

Valorisation énergétique de biomasses et de déchets solides

Gwendal Vonk

La gazéification à l'air

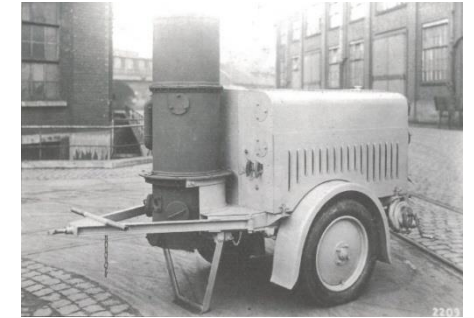
-

Historique et principe

La gazéification à l'air : Une technologie robuste

- Découverte fin XVIII^{ième} siècle : 1^{er} brevets « gazéification » en 1788 et 1791
- Utilisé pour produire du « gaz de ville » et alimenter les lampadaires à Londres et Paris
- Fort développement début XX^{ième} siècle (1920-1930)
- Essor durant la II^{nde} Guerre Mondiale : pénurie de carburants liquides
- Nouvel essor années 1980 : post crises pétrole 1973 et 1979
- Nouvel essor depuis 2010 : post crise 2008 (?)

Groupe électrogène - 1942



J.Wolff, « Le gazogène à bois Imbert », 1999

Berlin 1946



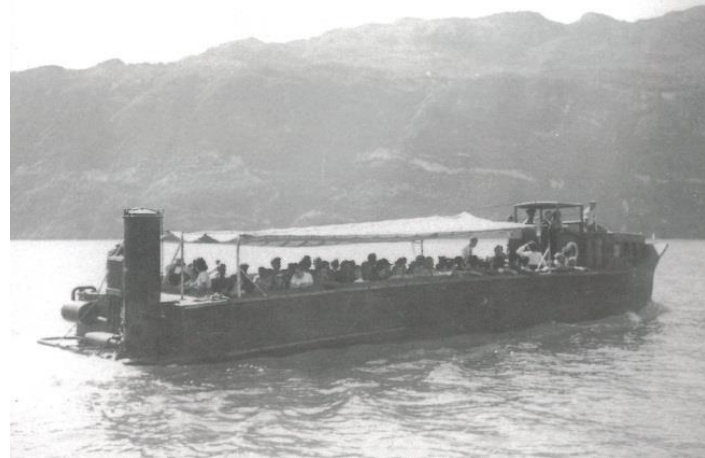
Bundesarchiv, Bild 183-V00670A -
Wikipedia

Corée du Nord 2014



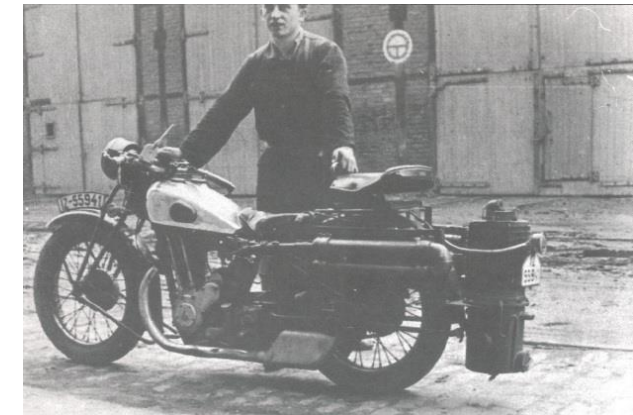
B.C. Tørrissen -
Wikipedia

Bateau « Etoile du Lac » - 1942-45



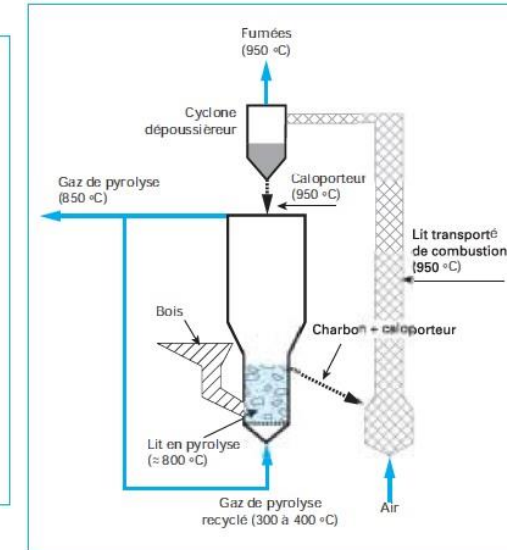
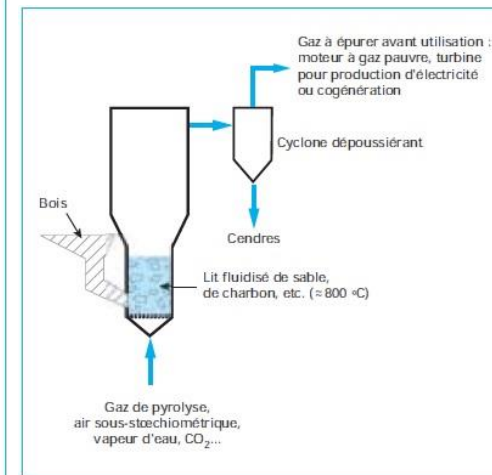
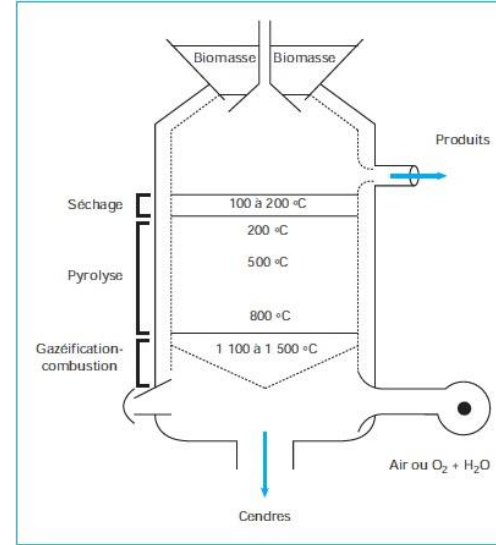
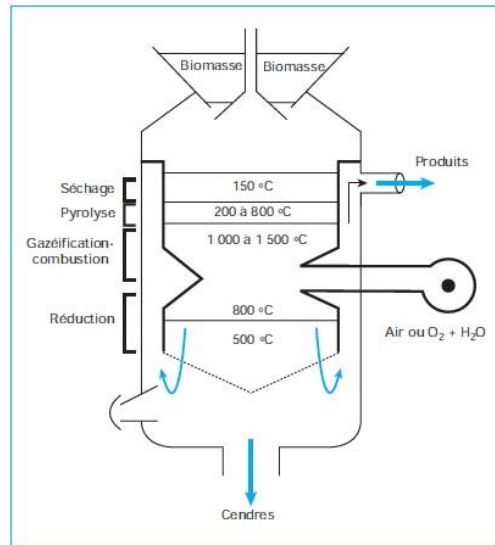
J.Wolff, « Le gazogène à bois Imbert », 1999

Moto 500cc - 1932



J.Wolff, « Le gazogène à bois Imbert », 1999

Le choix de la gazéification en lit fixe co-courant



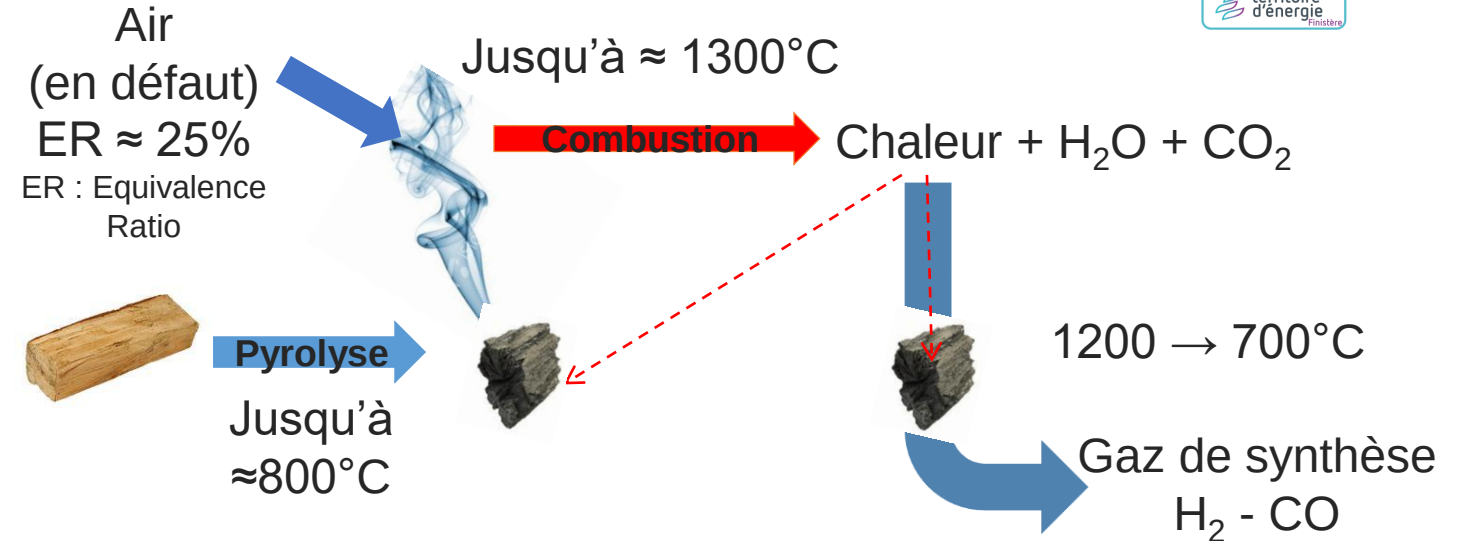
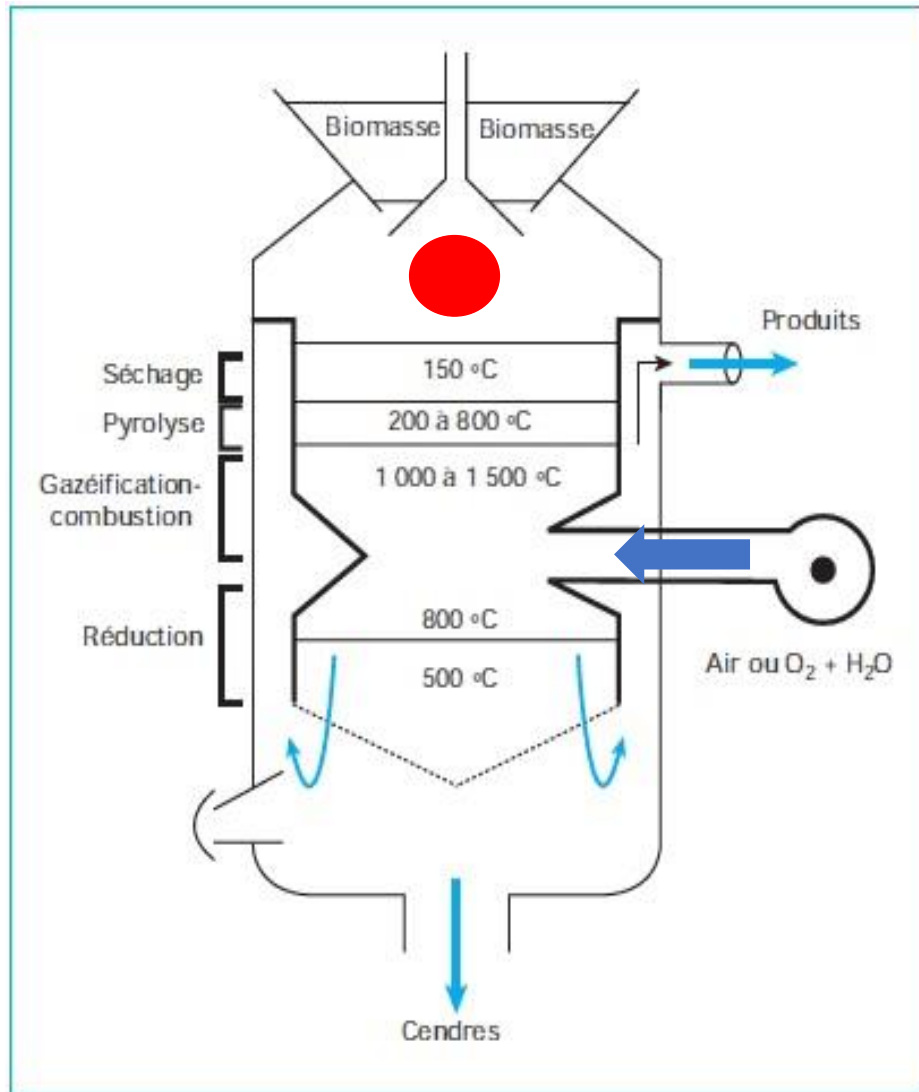
Source : Deglise X., Donnot, A., « Bois Energie », Tech. de l'Ing. be8535, 2004

Type de réacteur	Co-courant	Contre-courant	Lit Fluidisé	Lit Circulant
Concentration en Goudrons	faible	haute	modérée	modérée
Contrôle	facile	très facile	complexe	complexe
Echelle de puissance (MW _{th})	< 5	< 20	10 – 100	> 20
Taille particule – mm	20 - 100	5 - 100	10 - 100	< 1
Humidité - %m	< 20	< 50	< 40	< 15
Cendres - %m-sec	< 5	< 15	< 20	< 20

Source : Knoef « Handbook Biomass Gasification » 2005

La gazéification à l'air en lit fixe co-courant : le principe

Schéma d'un réacteur lit fixe co-courant



Concentration obtenues à partir de Bois

N ₂ - %v	50 - 54
CO - %v	17 - 22
H ₂ - %v	12 - 20
CO ₂ - %v	9 - 15
CH ₄ - %v	2 - 3
PCI - MJ/Nm ³	5 - 5,9

Source : FAO « Woodgas as Engine Fuel » 1986

PCI gaz naturel : 36 MJ/Nm³

Les déchets comme source d'énergie ?

Hiérarchie des déchets

Déchet évité

Prévention

Non-déchet

Réemploi

Déchet

Réutilisation

Valorisation Matière

**Valorisation
Energie**

Enfouissement

Les Combustibles Solides de Récupération (CSR)



Depuis mai 2016 en France, le CSR doit avoir les caractéristiques suivantes :

1. Déchets non dangereux
2. PCI > 12 MJ/kg (brut) (PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur)
3. Hg < 3 mg/kg-sec (< 3 ppm-m)
4. Cl < 15 000 mg/kg-sec (<1,5%m)
5. Br < 15 000 mg/kg-sec (<1,5%m)
6. Cl+Br+F+I < 20 000 mg/kg-sec (<2%m)

Caractéristique de classification	Mesure statistique	Unité	Classes				
			1	2	3	4	5
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	Moyenne	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3

Caractéristique de classification	Mesure statistique	Unité	Classes				
			1	2	3	4	5
Chlore (Cl)	Moyenne	% (sec)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3

Caractéristique de classification	Mesure statistique	Unité	Classes				
			1	2	3	4	5
Mercure (Hg)	Valeur médiane	mg/MJ (ar)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	Percentile 80	mg/MJ (ar)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

Proposition de classement des CSR – Norme EN 15359 - 2011

Etude de la gazéification de CSR en lit fixe co-courant

100%m Bois : Référence



100%m CSR Bois



Création de Mélanges :

- Réacteur conçu pour du bois
- 20% de CSR non ligneux (Ouadi et al., Applied Energy, 2013)

80% m



20% m Pneu



20% m Plastiques



20% m Boues de STEP

Conclusions de ma thèse de doctorat



- Il est possible de gazéifier des CSR avec ce type de réacteur à l'échelle industrielle et pilote
- Le CSR Bois montre des performances identiques au Bois
- L'ajout de 20% de CSR non-ligneux (Pneus, Plastiques, Boues) conduit à des performances légèrement plus faibles

Pour les polluants (par rapport au Bois propre) :

- Le CSR Bois produit légèrement plus de polluants (azotés)
- Les mélanges produisent plus de polluants (soufrés, azotés, goudrons)

La revalorisation énergétique des CSR par la gazéification semble être un moyen prometteur
MAIS qui a besoin d'études approfondies, et en particulier sur des unités de démonstration

Les unités de gazéification disponibles

Des unités de « petites » échelles (15-90kWe) pour du Bois

Naoden (France)



320 k€ ou 500 k€ : 7 ou 5 k€/kWe

IMPERIUM 50 ou 100

Performances

- Puissance électrique : **45 kW ou 90kW**
- Puissance thermique : 90 kW ou 160 kW
- Rendement global (hors char) : 82,8% ou 82,4%

Biomasse consommée

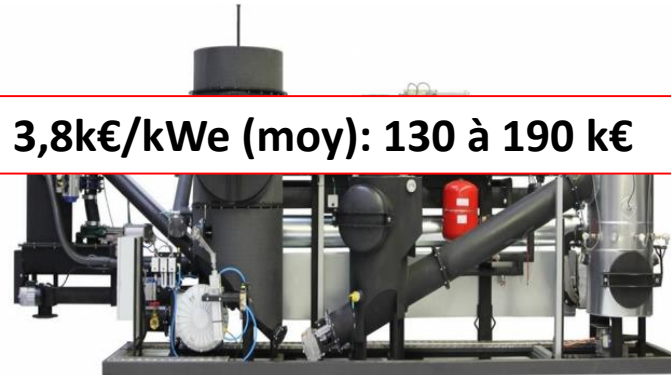
- Type de combustible : Bois d'oeuvre
- Humidité maximum : 20%
- Consommation de bois : **0,84 ou 0,78 kg/kWh_{el}**

Dimensions des unités (Larg/Long/Hauteur)

- UGZ : 1.2 x 2.4 x 2.5 m
- UPE : 1.2 x 2.4 x 2.5 m
- UTO : 0.6 x 1.0 x 5.0 m

Spanner Re² (Allemagne) (AHCS à Saint-Nolff)

3,8k€/kWe (moy): 130 à 190 k€



Modèle	HKA 35	HKA 49
Puissance Electrique	35 kW _{el}	49 kW _{el}
Puissance Chaleur	79,5 kW _{th}	111,3 kW _{th}
Qualité Bois	Bois, Max. Humidité < 13 %, Max 30% fines (< 4 mm)	
Consommation	0,9 kg/kWh _{el}	

Unités fonctionnant 8000h/an
Conçues pour 30 000h (4 ans)

1/3 Elec – 2/3 Chaleur

APL (USA)



À partir de 22 k€ : 1,5k€/kWe
+ options à ajouter

Puissance max.
15 kWe @50 Hz (18 kW@60 Hz)

Consommation : **1.2 kg/kWh_{el}**

Dimensions 1.4 m x 1.4 m x 2.2 m

Poids 1065 kg

Capacité réservoir 330 litres

Humidité Bois 5% à 30%
Granulométrie : 12-40mm

Valorisation énergétique des déchets à Ouessant

Etat d'avancement de l'étude

Différentes étapes



- **Identification du gisement de déchets et du potentiel utilisable en combustible**

Visite à la déchèterie de l'île

Document de suivis des déchets (2016 à 2019) avec coûts de traitements

- **Identification du gisement de biomasses mobilisable sur l'île**

Rencontre avec le PNRA : Entretien des espaces en friches

→ Réflexion sur un programme de rotation des entretiens pour production régulière de biomasse

Mise en place séparation tonte/branchages à la déchèterie + protocole de pesée (discussion Mairie)

- **Contact pris avec le SYMEED 29**

Réflexions sur la prochaine thématique pour l'année 2020 : le sujet « îles » est parmi la liste

La CCPI va lancer une étude « Biomasse » avec un volet valorisation énergétique

Rencontre à faire SDEF-SYMEED-Département-Région pour coordonner les actions sur un territoire (en particulier Ouessant)

- **Méthanisation :**

Contact avec Christian Barbier du Service Eau et Assainissement (SEA) du Département

Sur les boues de STEP : Quantité de boues très faibles. A voir avec autres gisements potentiels (restaurants ?)

Un schéma directeur va débiter sous peu concernant la station d'épuration d'Ouessant, si proposition à faire pour modification c'est maintenant.

Gisement Déchets Bois à Ouessant

Opération	Prestataire	Unité	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Total 2019	Total Théorique 12 mois
Transport maritime	Penn Ar Bed	Benne						0	
Rotation benne Brest	Guyot Env.	Benne	6	8	8	5	9	36	86,4
Traitement benne	Guyot Env.	Tonne	5,74	9,64	7,26	4,64	9,12	36,4	87,4

- A priori pas de stock chez habitants, car avant le flux était dirigé vers « encombrants »
- A priori potentiels plus important en été (moins de récupération pour chauffage et plus de palettes liées au tourisme ?)

Opération	Prestataire	Unité	Prix TTC unitaire - €	Total Théorique 12 mois	Prix TTC total annuel - €
Transport maritime	Penn Ar Bed	Benne	181,63 €	86,4	15 692,83 €
Rotation benne Brest	Guyot	Benne	36,00 €	86,4	3 110,40 €
Traitement benne	Guyot	Tonne	90,00 €	87,4	7 862,40 €
				Total	26 665 €

Potentiel valorisation énergétique déchets Bois Ouessant

		Production électrique - kWhe						
Rendement conversion gazéification - kWhe/kg		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Total	Moyenne annualisée - MWhe/an
Optimal	1,3	7462	12532	9438	6032	11856	47320	114
Naoden 45kWe	1,19	6833	11476	8643	5524	10857	43333	104
Naoden 90kWe	1,28	7359	12359	9308	5949	11692	46667	112
Spanner	1,11	6378	10711	8067	5156	10133	40444	97

- 100 MWhe / an potentiel, 2% de l'électricité de Ouessant, 27 tonnes de fioul économisées (+ carburant bateaux) + 200 MWh-thermique à valoriser (séchage combustible, chauffage locaux, eau chaude sanitaire...)

MAIS autoconsommation élec. de l'unité (pompes, ventilateurs...) d'environ 20-30% du productible

Rendement kWh/kg	Total heure/mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Moyenne annualisée - h/an
		744	672	744	720	744	8760
1,1	45 kWe	142	238	179	115	225	2157
	% du temps	19%	35%	24%	16%	30%	23 %
1,1	90 kWe	71	119	90	57	113	1079
	% du temps	10%	18%	12%	8%	15%	11 %

Facteur de charge moyen mensuel en France (source RTE):
 Eolien : 13 à 30 %
 Solaire : 4 à 20 %

Gazéification : 80-90%
 (si ressource non contrainte)

Possibilités d'utilisation de l'unité



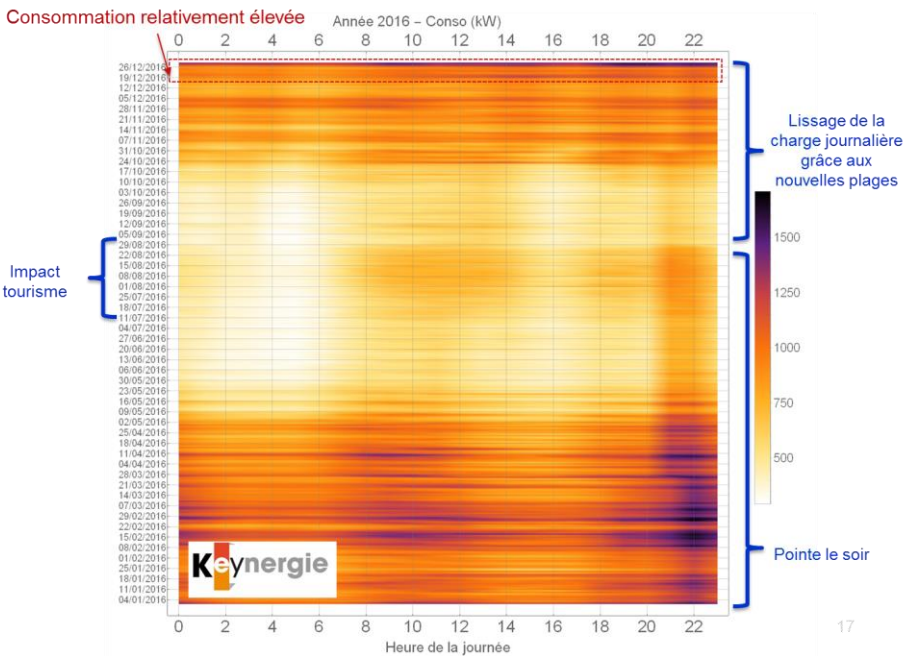
1. **Couplage à l'hydrolienne pour couvrir toutes les périodes d'étalement**
2. **Couplage à l'hydrolienne pour couvrir les périodes de mortes eaux**
3. **Utilisation en hiver pendant les pointes de consommations**

Possibilités d'utilisation de l'unité



Utilisation en hiver pendant les pointes de consommations

Carte de puissance appelée à Ouessant – 2016
(source : Keynergie)



- Rappels :
- 87 t bois / an
 - 100 MWhe potentiels

Puissance unité - kW	Temps de fonctionnement plein régime - h	Temps de fonctionnement plein régime - jour	Temps de fonctionnement 18h-00h - jour
45	2222	93	370
90	1111	46	185
180	556	23	93

Revente de l'électricité – Recettes potentielles

	Prix rachat - €/MWh		
(pour 87 t de Bois)	100	200	300
Rendement conversion - kWh/kg ou MWh/t	Recette annuelle - €	Recette annuelle - €	Recette annuelle - €
1	8 736	17 472	26 208
1,1	9 610	19 219	28 829
1,2	10 483	20 966	31 450
1,3	11 357	22 714	34 070

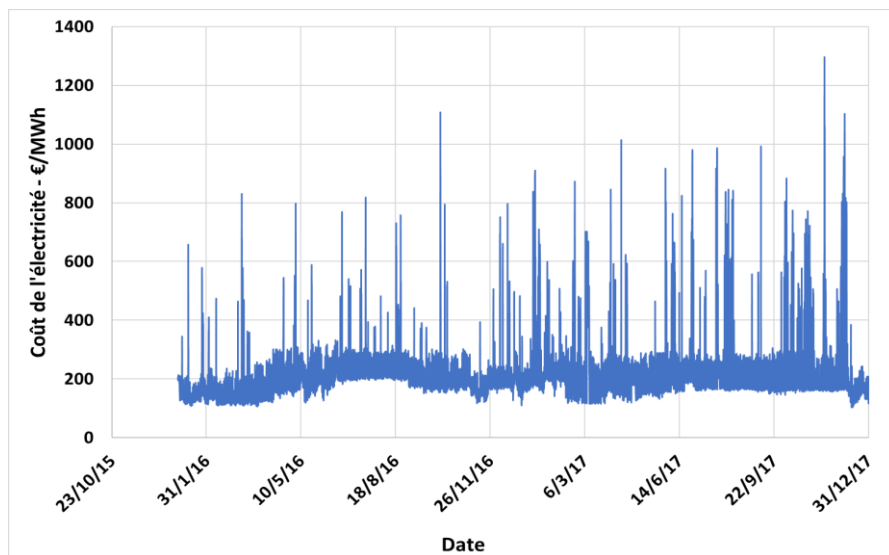
- Compte tenu capacité de pilotage, coût d'achat plus important ?

400-500€/MWh soit 40 000 à 50 000€/an

Coûts indicatifs procédés de gazéification (source : Cirad)

Investissement €/kWe	Maintenance €/kWh	Coûts moyen €/kWh	
		4 000 h	6 000 h
2 500- 6 000	0.08- 0.2	0.15- 0.5	0.1- 0.3

Coûts en direct de production de l'électricité en Corse pour 2016 et 2017 (source EDF open data corse)



Corse :

- 200€/MWh en moyenne
- Nombreuses périodes à plus de 400€/MWh
- Jusqu'à 1300€/MWh

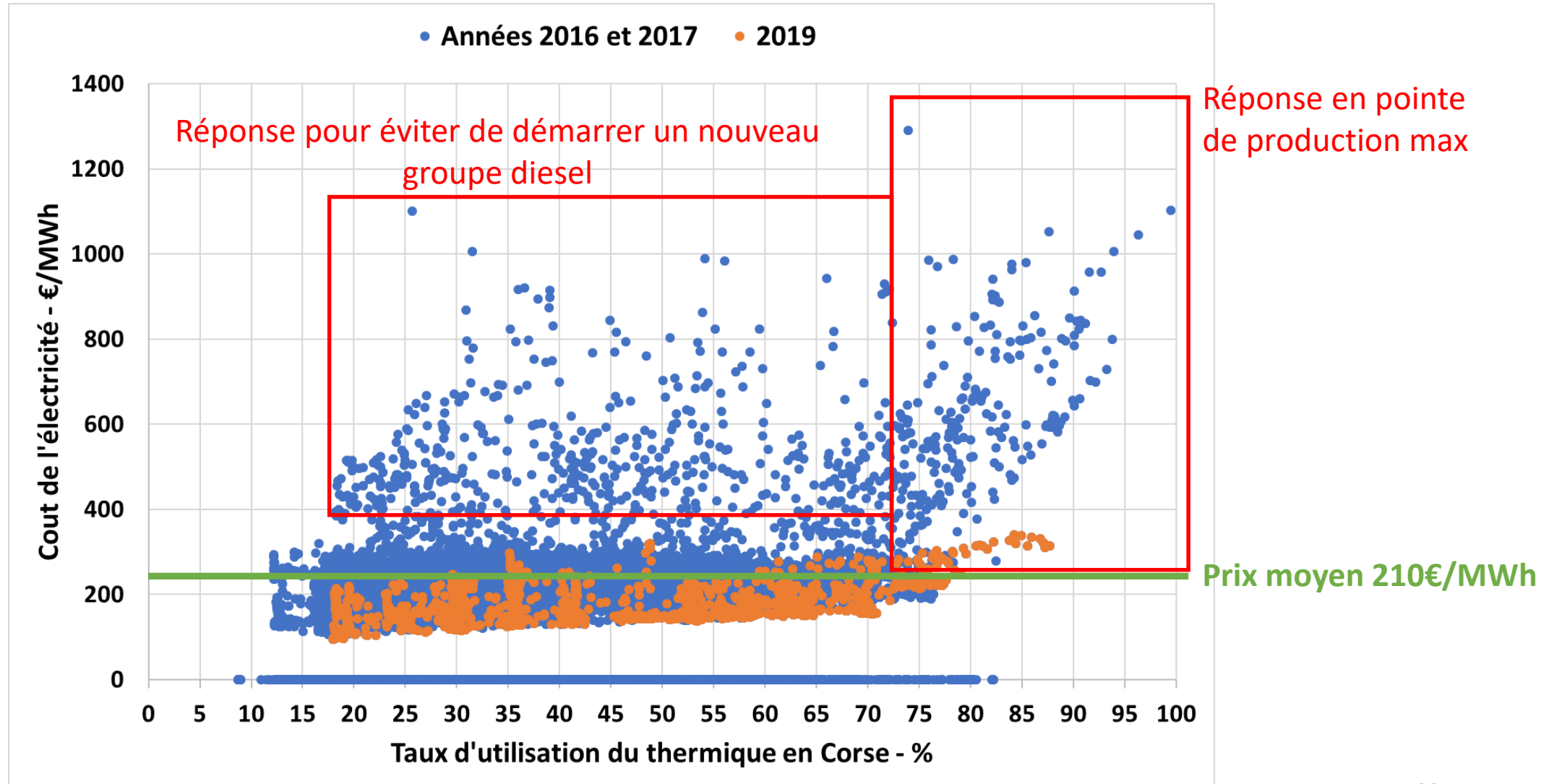
Ouessant :

- 350-400 €/MWh en moyenne

Revente de l'électricité – Recettes potentielles

(piloteable)

Coût électricité en fonction du taux d'utilisation du parc Thermique en Corse



Bilan financier

Déchets bois seulement

	Unité 45 kW	Unité 90kW
Investissement - €	320 000 (171 000)	500 000 (342 000)
Retour annuel - €	36 665	36 665
Temps d'amortissement - année	8,7 (4,7)	13,6 (9,3)
Retour annuel - €	60 665	60 665
Temps d'amortissement - année	5,3 (2,8)	8,2 (5,64)

Coûts : Naoden (Spanner)

100 €/MWh

10 000€/an élec

300 €/MWh

30 000€/an élec

- Augmenter les ressources pour augmenter les recettes d'électricité (bois déchets verts, résidus entretien lande, cartons, plastiques...)



Par contre des coûts à prendre en considération :

- Prise en charge des effluents (solides et liquides) donc coûts
- Main d'œuvre
- Maintenance (à voir si compris dans contrat avec entreprise ?)
- Subvention Région, Nationale (Europe ?) à chercher

Gisement de Cartons sur Ouessant



PCNC : Papiers Cartons Non Complexés

- PCNC : 27,5 t gros cartons – recettes tri : 1950€
- Gros de Magasins : 11,5 t de petits morceaux – recettes tri : 110€

38,9 T soit 43% de la collecte sélective (90t en 2018)

(+ 23,68t de papier/journaux – revalorisés à 2300 €)

Coûts de traitements de ces cartons (43% du coût des déchets collecte sélective) :

Type traitement	Société	Unité	Coûts
Transport maritime	Penn Ar Bed	Balle	6 155,19 €
Transport port Brest-Sotraval	Sotraval	Tonne	900,18 €
Traitement Sotraval	Sotraval	Tonne	8 643,57 €
			15 698,94 €

Balance : - 13 638€ en 2018

(Sur cartons uniquement!)

PCI du carton : 16 MJ-th/kg (Bois : 17-18MJ/kg) (source : Phyllis 2 Database) – 38,9t de cartons dans 87t de bois → 30% de

Avec un rendement de 1,1 MWhe/T, cela donne 42,79 MWhe supplémentaires potentiels

Soit entre 4 279 €/an et 12 837€/an de revente d'électricité (entre 100 et 300€/MWhe)

Soit balance financière de + 17 917€/an à + 26 475€/an supplémentaires avec l'incorporation de cartons

Tests de gazéification à faire avant pour confirmer – à voir Kervail à Ploufragan (22)

Combustion : Utilisation de bois déchets vert



- Bois propre
- A broyer et sécher et stocker à l'abri

Plutôt que de faire de l'électricité avec 30% de rendement (gazéification) puis d'utiliser un chauffage électrique

→ Utilisation directe du bois dans un poêle pour récupérer ≈90% de l'énergie sous forme de chaleur

Résultat : Un facteur 3 sur les économies de fioul à la centrale EDF

A voir :

- Intérêt de pouvoir produire de l'électricité en pointe par gazéification
- Nombre de maisons équipées de poêle/cheminées
→ discrimination : apport déchets verts de tous mais seuls certains bénéficient → Utilisation dans bâtiments publics

- Entretien de la lande :

160-180 ha/an entretenu aujourd'hui (40-50 PNRA – 120-130 chasseurs)

Zone Humide (avec Agence de l'eau) mais aussi zone de friche et prairie enfrichée

Travail conjoint SDEF-PNRA-AIP-Mairie pour estimation potentiel utilisable (Max – inaccessible – zone ornitho – zone chasse –...)

Chiffres pour fin Septembre

Merci de votre attention