Programme Résilience 2045

Carburants et vecteurs renouvelables : rendements, apports et contraintes

Comparatif des filières électricité, hydrogène, méthane, méthanol et biocarburants — de la ressource à la roue

Jacques Diez · resilience2045.fr · Octobre 2026

1. L'essentiel

- **Deux niveaux à ne pas confondre.** Le premier est l'élaboration du vecteur à partir d'une source naturelle (soleil, vent, uranium, eau, biomasse). Le second est l'utilisation du vecteur (électricité, bio-méthane, méthanol, hydrogène). Comparer directement « électricité → roues » et « biomasse → roues » mélange les deux niveaux.
- **Au premier niveau,** ce sont la source et ses coproduits qui comptent autant que le rendement : le soleil et le vent sont abondants mais intermittents ; l'uranium et l'eau sont pilotables ; la biomasse est limitée, mais elle apporte biochar, CO_2 concentré, chaleur et services (déchets, forêts, terres).
- **Au second niveau,** l'électricité directe reste imbattable pour l'usage quotidien (~74 % du vecteur aux roues). Parmi les molécules, le méthane en ÉREV arrive en tête (~40 %), avec le stockage saisonnier et le réseau déjà construits.
- **La filière méthane est la seule à cumuler** traitement des déchets secs et humides, entretien des forêts, valorisation des terres délaissées, séquestration par le biochar, CO_2 biogénique concentré, stockage saisonnier et réseau déjà construits.
- **Ses inconvénients** (fuites, sécurité) relèvent de la rigueur d'exploitation, et non de la molécule : ils se traitent par la mesure, le contrôle et la qualification des exploitants.

2. Méthode

Le comparatif est construit en deux niveaux. Le niveau 1 décrit l'élaboration de chaque vecteur à partir de sa source naturelle, avec ses coproduits et ses contraintes. Le niveau 2 décrit l'utilisation du vecteur jusqu'aux roues. Certains vecteurs sont de second rang : l'hydrogène d'électrolyse, l'e-méthane et l'e-méthanol sont produits à partir d'électricité, et la méthanation avec hydrogène ajouté associe deux sources, le carbone de la biomasse et l'énergie électrique. Les chaînes complètes (parties 5 et 6) combinent les deux niveaux.

Chaque chaîne est décomposée étape par étape, sur la base du pouvoir calorifique inférieur (PCI). Toutes les compressions sont intégrées : CO_2 pour la synthèse, hydrogène à 80 bar pour le méthanol, hydrogène à 700 bar pour la mobilité (10,5–15 % de son PCI), méthane à 250 bar pour le GNV (1–1,8 % de son PCI).

La chaleur est comptée lorsqu'elle est récupérable sur site : chaleur d'électrolyse (60–80 °C), chaleur de méthanation (300–400 °C), chaleur fatale de pyrogazéification. Elle est comptée à pleine valeur, sans pondération selon sa température ; sa valorisation suppose un utilisateur à proximité (réseau de chaleur, séchage de biomasse, serres, électrolyse haute température).

Conformément aux conventions du programme, les systèmes sont évalués en fonctionnement continu à leur point optimal, et les valeurs 2045 sont des ordres de grandeur (~). Les chaînes méthane et ÉREV reprennent les valeurs du corpus Résilience (synthèse pyrogazéification V11, note de cadrage V11) ; les autres filières reposent sur des valeurs publiées courantes.

3. Niveau 1 — Élaborer le vecteur à partir d'une source naturelle

Source → vecteur	Rendement de conversion	Caractère	Coproduits et services	Limite principale
Soleil (photovoltaïque) → électricité	~20 % du rayonnement	Intermittent, diurne et saisonnier	Aucun	Surfaces, stockage

Source → vecteur	Rendement de conversion	Caractère	Coproduits et services	Limite principale
Vent (éolien) → électricité	~40–45 % de l'énergie du vent	Intermittent	Aucun	Sites, acceptabilité, stockage
Uranium (nucléaire) → électricité	~33 % de la chaleur du réacteur	Pilotable	Chaleur (cogénération possible) ; déchets à gérer	Délais de construction (14 EPR2 au plus d'ici 2045)
Eau (hydraulique) → électricité	~85–90 %	Pilotable, stockable (STEP)	Gestion de l'eau, stockage	Sites déjà largement équipés
Biomasse sèche, déchets (pyrogazéification + méthanation) → bio-méthane	~55 % avec biochar (~58,5 % sans) ; ~75–80 % avec chaleur	Pilotable, stockable	Biochar, CO_2 concentré, chaleur ; entretien des forêts, terres délaissées	Ressource limitée
Déchets humides (méthanisation) → bio-méthane	~55 %	Continu, stockable	Digestat (engrais), CO_2 concentré ; traitement des effluents	Gisement, rigueur d'exploitation
Biomasse (gazéification complète) → méthanol	~50–58 % sans biochar	Stockable	CO_2 concentré, chaleur ; très peu de biochar	Ressource limitée
Biomasse (gazéification complète) → hydrogène	~45–55 % sans biochar	Stockage difficile	CO_2 concentré, chaleur ; très peu de biochar	Ressource limitée
Biomasse (cogénération) → électricité + chaleur	~30 % + ~50 % de chaleur	Pilotable	Chaleur ; CO_2 dilué	Besoin de chaleur local

Les trois molécules partent du même gaz de synthèse (CO, H_2, CO_2), et la gazéification elle-même est la principale perte (~20–25 %). Méthane : la méthanation dégage ~20 % de l'énergie en chaleur ; le biochar extrait retient du carbone et de l'énergie, d'où 55 % avec biochar contre 58,5 % sans. Méthanol : la synthèse retient un peu plus d'énergie que la méthanation, mais exige 50–100 bar, des boucles de recyclage et une distillation. Hydrogène : il provient surtout de l'eau, par conversion du CO à la vapeur ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$), et non de l'hydrogène de la biomasse ; la purification en perd une partie, brûlée pour le procédé.

La nature de la source est fondamentale. Le meilleur rendement de production d'électricité est celui de l'hydraulique, mais le rendement ne dit pas l'essentiel :

- **Uranium :** ressource limitée et importée, investissements lourds et délais de construction longs ; production pilotable ; déchets à gérer sur le très long terme.
- **Soleil :** illimité et gratuit en quantité, mais pas disponible tout le temps (nuit, hiver) : il appelle du stockage.
- **Vent :** abondant et gratuit lui aussi, mais intermittent : même besoin de stockage.
- **Eau :** le meilleur rendement (~85–90 %), une quantité limitée par les sites disponibles, mais une énergie stockable (barrages, STEP) ; elle devient vulnérable aux sécheresses.
- **Biomasse :** limitée en quantité. Mais dans Résilience, l'utilisation des déchets et résidus règle des problèmes existants — effluents d'élevage, biodéchets, combustible des feux de forêt, terres délaissées — et coproduit des ressources importantes pour le climat : biochar, CO_2 biogénique concentré, chaleur.

Pour le solaire, l'éolien et le nucléaire, le rendement de conversion compte moins que l'ampleur et le coût des installations nécessaires, qui évoluent : le solaire progresse continûment en rendement et en coût ; l'éolien distingue le terrestre et le maritime, avec des machines toujours plus puissantes ; le nucléaire gagne en sûreté mais se complexifie, avec des coûts et des délais en forte hausse. Pour les sources gratuites et abondantes (soleil, vent), les critères décisifs sont la surface, l'intermittence et le coût du stockage. Pour les ressources limitées (uranium, eau, biomasse), le rendement, les coproduits et les problèmes résolus comptent davantage.

Vecteurs de second rang, produits à partir d'électricité. L'électrolyse convertit ~68 % de l'électricité en hydrogène et produit en coproduits de la chaleur à 60–80 °C et de l'oxygène (8 kg par kg d'hydrogène), utilisable notamment pour une gazéification à l'oxygène. Associé au CO_2 biogénique concentré, cet hydrogène donne de l'e-méthane (~52 % de l'électricité, plus une chaleur de méthanation à 300–400 °C) ou de l'e-méthanol (~52 %).

La méthanation avec hydrogène ajouté est un produit de second rang particulier : le CO_2 biogénique d'un site de pyrogazéification ou de méthanisation, combiné à de l'hydrogène issu de surplus électriques, produit du méthane supplémentaire sans biomasse supplémentaire. Elle relie les deux sources, le carbone de la biomasse et l'énergie électrique, et stocke les surplus dans les infrastructures gazières existantes.

4. Niveau 2 — Utiliser le vecteur

Vecteur	Du vecteur aux roues	Stockage saisonnier	Distribution	Réservoir à bord
Électricité → véhicule à batterie	~74 % (réseau, recharge, batterie)	Non	Existante, renforcement important à financer	Batterie
Méthane (bio ou e-) → ÉREV V2.2	~40 % (réseau et 250 bar 0,965 × ÉREV 0,42)	~130 TWh existants	Réseau existant	250 bar
Méthanol → ÉREV	~37 % (logistique 0,99 × ÉREV 0,375)	Cuves à construire	À créer	Liquide
Hydrogène → pile à combustible	~37 % (700 bar 0,87 × transport 0,96 × pile 0,50 × traction 0,88)	Cavités salines, rares	À créer	700 bar
Hydrogène → ÉREV moteur H_2	~31 % (700 bar 0,87 × transport 0,96 × ÉREV 0,37)	Cavités salines, rares	À créer	700 bar

Le niveau 2 compare les vecteurs à usage égal, indépendamment de leur origine. L'électricité directe garde l'avantage pour l'usage quotidien ; parmi les molécules, le méthane l'emporte par son rendement en ÉREV, sa compression peu coûteuse et ses infrastructures existantes.

5. Chaînes complètes depuis l'électricité (niveaux 1 + 2)

Cette voie concerne les surplus d'électricité, notamment saisonniers, qui seraient sinon écrêtés ou vendus à prix négatif.

Étape	Véhicule à batterie	H_2 700 bar → pile	e-Méthane → ÉREV	e-Méthanol → ÉREV
Réseau + recharge	~0,94 × 0,91	—	—	—
Électrolyse (PCI)	—	~0,68	~0,68	~0,68
Compression H_2 / CO_2	—	~0,87 (700 bar)	~0,98 (CO_2)	~0,96 (H_2 80 bar + CO_2)
Synthèse	—	—	~0,79 (méthanation)	~0,80 (synthèse + distillation)
Stockage, transport, distribution	—	~0,96	~0,97 (réseau, stockage, 250 bar)	~0,99 (liquide)
Conversion à bord → roues	~0,86 (batterie + moteur)	~0,44 (pile 0,50 × traction 0,88)	~0,42 (ÉREV V2.2 : moteur 52–55 %)	~0,375 (moteur Geely > 48 %)

Valeurs centrales. ÉREV : chaîne moteur → électricité calée sur la valeur mesurée par Geely (moteur 47,3 %, 3,77 kWh d'électricité par litre, soit ~42 % carburant → électricité, donc ~89 % de l'arbre moteur à la batterie), puis ~88 % de la batterie aux roues. Méthane : objectif moteur ÉREV V2.2 de 52–55 % (turbocompound + ORC). Méthanol : plus de 48 % annoncés par Geely. Hydrogène en moteur : 47 %, comme le moteur essence Geely. Pour l'hydrogène, la pile convertit ~50 % de l'hydrogène en électricité, puis la batterie tampon, l'onduleur et le moteur électrique en transmettent ~88 % aux roues.

Filière	Aux roues	Chaleur valorisable	Énergie utile totale	Principale perte
Électricité directe → batterie	~74 %	—	~74 %	Recharge, batterie
e-Méthane → ÉREV	~21 %	~29 % (électrolyse + méthanation)	~50 %	Électrolyse, moteur
H_2 700 bar → pile à combustible	~25 %	~20 % (électrolyse)	~45 %	Électrolyse, compression, pile
e-Méthanol → ÉREV	~19,5 %	~21 %	~41 %	Électrolyse, moteur
H_2 700 bar → ÉREV moteur H_2	~21 %	~20 %	~41 %	Compression, moteur

Fourchettes indicatives : véhicule à batterie 66–79 % ; molécules de synthèse 15–33 % aux roues selon les technologies.

Lecture. Sans la chaleur, les trois molécules sont proches (~19,5 à 21 % en ÉREV), le méthane étant légèrement devant grâce au rendement moteur visé en V2.2. Avec la chaleur et les compressions, le méthane prend l'avantage : sa compression est la moins coûteuse et la méthanation libère une chaleur à haute température réutilisable, par exemple pour un électrolyseur haute température qui porte alors la chaîne à ~25 % aux roues. Pour des surplus qui seraient perdus, le critère décisif devient le coût du stockage, où le méthane bénéficie des ~130 TWh de stockages souterrains existants.

6. Chaînes complètes depuis la biomasse et les déchets (niveaux 1 + 2)

Filière	Aux roues	Chaleur	Total	Séquestration	Stockage saisonnier
Pyrogazéification + méthanation (Résilience)	~22 %	~22 %	~45 %	Biochar (~0,14–0,26 t CO_2/t sèche) + CO_2 concentré	Stockages gaz existants
Méthanisation (déchets humides)	~21,5 %	~5 %	~27 %	CO_2 concentré ; digestat → pyrolyse (cascade)	Stockages gaz existants
Gazéification → méthanol	~20 %	~15 %	~35 %	CO_2 concentré ; très peu de biochar	Cuves à construire
Gazéification → H_2 → pile	~18 %	~15 %	~33 %	CO_2 concentré ; très peu de biochar	Cavités salines, rares
Cogénération biomasse → batterie	~22 %	~50 %	~72 %	CO_2 dilué dans les fumées	Aucun
HVO (huiles usagées) → hybride	~28 %	—	~28 %	Aucune	Liquide, simple
Bioéthanol 1re génération → hybride	~15 %	—	~15 %	CO_2 de fermentation pur	Liquide, simple

Pyrogazéification : 55 % biomasse → bio-CH_4, 75–80 % avec chaleur fatale ; biochar 5,6–8,4 % de la masse entrante × 2,5–3,1 t CO_2eq/t (synthèse pyrogazéification V11).

Lecture. Toutes les filières issues de la biomasse par voie gazeuse donnent ~20–22 % aux roues, le méthane en haut de la fourchette. La cogénération obtient le meilleur total grâce à sa chaleur, mais elle ne stocke rien d'une saison à l'autre, ne séquestre pas simplement son carbone et ne fournit pas de carburant aux usages lourds. Le HVO a un bon rendement mais une ressource très limitée ; le bioéthanol a le rendement le plus faible et concurrence les surfaces alimentaires.

7. Apports et besoins de chaque filière

7.1 Électricité directe (véhicule à batterie)

Vecteur le plus efficace pour les usages quotidiens ; c'est la base du programme pour la mobilité légère, l'ÉREV roulant sur batterie pour l'essentiel des trajets.

Apports

- Meilleur rendement de toutes les filières (~74 % aux roues).
- Aucune combustion ni émission locale.
- Réseau électrique existant et production nucléaire et renouvelable décarbonée.
- Pompes à chaleur : usage thermodynamiquement supérieur pour le chauffage des bâtiments.

Besoins et contraintes

- Pas de stockage saisonnier : le système doit être dimensionné pour les semaines critiques d'hiver.
- Renforcement du réseau et des capacités de pointe ; bornes rapides.
- Batteries : ressources minérales (lithium, graphite), masse pénalisante pour les poids lourds, le maritime et l'aviation.
- Recharge longue sur les grands trajets ; autonomie réduite par grand froid.
- Sécurité : incendies de batterie rares mais difficiles à éteindre.

7.2 Hydrogène

Vecteur sans carbone à l'usage, pertinent pour l'industrie (acier, ammoniac, raffinage), mais coûteux à stocker et à distribuer pour la mobilité.

Apports

- Aucune émission de CO_2 à l'usage ; pile à combustible à ~50 % de rendement.
- Matière première industrielle directe (sidérurgie, engrais, raffinage).
- Production par gazéification de biomasse possible, avec CO_2 concentré.

Besoins et contraintes

- Infrastructure entièrement à créer : le réseau gaz n'en accepte qu'une faible proportion.
- Compression à 700 bar : 10,5–15 % du PCI ; réservoirs composites en fibre de carbone coûteux.
- Stockage saisonnier limité aux cavités salines, rares en France.
- Sécurité : très petite molécule (fuites, fragilisation des aciers), plage d'inflammabilité très large (4–75 %), énergie d'allumage très faible, flamme peu visible.
- Effet de serre indirect des fuites ; platine dans les piles.
- Ne valorise pas directement les déchets humides ; peu de biochar dans les procédés de gazéification actuels.

7.3 Méthane renouvelable (bio-CH_4 et e-CH_4)

Molécule pivot du programme Résilience : la première et la plus accessible des molécules synthétisables à partir du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène.

Apports

- Traitement des déchets humides (méthanisation : effluents d'élevage, biodéchets, boues) et secs (pyrogazéification : bois, résidus agricoles et forestiers).
- Entretien des forêts : la biomasse fine qui alimente les incendies devient une matière première achetée.
- Valorisation des terres délaissées ou dégradées par le miscanthus, sans concurrence avec les terres nourricières.
- Séquestration durable par le biochar et CO_2 biogénique concentré, prêt pour le stockage géologique ou la méthanation.
- Stockage des surplus électriques, y compris saisonniers, par méthanation.
- Réseau de distribution et ~130 TWh de stockages souterrains déjà construits ; compression à 250 bar peu coûteuse (1–1,8 % du PCI).
- Chaleur de méthanation à haute température réutilisable.
- Rendement moteur élevé : fort indice d'octane (~120–130), fonctionnement à point fixe en ÉREV, objectif ~52–55 % en version V2.2 (turbocompound + ORC).
- Plateforme chimique : matière première de l'hydrogène, de l'ammoniac et du méthanol ; la pyrolyse du méthane produit de l'hydrogène et du carbone solide stockable dans des matériaux.
- Moteurs simples et matures ; GNL pour les poids lourds, le maritime et l'aviation.

Besoins et contraintes

- Rigueur d'exploitation : seuil de fuite ≤ 1 % sur la chaîne complète, détection et réparation périodique des fuites, mesure indépendante.
- Catalyseur adapté et régulation de combustion pour limiter le méthane imbrûlé.
- Réservoirs à 250 bar : à énergie égale, ~1,6 fois le volume de méthanol et ~3 fois celui de l'essence (hors parois) ; compensé par l'ÉREV, qui roule sur batterie au quotidien.
- Acceptabilité locale de la méthanisation, aujourd'hui dégradée par des installations mal exploitées.
- Sécurité : gaz plus léger que l'air qui se disperse, plage d'inflammabilité étroite (5–15 %), odorisé ; technologie maîtrisée depuis des décennies.

7.4 Méthanol

Carburant liquide de synthèse, concurrent sérieux du méthane, notamment en Chine (constructeur Geely) et dans le transport maritime.

Apports

- Liquide à pression ambiante : stockage et réservoirs simples.
- Synthèse en une étape à partir du gaz de synthèse, demandant moins d'hydrogène que le méthane (H_2/CO de 2 contre 3).
- Rendement moteur élevé (plus de 48 % annoncés en hybride).
- Plateforme chimique : une partie du carbone peut être stockée dans des matériaux.

Besoins et contraintes

- Distribution à créer, avec des matériaux compatibles (corrosion de l'aluminium, joints).
- Densité énergétique moitié de l'essence : ~10 L/100 km au lieu de ~5 ; autonomie divisée par deux à réservoir égal.
- Démarrage à froid difficile en dessous de ~10 °C.
- Sécurité : toxique par ingestion et par la peau, flamme presque invisible, soluble dans l'eau ; émissions de formaldéhyde.
- Pas de voie directe depuis les déchets humides ; très peu de biochar dans les procédés de gazéification actuels.
- Pas de stockage saisonnier existant.

7.5 Cogénération biomasse

Production combinée d'électricité et de chaleur à partir de bois ou de résidus ; technologie mature.

Apports

- Meilleur total énergétique (~72 %) lorsque la chaleur trouve un usage local.
- Valorise le bois et les résidus ; électricité pilotable.

Besoins et contraintes

- Suppose un besoin de chaleur sur place toute l'année.
- Aucun stockage saisonnier : production continue.
- CO_2 dilué dans les fumées : captage coûteux ; pas de biochar.
- Ne fournit pas de carburant aux usages lourds ; émissions de particules à traiter.

7.6 Biocarburants liquides (HVO et bioéthanol)

Carburants compatibles avec les moteurs et la distribution existants.

Apports

- Utilisables immédiatement dans les véhicules et stations actuels (E10, E85, HVO).
- HVO : bon rendement de conversion des huiles usagées.
- Bioéthanol : CO_2 de fermentation presque pur, facile à stocker ; co-produits pour l'alimentation animale.

Besoins et contraintes

- HVO : ressource en huiles et graisses usagées très limitée, risque d'importations d'huiles végétales, consommation d'hydrogène aujourd'hui fossile.
- Bioéthanol de première génération : concurrence avec les surfaces alimentaires, intrants agricoles, rendement global faible (~15 %).
- Aucune séquestration de carbone par biochar ; pas de stockage saisonnier spécifique.

8. Matrice de synthèse

Critère	Électricité directe	Hydrogène	Méthane	Méthanol	Cogé. biomasse	HVO	Éthanol 1G
Rendement électricité → roues	Très fort	Faible	Faible	Faible	—	—	—
Énergie utile avec chaleur	Très fort	Moyen	Moyen +	Moyen	Fort	—	—
Déchets humides	Non	Non	Oui	Indirect	Non	Non	Non
Déchets secs, forêts	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Terres délaissées	Non	Possible	Oui	Possible	Possible	Non	Non
Séquestration biochar	Non	Faible	Oui	Faible	Non	Non	Non
CO_2 concentré	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Stockage saisonnier	Non	Limité	Existant	À créer	Non	Simple	Simple

Critère	Électricité directe	Hydrogène	Méthane	Méthanol	Cogé. biomasse	HVO	Éthanol 1G
Réseau de distribution	Existant, à renforcer fortement	À créer	Existant	À créer	Existant	Existant	Existant
Réservoir embarqué (volume relatif à énergie égale)	Batterie lourde	700 bar, coûteux (~6,7)	250 bar (~3,2)	Liquide, simple (~2)	—	Liquide	Liquide
Sécurité d'usage	Bonne	Délicate	Bonne si rigueur	Toxique	Bonne	Bonne	Bonne
Ressource disponible	Large	Large (élec.)	Large	Large	Moyenne	Très limitée	Limitée

Évaluation qualitative à l'horizon ~2045. Volumes relatifs de carburant à énergie égale, essence = 1, hors parois et équipements : méthanol ~2 ; méthane 250 bar ~3,2 ; hydrogène 700 bar ~6,7. L'architecture ÉREV, qui roule sur batterie au quotidien et n'utilise le carburant qu'en appoint, rend ces écarts de volume secondaires.

9. Conclusion

Un comparatif juste distingue la source et le vecteur. La source détermine la ressource disponible, son caractère pilotable ou intermittent et les coproduits ; le vecteur détermine le rendement d'usage, le stockage et la distribution. Une filière se juge sur l'ensemble des deux.

Sur le rendement seul, aucune molécule ne domine nettement : l'électricité directe reste la meilleure pour l'usage quotidien, et les filières gazeuses renouvelables se valent à quelques points près. Présenter le méthane comme « le meilleur rendement » serait contestable.

L'argument juste est autre : à rendement équivalent, la filière méthane est la seule qui traite à la fois les déchets secs et humides, réduit le combustible des feux de forêt, valorise les terres délaissées, retire du carbone de l'atmosphère, stocke l'énergie d'une saison à l'autre et s'appuie sur des infrastructures déjà payées. Ses contraintes — fuites et sécurité — relèvent de la discipline d'exploitation et se maîtrisent par la mesure, comme dans toute industrie à risque.

C'est la complémentarité de l'électricité et du méthane renouvelable, et non leur opposition, qui optimise le système énergétique.