

PROGRAMME RÉSILIENCE — FILIÈRE BIOMASSE HUMIDE

HUB TERRITORIAL RÉSILIENCE — MODULE SERRES

Biomasse → Méthaniseur → Séparation CH₄/CO₂ → GMP ÉREV → Batterie Hub → PAC + LED → Serres → Digestat

Document de référence consolidé — Version 8.1 — Août 2026

Évolutions V8.2 vs V8.4 — bilan CO₂ excédentaire corrigé : hiérarchie Rex/séparation + enrichissement partiel : scénario saisonnier CH₄ réseau reformulé :

La philosophie fondatrice

Le Hub ne dimensionne pas son énergie sur son ambition agricole.

Il dimensionne son activité agricole sur les ressources réellement produites par son territoire.

Le biogaz détermine les quantités de CH₄ et de CO₂ disponibles.

Le CH₄ alimente prioritairement le GMP ÉREV lorsque l'énergie est nécessaire.

La batterie permet au GMP de fonctionner dans sa zone optimale de rendement.

Le Rex fournit simultanément électricité, chaleur et CO₂ biogénique — c'est un cogénérateur intégré, pas un simple groupe électrogène.

Le CO₂ séparé en amont complète cette production et assure la continuité lorsque le Rex est arrêté.

Les excédents de CH₄ et de CO₂ peuvent être valorisés à l'extérieur du Hub — cette commercialisation est une possibilité, pas une condition de viabilité.

L'agriculture s'adapte à la ressource disponible ; elle n'impose pas à la ressource une production énergétique supérieure à ce que le territoire peut fournir.

Architecture — schéma fonctionnel de principe

BIOMASSE HUMIDE (3 exploitations — ~180 UGB)



MÉTHANISEUR (~91 000 Nm³/an biogaz brut)



DÉSULFURATION H₂S + SÉPARATION
CO₂ / CH₄ (traitement unique amont)



CH₄ > 97 %
~54 600 Nm³/an



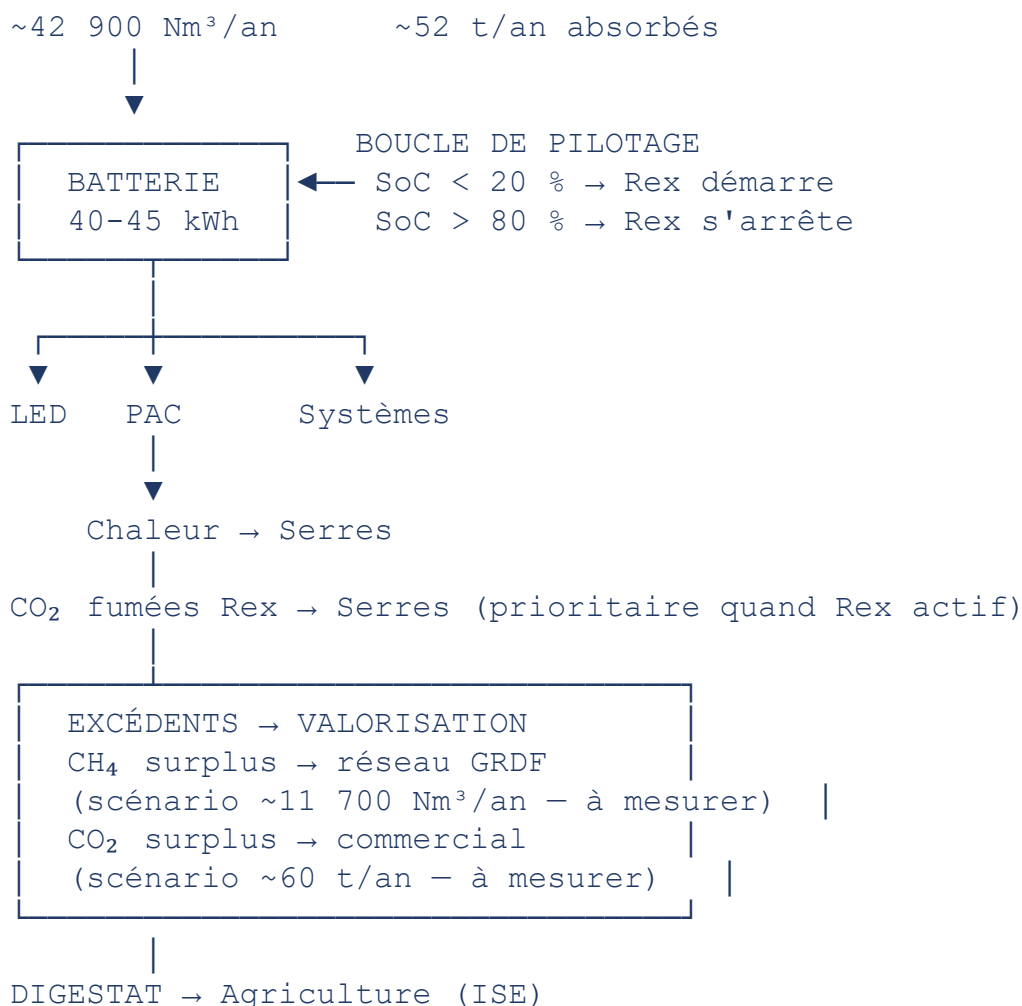
Priorité 1
GMP ÉREV / Rex



CO₂ biogénique pur
~36 400 Nm³/an



Priorité 1
Serres (appoint)



Boucle de pilotage centrale :

L'état de charge (SoC) de la batterie commande le Rex. Ce principe, directement issu de l'architecture ÉREV automobile, dissocie la puissance instantanée demandée par le Hub de la puissance optimale du moteur. C'est l'un des principaux intérêts du transfert de l'architecture ÉREV vers le Hub territorial.

PARTIE 1 — Principes et bilan de conservation énergétique annuel

Ce tableau est la pièce maîtresse technique du dossier. Une fois ce bilan fermé, toutes les fonctions du Hub sont mathématiquement subordonnées à une ressource locale mesurée.

1.1 Entrée unique : le biogaz

La production de biogaz dépend de la qualité et de la quantité de biomasse apportée par les 3 exploitations. Les valeurs ci-dessous sont des références de dimensionnement ; le démonstrateur mesurera les valeurs réelles et leur saisonnalité.

Paramètre	Valeur	Base de calcul
Gisement Hub	1 680 t/an mix lisier + fumier	3 exploitations ~180 UGB
Biogaz produit	~91 000 Nm³/an (60 % CH ₄ / 40 % CO ₂)	32 Nm³ biogaz/t moyen — à mesurer sur démonstrateur

Paramètre	Valeur	Base de calcul
PCI biogaz brut	6,1 kWh/Nm ³ (facteur CH ₄ 60 % inclus)	Valeur biogaz brut — avant séparation
PCI CH ₄ pur	10 kWh/Nm ³	Constante physique CH ₄ — après séparation
Débit méthaniseur	~10,4 Nm ³ /h biogaz brut continu	Production 24h/24 — indépendante du Rex
CH ₄ après séparation (60 %)	~54 600 Nm ³ /an — 6,24 Nm ³ /h moyen	Vers GMP Rex en priorité — surplus réseau
CO ₂ après séparation (40 %)	~36 400 Nm ³ /an — 4,16 Nm ³ /h moyen	Vers serres en appoint — surplus commercialisé
PCI total CH ₄ disponible	54 600 × 10 = 546 MWh/an	Vs 555 MWh PCI biogaz brut — écart ~9 MWh = pertes séparation (~1,6 %)

1.2 La séparation CO₂/CH₄ — étape structurante du Hub

La séparation du biogaz en CH₄ et CO₂ n'est pas uniquement une opération d'épuration. Elle constitue le point de départ de la stratégie de valorisation du Hub.

- Le CH₄ est produit sous une forme permettant plusieurs usages : alimentation prioritaire du GMP ÉREV et, lorsque la production excède les besoins du Hub, valorisation éventuelle sous forme de biométhane réseau.
- Le CO₂ séparé constitue simultanément une ressource biogénique utilisable dans les serres et, lorsque les besoins internes sont satisfaits, susceptible d'une valorisation externe.
- Une même molécule de carbone peut ainsi être valorisée successivement dans plusieurs fonctions du système plutôt que considérée comme un sous-produit sans valeur.

Étage	Fonction	Technologie	Statut
1 — Désulfuration H ₂ S	H ₂ S < 50 ppm — protège tout l'aval	Charbon actif ou biofiltration	Obligatoire
2 — Séparation CO ₂ /CH ₄	CO ₂ pur biogénique + CH ₄ >97 %	Membrane ou eau sous pression (PSA)	À chiffrer Phase 0

Coût upgrading à intégrer :

Unité de séparation membrane à ~91 000 Nm³/an : ~30 000-60 000 € estimé (à confirmer Phase 0).
Selon Gemini, ce surcoût est amorti en moins de 4 ans par les recettes de la catégorie D (CH₄ réseau + CO₂ marchand).

1.3 Bilan de conservation énergétique annuel — CH₄ pur, Rex esclave batterie

V8.3 corrige le bilan V8.0 : le Rex brûle du CH₄ pur (PCI 10 kWh/Nm³, pas 6,1 kWh/Nm³ biogaz brut). Toute la chaîne est recalculée depuis ce point.

Bilan saisonnier Rex — heures de fonctionnement réelles

Saison	Durée saison	Charge Hub dominante	H Rex estimées	CH ₄ consommé Rex	CH ₄ surplus gazomètre
Hiver	2 400 h	LED + PAC + systèmes (~35 kWe)	~2 200 h	~21 500 Nm ³	~1 000 Nm ³

Saison	Durée saison	Charge Hub dominante	H Rex estimées	CH ₄ consommé Rex	CH ₄ surplus gazomètre
Printemps	1 680 h	Systèmes seuls (~4-8 kWe)	~800 h	~7 800 Nm ³	~7 900 Nm ³
Été	2 200 h	Systèmes seuls (~4-8 kWe)	~400 h	~3 900 Nm ³	~9 700 Nm ³
Automne	1 400 h	LED partielles + systèmes (~15 kWe)	~1 000 h	~9 700 Nm ³	~1 100 Nm ³
TOTAL annuel	8 760 h		~4 400 h Rex actif	~42 900 Nm ³ consommés	~11 700 Nm ³ potentiels → réseau GRDF (scénario — à mesurer)

Calcul débit CH₄ Rex : $40 \text{ kWe} / (0,41 \times 10 \text{ kWh/Nm}^3) = 9,76 \text{ Nm}^3/\text{h}$ CH₄ pur consommé à pleine charge.

Bilan de conservation énergétique annuel V8.2 — fermé et vérifié

Flux	Calcul	MWh/an ou Nm ³ /an	% PCI CH ₄ disponible
ENTRÉE — PCI CH₄ disponible après séparation	54 600 × 10	546 MWh/an	100 %
PARTITIONNEMENT CH₄			
CH ₄ vers Rex (4 400 h actif)	42 900 Nm ³ × 10 kWh/Nm ³	429 MWh	78,6 %
CH ₄ potentiellement disponible réseau (scénario)	~11 700 Nm ³ × 10 kWh/Nm ³	~117 MWh	~21,4 %
VÉRIFICATION CH ₄	429 + 117	546 ✓	100 %
PARTITIONNEMENT REX (42 900 Nm³ CH₄ — 4 400 h)			
Électricité Rex (rendement cycle 46 % × gén. 92 % × ond. 96,5 %)	40 kWe × 4 400 h	176 MWhe	32,2 %
Chaleur récupérable moteur (~80 % × (1-46 %) × PCI)	40 kWth × 4 400 h	176 MWth	32,2 %
Pertes moteur non récupérables (~16 %)	429 - 176 - 176	77 MWh	14,1 %
VÉRIFICATION Rex	176 + 176 + 77	429 ✓	78,6 %
DESTINATION ÉLECTRICITÉ REX (176 MWhe) via BATTERIE			
LED serres (hiver nuit — 31 kWe × 600 h)	31 × 600 / 1 000	18,6 MWhe	3,4 %
Systèmes serre (4 kWe × 8 760 h — batterie couvre hors Rex)	4 × 8 760 / 1 000	35,0 MWhe	6,4 %
PAC (solde électricité Rex)	176 - 18,6 - 35,0	122,4 MWhe	22,4 %
VÉRIFICATION électricité	18,6 + 35,0 + 122,4	176 ✓	32,2 %

Flux	Calcul	MWh/an ou Nm ³ /an	% PCI CH ₄ disponible
CHALEUR TOTALE (Rex + PAC) — potentiel théorique			
Chaleur Rex récupérable	40 kWth × 4 400 h	176 MWhth	32,2 %
Potentiel PAC (122,4 MWe × COP 3,5)	122,4 × 3,5	428 MWhth	—
Total potentiel chaleur Hub	176 + 428	604 MWhth/an	— (PAC régulée T°C)
Chaleur utile serre (régulée T°C consigne)	Voir Partie 4	~40 MWhth	7 %
CO₂ — BILAN SAISONNIER (voir détail §3.3)			
CO ₂ Rex disponible (Rex actif 4 400 h)	22 kg/h × 4 400 h / 1 000	~97 t/an	Prioritaire serre — excédent Rex hors 12 kg/h serre
CO ₂ séparation disponible (continu 24h/24)	36 400 Nm ³ × 1,96 kg/Nm ³	~71 t/an	Appoint Rex actif + seule source Rex arrêté
CO ₂ absorbé serres (bilan saisonnier)	Rex actif + Rex arrêté + intermédiaire	~89 t/an	Enrichissement partiel printemps/été (~544 m ² vs 800 m ²)
CO ₂ excédentaire commercialisable (scénario)	18,2 kg/h × ~3 300 h Rex actif	~60 t/an	Hiver + intermédiaire — à mesurer démonstrateur

Bilan fermé V8.2 :

546 MWh CH₄ = 429 MWh Rex + ~117 MWh potentiellement disponibles réseau (scénario saisonnier). Rex : 176 MWe + 176 MWhth + 77 MWh pertes = 429 ✓. Électricité : 18,6 + 35,0 + 122,4 = 176 ✓. Aucun double comptage. Le partage réel Rex/réseau sera déterminé expérimentalement sur démonstrateur.

Enseignement fondamental du bilan V8.2

- CH₄ SURPLUS RÉSEAU : ~11 700 Nm³/an (~117 MWh biométhane) — flux commercial nouveau V8.0/V8.2
- REX COGÉNÉRATEUR : 176 MWe électricité + 176 MWhth chaleur + 97 t/an CO₂ — rendement global > rendement électrique seul (41 %)
- CO₂ CONTINU : 71 t/an CO₂ séparation disponible 24h/24 indépendamment du Rex — continuité serre assurée
- BATTERIE : tampon entre production Rex (régime fixe) et consommation Hub (variable) — simulation dynamique requise Phase 0
- CONTRAINTE PRINCIPALE : SoC batterie ≥ 20 % — la contrainte électrique instantanée de V7.0 disparaît

PARTIE 2 — Réemploi du GMP ÉREV automobile

Source exclusive rendements : Annexe ÉREV V11 V3 (mai 2026).

2.1 Principe du réemploi — pourquoi le GMP automobile

Le Hub utilise comme générateur électrique un GMP développé pour une application ÉREV automobile compacte. Ce choix n'est pas seulement économique — c'est un choix architectural.

L'intérêt de cette architecture est de réutiliser un ensemble industriel comprenant :

- Moteur thermique à haut rendement (cycle thermodynamique optimisé)
- Générateur électrique intégré
- Électronique de puissance qualifiée série
- Système de contrôle avec stratégie de fonctionnement à régime optimisé
- Batterie de stockage intermédiaire (40-45 kWh)
- Chaîne de dépollution (SCR/DOC) — intégrée et qualifiée

Le Hub ne développe pas un groupe électrogène spécifique. Il transpose à une application stationnaire un ensemble dont l'architecture a été conçue pour produire efficacement de l'électricité à partir du carburant lorsque l'état de charge de la batterie le nécessite.

La chaîne stationnaire s'arrête à l'onduleur : pas de transmission, de différentiel ni de roues. Gain de rendement vs véhicule en traction : ~7-9 points — la puissance n'est pas dissipée mécaniquement.

2.2 Rex esclave de la batterie — principe de fonctionnement

Comme dans l'architecture ÉREV, le moteur thermique n'a pas vocation à suivre instantanément la demande électrique.

La batterie constitue le tampon énergétique entre la production et les consommations.

- Lorsque le SoC descend sous le seuil défini (~20 %), le Rex démarre et fonctionne à son régime de rendement optimal.
- Lorsque le SoC atteint son niveau supérieur de consigne (~80-90 %), le Rex s'arrête.
- Entre les deux, le Rex tourne en continu à régime fixe — indépendamment de ce que consomment les serres.

Le système dissocie ainsi la puissance instantanée demandée par le Hub de la puissance optimale du moteur. Cette dissociation constitue l'un des principaux intérêts du transfert de l'architecture ÉREV vers le Hub territorial.

Batterie — vérification par simulation dynamique requise :

La batterie 40-45 kWh constitue le tampon électrique du Hub et absorbe les variations rapides de puissance. Elle permet de découpler les pointes de consommation de la puissance instantanée du Rex. Sa capacité et son SoC minimal doivent être vérifiés par simulation dynamique du profil réel des charges (Phase 0/FEED) avant de dimensionner l'installation.

2.3 Rex comme cogénérateur — rendement global

Le rendement du système ne doit pas être évalué uniquement sur le rendement électrique du Rex (~41 %). Le Rex valorise simultanément :

- L'électricité (176 MWh_e/an → LED, PAC, systèmes)
- La chaleur récupérable (176 MWh_{th}/an → serres via PAC)
- Le CO₂ biogénique des fumées (~97 t/an → enrichissement serres)

La comparaison avec un simple groupe électrogène serait trompeuse : un groupe électrogène rejette chaleur et CO₂ à l'atmosphère. Le Rex Hub valorise ces deux flux comme ressources agricoles.

2.4 Trajectoire ÉREV V2.0 → V2.2

Paramètre	V2.0 (maintenant)	V2.1 (2027-28)	V2.2 (2030+)
Rendement cycle thermique (Annexe V11 V3)	46 % central (44-48 %)	49,5 % central (48-51 %)	53,5 % central (52-55 %)
Rendement stationnaire CH ₄ →élec	~41 %	~44 %	~47,5 %
Rex max sur CH ₄ pur	~40 kWe	~43 kWe	~46 kWe
Débit CH ₄ Rex	~9,76 Nm ³ /h	~9,09 Nm ³ /h	~8,42 Nm ³ /h
Chaleur récupérable moteur	~40 kW _{th}	~35 kW _{th}	~30 kW _{th}
CO ₂ fumées Rex (CH ₄ pur)	~22 kg/h	~20 kg/h	~18,5 kg/h
Chaîne dépollution	SCR/DOC intégré GMP — conformité ICPE	Idem	Émissions très faibles — à valider stationnaire
Statut	Opérationnel	2027-28	Prospectif 2030+

Compatibilité fumées Rex → serres — validation Phase 0/FEED :

Le GMP est issu d'une architecture automobile bénéficiant d'une chaîne de dépollution industrialisée. La possibilité de valoriser les fumées dans les serres sera validée dans la configuration stationnaire réelle (NOx, CO, hydrocarbures résiduels). La conformité réglementaire de l'installation stationnaire sera établie séparément dans le cadre de la Phase 0/FEED. Aucune transposition directe de la norme automobile Euro 7 vers le stationnaire.

2.5 Fonctionnement — cycle 24h type hiver

Phase	Rex	Batterie SoC	Charges Hub
Jour (pas de LED)	Régime fixe — charge batterie	Monte vers 80-90 %	PAC + systèmes (~34 kWe)
Soir — transition	Régime fixe continu	Maintien charge	LED allumées progressivement
Nuit hiver (LED max)	Régime fixe continu	Légère décharge si besoin	LED 31 kWe + PAC + systèmes
Arrêt Rex (maintenance)	À l'arrêt	Couvre 1-2 h charge complète	Continuité sans interruption
Printemps/été (jour)	Arrêté (SoC > 80 %)	Reste haute — Rex ne démarre pas	Systèmes seuls (~4-8 kWe)

Phase	Rex	Batterie SoC	Charges Hub
Printemps/été (nuit)	Démarre si SoC < 20 %	Recharge rapide — Rex s'arrête vite	Très faible — pas de LED ni PAC

PARTIE 3 — Traitement des gaz et hiérarchie CO₂ serre

3.1 Architecture de traitement V8.2 — traitement unique en amont

Étage	Localisation	V2.0/V2.1	V2.2
1 — Désulfuration H ₂ S	Sortie méthaniseur	Obligatoire — H ₂ S < 50 ppm	Obligatoire
2 — Séparation CO ₂ /CH ₄	Sortie méthaniseur	Obligatoire V8.2	Obligatoire V8.2
3 — SCR/DOC fumées Rex	Sortie Rex (intégré GMP)	Intégré GMP — conformité ICPE	Émissions réduites — validation stationnaire
4 — Échangeur refroidissement	Sortie Rex	400°C → 50°C — obligatoire	Obligatoire
5 — Buses distribution CO ₂	Entrée serre	Obligatoire	Obligatoire

3.2 Hiérarchie des sources de CO₂ serre

Lorsque le Rex fonctionne, ses fumées constituent une source de CO₂ biogénique directement associée à la production d'électricité et de chaleur. Après traitement et refroidissement appropriés, ce CO₂ est utilisé prioritairement pour l'enrichissement des serres.

Le CO₂ séparé en amont du méthaniseur constitue une seconde source, indépendante du fonctionnement du Rex. Il permet :

- D'assurer l'enrichissement lorsque le Rex est arrêté (printemps/été, maintenance)
- De compléter le CO₂ des fumées lorsque le besoin des serres est supérieur à la production instantanée du Rex
- D'être valorisé extérieurement lorsque les besoins internes sont satisfaits

La séparation amont transforme ainsi le CO₂ en ressource disponible en continu, tandis que le Rex apporte une seconde source variable associée à la production électrique.

Priorité	Source CO ₂	Disponibilité	Qualité	Débit disponible
1 — Prioritaire	Fumées Rex (CH ₄ pur brûlé)	Quand Rex actif (~4 400 h/an)	CO ₂ + H ₂ O — SCR/DOC GMP conforme ICPE — validation serre Phase 0	~22 kg/h — 12 kg/h absorbés (800 m ²)
2 — Appoint	CO ₂ séparation (biogénique pur)	Continue 24h/24 (méthaniseur continu)	Pur, biogénique, sans NOx/HC	Selon besoin — Rex à l'arrêt ou pointe surface

3.3 Bilan CO₂ annuel V8.2

Flux CO ₂	Calcul	Valeur	Note
SOURCES CO₂ DISPONIBLES			
CO ₂ fumées Rex (CH ₄ pur — 4 400 h actif)	22 kg/h × 4 400 h / 1 000	~97 t/an	Prioritaire — combustion CH ₄ seul
CO ₂ séparation (continu 24h/24)	36 400 Nm ³ × 1,96 kg/Nm ³	~71 t/an	Appoint Rex actif + seule source Rex arrêté
USAGE SERRE — HIÉRARCHIE REX PUIS SÉPARATION			
Rex actif (~4 400 h) : Rex couvre serre (800 m ²)	12 kg/h × 4 400 h / 1 000	~53 t/an absorbés	Rex couvre seul — séparation non utilisée serre → excédent
Rex arrêté (~2 200 h printemps/été) : séparation seule	8,2 kg/h × 2 200 h / 1 000	~18 t/an absorbés	Enrichissement partiel : ~544 m ² (68 %) — déficit 3,8 kg/h accepté
Intermédiaire Rex actif partiel (~2 200 h)	Variable	~18 t/an estimés	Rex et séparation alternent selon SoC
CO ₂ TOTAL absorbé serres	53 + 18 + 18	~89 t/an	Vs 52 t/an V8.3 (calcul simplifié) — enrichissement partiel intégré
CO₂ EXCÉDENTAIRE COMMERCIALISABLE (scénario)			
Rex actif : excédent Rex + séparation non utilisée	(22-12) + 8,2 = 18,2 kg/h × ~3 300 h	~60 t/an (scénario)	Hiver + intermédiaire — Rex actif — à mesurer démonstrateur

CO₂ biogénique ≠ séquestration :

Le CO₂ fourni à la serre est biogénique (cycle court du carbone). Il évite une émission fossile équivalente — bénéfice réel comptabilisé dans l'ICB. Ce n'est pas une séquestration au sens Puro.earth/EBC (stockage durable siècle+). Cette distinction doit être maintenue dans tous les documents institutionnels, notamment vis-à-vis des ministères et de la Cour des Comptes.

3.4 Priorités de valorisation CH₄ et CO₂ — Hub viable sans vente extérieure

CH₄ — double priorité

Priorité 1 : CH₄ → Rex → électricité + chaleur + CO₂ → Hub

Priorité 2 : CH₄ excédentaire → valorisation réseau GRDF

Le Rex n'absorbe pas artificiellement toute la production de CH₄. Son fonctionnement est déterminé par les besoins énergétiques du Hub et par l'état de charge de la batterie. Lorsque la production de CH₄ dépasse les besoins cumulés du Rex et les capacités de stockage disponibles, l'excédent peut être valorisé sous forme de biométhane, sous réserve des conditions techniques et contractuelles d'injection réseau.

CO₂ — double priorité

Priorité 1 : CO₂ → serres (enrichissement photosynthèse)

Priorité 2 : CO₂ excédentaire → valorisation commerciale

La commercialisation n'est pas une hypothèse nécessaire au fonctionnement du Hub. Elle constitue une possibilité supplémentaire de valorisation des flux lorsque les besoins internes sont satisfaits. Le Hub reste viable conceptuellement sans dépendre de la vente de chaque sous-produit.

Injection GRDF discontinue saisonnière — point Gemini :
Le surplus CH₄ potentiel (~11 700 Nm³/an dans le scénario de dimensionnement retenu) est principalement disponible au printemps et en été. L'injection réseau GRDF pour les micro-gisements en injection discontinue est soumise à des conditions techniques et contractuelles spécifiques. Le gazomètre doit être dimensionné pour lisser ce poste d'injection. Vérification du seuil minimal GRDF à ce volume requise en Phase 0.

3.5 Alimentation électrique de sécurité

La batterie Hub (40-45 kWh) assure la continuité électrique lors d'un arrêt Rex planifié. Pour les arrêts d'urgence, une alimentation indépendante (UPS 5-10 kVA, autonomie 2-4 h) couvre exclusivement les fonctions critiques : automatismes, détection CH₄/H₂S/CO, ventilation ATEX, éclairage sécurité, brassage digesteur. Cette alimentation ne constitue pas une source énergétique du procédé.

PARTIE 4 — Serres modulaires en rotation

4.1 Besoins unitaires par phase / 100 m²

Phase	T°C	LED/100m ²	Élec/100m ²	Chaleur/100m ²	CO ₂ enrichi
Production tomate intensive	16°C	6,5 kWe (hiver nuit)	7,0 kWe	Pointe 10 kWth / moy. 3 kWth	1,5 kg/h
Production laitue	10°C	3,7 kWe (hiver nuit)	4,2 kWe	Pointe 6 kWth / moy. 1,5 kWth	1,5 kg/h
Croissance active	14°C	1,5 kWe	2,0 kWe	2 kWth	Partiel
Germination / semis	18°C	0,8 kWe	1,3 kWe	2,5 kWth	Non
Préparation / repos hiver	8°C	0	0,3 kWe	0,5 kWth	Non
Repos hors hiver	Ambiante	0	0	0	Non

4.2 Trois règles de pilotage V8.2

Règles immuables — le système est contraint par ses ressources, pas par ses ambitions

Règle 1 — BATTERIE : SoC batterie ≥ 20 % en permanence

- Rex démarre automatiquement si SoC < 20 % — s'arrête si SoC > 80-90 %
- La batterie absorbe les variations rapides de charge (LED, PAC, systèmes) — à vérifier par simulation dynamique Phase 0

Règle 2 — CHALEUR : besoins thermiques serres ≤ chaleur Rex + (élec PAC × COP 3,5)

- Marge thermique très confortable — 604 MWhth potentiel pour ~40 MWhth utiles

Règle 3 — CO₂ : 2 sources complémentaires — continuité assurée

- Source 1 (fumées Rex) : ~2 000 m² max quand Rex actif — 800 m² actifs réellement enrichis

→ Source 2 (CO₂ séparation) : disponible en continu — couvre serre même Rex à l'arrêt

4.3 Bilan thermique saisonnier (5 serres 400 m², scénario laitue)

Saison	Durée	LED	Élec→PAC	Chaleur Rex	Chaleur PAC	Total dispo	Besoin serre
Hiver nuit (T<0°C)	300 h	26 kWe (50 %)	8 kWe	40 kWth	28 kWth	68 kWth	12 kWth
Hiver nuit (T>0°C)	300 h	31 kWe (laitue)	3 kWe	40 kWth	10,5 kWth	50,5 kWth	12 kWth
Hiver jour	1 200 h	0	34 kWe	40 kWth	119 kWth	159 kWth	12 kWth
Printemps/automne	3 500 h	0 ou réduit	~8 kWe (Rex actif)*	40 kWth*	28 kWth*	68 kWth*	3 kWth
Été	2 200 h	0	0 (aérotherme)	0	0	0	0

* Printemps/automne : Rex actif par intermittence selon SoC batterie — pas de besoin chauffage donc sans impact sur le bilan thermique utile.

PARTIE 5 — CO₂ biogénique, digestat et valorisation

5.1 Hiérarchie de valorisation du CO₂ excédentaire

Niveau	Valorisation	Autonomie	Maturité	Valeur indicative
Niveau 1 — Hub autonome	CO ₂ vers propres serres (52 t/an)	100 % autonome	Opérationnel	— (interne)
Niveau 2 — Territoire immédiat	CO ₂ vers serres voisines sous contrat (jusqu'à 116 t/an)	Indépendant	À structurer	150-200 €/t CO ₂ liquide évité
Niveau 3 — Territoire élargi	Liquéfaction + hub régional CO ₂ Résilience	Indépendant	À développer	120-180 €/t livrée
Niveau 4 — Apport ext.	Power-to-Gas (CO ₂ + H ₂ renouvelable → CH ₄)	Nécessite H ₂ ext.	2027-2028	Selon prix H ₂
Niveau 5 — Séquestration	Minéralisation / matériaux biogéniques	Indépendant	2028-2030	En développement
Si aucune voie disponible	Rejet atmosphère (fraction C ₅ ICB)	Sans objet	Dernier recours	0 — perte ICB

5.2 Digestat — fraction C₃ ICB et ISE

- Production digestat : ~1 600-1 800 t/an
- ISE estimé : 350-450 t équivalents engrais/an — à mesurer sur démonstrateur
- Valeur ISE : ~42 000-54 000 €/an en engrais minéraux importés substitués — contractualisable
- Utilisation serre : fraction liquide diluée comme fertilisant — réduit l'achat d'engrais serre

5.3 ICB Hub selon niveau de valorisation CO₂

Scénario valorisation	ICB estimé	Statut
0 % valorisé — tout rejet atmosphère (C _s)	~0,70-0,75	Base minimale
50 % valorisé	~0,82-0,87	Scénario réaliste
100 % valorisé (niveaux 1+2+3)	~0,92-0,96	Scénario optimal
Objectif cahier des charges V2.3	ICB ≥ 0,85 à 5 ans	Référence institutionnelle

ICB — hypothèse de travail, pas résultat :

L'ICB ne peut pas être calculé rigoureusement sans bilan massique carbone complet sur 12 mois de démonstrateur. Ces valeurs sont des estimations de travail.

PARTIE 6 — Organisation humaine, contrôle et sécurité

Un agriculteur isolé ne peut pas exploiter seul une installation à risques continus. Le groupement de 3 exploitations finance un Responsable Exploitation (RE) dédié. Le module serres porte le poste RE de 8-12 h à 33-48 h/semaine — 1 ETP plein justifié et attractif.

6.1 Tâches hebdomadaires RE

Domaine	Tâches principales	Charge hebdo	Dont sécurité
1 — Méthanisation	Contrôle digesteur + gazomètre, relevé débits ICB, H ₂ S amont, pH T°C, gestion apports, digestat	5-7 h	2-3 h
2 — Séparation CO ₂ /CH ₄	Contrôle membrane/PSA, qualité CH ₄ (>97 %), pression, débit CO ₂	1-2 h	0,5 h
3 — GMP V2.0/V2.1	GMP + SCR + AdBlue + capteurs CO+NO _x serre + test ATEX + SoC batterie	3-4 h	1-2 h
3 — GMP V2.2	Idem sans SCR + AdBlue (gain ~1 h/sem.)	2-3 h	1-1,5 h
4 — PAC + UPS	COP + pression + T°C nappe + test UPS mensuel + SoC batterie hub	0,5-1 h	0,2 h
5 — Serres modulaires	T°C HR CO ₂ serre, rotation cultures, irrigation digestat, récolte, conditionnement	20-30 h	1 h
6 — Sécurité + admin	Registre PED, capteurs, exercice SDIS annuel, plateforme ICB/ISE	3-4 h	1 h
TOTAL avec serres V2.0/V2.1		33-48 h/sem.	5-7 h — 1 ETP plein
TOTAL avec serres V2.2		32-47 h/sem.	4-6 h
TOTAL sans serres		9-14 h/sem.	3-5 h — risque sous-emploi

6.2 Tableau de bord RE — seuils d'action V8.2

Grandeur	Seuil alarme	Action RE
SoC batterie Hub	< 20 %	Vérifier démarrage Rex — si défaillant : réduire charges serres
SoC batterie Hub	> 90 %	Rex s'arrête automatiquement — normal printemps/été
Qualité CH ₄ sortie séparation	< 95 %	Vérifier membrane/PSA — réduire injection Rex
Gazomètre CH ₄	> 80 % capacité	Activer injection réseau GRDF ou réduire apport digesteur
CO ₂ serre (NDIR x5)	> 1 200 ppm	Fermer vanne injection serre concernée
CO ₂ serre	> 3 000 ppm	Coupure auto + évacuation + ventilation
CO travailleurs	> 25 ppm (VLCT)	Arrêter injection + évacuer + ventiler
NO _x entrée serre	> 40 ppm	Coupure injection + arrêt Rex + alerte SDIS
H ₂ S amont séparation	> 80 ppm	Remplacer charbon actif avant saturation
H ₂ S amont séparation	> 100 ppm	Arrêt Rex + sécurisation
CH ₄ zone technique	> 10 % LIE	Arrêt Rex immédiat + ventilation + alerte SDIS
UPS / batterie secours	< 80 % charge	Vérifier alimentation + prévoir maintenance
AdBlue (V2.0/V2.1)	< 20 %	Ravitaillement sous 48 h

6.3 Exercice SDIS annuel — 4 scénarios > 150 Nm³/h

- Scénario biogaz : déchirure membrane, surpression digesteur, panne torchère
- Scénario procédé : panne GMP générale (Rex + batterie + PAC + LED), test bascule UPS
- Scénario environnement : débordement digestat, fuite vers milieu naturel
- Scénario CO₂ serre : défaillance chaîne traitement gaz, CO ou NO_x > seuil en serre occupée

PARTIE 7 — Bilan économique — 4 catégories

V8.2 conserve les 4 catégories de V8.0. La catégorie D est révisée avec les chiffres CH₄ corrigés (PCI 10 kWh/Nm³).

7.1 Investissement — V7.0 / V8.2

Poste	V7.0	V8.2	Delta
Digesteur 400 m ³ + séparateur + équipements	180 000-240 000 €	180 000-240 000 €	0
GMP Rex + batterie + onduleur	55 000-75 000 €	15 000-25 000 €	-40 000 à -50 000 €
Unité séparation CO ₂ /CH ₄ (membrane/PSA)	0	30 000-60 000 €	+30 000 à +60 000 €
Chaîne traitement fumées	18 000-32 000 €	5 000-12 000 € (GMP intègre SCR/DOC)	-13 000 à -20 000 €

Poste	V7.0	V8.2	Delta
Ballon tampon + réseau eau chaude serre	20 000-30 000 €	20 000-30 000 €	0
PAC sur nappe (20-25 kWe)	25 000-45 000 €	25 000-45 000 €	0
Aérotherme by-pass été	3 000-8 000 €	3 000-8 000 €	0
UPS / batterie sécurité (5-10 kVA)	3 000-8 000 €	3 000-8 000 €	0
5 serres triple paroi polycarbonate 400 m²	250 000-350 000 €	250 000-350 000 €	0
LED horticoles 5 serres	50 000-90 000 €	50 000-90 000 €	0
Capteurs + automate SCADA + plateforme ICB/ISE	20 000-35 000 €	22 000-38 000 €	+2 000-3 000 €
Raccordement électrique	5 000-10 000 €	5 000-10 000 €	0
Études, permis, installation, imprévus (15 %)	94 000-140 000 €	88 000-138 000 €	~ -6 000 €
TOTAL Hub hors serres	~398 000 € central	~370 000 € central	~ -28 000 €
TOTAL Hub avec serres + LED	~768 000 € central	~740 000 € central	~ -28 000 €
Par exploitant (÷3)	~256 000 € central	~247 000 € central	~ -9 000 €

7.2 Revenus et économies — 4 catégories V8.2

Catégorie	Flux	Quantité/an	Valeur unit.	Montant/an
A — CONTRACTUALISABLE				
A1	Digestat — ISE engrais substitués	~400 t équiv./an	120 €/t	48 000 €
A2	CO ₂ vers serres voisines (si contrat signé)	Jusqu'à 116 t/an	150 €/t	Jusqu'à 17 400 €
SOUS-TOTAL A				48 000-65 400 €/an
B — ÉCONOMIES MESURABLES				
B1	Électricité autoconsommée (systèmes + LED + PAC)	~176 MWhe/an (Rex 4 400 h)	0,20 €/kWh évité	35 200 €
B2	Chaleur substituée serre (40 MWhth/an)	40 MWhth	0,08 €/kWh	3 200 €
B3	CO ₂ substitué serre (52 t/an CO ₂ liquide évité)	52 t/an	200 €/t	10 400 €
SOUS-TOTAL B				48 800 €/an
C — VALORISATIONS POTENTIELLES				
C1	CO ₂ excédentaire (liquéfaction, minéralisation)	Variable	120-180 €/t	À évaluer

Catégorie	Flux	Quantité/an	Valeur unit.	Montant/an
C2	Power-to-Gas (CO ₂ + H ₂ → CH ₄)	Variable	Selon prix H ₂	À évaluer
SOUS-TOTAL C				À évaluer
D — FLUX COMMERCIAUX NOUVEAUX V8.2				
D1	CH ₄ réseau GRDF — scénario ~11 700 Nm ³ /an printemps/été (à mesurer démonstrateur)	~117 MWh potentiels	0,07 €/kWh	~8 200 € (scénario)
D2	CO ₂ excédentaire commercialisable — scénario ~60 t/an (hiver + intermédiaire, Rex actif) — à mesurer démonstrateur	~60 t/an potentiels	150-200 €/t	~9 000-12 000 € (scénario)
SOUS-TOTAL D				~17 200-20 200 €/an (D1+D2 scénarios)
TOTAL A + B + D — base V8.3 (D1+D2 scénarios)				~114 000-133 600 €/an
TOTAL A + B + C + D (scénario optimal)				À compléter phase FEED

7.3 Comparaison économique V7.0 / V8.2

Indicateur	V7.0	V8.2	Delta
CAPEX Hub avec serres (central)	~768 000 €	~740 000 €	-28 000 € (-4 %)
Base revenus/économies A+B	107 200-126 200 €/an	96 800-114 200 €/an	-10 400 €/an
Flux commerciaux nouveaux D	0	~11 200-12 200 €/an	+11 200-12 200 €/an
TOTAL A+B+D	107 200-126 200 €/an	~114 000-133 600 €/an	~stable (-1 %)
Retour Hub complet (brut avant OPEX)	7,2 ans	~6,9 ans	-0,3 ans
Contrainte électrique instantanée	Oui — Rex pilote tout	Non — batterie + simulation Phase 0	Avantage opérationnel
Qualité CO ₂ serre	Fumées biogaz traitées	CO ₂ pur séparation + fumées Rex CH ₄	Avantage qualité
Flexibilité commerciale	Aucune	CH ₄ réseau + CO ₂ commercialisé	Nouveau levier

Temps de retour — avant OPEX uniquement :

Ces temps de retour sont bruts, avant déduction de l'OPEX. L'OPEX annuel (maintenance, personnel RE ~35-50 k€/an, assurance) représente 44 000-66 000 €/an (avec RE), soit 35-60 % des revenus A+B+D. Le TRI réel doit être calculé sur modèle cash-flow complet en phase FEED.

7.4 Production maraîchère — levier principal non chiffré

La production maraîchère des 5 serres constitue le principal potentiel de création de valeur du Hub. Son chiffre d'affaires et sa marge doivent être établis par une étude agronomique et commerciale spécifique. Ce document ne chiffre pas la production maraîchère. Le modèle énergétique démontre sa valeur intrinsèque sans en avoir besoin.

7.5 Éligibilité BPI — critères à vérifier Phase 0

Statut :

Les 6 conditions ci-dessous sont des critères d'éligibilité à vérifier et documenter en Phase 0. Elles ne constituent pas une affirmation de bonification acquise. La bonification BPI +0,5 pt sera confirmée par l'instruction du dossier.

Condition	Statut à vérifier Phase 0	Conséquence si confirmé
1. Groupement ≥ 3 exploitants	Fondement du Hub — à contractualiser ✓	Éligibilité BPI
2. RE dédié qualifié CS RUMA	Poste à créer et former — à documenter Phase 0	Éligibilité BPI
3. Astreinte ≤ 10 min documentée	RE sur site ou proximité — à justifier dans dossier	Éligibilité BPI
4. Étude CO ₂ depuis la conception	Objet des Parties 2, 3 et 5 — documenté ✓	Éligibilité BPI
5. Trajectoire valorisation CO ₂	Serre + excédent + commercial D1/D2 — documenté ✓	Éligibilité BPI
6. Mutualisation à l'échelle Hub	Digesteur + GMP + PAC + serres + séparation — à confirmer	Éligibilité BPI
BONIFICATION BPI (si 6/6 confirmés)	À vérifier instruction dossier — +0,5 pt sur taux	cf. ch. 7.3 cahier V2.3

Rôle du démonstrateur

Le démonstrateur n'a pas pour objet de vérifier si le principe général est physiquement possible : les différentes briques technologiques existent indépendamment.

Il a pour objectif de déterminer expérimentalement les performances de leur intégration dans une architecture territoriale unique :

- Production réelle et saisonnalité du biogaz (gisement, qualité biomasse)
- Performances de la séparation CH₄/CO₂ à ce débit et cette qualité de biogaz
- Rendement réel du GMP ÉREV au CH₄ pur en conditions stationnaires
- Comportement du couple Rex-batterie (simulation dynamique à valider expérimentalement)
- Récupération thermique réelle selon profil de charge Hub
- Qualité et disponibilité du CO₂ issu des fumées Rex en conditions réelles
- Complémentarité opérationnelle CO₂ Rex + CO₂ séparation en serre
- Besoins réels des serres (T°C, CO₂, LED, chaleur) selon cultures et saisons
- Valorisation agronomique du digestat (ISE réel, qualité, acceptabilité)

- Débouchés réels des excédents CH₄ (conditions GRDF) et CO₂

Le démonstrateur transforme ainsi les hypothèses de dimensionnement en données expérimentales utilisables pour le déploiement industriel.

Synthèse — Le Hub territorial Résilience V8.2

Ce que le bilan de conservation V8.2 démontre — bilan fermé

- ENTRÉE CH₄ : 546 MWh/an (54 600 Nm³) — après séparation biogaz brut
- CH₄ REX : 429 MWh (42 900 Nm³ × 10 kWh/Nm³) → 176 MWhe + 176 MWhth + 77 MWh pertes = 429 ✓
- CH₄ RÉSEAU : 117 MWh (11 700 Nm³) — surplus printemps/été → GRDF → ~8 200 €/an
- CO₂ : Rex ~97 t/an + séparation ~71 t/an — ~53 t serre Rex actif + ~18 t serre Rex arrêté — ~60 t/an excédent commercialisable (scénario)
- BATTERIE : tampon 40-45 kWh — Rex régime fixe, simulation dynamique requise Phase 0
- TOTAL A+B+D avant OPEX : ~108 000-125 600 €/an — CAPEX ~740 000 € — retour brut ~6,9 ans

Dimension	Valeur de référence V8.2
Philosophie	Ressources territoire → CH ₄ + CO ₂ → Rex cogénération → excédents valorisés → agriculture adaptée
Architecture	Hub 3 exploitations · digesteur 400 m ³ · séparation CH ₄ /CO ₂ · GMP ÉREV 40-45 kW · batterie 40-45 kWh · PAC · 5 serres × 400 m ²
GMP ÉREV	Réemploi ensemble automobile série — 15 000-25 000 € vs 55 000-75 000 € module sur mesure V7.0
Pilotage Rex	Esclave batterie — SoC < 20 % → démarre, SoC > 80-90 % → s'arrête — régime fixe optimal
Rex cogénérateur	176 MWhe + 176 MWhth + 97 t CO ₂ /an — rendement global > rendement électrique seul (41 %)
Rex actif	~4 400 h/an — hiver dominant, quasi à l'arrêt été
PCI CH ₄ pur	10 kWh/Nm ³ (constante physique) — correction V8.2 vs 6,1 kWh/Nm ³ biogaz brut V8.0
CH ₄ surplus réseau	Scénario ~11 700 Nm ³ /an (~117 MWh) → GRDF printemps/été → ~8 200 €/an (scénario — à déterminer démonstrateur)
Séparation amont	Étape structurante — CO ₂ pur 24h/24 + CH ₄ >97 % — pas simple purification
CO ₂ serre — source 1	Fumées Rex CH ₄ pur — ~22 kg/h — prioritaire quand Rex actif — validation serre Phase 0
CO ₂ serre — source 2	CO ₂ séparation pur — appoint continu — couvre Rex à l'arrêt
CO ₂ commercial	Scénario ~60 t/an excédent (Rex actif hiver+inter.) → ~9 000-12 000 €/an — valeur à mesurer démonstrateur — Hub viable sans cette vente
CO ₂ biogénique ≠ séquestration	Cycle court — substitution fossile — pas puits carbone Puro.earth/EBC
Surface CO ₂	2 000 m ² physiques / 800 m ² simultanément actifs (enrichissement)

Dimension	Valeur de référence V8.2
Batterie Hub	40-45 kWh — tampon énergétique — simulation dynamique requise Phase 0
ICB Hub	0,70 (rejet) → 0,96 (100 % valorisé) — bilan massique démonstrateur requis
Digestat ISE	~400 t équiv./an — ~48 000 €/an — contractualisable
RE — poste	33-48 h/semaine avec serres — 1 ETP plein justifié et attractif
CAPEX Hub avec serres	~740 000 € central — ~247 000 €/exploitant
Revenus A+B+D avant OPEX	~108 000-125 600 €/an (sans production maraîchère)
Retour brut avant OPEX	~6,9 ans Hub complet — TRI réel phase FEED
Production maraîchère	Levier principal — étude agronomique et commerciale spécifique
Éligibilité BPI 6.2bis	6 critères — à vérifier Phase 0 — bonification +0,5 pt si confirmés
Injection GRDF	Conditions discontinues saisonnières — gazomètre à dimensionner — seuil minimal à vérifier
Démonstrateur	Valide l'intégration, pas le principe — 11 paramètres à mesurer expérimentalement

Programme Résilience V11 — Hub territorial — Module serres — V8.2 — Août 2026
GMP ÉREV réemployé · Batterie Hub · Séparation CO₂/CH₄ · Bilan CH₄ pur corrigé · CH₄ réseau · CO₂ commercial · Source ÉREV : Annexe V11 V3