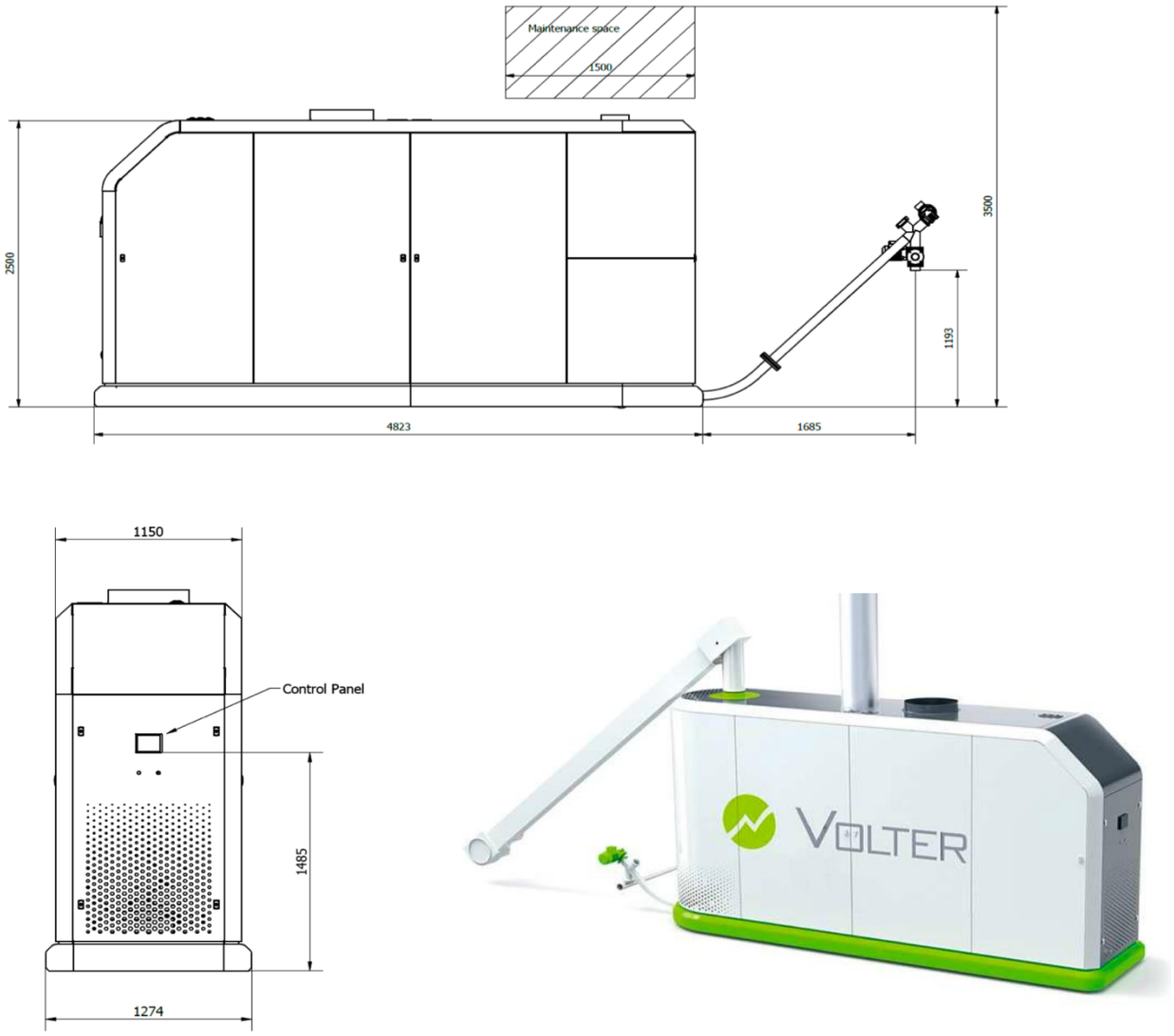
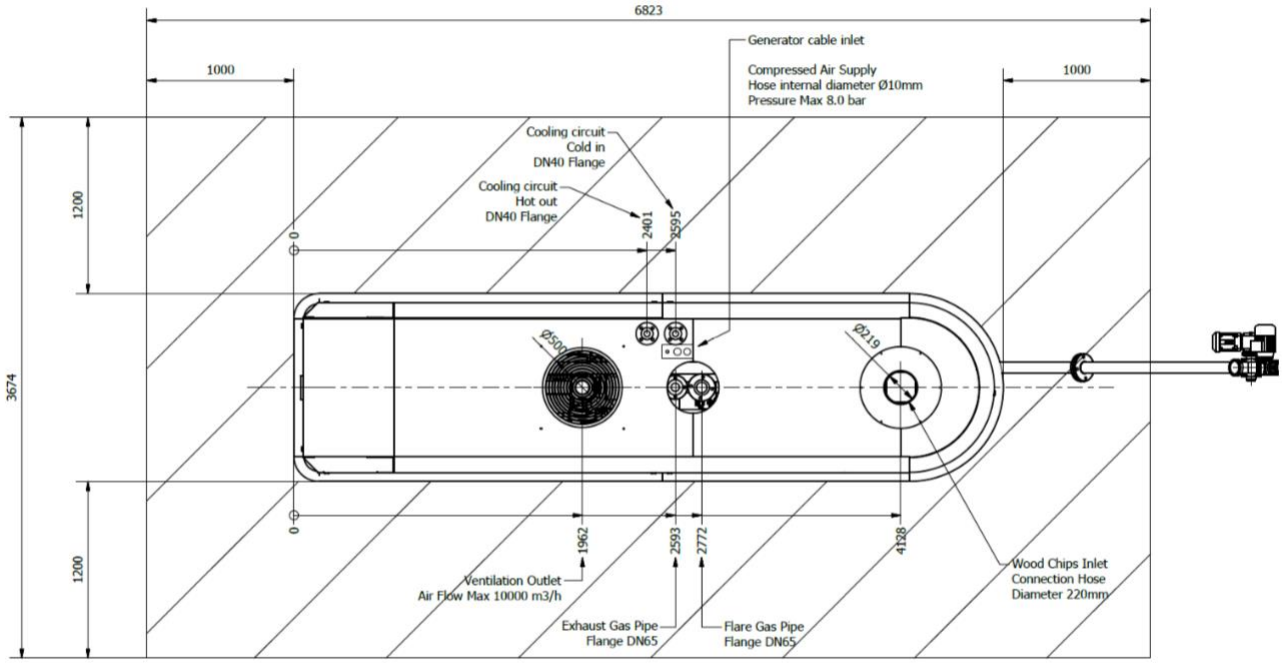


Figure 6. Unité de gazéification/cogénération Volter 40 Indoor

Single installation



Multiple installation

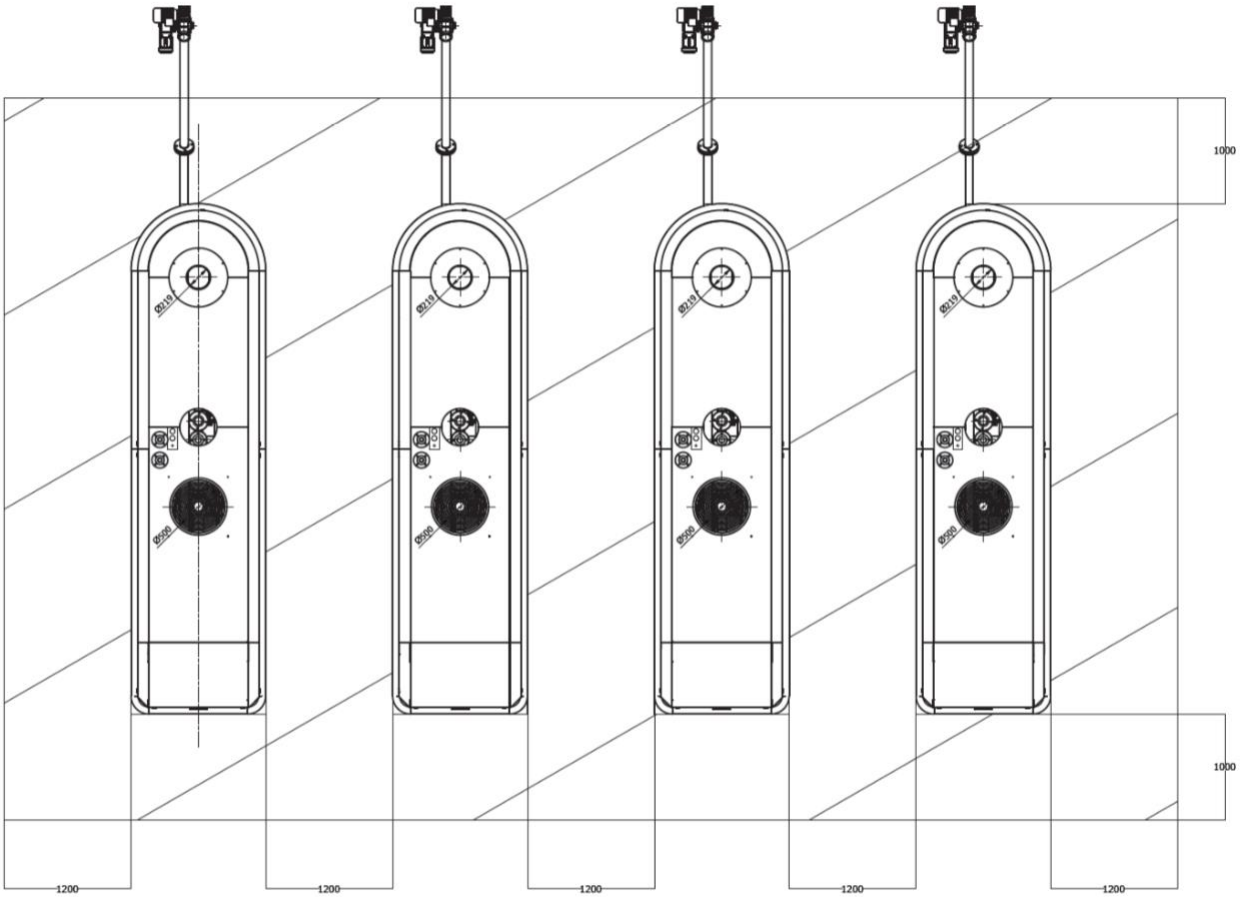


Figure 7. Implantation unique ou multiple de l'unité Volter 40 Indoor

Ce module est spécialement conçu pour fonctionner en **intérieur** (humidité relative inférieure à 90% et sans condensation), ce qui incombe de disposer d'un local adéquat pouvant accueillir la solution Volter 40 Indoor.

Le **traitement des fumées** est intégré dans l'unité principale, aucun équipement complémentaire n'est donc à prévoir au niveau de la filtration.

L'unité doit être alimentée par des copeaux de bois dont la granulométrie maximale (pour seulement 9% de la masse totale des particules) ne doit pas excéder 63 mm.

Les principales caractéristiques de cette solution sont résumées dans le tableau suivant :

DONNÉES DU SYSTÈME – **VOLTER 40 Indoor**		
Rendements		
Rendement du gazéifieur	NC ⚠	
Rendement électrique	NC ⚠	
Rendement thermique	NC ⚠	
Puissances		
Puissance électrique	40	kW
Puissance thermique	100	kW
Consommation électrique	1,5 - 2	kW
Granulométries acceptées		
Fraction ppale (80% m.)	16 -50	mm
Taux de fines (gran. < 3,2 mm) max.	1	%
Humidité		
Humidité max. du combustible	18	%
Réservoir		
Autonomie	env. 5	jours
Viabilité		
Durée de vie min.	30	ans
Heures de fonctionnement max.	7800	h/an
Encombrement		
Volume occupé	88,06	m3
Surface au sol (sécheur et maintenance inclus)	55	m2
Hauteur max.	3,5	m
Longueur max.	6,8	m
Largeur max.	3,7	m

⚠ Le fait que le fournisseur ne renseigne pas ses rendements impose de porter une attention particulière à l'estimation de la rentabilité économique de cette solution.

3) SPANNER Re^2 GmbH – HKA 70 :

Le groupe allemand SPANNER Re^2 GmbH, dont la société AHCS basée à Saint-Nolff (56) commercialise les produits en France, propose une centrale dont les puissances conviennent au projet étudié.

Le bloc énergie HKA 70 comprend trois containers de 40'' High Cube (dimensions unitaires : L. 12 m x l. 2,5 m x h. 2,5 m) comportant respectivement :

- **Volume de stockage** de biomasse de 67 m^3 à ciel ouvert ; *ce container est également disponible en 20'' (volume = 33 m^3 ; L. 6 m x l. 2,5 m x h. 2,5 m)*
- **Séchoir/crible** de biomasse avec ventilateurs
- **Module de gazéification**, hydraulique, réseau de gaz et fumisterie ainsi que le **moteur de cogénération**

L'ensemble est conçu pour une disposition en **extérieur** et l'alimentation du réservoir de biomasse se fait à l'aide d'un **chariot télescopique**.

Les combustibles admis par la centrale sont principalement :

- Plaquettes forestières
- Pellets
- Copeaux de bois naturel

Les FIGURES 8 ET 9 illustrent l'installation décrite dans ce paragraphe :

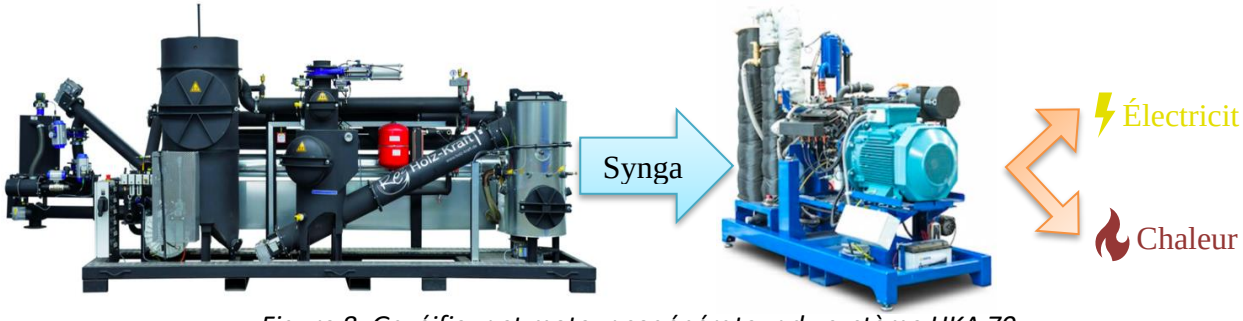


Figure 8. Gazéifieur et moteur cogénérateur du système HKA 70

Figure 9. Implantation du module de stockage (20'') et du module de gazéification/cogénération (40'')

Les données techniques de cette centrale figurent dans le tableau ci-dessous :

DONNÉES DU SYSTÈME – **SPANNER HKA 70**		
Rendements		
Rendement du gazéifieur	NC	⚠
Rendement électrique	env. 30	%
Rendement thermique	NC	⚠
Puissances		
Puissance électrique	68	kW
Puissance thermique	123	kW
Consommation électrique	NC	
Granulométries acceptées		
Fraction ppale (80% m.)	30	mm
Taux de fines (gran. < 4mm) max.	30	%
Humidité		
Humidité max. du combustible	13	%
Réservoir		
Volume silo (20'' & 40'')	33 - 67	m3
Autonomie (utilisation continue)	3 à 5	jours
Viabilité		
Durée de vie min.	NC	
Heures de fonctionnement max.	8000	h/an
Encombrement		
Volume occupé (containers 40")	270	m3
Surface au sol (containers 40")	108	m2
Hauteur max.	2,5	m
Longueur max. (selon disposition)	12 - 24 -36	m
Largeur max. (selon disposition)	2,5 - 6 - 9	m

Ici aussi, le fournisseur ne renseigne pas tous les rendements de sa solution, ce qui peut induire une sous-évaluation de la consommation en combustibles et donc une surestimation de la rentabilité économique du système. Cependant, notons que Spanner est un groupe dont les produits sont assez répandus en Allemagne ; leur technologie semble faire ses preuves et les produits ont un bon retour d'expérience. Une demande d'informations plus précises sur les rendements du gazéifieur et de l'échangeur thermique serait toutefois à prévoir.

Par ailleurs, SPANNER Re^2GmbH propose d'autres solutions de micro-cogénération par gazéification, de plus faibles puissances, donc moins pertinentes dans le cadre du projet étudié. Le tableau ci-dessous regroupes ces solutions :

Solution	$P_{électrique}$ délivrée	$P_{thermique}$ délivrée
HKA 10	9 kW	22 kW
HKA 35	35 kW	79,5 kW
HKA 45	45 kW	102,2 kW
HKA 49	49 kW	111,3 kW

Un audit pourrait toutefois être effectué auprès du groupe SPANNER Re^2GmbH afin d'établir les rentabilités économiques des trois dernières solutions du tableau ci-dessus.

Pour le projet étudié, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'étude économique de l'***Imperium 50*** et l'***Imperium 100*** de chez NAODEN, du ***Volter 40 Indoor*** de chez VOLTER ainsi que du ***HKA 70*** de chez SPANNER.
Le paragraphe suivant établit une synthèse comparative de cette étude de rentabilité économique.

C. Comparaison des technologies d'un point de vue économique

- **<u>Comparatif des coûts d'investissement :</u>**

Solution	SYNTHÈSE DES COÛTS DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS			
	NAODEN		VOLTER	SPANNER
	Imperium 50	Imperium 100	Volter 40 Indoor	HKA 70
Investissement				
Centrale	426 601,00 €	600 200,00 €	346 660,00 €	774 417,05 €
Génie civil/terrassement	13 000,00 €	13 000,00 €	24 900,00 €	25 146,20 €
Total investissement*	**439 601,00 €**	**613 200,00 €**	**371 560,00 €**	**799 563,25 €**
Prix de l'investissement au kW électrique**	**9768,91 €/kWe**	**6813,33 €/kWe**	**9289 €/kWe**	**11758,28 €/kWe**

**Les coûts d'investissement (centrale, génie civil et terrassement) sont des inputs constructeurs.*

***La dernière ligne correspond au total de l'investissement divisé par la puissance électrique utile de la solution.*

- **Comparatif des coûts de fonctionnement pour une utilisation répondant uniquement aux besoins du projet :**

Solution	SYNTHÈSE DES COÛTS DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS			
	NAODEN		VOLTER	SPANNER
	Imperium 50	Imperium 100	Volter 40 Indoor	HKA 70
Fonctionnement				
Consommation de combustibles (P1) annuelle*	35 763,04 €	35 763,04 €	35 763,04 €	35 763,04 €
Consommation d'électricité (P1') annuelle	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
Maintenance courante (P2) annuelle**	6 000,00 €	8 000,00 €	11 500,00 €	NC
Provision pour réparation (P3) annuelle***	4 075,56 €	3 275,00 €	8 100,00 €	NC
Remboursement d'emprunt (P4) annuel	48 939,25 €	68 265,43 €	41 364,48 €	89 012,60 €
Total fonctionnement annuel	**94 777,84 €**	**115 303,46 €**	**96 727,52 €**	**124 775,64 €**
Prix du fonctionnement au MWh électrique sans valorisation thermique**	**361,75 €/MWhe**	**440,09 €/MWhe**	**369,19 €/MWhe**	**476,24 €/MWhe**
Prix du fonctionnement au MWh électrique avec valorisation thermique***	**326,75 €/MWhe**	**405,09 €/MWhe**	**334,19 €/MWhe**	**441,24 €/MWhe**

** Hypothèse : L'installation répond uniquement au besoin du projet – combustible assimilé à des plaquettes forestières à 10% d'humidité – PCI de 4,44 MWh/tonne – prix de 150 €/tonne (séchage compris).*

*** Input constructeur.*

**** Prix de remplacement du bloc moteur divisé par la durée de vie de ce dernier pour un taux d'utilisation annuel répondant uniquement au besoin électrique annuel (input constructeur).*

***** Coût de fonctionnement divisé par la production électrique annuelle répondant uniquement au besoin électrique.*

****** Coût de fonctionnement annuel moins recette générée par la revente de chaleur produite à l'année (hypothèse : prix de revente de 20€/MWh), divisé par la production électrique annuelle répondant uniquement au besoin électrique.*

- **Comparatif des coûts d'utilisation pour une utilisation à pleine charge des solutions :**

Solution	SYNTHÈSE DES COÛTS DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS			
	NAODEN		VOLTER	SPANNER
	Imperium 50	Imperium 100	Volter 40 Indoor	HKA 70
Fonctionnement				
Consommation de combustibles (P1) annuelle*	50 368,55 €	100 737,10 €	42 588,04 €	74 256,07 €
Consommation d'électricité (P1') annuelle	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent	Non pertinent
Maintenance courante (P2) annuelle**	6 000,00 €	8 000,00 €	11 500,00 €	NC
Provision pour réparation (P3) annuelle***	5 740,00 €	9 225,00 €	8 100,00 €	NC
Remboursement d'emprunt (P4) annuel	48 939,25 €	68 265,43 €	41 364,48 €	89 012,60 €
Total fonctionnement annuel	**111 047,80 €**	**186 227,53 €**	**103 552,53 €**	**163 268,67 €**
Prix du fonctionnement au MWh électrique sans valorisation thermique**	**300,94 €/MWhe**	**252,34 €/MWhe**	**331,9 €/MWhe**	**300,13 €/MWhe**
Prix du fonctionnement au MWh électrique avec valorisation thermique***	**265,94 €/MWhe**	**217,34 €/MWhe**	**296,9 €/MWhe**	**265,13 €/MWhe**

** Hypothèse : L'installation fonctionne à pleine charge (ie. au maximum du nombre d'heures annuelles renseigné par le constructeur) – combustible assimilé à des plaquettes forestières à 10% d'humidité – PCI de 4,44 MWh/tonne – prix de 150 €/tonne (séchage compris).*

*** Input constructeur.*

**** Prix de remplacement du bloc moteur divisé par la durée de vie de ce dernier pour un taux d'utilisation à 100% de la valeur indiquée par le fournisseur (input constructeur).*

***** Coût de fonctionnement divisé par la production électrique annuelle maximale.*

****** Coût de fonctionnement annuel moins recette générée par la revente de chaleur produite à l'année (hypothèse : prix de revente de 20€/MWh), divisé par la production électrique annuelle maximale.*

NB : les rendements inconnus sont supposés identiques à ceux fournis par NAODEN, sous l'hypothèse que toutes les technologies de gazéification sont actuellement équivalentes.

NB bis: les coûts inhérents à la consommation électrique des solution sont supposés non pertinents à partir du moment où le procédé est considéré comme auto-alimenté.

III. CONCLUSION

Les différentes technologies de gazéification appliquées à la micro-cogénération étudiées à travers ce dossier sont avant toute chose onéreuses et volumineuses.

Par ailleurs, il existe un important manque d'information de la part de la plupart des constructeurs sur les données techniques des appareils, notamment les rendements. Cette lacune d'information est sans doute liée à la genèse assez récente de ces technologies qui ne sont pas encore totalement abouties.

Les temps de retour sur investissement moyens de ces technologies et de toutes les installations et consommations qui leur sont liées (backups thermiques, émetteurs, locaux…) sont encore très hauts (plus de 50 ans).

On arrive à calculer des retours sur investissement sur une dizaine d'année si une subvention de l'ADEME ou de la région est octroyée à hauteur de 70% de l'investissement sur un tel projet. Cependant, cette subvention n'est pas d'actualité.

Un travail en parallèle de l'État sur ladite subvention et de la R&D sur l'optimisation de ces procédés est à espérer si l'on veut voir cette technologie émerger comme un réel outil de la transition énergétique.

NB : d'autres technologies existent actuellement, parmi lesquelles on retrouve les groupes Leroux & Lotz (dont les technologies de ce genre se concentrent davantage sur les plus grosses puissances) ou Mini Green Power (mais dont le rendement de la technologie est encore faible dû à l'utilisation de turbines ORC à basses température pour de telles puissances).

« Il n'y a pas de solution miracle pour lutter contre le réchauffement climatique : il y a des solutions, que nous devons apprendre à faire fonctionner entre elles »

Victorien Erussard, Capitaine du Energy Observer