



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

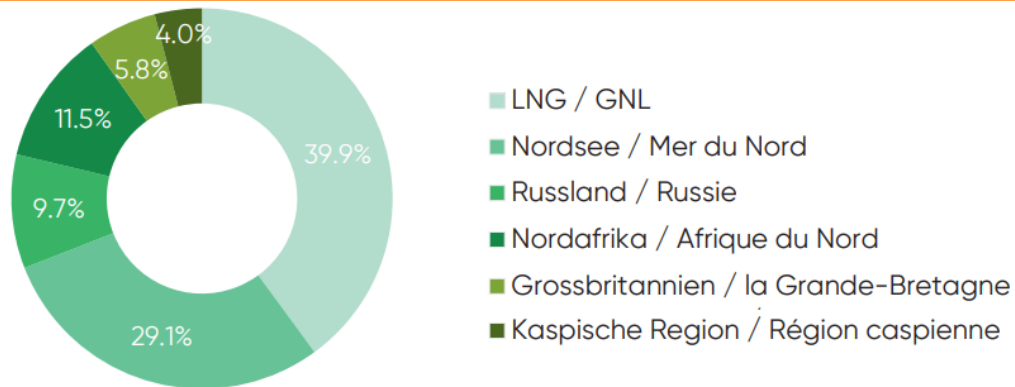
Deep Blue Hydrogen

De la croissance de végétaux lacustres à la production d'énergie

09.2025

Bienvenue





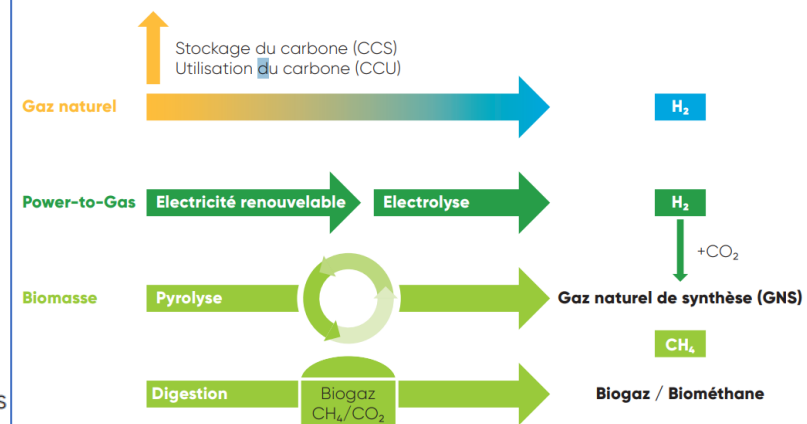
- LNG / GNL
- Nordsee / Mer du Nord
- Russland / Russie
- Nordafrika / Afrique du Nord
- Grossbritannien / la Grande-Bretagne
- Kaspische Region / Région caspienne

- ¹⁾ Aufgrund der Veränderungen an den europäischen Gashandelsmärkten, auf denen die schweizerischen Gasversorger ihre Gasmengen kontrahieren, ist eine belastbare länderspezifische Darstellung nicht mehr möglich.
- ¹⁾ En raison des changements sur les marchés européens du gaz, sur lesquels l'industrie gazière suisse contracte ses volumes de gaz, il n'est plus possible d'établir une vue d'ensemble représentative et fiable pour chaque pays.

Quelle: European Gas Flow dashboard, entsog, 5.4.2024
Source: European Gas Flow dashboard, entsog, 5.4.2024

Les gaz renouvelables et leur potentiel climatiquement neutre

Filières de production des gaz renouvelables



Potentiels d'approvisionnement pour la Suisse*

H ₂ bleu Importations Potentiel ¹	H ₂ vert Importations Potentiel ²
H ₂ vert Production CH 5 TWh	
Biométhane Importations 4 TWh	
Biométhane Production CH 4 TWh	

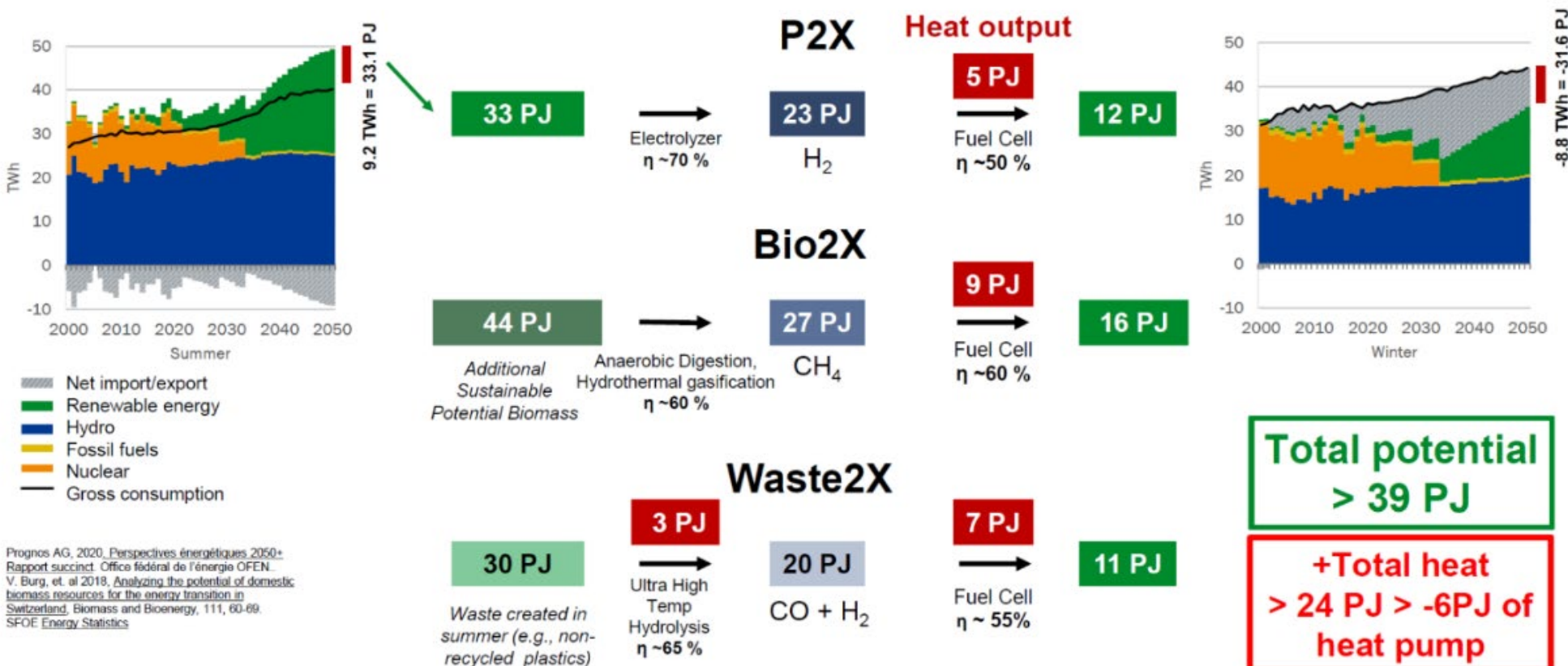
- * Etudes:
- Hanser Consulting AG (2018): Erneuerbare Gasstrategie für die Schweiz
 - Rapport WSL n° 57 (2017): Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung
 - EMPA/PSI (2019): Potenzialanalyse Power-to-Gas in der Schweiz

¹selon réserves de gaz naturel

²selon développement de la production d'électricité renouvelable en Europe et dans les régions limitrophes

Source: VSG

Summer/winter electricity balance, scenario ZERO basis



Prognos AG, 2020, Perspectives énergétiques 2050+
Rapport succinct, Office fédéral de l'énergie OFEN
V. Burg, et. al 2018, Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland, Biomass and Bioenergy, 111, 60-69.
SFOE Energy Statistics

An underwater photograph showing a dense network of green aquatic plants with small, rounded leaves and thin stems. The water is a deep teal color. The word 'Résultats' is written in white, sans-serif font in the center of the image.

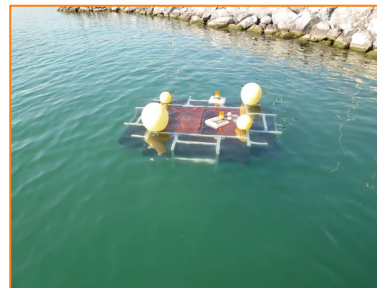
Résultats

Cultiver les macrophytes:

Autorisation, construction et mise en place de la plateforme

Parcours d'autorisation et oppositions

- Refus administratif initial du canton de Vaud et de Neuchâtel
- Opposition de la corporation des pêcheurs neuchâteloise
- Procédure lourde à Neuchâtel pour obtenir une autorisation (accord de la corporation des pêcheurs, la preuve du caractère « non-construction », un permis de construire, une concession et l'avis de plusieurs services.)
- Autorisation finalement accordée par la DGE Vaud pour l'installation à Morges suite à une coordination multi-acteurs

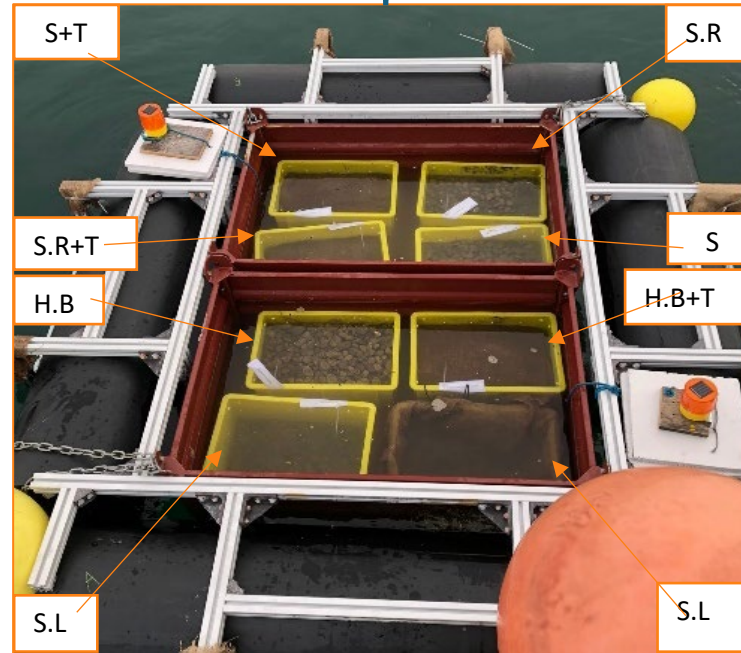


Culture des macrophytes:

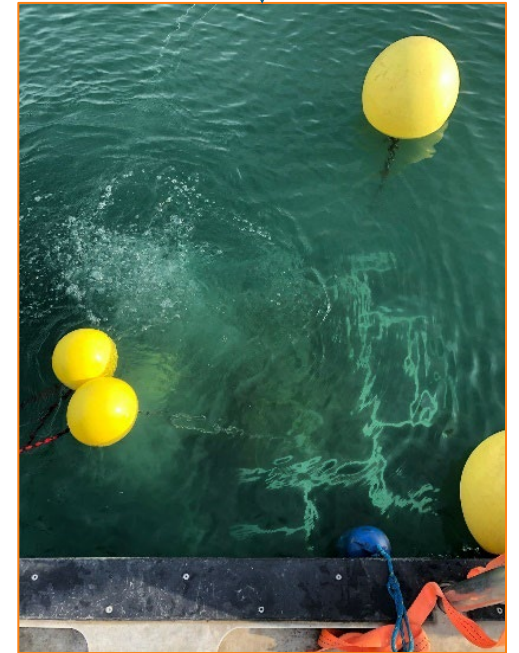
Mise en place des bacs de culture de macrophytes



Préparation de caisses de
vendange en polypropylène

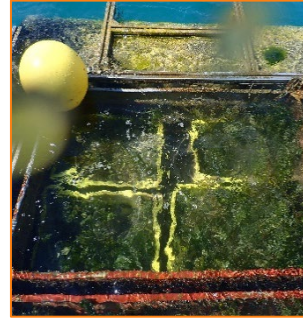


Mise en place des caisses de
vendange sur la plateforme



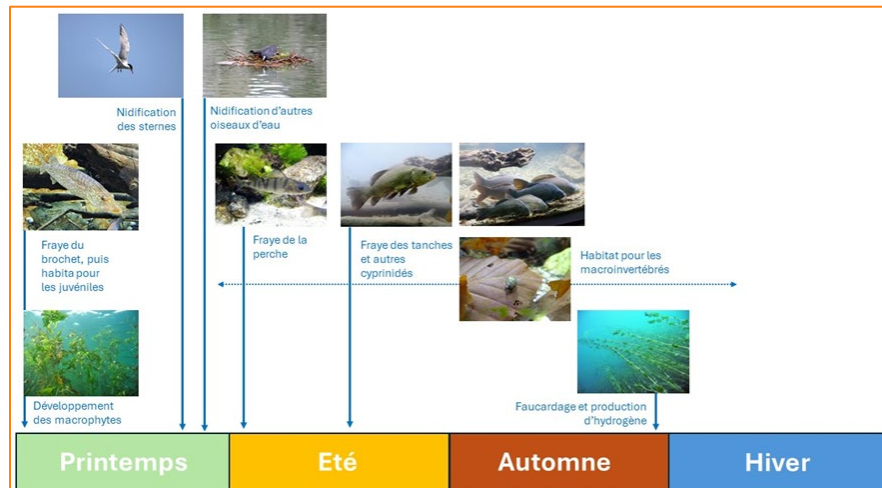
Immersion de la plateforme

Cultiver les macrophytes: Culture des macrophytes



- Maintien des substrats et des bacs malgré les intempéries
- Reprise réussie des boutures malgré un retard initial par rapport aux individus déjà présents.
- Quatre types de substrats adaptés, aucun ne constituant un facteur limitant.
- Présence notable de poissons observée parmi les macrophytes cultivés.
- Potamot perfolié facilement cultivable, formant des groupements denses et des herbiers.

Potentiel de compensation écologique et création d'habitat:



Compte tenu des fortes oppositions dans les lacs naturels, les plateformes ne seront pas déployées à grande échelle. Elles restent toutefois pertinentes pour des projets de **compensation écologique sur les lacs artificiels**. La Maison de la Rivière (MDLR) concentrera donc ses efforts sur cette orientation.



Zones de marnage : absence de végétation dans les barrages à accumulation, perte importante de biodiversité.



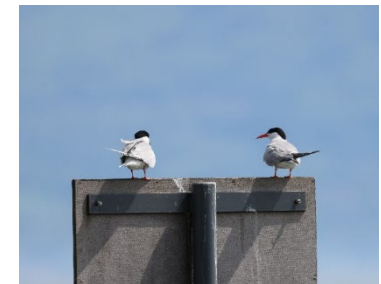
Macrophytes : identifier les espèces présentes, sélection d'espèces indigènes non menacées, prélèvement de boutures et repiquage dans les bacs



Invertébrés : les herbiers favorisent le développement d'invertébrés aquatiques et terrestres, base alimentaire pour de nombreuses espèces.



Poissons : les herbiers servent d'habitat, de zone de chasse et de reproduction à diverses espèces piscicoles (tanches, brochets, perches).



Oiseaux : radeaux aménagés peuvent inclure des plateformes de nidification, servant de refuge à certaines espèces (ex. sternes, cas de Verbois).

Traitement des macrophytes avant gazéification:



Avant

Après

- **Ensileuse** : blocage du système par les macrophytes trop humides, matière inutilisable.
- **Défibreux**: transformation efficace en pâte compacte, mais matière trop humide pour la gazéification.
- **Défibreux + séparateur à vis** : production d'une pâte fibreuse humide, séparation inefficace (peu d'eau extraite).
- **Mélangeuse + séparateur** : hachage puis séparation solide/liquide, mais taux d'humidité encore trop élevé
- **Mélangeuse + séparateur (2 passages)** : tentative de réduction d'humidité s'avérant insuffisante
- **Mélangeuse + séparateur + séchage manuel** : séchage manuel nécessaire à l'air libre pour atteindre le taux d'humidité idéal

Traitement des macrophytes avant gazéification:

Processus retenu



Livraison des macrophytes



Passage dans une mélangeuse



Produit fini



Séchage manuel



Passage dans un séparateur à vis

Processus de gazéification:



Séquestration à long terme de carbone atmosphérique par la production de charbon à usage agricole

Biochar - 3.2t/jour

Copeaux de bois
32t/jour



CLEAN CARBON
CONVERSION AG
Energize Waste™

Gaz de bois riche en H2



Electricité
~ 1MWe

PSA



-hydrogène de qualité pour
les stations H2
~ 750kg/jour

Gaz résiduel
Composants non-H2

Chaleur + Électricité

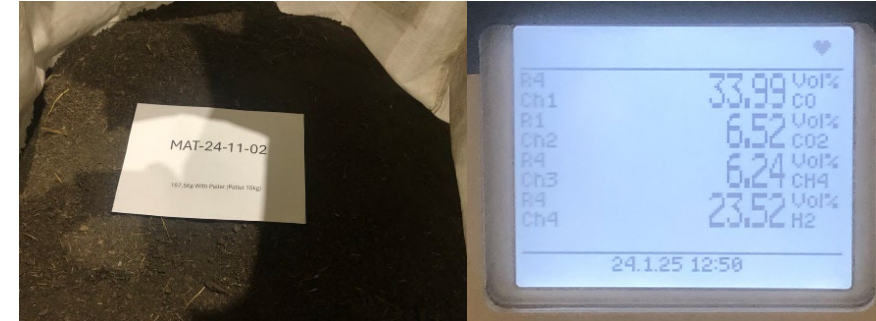
Émissions de CO2 neutre
(provient du bois)

Essais de gazéification: Les macrophytes

Macrophytes no.1

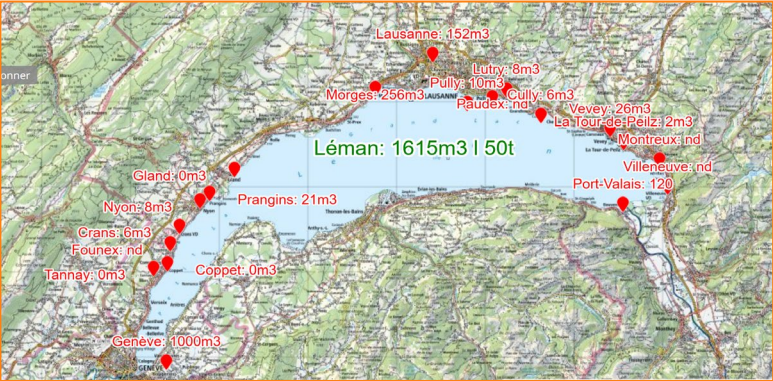


Macrophytes no.2



Déchets	Utilisation (tonnes/jour)	Taux d'humidité (%)	Prod. (kg/hr)	% Gazéification	H2 (% mol)	CO (% mol)	CO2 (% mol)	CH4 (% mol)	N2 (% mol)
Macrophytes no.1		20%			32,0	35,50	23,69	6.86	1.95
Macrophytes no.2	1.93	7,5%	37.76	47	20.4	35.1	8.9	6.8	28.8

Disponibilité des macrophytes: Faucardage dans les lacs naturels



Genève: 1000m³	Tannay: 0 m³	Coppet: 0 m³	Founex: nd	Crans: 6 m³	Nyon: 8 m³	Prangins: 21 m³
Gland: 0 m³	Morges: 256 m³	Lausanne: 152 m³	Pully: 10 m³	Paudex: nd	Lutry: 8 m³	Cully: 6 m³
Vevey: 26 m³	La Tour-de-Peilz: 2 m³	Montreux: nd	Villeneuve: nd	Port-Valais: 120 m³	Yverdon-les-Bains: 60 m³	Grandson: 80 m³
Concise: 2 m³	Vaumarcus: 6 m³	St-Aubin-Sauges: 30 m³	Bevaix: 10 m³	Cortailod: 25 m³	Auvernier: 18 m³	Neuchâtel: nd
St-Blaise: nd	Epagnier: 527 m³	Cudrefin: 5 m³	Portalban: 0 m³	Gleteren: nd	Chevroix: 0 m³	Estavayer-le-Lac: 20 m³
Cheyles-Châbles: 100 m³	Yvonnand: 0 m³	Le Landeron: 12 m³	Neuveville: 36 m³	Bienne: 250 m³	Morgen: 9 m³	Lüscherz: 6 m³

Statistiques de faucardage ERM 2020 - 2023 - 2024	
Année	Volume d'algues
	m3
2020	256
2023	144
2024	96

Le volume total de **macrophytes humides disponible est de 2832m³**, soit **84 tonnes de macrophytes secs** par an qui **produisent 112 MWh** de gaz de synthèse. En plus des volumes très faibles de macrophytes, les quantités récoltées par les communes peuvent grandement varier comme le démontrent les statistiques de l'ERM. **Il est donc nécessaire de se pencher sur d'autres sources de biomasse.**

Essais de gazéification: Compost, digestat, rejet de compost et de digestat (pollution plastique)

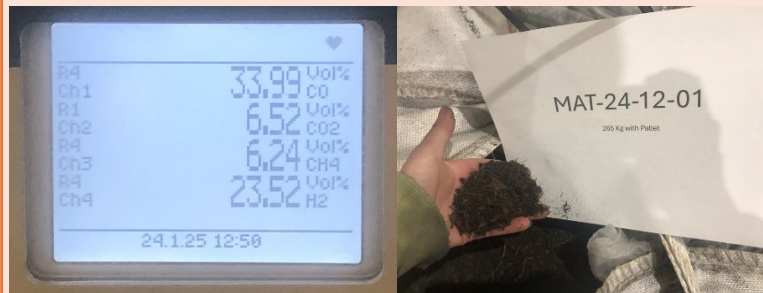
Ecorecyclage: Compost issu du criblage

Compost: 10 000 t/an
Rejets de plastique: 3 000 t/an



Satom: Digestat de méthanisation

Digestat solide: 16 000 t/an
Rejets de plastique: 3 500 t/an

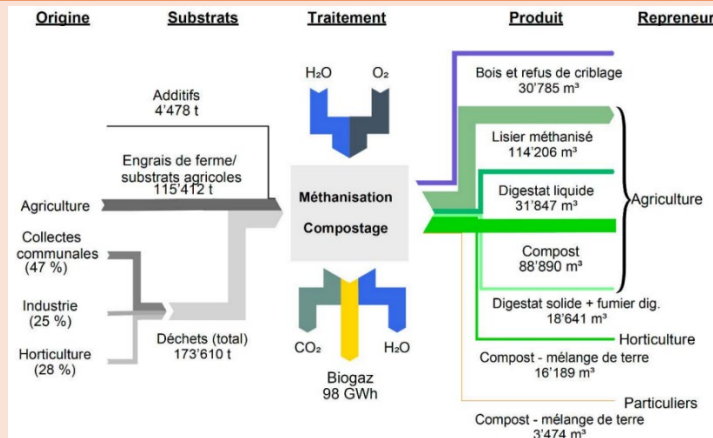


Les gains liés à la gazéification du compost ou du digestat de méthanisation par les entreprises de compostage (Écorecyclage, Satom) seraient significatifs. Elles n'auraient **plus besoin d'effectuer de tri**, ni de supporter les **frais d'incinération**. Elles n'auraient également **plus à subventionner l'épandage** auprès des agriculteurs. Enfin, la gazéification permettrait de générer une **production supplémentaire de gaz renouvelable**, renforçant à la fois l'intérêt économique et énergétique de la filière.

Déchets	Utilisation (tonnes/jour)	Taux d'humidité (%)	Prod. (kg/hr)	% Gazéification	H2 (% mol)	CO (% mol)	CO2 (% mol)	CH4 (% mol)	N2 (% mol)
Digestat Satom	1.82	20%	36.83	49	34.6	31.5	10	7.7	16.2
Compost Ecorecyclage	1.23	40%	23.71	46	42.1	27.8	12.1	6	12

Estimation des quantités de biomasse disponibles

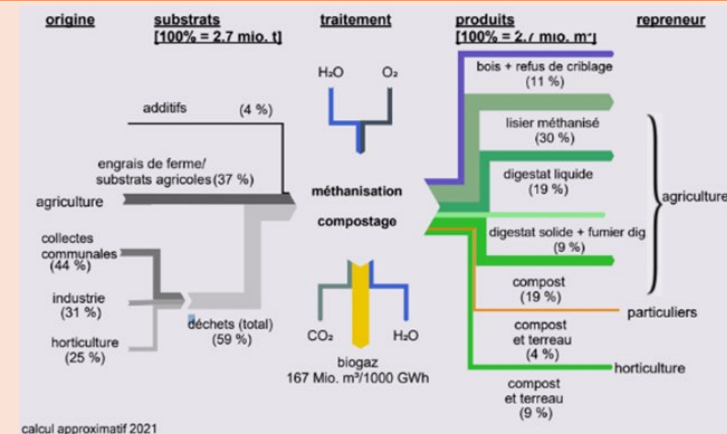
Flux de matières 2021 dans le canton de Vaud: Origine des déchets biogènes et utilisation des produits



- Digestat solide: 5'219 tonnes
- Bois et refus de criblage: 4'618 tonnes
- Compost: 44'868 tonnes
- Total: **54'705 tonnes**

Potentiel de production de gaz de synthèse : **87.8 GWh**

Flux de matières 2020 en Suisse: Origine des déchets biogènes et utilisation des produits



- Digestat solide: 68'040 tonnes
- Bois et refus de criblage: 44'550 tonnes
- Compost: 353'160 tonnes
- Total: **465'750 tonnes**
- Potentiel de production de gaz de synthèse : **747.5 GWh**

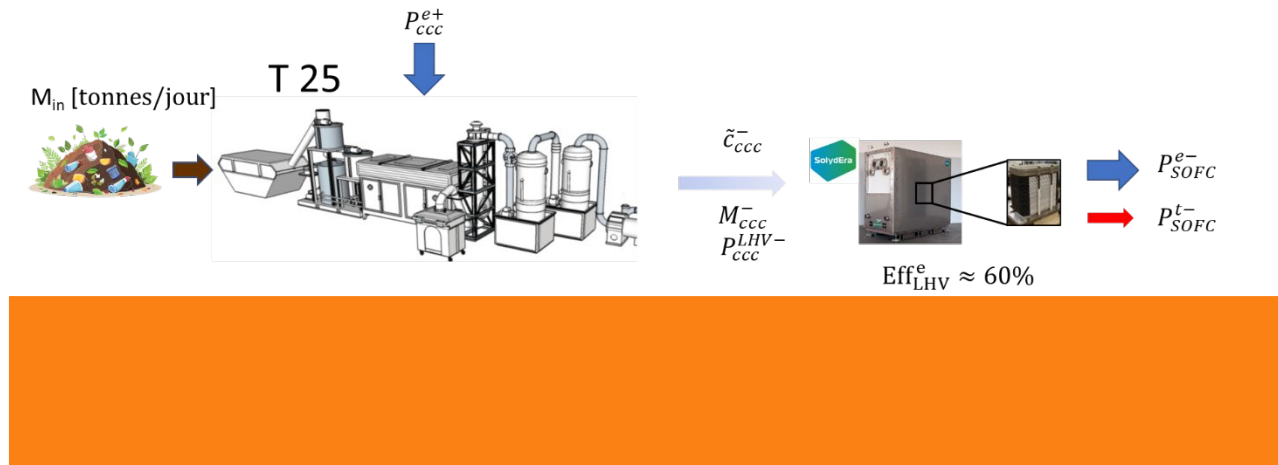
Les produits de la méthanisation et du compost sont disponibles et peuvent être valorisés par notre technologie de gazéification.

Nous pouvons intervenir sur:

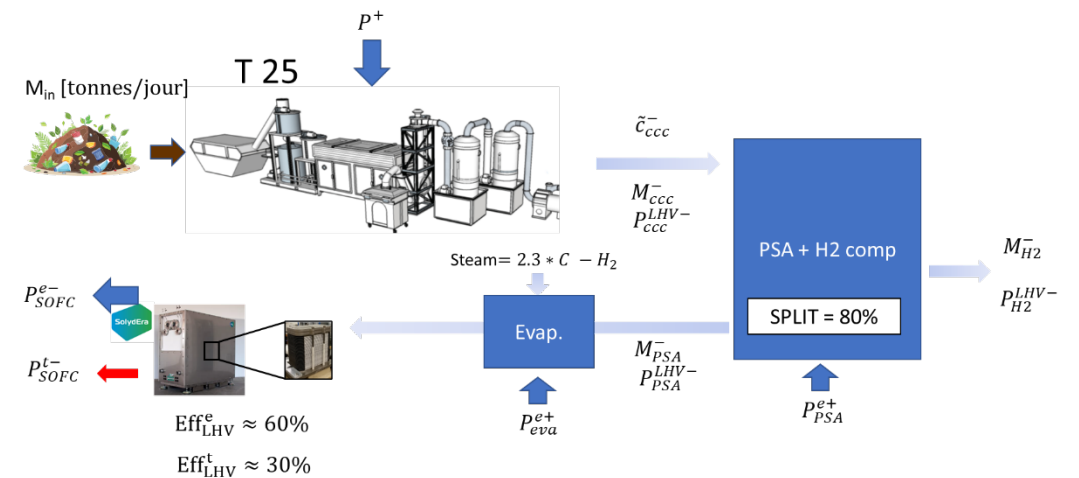
- les déchets de criblage et le bois
- sur le digestat solide et le compost (notamment en hiver lorsque la demande agricole est faible)
- sur les flux pollués par le plastique (déchets communaux et industriels) après méthanisation. En valorisant directement le digestat, il n'est plus nécessaire de trier à l'entrée ou à la sortie du méthaniseur.

Bilan des essais de gazéification:

MODE: Production d'électricité



MODE: Production d'hydrogène



- Mise à l'échelle de T5 à T25 (produit commercial avec 32 t/j)
- Basse qualité à la sortie de la CCC:
 - Mode production électricité non attrayant (électricité entrant = électricité sortant)
 - Seul le compost d'Ecorecyclage atteint des rendements comparables à d'autres technologies de production d'hydrogène
- **Cependant**, des tests plus longs (diminuer l'azote résiduel), à plus grande échelle (moins de pertes) et avec une optimisation du taux d'humidité **pourraient** améliorer les résultats

Essais de gazéification: Biochar obtenu



Les analyses des résidus solides issus de la gazéification montrent que:

- Dans les conditions opératoires de la machine CCC, le processus **ne permet pas la production de biochar** à partir des macrophytes et du compost.
- Le résidu des macrophytes contient **12 % de carbone** pour **88 % de matière inorganique**, avec un **pH de 13**.
- Le résidu du compost présente **19 % de carbone** et **81 % de matière inorganique**, avec un **pH de 11**.
- Ces valeurs indiquent un pH élevé et une faible teneur en carbone, des caractéristiques incompatibles avec celles du biochar.
- Pour obtenir du biochar, avec la technologie CCC il serait nécessaire de mélanger le compost et les **algues avec du bois**.

An underwater photograph showing a dense network of thin, light-colored stems with small, rounded green leaves. The water is a deep teal color, and the plants are slightly out of focus, creating a sense of depth. The text "Conclusion et perspectives" is overlaid in the center in a white, sans-serif font.

Conclusion et perspectives

Les différents projets potentiels:

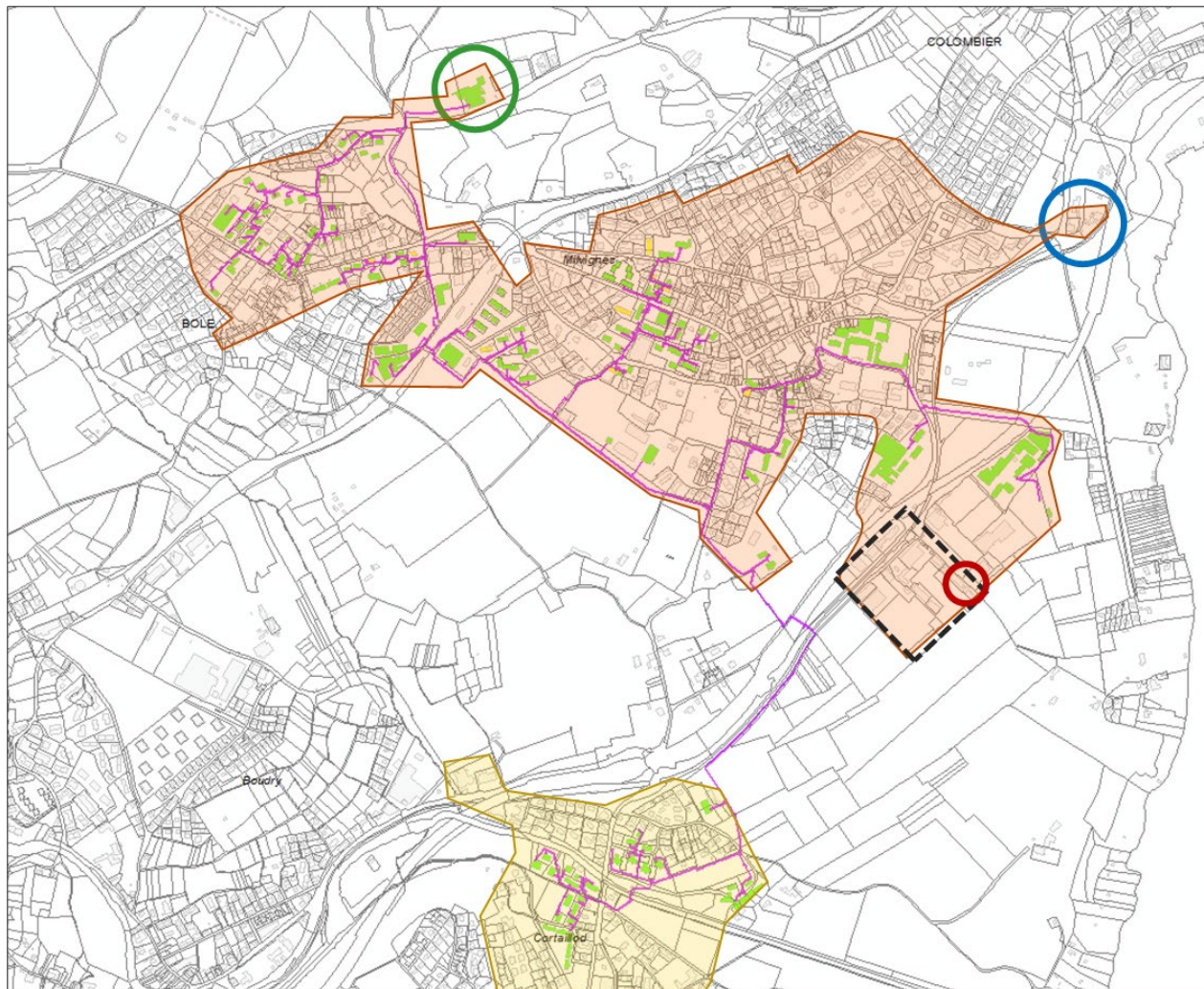
Projets	Enjeux	Quantité disponible	Solution proposée
Gazéification de déchets bois – Cottendart (canton Neuchâtel)	Remplacement de l'UVTD de Cottendart et pérennisation de la production de chaleur pour le réseau CADBAR	Env. 25'000 m3 de bois de déconstruction	Unité de gazéification avec une flexibilité sur les intrants (déchets bois + macrophytes). Production de gaz de synthèse permettant de produire du méthane et ou de l'hydrogène, de l'électricité et de la chaleur en fonction des besoins saisonniers.
Gazéification du compost – Satom Villeneuve	Présence de plastiques dans les biodéchets → tri coûteux pour méthanisation et compostage. Compost vendu 1 CHF/m ³ mais transport et épandage coûtent 9 CHF/m ³ .	10 000 tonnes de biodéchets	Installer une machine CCC pour gazéifier le digestat solide et produire du gaz de synthèse. Supprime le tri des plastiques.
Gazéification du compost – Axpo	Présence de plastiques dans les biodéchets → coûts liés à l'incinération des déchets de criblage. Besoin de valorisation énergétique.	1 500 t de déchets de criblage à Chavornay + 15 sites de méthanisation sèche et 6 de compostage	Installer une machine CCC sur un site Axpo pour gazéifier les déchets de criblage, produire du gaz de synthèse et supprimer les coûts d'incinération.
Gazéification des déchets de bois – Gros-de-Vaud	Souhaite utiliser un terrain disponible (1 ha) pour installer une unité de gaz. Accord de l'État et de la commune requis.	25 000 – 30 000 m ³ de bois/an (≈ 90 CHF/t)	Louer la surface pour une machine CCC. Fournir la matière première, valoriser le biochar. Valorisation énergétique et exploitation par un énergéticien.
Gazéification des déchets de bois – Schmuki SA	Valoriser les copeaux de bois issus du compostage (8 000–10 000 t/an) et optimiser leur exploitation énergétique.	8 000 – 10 000 tonnes de copeaux/an (36–52 CHF/m ³ selon condition)	Installer une machine CCC dans le canton de Vaud, alimenté par Schmuki SA, pour valoriser les copeaux de bois.



Exemple d'application sur le site de Cottendart

Réseau CADBAR

Enjeux du développement du réseaux



Moyens de production de chaleur actuels en mutation :

- Réduction ou arrêt de l'UVTD de Cottendard (~2030)
- Chaudière gaz

Production de chaleur : ~ 25 GWh/an

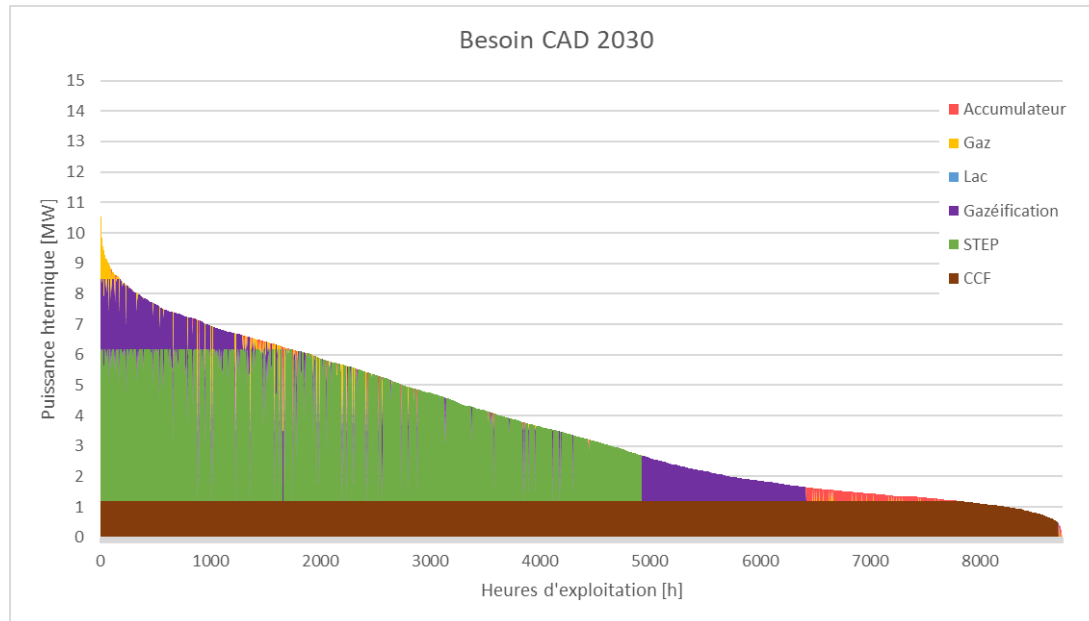
Moyens de production futur (à l'étude)

- PAC sur la STEP Colombier-Milvignes 5 à 7 MW
- Gazéification + CCF (déchets de bois et macrophytes) à Cottendard 1 MW
- Appoint et secours

Production de chaleur : ~ 35 GWh/an

Sources de chaleur à futur

Unité de gazéification avec une flexibilité sur les intrants



Intrants sélectionnés pour Cottendart :

- Déchet de bois : 5 GWh/an
- Macrophytes : 50 MWh/an

Source de revenue

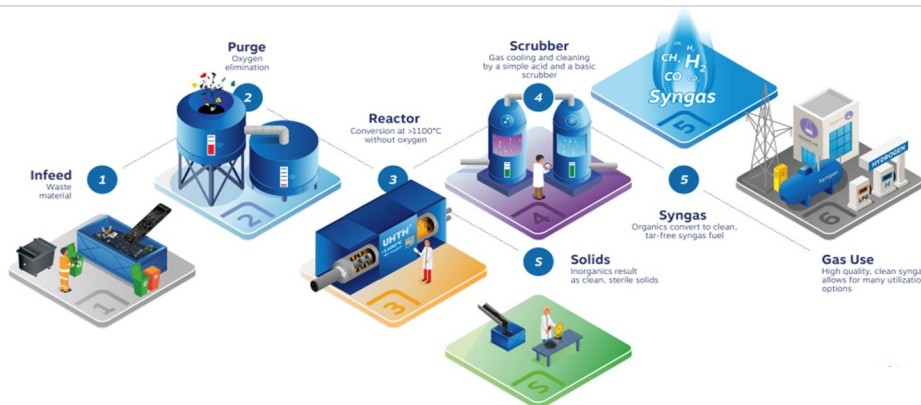
- Production de chaleur cédée au CAD en hiver
- Production d'électricité repris par le GRD (plutôt en hiver)
- Production d'hydrogène (mobilité)

Inconvénients:

- Résidus solides non valorisable en biochar
- Production électrique en été peu intéressante

Optimisation possible :

- Augmentation de la production de gaz de synthèse avec introduction de CO₂



Conclusions

1. Potentiel faible issu du traitement des macrophytes
2. Potentiel supplémentaire identifié avec les déchets de bois
3. Pas de garantie de valoriser les résidus solide en tant que biochar

Pochaines étapes

Poursuites des études jusqu'à début 2026 afin de démontrer la rentabilité d'une installation de gazéification à Cottendart.

Remerciements: FOGA



Viteos SA

Case postale 3206
Quai Max-Petitpierre 4
CH - 2001 Neuchâtel 1



www.viteos.ch

Merci de
votre attention

Déploiement à grande échelle:

Evaluer le potentiel de mise en place d'une filière de récolte de macrophytes sur les lacs naturels

Production de matière sèche	Coût du séchage des macrophytes	Coût d'évacuation des communes	
Les ratios de conversion des macrophytes humides en macrophytes secs avec un taux d'humidité de 20% sont très variables avec une moyenne de 27 ± 8 kg/m ³ .	Aujourd'hui, sans compter le transport de la marchandise, produire 1,35 tonnes de macrophytes coûte CHF 515.- ou 0.3815 CHF/kg. Dans ce cas de figure, le coût pour produire 1 tonne de macrophytes secs revient à CHF 382-	D'après la commune de Morges, le coût d'élimination des macrophytes humides à la compostière de Lavigny est de 100 CHF par tonne.	Le traitement de 50 m ³ de macrophytes humides (soit environ 11 tonnes) coûte CHF 515, ce qui ramène le coût de traitement à environ 47 CHF par tonne de macrophytes humides.

Déploiement à grande échelle:

Evaluer économiquement la production d'hydrogène ou de biométhane à l'échelle nationale

Le prix minimum facturé aux communes pour le traitement d'une tonne de macrophytes mouillés serait donc de CHF 29 pour une production d'hydrogène avec biochar et de CHF 36 sans biochar pour autant qu'elles livrent gratuitement les macrophytes. Nous pouvons suffisamment réduire le coût de production pour que la gazéification soit rentable si la transformation et le séchage des macrophytes ont lieu sur le site de gazéification pour ne pas ajouter des coûts de transport supplémentaires.

Nos essais n'ont pas permis d'obtenir du biochar à partir des macrophytes. En conséquence, basé sur l'étude complète de rentabilité de la gazéification du bois dans une machine Clean Carbon Conversion la gazéification des macrophytes seuls, avec une machine CCC, serait économiquement viable si les communes payaient un minimum de CHF 36 la tonne pour le traitement de leurs macrophytes humides. Malheureusement nous n'avons pas pu démontrer des résultats de gazéification aussi prometteur qu'avec le bois. La production de biochar serait toutefois possible en gazéifiant un mélange de bois et de macrophytes, ce qui améliorerait aussi la production d'énergie.