Architecture en cascade : méthanisation → digestat solide → pyrolyse

Complément technique à la synthèse pyrogazéification — bilan matière et carbone

Programme Résilience 2045 — note technique complémentaire V2 — Juillet 2026

1. Principe

La méthanisation extrait par digestion anaérobie la fraction facilement biodégradable de la biomasse (sucres, protéines, lipides), qu'elle convertit en biogaz (CH_4 + CO_2). Ce qui reste dans le digestat — la fraction solide, après séparation — est précisément la fraction récalcitrante à la digestion anaérobie : lignine et fibres ligno-cellulosiques peu ou pas dégradées. Or c'est exactement le type de matière qui pyrolyse le mieux : la lignine est la molécule qui donne un biochar de bonne qualité (carbone aromatique stable), alors qu'elle résiste à la fermentation bactérienne.

La cascade méthanisation → pyrolyse n'est donc pas une simple juxtaposition de deux filières : c'est une valorisation séquentielle qui traite deux fractions différentes de la même biomasse, chacune par le procédé auquel elle se prête le mieux. Elle ne mobilise aucune biomasse supplémentaire — elle valorise mieux un flux (le digestat) déjà produit par les méthaniseurs existants.

2. Étapes du procédé

- Séparation solide/liquide du digestat (décanteuse centrifuge ou vis-presse) : la fraction liquide (azote ammoniacal, potassium) reste utilisée directement comme fertilisant liquide ; la fraction solide (fibres, phosphore) est orientée vers la pyrolyse.
- Déshydratation et séchage de la fraction solide jusqu'à environ 90 % de matière sèche — la pyrolyse exige un intrant sec pour un rendement énergétique correct. Ce séchage peut mobiliser la chaleur fatale déjà produite par la cogénération du site de méthanisation, ce qui limite le surcoût énergétique net.
- Pyrolyse lente (typiquement 500 °C) de la fraction solide séchée, produisant du biochar, du syngaz et une fraction de bio-huile.
- Le syngaz produit est généralement autoconsommé pour fournir tout ou partie de l'énergie thermique nécessaire au séchage et au maintien en température du réacteur, ce qui améliore l'autonomie énergétique de l'installation et réduit d'autant le surcoût net évoqué en section 2.
- Option : une partie du biochar produit peut être réintroduite dans le digesteur comme additif plutôt qu'exportée vers les sols — voir section 5.

3. Bilan matière et carbone (base : 1 tonne de biomasse brute entrant en méthanisation)

Les hypothèses ci-dessous sont des ordres de grandeur illustratifs pour un mix agricole type (effluents d'élevage + cultures intermédiaires à vocation énergétique). Elles doivent être recalibrées site par site selon la nature réelle des intrants.

Étape	Masse / matière sèche (MS)	Observation
Biomasse brute entrante (méthanisation)	1 000 kg, ~22 % MS → 220 kg MS / 780 kg eau	Mix effluents d'élevage + CIVE, hypothèse type
Matière organique volatile (MOV)	~85 % de la MS → 187 kg MOV	Fraction potentiellement dégradable
Dégradation en biogaz (CH_4+CO_2)	~45 % de la MOV dégradée → 84 kg MOV convertie	Fourchette réaliste 40–55 % selon intrant/temps de séjour
Digestat brut (MS résiduelle)	≈ 136 kg MS (220 − 84)	Fibres non digérées + minéraux + biomasse bactérienne
Séparation solide/liquide	Fraction solide ≈ 200 kg brut (~25 % MS → 50 kg MS)	Décanteuse centrifuge ou vis-presse ; reste en fraction liquide : ~86 kg MS (N-NH_4^+, K)

Séchage fraction solide	50 kg MS → ~90 % MS (≈ 56 kg total)	Évaporation ≈ 144 kg eau ; utilise la chaleur fatale de cogénération si disponible
Pyrolyse (rendement massique ~30 %)	56 kg × 30 % ≈ 16,7 kg biochar	Cohérent avec le rendement mesuré en laboratoire (33,1 %, pyrolyse lente 500 °C)
Carbone dans le biochar (~50 % C)	16,7 kg × 50 % ≈ 8,3 kg C	Valeur moyenne pour un digestat agricole ; teneur en C plus faible que le biochar bois (cendres minérales concentrées) — fourchette réelle 40–60 % selon composition
CO_2eq séquestré	≈ 30 kg CO_2eq / tonne brute entrante	8,3 kg C × 3,67

Soit, en ordre de grandeur, environ 30 kg de CO_2eq durablement séquestrés par tonne de biomasse brute entrant en méthanisation — en plus du biogaz déjà produit par la filière, et sans mobilisation de biomasse supplémentaire.

4. Biochar de digestat vs biochar de bois : une comparaison nécessaire

Le biochar issu de digestat n'est pas équivalent au biochar issu de bois brut utilisé dans les sites de pyrogazéification du programme :

- teneur en carbone plus faible (de l'ordre de 40 à 60 %, contre 75 à 85 % pour un biochar ligneux), car le digestat concentre les minéraux (cendres, phosphore, potassium, calcium) déjà présents dans la biomasse d'origine ;
- en contrepartie, le biochar de digestat est intrinsèquement plus riche en phosphore — un résidu inorganique valorisable comme amendement minéral à libération lente, complémentaire de la fraction liquide azotée ;
- le rendement massique de pyrolyse (~30–33 %) est comparable à celui du bois, ce qui permet de réutiliser directement les paramètres déjà validés dans la synthèse Forêt vs Biochar du programme.

Ce biochar reste néanmoins soumis aux mêmes exigences de certification (standards EBC) que le biochar ligneux, avec une vigilance particulière sur la composition de l'intrant initial (voir section 6).

5. Une synergie possible : le retour du biochar au digesteur

Plusieurs études récentes montrent qu'une fraction du biochar ou du char produit à partir du digestat peut être réintroduite dans le digesteur comme additif, où sa conductivité électrique favorise le transfert d'électrons entre espèces microbiennes (DIET) et améliore le rendement en méthane — les résultats publiés vont d'un gain de l'ordre de 5 % à des gains bien supérieurs selon le type de char et de substrat, avec en prime une meilleure stabilité du procédé face aux surcharges en acides gras volatils.

Ceci introduit un arbitrage opérationnel pour chaque site : exporter la totalité du biochar vers les sols (maximise la séquestration carbone et le co-bénéfice agronomique direct) ou en recycler une partie dans le digesteur (maximise la production de biogaz et la stabilité du procédé, au prix d'une séquestration nette légèrement réduite). Ce choix relève de l'optimisation économique locale, pas d'un principe technique intangible.

6. Points de vigilance

- Risque de contamination : la composition du biochar de digestat dépend directement de la qualité des intrants du méthaniseur (HAP, dioxines, métaux lourds en cas de contamination des effluents ou biodéchets). Un contrôle systématique est nécessaire avant tout usage agronomique, comme pour le biochar ligneux.

- Coût énergétique du séchage : c'est le poste le plus sensible économiquement. Il n'est justifié que si la chaleur fatale du site (cogénération) est disponible et sinon mobilisable pour un autre usage à plus forte valeur.
- Variabilité des intrants : contrairement au bois, la composition du digestat varie fortement selon les intrants du méthaniseur (élevage, CIVE, biodéchets), ce qui impose une caractérisation locale plutôt que l'application directe des ratios ci-dessus.

7. Implication pour l'architecture du Programme Résilience

Cette cascade ne concurrence pas l'architecture des 150 sites de pyrogazéification, dont l'intrant principal reste la biomasse ligneuse et les résidus agricoles secs. Elle constitue un gisement additionnel et distinct : celui des méthaniseurs déjà en fonctionnement ou en projet sur le territoire, pour lesquels le digestat solide représente aujourd'hui un flux sous-valorisé (épandage direct, sans séquestration carbone additionnelle).

Cette architecture permet également d'améliorer le bilan carbone des méthaniseurs existants sans remettre en cause leur fonctionnement ni leurs investissements déjà réalisés : Résilience ne concurrence pas la méthanisation, il la rend meilleure.

Un chiffrage national précis nécessiterait de mobiliser l'inventaire réel des sites de méthanisation français (nombre de sites, tonnages d'intrants, types de substrats) — donnée que le programme n'a pas encore intégrée à ce stade et qu'il serait utile de rapprocher des bases GRDF ou ADEME. Un tel inventaire permettrait d'estimer le potentiel national de séquestration additionnelle, exprimé en tonnes de CO_2 durablement immobilisées par an, ainsi que la production supplémentaire de biochar susceptible d'être intégrée à la stratégie nationale bas carbone.

Sources principales : ScienceDirect — pyrolyse et carbonisation hydrothermale de digestats (rendement char ~33 %, teneur en carbone du digestat solide 15–55 %) ; Frontiers — caractérisation et valorisation du digestat de biogaz (fractions solide/liquide) ; arXiv — intégration Power-to-X et pyrolyse des fibres de digestat (installation SkyClean) ; W-Ays (Biochar wAys) — production de biochar sur site de méthanisation agricole ; études sur le biochar comme additif de méthanisation (transfert d'électrons interspécifique, DIET) ; Sequestration_CO2_foret_vs_biochar_v4, Programme Résilience (paramètres de pyrolyse de référence).