

# PROGRAMME RÉSILIENCE V11

*helion31412.github.io/resilience2045*

---

## PYROGAZIFICATION — SYNTHÈSE TECHNIQUE

---

*Débits massiques et thermiques · Rendements · Épuration · Produits valorisés*

**Architecture nationale : 150 sites × 1 000 t/j**

Capacité totale : 54,75 Mt MS/an · Bio-CH<sub>4</sub> : 262 TWh/an (central)

*Document de référence technique*  
Résilience V11 — Juin 2026

## 1. Positionnement dans Résilience V11

La pyrogazification constitue le **cœur technologique** de Résilience V11. Elle convertit la biomasse lignocellulosique sèche (**MS ≥ 85 %**) en un gaz de synthèse (syngaz) riche en H<sub>2</sub> + CO, qui est ensuite épuré, puis acheminé vers une biométhanation catalytique (procédé Sabatier) ou biologique pour produire du bio-CH<sub>4</sub> injecté dans le réseau GNV/GNL.

### Rôle stratégique dans Résilience V11 :

- **Gisement national ciblé** : ~200–255 TWh/an sur des usages que l'électrification ne peut traiter
- **Production centrale bio-CH<sub>4</sub>** : 262 TWh/an (pyrogazification + méthanisation + Sabatier)
- **150 sites industriels** × 1 000 t de biomasse sèche/jour = 54,75 Mt MS/an
- **Qualification V11** : ✓ Démonstré à l'échelle pilote (Valmet, Repotec, ThermoSelect) / Plausible à l'échelle industrielle française

## 2. Principe du procédé et zones réactionnelles

La pyrogazification est une **thermo-conversion en atmosphère sous-stœchiométrique** ( $\lambda = 0,25-0,35$  en air, ou vapeur d'eau pour la voie allothermique). Elle se déroule en quatre zones successives :

Zone	Température (°C)	Réactions dominantes	Produits
Séchage	100 – 200	Évaporation H <sub>2</sub> O	Vapeur d'eau, biomasse sèche
Pyrolyse	200 – 500	Décomposition thermique (endothermique)	Char, goudrons primaires, gaz légers (CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O)
Oxydation partielle	900 – 1 100	Combustion partielle (exothermique)	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O → apport thermique au gazéifieur
Réduction (gazéification)	700 – 900	Boudouard, Water-gas, Water-gas shift	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> (syngaz brut)

### 2.1 Réactions clés de la zone de réduction

**Réaction de Boudouard** :  $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$   $\Delta H = +172$  kJ/mol (endothermique)

**Réaction water-gas** :  $C + H_2 O \rightarrow CO + H_2$   $\Delta H = +131$  kJ/mol (endothermique)

**Water-gas shift** :  $CO + H_2 O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$   $\Delta H = -41$  kJ/mol (faiblement exothermique)

**Méthanation in-situ** :  $CO + 3 H_2 \rightarrow CH_4 + H_2 O$   $\Delta H = -206$  kJ/mol (exothermique)

### 2.2 Technologies retenues pour Résilience V11

Technologie	Type	T° (°C)	Statut V11	Avantage principal
Lit fixe contracourant	Allothermique / air	700–900	✓ Démonstré	Robustesse, faible coût
Lit fluidisé circulant (CFB)	Allothermique / vapeur	800–900	✓ Démonstré (Valmet)	Grande capacité, bon contrôle

Gazéifieur à double zone (FICFB)	Allothermique vapeur	800–950	✓Démonté (Güssing)	Syngaz H <sub>2</sub> -riche sans N <sub>2</sub> diluant
Plasma / haute T°	Électrothermique	> 1 200	Plausible	Destruction goudrons totale

Pour Résilience V11, la technologie de référence est le **lit fluidisé circulant (CFB) allothermique à vapeur**, optimisé pour minimiser les goudrons et maximiser le ratio H<sub>2</sub> /CO > 1,5 requis pour la biométhanation Sabatier.

### 2.3 Schéma de principe — De la biomasse à l'injection réseau

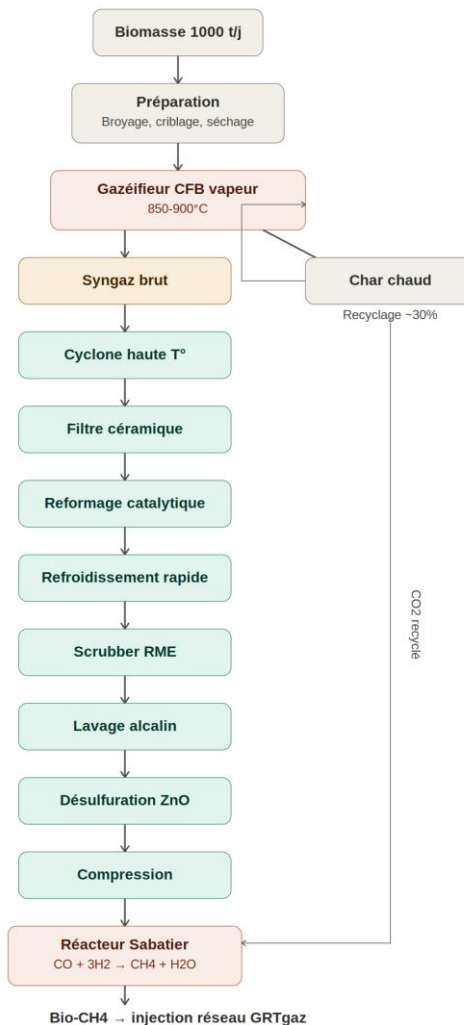


Figure 1 — Chaîne complète : préparation, gazéification, épuration en 7 étapes, Sabatier, injection. Le char est recyclé à ~30 % vers le gazéifieur ; le CO<sub>2</sub> séparé en aval du Sabatier est recyclé dans la boucle.

## 3. Bilans massiques — Site de référence 1 000 t MS/j

Le site de référence Résilience V11 traite **1 000 t de matière sèche/jour**, soit ≈ 1 111 t de biomasse brute à 10 % d'humidité résiduelle (après séchage amont). Le PCI de la biomasse lignocellulosique sèche est pris à **17,5 GJ/t MS** (pin sylvestre, hêtre, rémanents forestiers moyens).

### 3.1 Entrées du gazéifieur

Flux entrant	Débit massique	Commentaire
Biomasse sèche (MS ≥ 85 %)	1 000 t/j = 41,7 t/h	PCI = 17,5 GJ/t → 729 MWth entrant
Agent gazéifiant : vapeur d'eau	~350 t/j = 14,6 t/h	Rapport vapeur/biomasse ≈ 0,35 masse/masse
Énergie thermique apportée (allothermique)	~100 MWth (combustion char partiel)	Fournie par la boucle de char ou brûleurs auxiliaires
Électricité procédé (ventilateurs, pompes)	~8 MWe	Autoconsommation électrique du site

### 3.2 Sorties brutes du gazéifieur (syngaz brut)

Composition typique du syngaz brut en sortie de gazéifieur CFB vapeur (base sèche, % vol) :

Composant	% vol (base sèche)	Débit massique approximatif
H <sub>2</sub>	35 – 45 %	~65 t/j
CO	20 – 30 %	~220 t/j
CO <sub>2</sub>	15 – 25 %	~340 t/j
CH <sub>4</sub>	5 – 10 %	~60 t/j
N <sub>2</sub> (si air)	< 5 % (voie vapeur ≈ 1 %)	~10 t/j
H <sub>2</sub> O (vapeur, base humide)	30 – 45 % base humide	Condensée en aval
Goudrons totaux	2 – 30 g/Nm <sup>3</sup> (brut)	~20 – 80 t/j
Poussières / cendres volantes	5 – 40 g/Nm <sup>3</sup> (brut)	~15 – 60 t/j
H <sub>2</sub> S + COS	50 – 500 ppm vol	< 2 t/j
NH <sub>3</sub>	500 – 3 000 ppm vol	Traces
HCl	10 – 200 ppm vol	Traces

### 3.3 Débit de syngaz brut produit

Paramètre	Valeur	Unité
Volume spécifique de syngaz brut	~1,8 – 2,2	Nm <sup>3</sup> /kg MS
Débit volumique syngaz brut (base humide)	~75 000 – 92 000	Nm <sup>3</sup> /h
Débit volumique syngaz sec	~55 000 – 65 000	Nm <sup>3</sup> /h
PCI syngaz brut (base humide)	~5 – 7	MJ/Nm <sup>3</sup>
Puissance chimique syngaz brut	~280 – 380	MWth

### 3.4 Produits solides : char et cendres

Flux solide	Débit	Teneur C résiduel	Valorisation
Char (coke de biomasse)	~80 – 120 t/j	60 – 80 % C	Recyclé en gazéifieur (30 %) + biochar (70 %)
Cendres fond de gazéifieur	~15 – 25 t/j	< 5 % C	Amendement minéral, BTP
Cendres volantes captées	~10 – 20 t/j	< 10 % C	Biochar classe II après activation ou CET
Biochar final valorisé	~56 – 84 t/j	> 70 % C stable	Séquestration carbone : -55 à -82 kg CO <sub>2</sub> éq/t MS

► Le biochar valorisé représente ~5,6 – 8,4 % de la masse entrante. Sur 150 sites : 3 – 4,6 Mt biochar/an, soit ~8,4 – 13 Mt CO<sub>2</sub> séquestré/an en amendement agricole durable (100 ans+).

## 4. Bilan thermique et rendements — Chaîne complète

### 4.1 Définition des rendements

**Rendement de gazéification ( $\eta_{\text{gaz}}$ ) :**  $\eta_{\text{gaz}} = \text{PCI}_{\text{syngaz\_net}} / \text{PCI}_{\text{biomasse\_entrante}}$

**Rendement chimique global ( $\eta_{\text{CH}_4}$ ) :**  $\eta_{\text{CH}_4} = \text{Énergie bio-CH}_4 \text{ injecté} / \text{PCI}_{\text{biomasse}}$

**Rendement exergetique :** Non intégré dans V11 (approche simplifiée PCI/PCS acceptée pour l'échelle nationale)

### 4.2 Bilan thermique site de référence 1 000 t MS/j

Flux énergétique	Puissance (MWth)	% PCI entrant	Note
PCI biomasse entrante (base)	729	100 %	17,5 GJ/t × 1 000 t/24 h
Chaleur latente séchage	-35	-4,8 %	Séchage 30 % → 10 % humidité
Chaleur pyrolyse (endotherm.)	-45	-6,2 %	Fournie par oxydation partielle interne
Pertes thermiques paroi gazéifieur	-25	-3,4 %	Isolation réfractaire haute performance
PCI syngaz brut produit	~580 – 620	~80 – 85 %	$\eta_{\text{gaz}} \approx 82$ % central
Pertes épuration / refroidissement	-40 – 60	-5,5 – 8 %	Chaleur récupérée en cogénération
PCI syngaz net en entrée Sabatier	~530 – 560	~73 – 77 %	Après épuration complète
Rendement biométhanation Sabatier	× 0,78	—	Thermodynamique + pertes H <sub>2</sub> de procédé
PCI bio-CH <sub>4</sub> injecté réseau	~415 – 440	~57 – 60 %	$\eta_{\text{CH}_4\_global} \approx 58,5$ % central
Chaleur fatale récupérable (cogénération)	~120 – 150	~17 – 21 %	Séchage biomasse amont + chaleur urbaine

Électricité autoconsommée (net)	-8 – 12	-1,1 – 1,6 %	Bilan électrique site
---------------------------------	---------	--------------	-----------------------

**Rendements synthèse — Site 1 000 t MS/j :**

- **η gazéification (syngaz brut/biomasse) :** 82 ± 3 % (✓Robuste)
- **η chimique global (bio-CH<sub>4</sub> /biomasse) :** 58,5 ± 2 % ( Plausible, dépend Sabatier)
- **η énergétique total (CH<sub>4</sub> + chaleur fatale) :** 75 – 80 % ( Plausible avec cogénération)
- **Production bio-CH<sub>4</sub> par site :** 415 – 440 MWth = 3,6 – 3,8 TWh/an par site
- **Production nationale (150 sites) :** 540 – 570 TWh/an de syngaz → 254 – 270 TWh/an bio-CH<sub>4</sub> (voie pyrogazification seule)

**4.3 Récapitulatif production nationale Résilience V11**

Source	Production bio-CH <sub>4</sub> (TWh/an)	Qualification V11
Pyrogazification 150 sites	~210 – 225	Plausible
Méthanisation biomasse agricole/déchets	~70	✓Démontré
Biométhanation Sabatier (H <sub>2</sub> ENR + CO <sub>2</sub> biogène)	~37 – 39	Plausible
Total Résilience V11	~262 TWh/an (central)	Scénario central V11
Fourchette haute	~282 TWh/an	Scénario optimiste
Fourchette basse	~244 TWh/an	Scénario prudent

**4.4 Compression et liquéfaction — Bio-CH<sub>4</sub> vs hydrogène, rendements de conditionnement**

En sortie du réacteur Sabatier, le bio-CH<sub>4</sub> doit être conditionné pour son usage final : **compression à 250 bar** pour l'injection directe réseau et le carburant GNV, ou **liquéfaction à -163 °C** pour le GNL destiné au transport lourd et maritime. Ces étapes consomment de l'énergie et constituent une pénalité supplémentaire sur le rendement final, distincte du rendement de production du bio-CH<sub>4</sub> calculé en 4.2. Le tableau ci-dessous compare ces deux opérations pour le méthane et pour l'hydrogène, sur une base commune : la consommation rapportée au **PCI propre à chaque gaz** (CH<sub>4</sub> : 13,9 kWh/kg ; H<sub>2</sub> : 33,3 kWh/kg).

Vecteur & procédé	Cible	Conso. spécifique (kWh/kg)	% du PCI du gaz	Rendement net	Observation
GNV — Compression CH <sub>4</sub>	250 bar	0,15 – 0,25	1,0 – 1,8 %	98,2 – 99 %	Très peu énergivore : 3–4 étages, densité initiale favorable
GNL — Liquéfaction CH <sub>4</sub>	Patm, -161 °C	0,3 – 0,6	2 – 4,3 % (élec.) / 6 – 10 % (auto-conso. gaz)	90 – 94 %	Excellent en grande échelle (C3MR) ; chute à ~85 % en micro-liquéfaction décentralisée
Compression H <sub>2</sub>	700 bar, ambiant	3,5 – 5	10,5 – 15 %	85 – 89,5 %	Très énergivore : faible densité de l'H <sub>2</sub> , compression multicylindre ou ionique requis
Liquéfaction H <sub>2</sub>	Patm, -253 °C	8 – 12	24 – 36 %	64 – 76 %	Procédé cryogénique lourd ; conversion ortho-para

Pour le méthane, la **compression à 250 bar est l'opération la plus efficace** ( $\eta$  jusqu'à 99 %), nettement supérieure à la liquéfaction ( $\eta$  90–94 % en grande échelle), confirmant la logique attendue : un changement de phase complet reste plus coûteux qu'un simple travail de compression mécanique. Pour l'hydrogène, l'écart entre les deux procédés est plus resserré (85–90 % vs 64–76 %), mais les deux restent nettement moins efficaces que leurs équivalents méthane.

#### 4.4.1 L'asymétrie méthane / hydrogène

##### Enseignement clé :

Conditionner l'hydrogène est intrinsèquement bien plus pénalisant que conditionner le méthane. Là où comprimer le méthane à 250 bar ne consomme que **1 à 1,8 % de son contenu énergétique**, pousser l'hydrogène à 700 bar en engloutit jusqu'à **15 %** — un facteur 8 à 10 sur la pénalité relative.

L'écart est encore plus marqué en liquéfaction : **2 à 10 % du PCI pour le méthane** (selon échelle et mode de comptage) contre **24 à 36 % du PCI pour l'hydrogène**. Cette pénalité massive sur l'hydrogène liquide s'explique par la température cryogénique extrême (–253 °C, contre –161 °C pour le méthane) et par la **conversion ortho-para**, une transformation moléculaire propre à l'hydrogène qui consomme à elle seule plus du quart de l'énergie de liquéfaction.

Pour Résilience V11, cet écart conforte structurellement le choix de la **voie bio-CH<sub>4</sub> via pyrogazéification et Sabatier** plutôt qu'une chaîne hydrogène pur pour le stockage saisonnier et le transport de grandes quantités d'énergie, tout en réservant l'hydrogène aux usages où il est irremplaçable (réduction directe du minerai de fer en sidérurgie, chimie de l'ammoniac), conformément à la doctrine V11 sur la hiérarchie des vecteurs énergétiques.

#### 4.4.2 Application à l'échelle des sites Résilience V11

La nature décentralisée des 150 sites (1 000 t MS/j) oriente, si une option GNL locale est envisagée, vers des unités de liquéfaction petite/moyenne échelle plutôt que des méga-terminaux industriels. Le rendement réaliste à attendre est alors de **85 – 90 %** plutôt que les 93–94 % atteints par les meilleures installations C3MR/Cascade optimisée à grande échelle. Ces pénalités de conditionnement s'appliquent en aval du PCI bio-CH<sub>4</sub> injecté réseau (415–440 MWth/site) et ne sont pas incluses dans le  $\eta_{\text{CH}_4\_global} = 58,5\%$  déjà calculé en 4.2, qui s'arrête à l'injection réseau basse pression.

## 5. Goudrons — Problème central de la pyrogazification

Les **goudrons** (tars) sont des hydrocarbures condensables issus de la pyrolyse incomplète, présents dans le syngaz brut entre **2 et 30 g/Nm<sup>3</sup>** selon la technologie. Ils constituent le principal obstacle à l'industrialisation : ils bouchent les canalisations, empoisonnent les catalyseurs Sabatier et endommagent les compresseurs.

### 5.1 Classification des goudrons (ECN/Milne)

Classe	Composés typiques	T° condensation	Impact procédé
Classe 1 — GC- indétectables	Lévoglucosane, hydrates de carbone lourds	> 150 °C	Colmatage haute T°
Classe 2 — Hétérocycliques	Pyridine, phénol, crésol	100 – 150 °C	Solubilité eau, toxicité effluents

Classe 3 — Aromatiques légers	Toluène, xylène, styrène	< 0 °C	Faible impact (restent gazeux)
Classe 4 — HAP légers	Naphtalène, acénaphthylène	50 – 100 °C	Cristallisation froide
Classe 5 — HAP lourds	Pyrène, coronène, fluoranthène	100 – 200 °C	Encrassement sévère, CMR

## 5.2 Seuils d'acceptabilité

Application aval	Seuil goudrons requis	Qualification V11
Moteur à gaz (cogénération)	< 100 mg/Nm <sup>3</sup>	✓ Atteignable (wet scrubber)
Biométhanation biologique	< 1 mg/Nm <sup>3</sup>	Plausible (RME avancé)
Biométhanation Sabatier (Ni/Ru)	< 0,1 mg/Nm <sup>3</sup> (HAP classe 5)	□ Prospectif (catalyseurs robustes en dev.)
Injection directe réseau (après Sabatier)	Standard GRTgaz H35 / H-gaz	Spécification réseau GNV

## 5.3 Stratégies d'élimination des goudrons — Résilience V11

La stratégie retenue combine deux lignes complémentaires :

### 5.3.1 Reformage primaire (in-situ)

- **Température de sortie gazéifieur > 850 °C** : craquage thermique partiel des goudrons classe 1 et 2
- **Catalyseurs in-bed (dolomite, olivine)** :  $\eta$  destruction classes 2–4 : 60 – 80 % ;  $\Delta$  coût modeste ; durée de vie 200 – 800 h
- **Injection vapeur surstœchiométrique** : reformage à la vapeur in-situ des goudrons (T > 900 °C) ;  $\uparrow$  ratio H<sub>2</sub> /CO favorable Sabatier

### 5.3.2 Épuration secondaire (aval gazéifieur)

Étape	Technologie	Goudrons éliminés	T° opération	Efficacité
1 — Dépoussiérage chaud	Cyclone haute T° + filtre céramique	Particules > 5 $\mu$ m, goudrons adsorbés sur cendres	400 – 500 °C	Poussières : > 95 %
2 — Reformage catalytique	Réacteur Ni/MgO ou Rh (reformeur secondaire)	Classes 1, 2, 4, 5	700 – 900 °C	Goudrons : > 95 %
3 — Refroidissement rapide (Quench)	Tour à eau ou échangeur	Condensation des goudrons résiduels classe 5	150 → 40 °C	Classes 4–5 : > 90 %
4 — Scrubber RME (huile végétale)	Tour à garnissage RME (rapeseed methyl ester)	Goudrons condensables (classes 2–5)	20 – 40 °C	$\eta$ > 99,5 % (< 1 mg/Nm <sup>3</sup> )

5 — Lavage alcalin (H <sub>2</sub> S / HCl)	Colonne à absorption NaOH	H <sub>2</sub> S, HCl, NH <sub>3</sub> , HCN	Ambiante	H <sub>2</sub> S : > 99 %
6 — Désulfuration fine (ZnO)	Lit fixe ZnO ou Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S résiduel → < 0,1 ppm	200 – 400 °C	H <sub>2</sub> S : < 0,1 ppmv
7 — Compression + séchage	Compresseur vis + déshydrateur TSA	H <sub>2</sub> O résiduelle	—	H <sub>2</sub> O : < 10 mg/Nm <sup>3</sup>

**Syngaz épuré en entrée Sabatier (spécifications V11) :**

- **Goudrons totaux** : < 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> (objectif < 0,1 mg/Nm<sup>3</sup> catalyseur Ni)
- **H<sub>2</sub> S + COS** : < 0,1 ppmv
- **HCl** : < 0,01 ppmv
- **NH<sub>3</sub>** : < 1 ppmv
- **Poussières** : < 0,5 mg/Nm<sup>3</sup>
- **H<sub>2</sub> O** : < 10 mg/Nm<sup>3</sup> (point de rosée < -20 °C)
- **Ratio H<sub>2</sub> /CO** : ≥ 3 (requis Sabatier : CO + 3H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> O)

**5.4 Devenir des goudrons captés**

Fraction captée	Volume (t/j, site 1 000 t)	Traitement / Valorisation
Condensats RME chargés en goudrons	~5 – 15 t condensats	Distillation → fraction légère recirculée, lourds : co-incinération
Boues de scrubbing alcalin	~2 – 5 t/j	Station épuration dédiée, boues : méthanisation
Coke de catalyseur reformeur	~0,5 – 1 t/j	Régénération par air à 600 °C (CO <sub>2</sub> → capté ou émis)
Effluents liquides aqueux	~20 – 40 m <sup>3</sup> /j	Traitement biologique (DBO/DCO), rejet normes ICPE

**6. Produits recyclés dans le procédé**

La pyrogazification Résilience V11 est conçue selon une logique de boucles internes maximisant l'efficacité et minimisant les déchets.

Produit recyclé	Origine	Destination	Rôle / Bénéfice
Char (fraction gazéifieur)	Zone de réduction (fond gazéifieur)	Recirculé dans zone d'oxydation (30 %)	Apport thermique autothermique ; ↓ consommation auxiliaire
Vapeur d'eau (Sabatier)	Réaction Sabatier : CO + 3H <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	Recyclée comme agent gazéifiant	↓ consommation eau process de ~30 %
CO <sub>2</sub> (Sabatier + épuration)	CO <sub>2</sub> séparé PSA en post-Sabatier	Recirculé vers gazéifieur (réaction Boudouard) ou stocké	Valorisation carbone ; ↑ ratio CO/CO <sub>2</sub> syngaz

Chaleur réacteur Sabatier (250 °C)	Réaction exothermique Sabatier	Échangeur → séchage biomasse amont	↑ η thermique global +5 %
Chaleur fatale gazéifieur (400 – 600 °C)	Paroi gazéifieur + cyclone chaud	Production vapeur HP → turbine ORC ou vapeur procédé	Autoconsommation électrique partielle
Eaux process condensées (quench)	Refroidissement syngaz 150 → 40 °C	Traitement + réinjection comme eau de scrubbing	Économie eau fraîche ~60 %
RME régénéré (scrubber)	Scrubber RME chargé en goudrons légers	Distillation → RME pur recirculé	Durée de vie RME 3 – 6 mois ; ↓ coût consommable
Cendres riches en K, P	Fond gazéifieur (fraction minérale)	Retour sol agricole (amendement)	Bouclage minéral P/K → ↓ engrais chimiques

### 6.1 Schéma des boucles internes — Description textuelle

**Boucle 1 — Char/thermique :** Char produit → recirculation gazéifieur → oxydation → chaleur → séchage biomasse

**Boucle 2 — Eau / vapeur :** Vapeur HP produite → agent gazéifiant → syngaz humide → condensation → réinjection process

**Boucle 3 — CO<sub>2</sub> :** CO<sub>2</sub> capté PSA → Sabatier (si H<sub>2</sub> dispo) ou Boudouard gazéifieur → CO syngaz

**Boucle 4 — Chaleur Sabatier :** Chaleur réacteur Sabatier (250 °C) → échangeur → préchauffage syngaz entrant → ↑ η Sabatier

**Boucle 5 — Minéraux :** Cendres K/P → retour agricole → biomasse futurs cycles → bouclage agronomique

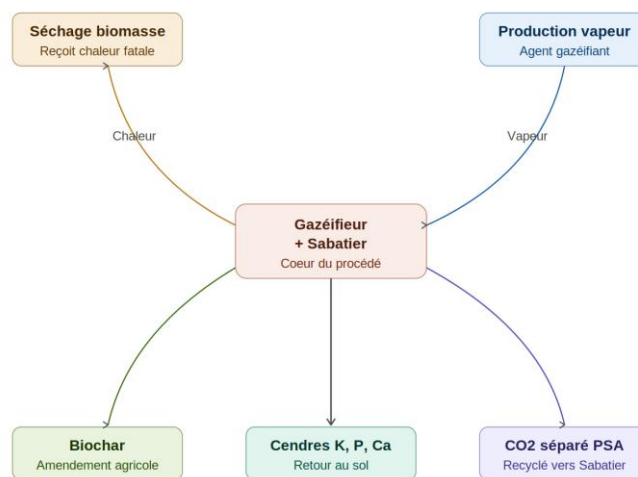


Figure 2 — Cinq boucles de recyclage autour du cœur gazéifieur + Sabatier : chaleur vers séchage, vapeur vers gazéifieur, biochar vers agriculture, CO<sub>2</sub> vers Sabatier, cendres vers le sol.

## 7. CO<sub>2</sub> biogène : quatre destinations Résilience V11

La pyrogazification génère un flux concentré de CO<sub>2</sub> biogène (**15 – 25 % vol du syngaz brut**), soit environ **250 – 350 t CO<sub>2</sub> /j par site**. Résilience V11 définit quatre destinations valorisantes :

Destination	Volume (t CO <sub>2</sub> /j/site)	Technologie	Valeur économique	Qualification V11
1 — Sabatier (Power-to-Gas)	~100 – 150	Méthanation Ni/Ru + H <sub>2</sub> ENR	~55 €/t CO <sub>2</sub> valorisé	Plausible
2 — Biochar (C stable sol)	~80 – 120 (C dans biochar)	Séparation char + amendement	~80 – 120 €/t CO <sub>2</sub> éq (crédit carbone)	✓Démontré
3 — CO <sub>2</sub> concentré industrie	~50 – 80	Compression + livraison serres, boissons	~30 – 50 €/t	✓Démontré
4 — Séquestration géologique (BECCS)	Résidu non valorisé	Compression + stockage géologique	~20 – 40 €/t (crédits EU ETS)	□ Prospectif (France)

## 8. Paramètres économiques — Référence Résilience V11

Paramètre	Valeur V11	Qualification
CAPEX site 1 000 t/j (gazéification + épuration + Sabatier)	~460 M€	Plausible (Güssing x 10, retours d'expérience)
CAPEX total 150 sites	~69 Md€	Scénario central V11
OPEX annuel (énergie, maintenance, personnel)	~18 – 22 M€/site/an	Plausible
Coût de production bio-CH <sub>4</sub> (LCOE)	~80 – 110 €/MWh	Plausible (2030–2045)
Recette biochar (amendement agricole)	~4 – 8 M€/site/an	✓Démontré (marché naissant)
Recette CO <sub>2</sub> concentré industrie	~1,5 – 4 M€/site/an	✓Démontré
Durée de vie des installations	25 – 30 ans	Standard industriel
Article R.446-105 (exclusion CPB biogaz)	Verrou réglementaire clé	Question sénatoriale Piednoir déposée

## 9. Synthèse et points de vigilance V11

### 9.1 Comparaison des filières de décarbonation

Le tableau ci-dessous situe la pyrogazéification face aux trois autres voies mobilisées dans Résilience V11 : méthanisation, hydrogène, et électrification directe.

Critère	Méthanisation	Pyrogazéification	Hydrogène	Électrification directe
Biomasse humide	★★★★★	★	★	—

Biomasse sèche	★★	★★★★★	—	—
Rendement énergétique	55–65 %	75–80 % (avec chaleur)	30–45 %	> 300 % (PAC)
Gaz injectable réseau	Oui	Oui	Non	Non
Compatible GNL	Oui	Oui	Non	Non
Compatible moteurs existants	Oui	Oui	Limité	Non
Stockage saisonnier	Excellent	Excellent	Difficile	Très difficile
Transport maritime	Oui	Oui	Très difficile	Impossible
Aviation SAF	Oui	Oui	Non	Non
Décarbène industrie lourde	Oui	Oui	Oui	Partiellement
Co-produit biochar	Non	Oui	Non	Non
CO <sub>2</sub> concentré valorisable	Faible	Excellent	Non	Non
Maturité technologique	★★★★★	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★★
Résilience énergétique	Très bonne	Excellente	Moyenne	Faible

Ce positionnement explique le choix V11 de mobiliser la pyrogazéification sur les usages où la **biomasse sèche** domine (rémanents forestiers, résidus agricoles ligneux), en complémentarité avec la méthanisation sur la biomasse humide (effluents, déchets organiques), et en réservant l'électrification directe aux usages où elle conserve son avantage de rendement (chauffage résidentiel par PAC, mobilité légère).

## 9.2 Atouts confirmés

- **Rendement gazéification 82 % ✓**: Validé par Güssing (Autriche, 8 MWth), Skive (Danemark), Valmet (Finlande)
- **Syngaz H<sub>2</sub> -riche (vapeur)** : H<sub>2</sub> /CO > 1,5 accessible, favorable biométhanation Sabatier sans séparation coûteuse
- **Biochar séquestration carbone** : Reconnue CRCF UE (3 février 2026) — verrou réglementaire levé au niveau européen
- **CO<sub>2</sub> biogène concentré** : Flux pur sans dilution atmosphérique → valorisation directe industrie
- **Chaîne de boucles internes** : Autosuffisance thermique partielle → ↑ η global vers 75 – 80 %

## 9.3 Points de vigilance et incertitudes

- **Goudrons HAP classe 5 (□ Prospectif)** : La tolérance du catalyseur Ni/Ru Sabatier aux HAP lourds résiduels n'est pas encore démontrée à grande échelle. Requis : < 0,1 mg/Nm<sup>3</sup>
- **Passage à l'échelle 1 000 t/j ( Plausible)** : Plus grand démonstrateur : ~100 MWth (Värnamo). Facteur × 6 à démontrer en France
- **Durée de vie catalyseurs reformeur** : 200 – 800 h → régénération fréquente → coût OPEX non négligeable
- **Seuil de fuite méthane ≤ 1 %** : Non-négociable contractuel V11. Requis sur l'ensemble de la chaîne gazéification → injection réseau
- **Article R.446-105** : L'exclusion de la pyrogazification des CPB biogaz bloque le financement de la filière. Verrou réglementaire prioritaire (question S.Piednoir, retour septembre 2026)

- **Gisement biomasse (□ Prospectif partiel)** : La mobilisation de 54,75 Mt MS/an suppose terres marginales + rémanents forestiers + résidus agricoles. Grille de confiance V11 : Robuste 40 %, Plausible 40 %, Prospectif 20 %

## 9.4 Feuille de route technique V11

Phase	Horizon	Objectif	Jalons clés
Démonstration	2025 – 2028	Pilote 100 MWth (100 t/j) en France	Financement ANR / CEA / lauréats CPB (Novéa, Charwood, LERMAB)
Préindustriel	2028 – 2032	5 sites × 300 t/j	Intégration Sabatier + biochar ; qualification RTE / GRTgaz
Industrialisation	2032 – 2038	50 sites × 1 000 t/j	Déverrouillage R.446-105 ; financement CPL ou CfD
Déploiement complet	2038 – 2045	150 sites en service	262 TWh/an bio-CH <sub>4</sub> ; France carbon-negative – 60 à –80 Mt CO <sub>2</sub> /an

## 10. Bilan journalier complet des sorties — Site 1 000 t MS/j

Ce tableau récapitule l'ensemble des **flux sortants valorisables ou à traiter** produits chaque jour par un site de référence Résilience V11. La colonne « Valeur » indique le produit de marché correspondant ou la filière de destination.

### 10.1 Produits énergétiques

Produit	Quantité journalière	Équivalent énergétique	Destination / Remarque
Bio-CH <sub>4</sub> injecté réseau (gaz de synthèse Sabatier)	~9 600 – 10 200 MWh/j (PCI)	~400 – 425 MWth continu	Réseau GRTgaz, GNV, GNL — recette ~80–110 €/MWh
Chaleur fatale haute température (400–600 °C)	~30 – 45 MWth (chaleur)	~720 – 1 080 MWh <sub>th</sub> /j	Séchage biomasse amont ou turbine ORC → électricité site
Chaleur fatale moyenne température (150–250 °C)	~20 – 30 MWth	~480 – 720 MWh <sub>th</sub> /j	Réacteur Sabatier → préchauffage syngaz, eau chaude procédé
Chaleur fatale basse température (< 100 °C)	~15 – 25 MWth	~360 – 600 MWh <sub>th</sub> /j	Réseau de chaleur urbain si site péri-urbain
Électricité produite (ORC / turbine vapeur)	~8 – 15 MWe	~192 – 360 MWh <sub>e</sub> /j	Autoconsommation site ; surplus réseau local

#### Total énergie utile sortante par jour (site 1 000 t) :

- **Bio-CH<sub>4</sub>** : 9 600 – 10 200 MWh<sub>th</sub>/j → 3,5 – 3,7 TWh/an
- **Chaleur récupérée totale** : ~1 560 – 2 400 MWh<sub>th</sub>/j → 0,57 – 0,88 TWh<sub>th</sub>/an
- **Électricité nette exportable** : 0 – 4 MWe en surplus (après autoconsommation ~8–12 MWe)
- **η total (CH<sub>4</sub> + chaleur)** : 75 – 80 % du PCI biomasse entrante

### 10.2 Produits solides valorisables

Produit solide	Tonnage journalier	Caractéristiques clés	Valorisation / Marché
Biochar amendement agricole (classe I)	~40 – 60 t/j	C stable > 70 %, pH 8–10, surface BET > 200 m <sup>2</sup> /g	Amendement sol agricole, vignes, maraîchage — ~150–300 €/t
Biochar activation (classe II — carbon engineering)	~10 – 20 t/j	Activé thermiquement, Iode > 800 mg/g	Filtration eau/air, traitement effluents — ~400–800 €/t
Char recyclé gazéifieur (auto-apport thermique)	~25 – 40 t/j	C résiduel 60–80 %, PCI ~28 MJ/kg	Recyclage interne — économie ~30 MWth/j
Cendres fond de gazéifieur (minéraux K, P, Ca)	~15 – 25 t/j	K <sub>2</sub> O 5–15 %, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 2–8 %, CaO 20–40 %	Amendement minéral agricole, BTP si inerte — ~20–40 €/t
Cendres volantes (cycle chaud)	~10 – 20 t/j	Fines < 50 µm, C résiduel < 10 %	CET classe II ou co-incinération si hors seuil

**Total solides valorisables par jour :**

- **Biochar total (cl. I + cl. II) :** 50 – 80 t/j → 18 250 – 29 200 t/an par site
- **Séquestration carbone associée :** ~55 – 80 kg CO<sub>2</sub> éq/t MS traitée → 55 – 80 t CO<sub>2</sub> éq séquestrés/jour
- **Cendres minérales valorisables :** 15 – 25 t/j (retour agricole phosphore-potassium)
- **Sur 150 sites :** 7,5 – 12 Mt biochar/an → 8 – 13 Mt CO<sub>2</sub> séquestrés/an

**10.3 Flux gazeux et liquides en sortie**

Flux	Débit journalier	Composition / Qualité	Destination
CO <sub>2</sub> biogène concentré (PSA post-Sabatier)	~120 – 180 t CO <sub>2</sub> /j	Pureté > 99 % vol, pression 15–30 bar	Serres horticoles, boissons, industrie agro — ~30–50 €/t
CO <sub>2</sub> biogène pour Sabatier interne	~80 – 120 t CO <sub>2</sub> /j	Alimenté directement en réacteur	Valorisé en bio-CH <sub>4</sub> (non commercialisé séparément)
Effluents liquides aqueux traités	~20 – 40 m <sup>3</sup> /j	DBO <sub>5</sub> < 25 mg/L après traitement biologique	Rejet milieu naturel (norme ICPE) ou réutilisation procédé
Condensats RME régénérés	~5 – 10 t/j de condensats	Fraction légère recyclée, lourds co-incinérés	Interne — économie consommable RME
Vapeur d'eau condensée récupérée	~250 – 320 t/j	Eau déminéralisée après traitement	Réinjection comme eau process (~60 % autonomie eau)
Émissions cheminée (syngaz résiduel non valorisé)	< 5 % du volume total	Après post-combustion : CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> < 200 mg/Nm <sup>3</sup>	Cheminée site — conformité IED / arrêté ICPE

**10.4 Tableau de synthèse global — Bilan journalier 1 000 t MS/j**

Base d'entrée : 1 000 t MS/j = 729 MWth PCI biomasse = 100 %

Catégorie	Flux sortant journalier	Puissance / Masse	% PCI entrant	Valeur marchande estimée
BIO-CH <sub>4</sub> INJECTÉ RÉSEAU	9 600 – 10 200 MWh <sub>th</sub>	400 – 425 MWth	57 – 60 %	~800 000 – 1 100 000 €/j
Chaleur fatale totale récupérée	1 560 – 2 400 MWh <sub>th</sub>	65 – 100 MWth	9 – 14 %	~15 000 – 48 000 €/j (si vendue)
Électricité nette (ORC / vapeur)	0 – 96 MWh <sub>e</sub>	0 – 4 MWe surplus	< 1 %	~0 – 9 600 €/j
Biochar classe I (amendement)	40 – 60 t	—	—	~6 000 – 18 000 €/j
Biochar classe II (filtration)	10 – 20 t	—	—	~4 000 – 16 000 €/j
CO <sub>2</sub> biogène concentré (industrie)	120 – 180 t	—	—	~3 600 – 9 000 €/j

Cendres minérales (retour sol)	15 – 25 t	—	—	~300 – 1 000 €/j
Crédit carbone biochar (EU CRCF)	55 – 80 t CO <sub>2</sub> éq séquestrés	—	—	~1 650 – 5 600 €/j (30–70 €/t CO <sub>2</sub> )
Pertes thermiques non récupérées	—	~25 – 40 MWth	3,5 – 5,5 %	—
Déchets à traiter (effluents, cendres hors seuil)	~5 – 15 t + 20–40 m <sup>3</sup>	—	—	Coût traitement ~500 – 2 000 €/j
TOTAL RECETTES JOURNALIÈRES (central)	—	—	—	~830 000 – 1 200 000 €/j

### Lecture du bilan journalier V11 :

Sur les **729 MWth** entrant sous forme de biomasse, le site convertit **57–60 % en bio-CH<sub>4</sub>** commercial, récupère **9–14 % en chaleur fatale** (séchage + réseau de chaleur), et valorise les **solides et CO<sub>2</sub>** pour un complément de recettes de ~14 000 – 50 000 €/j.

Les **pertes non récupérées restent inférieures à 6 %** du PCI entrant, ce qui place ce procédé parmi les **meilleures efficacités thermiques** de la filière biomasse-énergie.

Recette totale centrale estimée : **~300 – 440 M€/an par site** (bio-CH<sub>4</sub> dominant à > 90 % des recettes). Le biochar et le CO<sub>2</sub> représentent des recettes complémentaires encore sous-valorisées en 2026.

## Annexe — Abréviations et unités

Abréviation	Définition
MS	Matière sèche
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
CFB	Circulating Fluidized Bed (lit fluidisé circulant)
FICFB	Fast Internally Circulating Fluidized Bed
RME	Rapeseed Methyl Ester (ester méthylique de colza) — solvant scrubber
PSA	Pressure Swing Adsorption — séparation gaz H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
COP	Coefficient of Performance (pompe à chaleur)
ORC	Organic Rankine Cycle — turbine chaleur fatale
TSA	Temperature Swing Adsorption — séchage gaz
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
CRCF	Carbon Removal Certification Framework (UE)
CPB	Certificat de Production de Biogaz (France)
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
$\eta$	Rendement énergétique ( $\eta$ )
$\lambda$	Rapport stœchiométrique air/biomasse ( $\lambda$ )
TWh/an	TéraWatt-heure par an
MWth	MégaWatt thermique
Nm <sup>3</sup>	Mètre cube normal (0 °C, 1 atm)
ppmv	Parties par million en volume