

Etude technique, économique et sociale pour la valorisation du CO₂ issu de méthanisation pour la culture sous serres et cultures d'algues

Rendu final
Avril 2021



1. Calibrage des unités de méthanisations
2. Consultations des entreprises
3. Business plan avec valorisation du CO₂
4. Bilan GES
5. Analyse multicritères & propositions d'actions
6. Conclusions

Phase 1 : Calibrage des unités de méthanisation

Ration des méthaniseurs

Matière	Scénario 1	Scénario 2 GRDF	Scénario 2 S3D	Scénario 3
	STEP – 35/40 Nm ³ /h	Grosse exploitation individuelle – 75 Nm ³ /h		Petit collectif – 150 Nm ³ /h
Boues STEP	1 100 t _{MS} – équivalent 70 000 EH			
Lisier porcin		10 000	6 000	10 000
Lisier bovin		10 000	6 000	10 000
Fumier bovin		9 000	3 000	9 000
CIVE			2 000	5 000
Menues pailles			100	250
Issues silos			200	500
Total		29 000	19 300	34 750

Fraction d'effluent d'élevage > 60 % pour les scénarios agricoles

Pré-existence d'un décanteur primaire pour le scénario STEP, des boues mixtes ont été considérées

Hypothèses de dimensionnement technique

	Scénario STEP	Scénario Agricole individuelle	Scénario Petit collectif
Durée de stockage digestat liquide	NC	6 mois	
Durée de stockage digestat solide	4 mois		
% MS cible DB brut	7 %	10,5/11 %	
Temps de séjour	30 jours	80 jours	
Autoconsommation biogaz	6 à 8%		
Durée stockage ensilage	NC	1 an	

CAPEX

Hypothèses :

- ▶ Bâtiment de stockage :
 - Réutilisation des bâtiments existants pour le scénario « Agricole individuelle »
 - Construction d'un nouveau bâtiment pour le scénario « Petit collectif »
 - Construction d'un bâtiment pour l'épaississement des boues et leur stockage pour le scénario STEP
- ▶ Distance de raccordement :
 - STEP : 500 m → 30 k€
 - Agricole individuelle : 5 km → 300 k€
 - Petit Collectif : 10 km → 600 k€

	STEP	Agricole individuelle	Petit collectif
Aménagement du site	345 k€	639 k€	1 240 k€
Gestion et traitement des Substrats	201 k€	272 k€	630 k€
Méthanisation	711 k€	1 127 k€	1 906 k€
Gestion et traitement du Digestat	209 k€	721 k€	1 191 k€
Gestion et valorisation du Biogaz	570 k€	904 k€	1 129 k€
Ingénierie & chantier	375 k€	819 k€	1 365 k€
TOTAL	2 410 k€	4 481 k€	7 461 k€
Investissement / puissance (€/Nm ³ /h)	65 472	60 963	49 858

Phase 1 : Calibrage des unités de méthanisation

OPEX

Hypothèse :

	Scénario STEP	Scénario Agricole individuelle	Scénario Petit collectif
Prix achat : - CIVE - Menue paille - Issus de silo	NC	30 €/t _{MB} 40 €/t _{MB} 50 €/t _{MB}	
Coût épandage + transport	Digestat solide : 4 €/t _{MB} Digestat liquide : 3,2 €/t _{MB} (hors STEP)		
Maintenance méthanisation	32 k€/an 5% CAPEX	54 k€/an 4,6% CAPEX	79 k€/an 4% CAPEX
Maintenance épurateur	30 k€/an	45 k€/an	60 k€/an
Coût électricité	80 €/MWh HTVA		
ETP méthanisation	¾ à 42 €/h	¾ à 30 €/h	1 à 30 €/h
Analyse biométhane	4 en année 1, 2 en année 2 → 1400 €/an sur 15 ans		

Résultats :

	STEP	Agricole individuelle	Petit collectif
Transport des Substrats	2 k€	25 k€	72 k€
Production et achats de substrats	-	74 k€	185 k€
Transport & Epandage du digestat	4 k€	67 k€	114 k€
Maintenance & Suivi Biologique	66 k€	105 k€	147 k€
Electricité	20 k€	63 k€	120 k€
Main d'œuvre	51 k€	24 k€	49 k€
Autres frais	100 k€	89 k€	113 k€
Impôts et taxes	0 k€	0 k€	2 k€
TOTAL	243 k€	448 k€	802 k€

Phase 1 : Calibrage des unités de méthanisation

Produits

PRODUITS	
Item	Unité
Vente biométhane ancien tarif	
	t MB
Vente de biométhane TP + sub ADEME	
Vente biométhane base	MWh
Vente biométhane prime EFF	MWh
Vente biométhane prime STEP	MWh
Vente de biométhane TP sans sub ADEME	
Vente biométhane base	MWh
Vente biométhane prime EFF	MWh
Vente biométhane prime STEP	MWh
Economie d'épandage	
	tMS/an

STEP		
Qtté	Prix unitaire € HT/unité	Produits € HT
		518 729 €
3 490	148,62	518 729 €
		478 939 €
3 490	117,22	409 133 €
3 490	20	69 806 €
		496 045 €
3 490	122,1	426 238 €
0	0	- €
3 490	20	69 806 €
		10 989 €
333	33,0 €	10 989 €

Agricole individuelle		
Qtté	Prix unitaire € HT/unité	Produits € HT
		929 251 €
6 969	133,34	929 251 €
		839 838 €
6 969	110,51	770 148 €
6 969	10	69 690 €
6 969	115,4	804 302 €
6 969	10	69 690 €
0	0	- €
		- €
		- €

Petit collectif		
Qtté	Prix unitaire € HT/unité	Produits € HT
		1 648 244 €
14 188	116,17	1 648 244 €
		1 475 006 €
14 188	93,96	1 333 124 €
14 188	10	141 882 €
14 188	98,9	1 402 657 €
14 188	10	141 882 €
0	0	- €
		- €
		- €

Hypothèses sur les tarifs d'achat :

- ▶ Ancien tarif
 - scénario 1 : 100 % P3
 - Scénario 2 et 3 : 100 % P2
- ▶ Tarif provisoire
 - Contractualisation dernier trimestre 2021
 - Test de sensibilité sur le paramètre subvention ADEME

Plan de financement

Financement	STEP	Agricole individuelle	Petit collectif
Investissement total	2 410 253	4 481 063	7 461 177
BFR	376 175	111 000	277 500
DSRA	90 000	160 000	265 000
Montant à financer (Invest+BFR+DSRA)	2 876 428	4 752 063	8 003 677
Taux de subvention	15%	15%	10%
Montant subventionné	361 538	672 159	746 118
Apport	241 025	448 106	746 118
Emprunt bancaire	2 273 865	3 631 797	6 511 442

Hypothèses plan de financement :

- ▶ Emprunt : Durée de 13 ans à un taux de 2,0%
- ▶ Fonds propres : 10% du montant des investissements
- ▶ BFR : 25% du CA pour le Sc. STEP et 1,5 ans de production et d'achat substrat pour Sc. 2 & 3
- ▶ DSRA : 6 mensualités d'emprunt (recapitalisé la 14^{ème} année)

Rentabilité

- ▶ La baisse du tarif d'achat à un impact de l'ordre de :
 - 2 points de TRI pour le scénario STEP en considérant une aide ADEME, 1 point le cas échéant
 - 3 à 3,5 points de TRI pour les scénarios agricoles en considérant une aide ADEME contre 2 points en considérant, à taux de subventions identiques, qu'elles ne viennent pas de l'ADEME

		STEP	Agricole individuelle	Petit collectif
Ancien tarif d'achat	Temps de retour brut (en année) : sans intérêts d'emprunt	7,8	8,5	8,6
	TRI avant impôts (en %)	9,3%	8,1%	7,9%
Tarif provisoire avec subvention ADEME	Temps de retour brut (en année) : sans intérêts d'emprunt	8,9	10,2	10,5
	TRI avant impôts (en %)	7,0%	5,0%	4,5%
Tarif provisoire sans subvention ADEME	Temps de retour brut (en année) : sans intérêts d'emprunt	8,4	9,3	9,4
	TRI avant impôts (en %)	8,0%	6,3%	5,9%

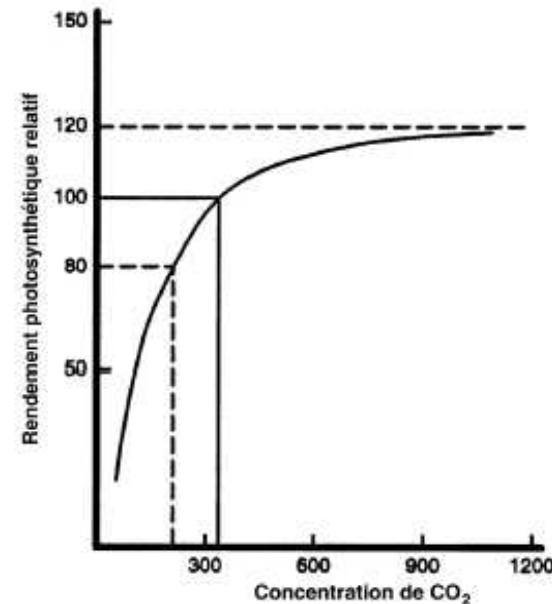
- ▶ Dans la suite de la présentation, la comparaison se fera sur la base du tarif provisoire sans subvention ADEME

Phase 2 : Consultation des entreprises

Valorisation du CO₂ dans les serres – Retour serristes – Généralités

Consommation de CO₂ par les plantes :

- ▶ Accroissement du rendement photosynthétique par l'augmentation de la concentration du CO₂ (400 ppm → 1 000 ppm en moyenne) dans les serres. Conséquences :
 - Rendement supérieur (jusqu'à 50% en plus)
 - Raccourcissement du temps de croissance de 5 à 10%
 - Accroissement du nombre de fleurs/fruits par plant
- ▶ Très variables suivant la nature des plantes, de l'ensoleillement moyen, de la température et des pratiques des serristes (ventilation forcée, etc..) :
 - Consommation annuelle moyenne : 100 à 300 t/ha/an
 - Consommation horaire (hors nuit) : 50 à 150 kg/ha/h



Production sous serre aujourd'hui :

- ▶ 80% de tomates
- ▶ Mais également un intérêt croissant vers le concombre, poivron, aubergine, asperge, kiwi, vanille, herbes aromatiques, fleurs, etc...

Valorisation du CO₂ dans les serres – Retour serristes – Généralités

Type de serre :

- ▶ Double parois gonflable → durée de vie de 5 ans / rentable à partir de 2 000 m²
- ▶ Verre → durée de vie de 20 ans / rentable à partir de 20 000 m² (2 ha)

Distribution/pilotage du CO₂ :

- ▶ Flexible PVC perforé placé dans la partie inférieure du couvert végétal ou sous les banquettes
- ▶ Détecteurs reliés à un ordinateur central
- ▶ Régulateur de gaz carbonique (analyseur à infrarouge)

Valorisation du CO₂ dans les serres – Retour serristes – Généralités

Le CO₂ injecté dans les serres provient :

- ▶ Des fumées de cogénération gaz de novembre à mars → Abrogation du tarif C16 depuis le 21/02/2021
- ▶ Des fumées des chaudières le reste de l'année
- ▶ D'industriels type Air Liquide, Messer, Linde sous forme liquéfiée en qualité alimentaire (spec. EIGA) → Source d'appoint :
 - Vendu autour de 100 €/t
 - Location de cuve : entre 800 et 1 500 €/cuve/mois
 - Avantages : Plus facilement pilotable, Ne contient pas d'impureté, N'incorpore pas d'humidité.
 - Approches faites par des méthaniseurs : 60 €/t sortie méthaniseur (liquéfié) + 0,40 €/t/km

Spécificités à respecter :

- ▶ Ne doit pas contenir en particulier NOx, éthylène, CO et respecter les valeurs de VLEP suivantes :
- ▶ Filtres sur les fumées nécessaires

Composé		VLEP (sur 8h) en ppm
Monoxyde de carbone	CO	20
Dioxyde de carbone	CO ₂	5000
Hydrogène sulfuré	H ₂ S	5
Monoxyde d'azote	NO	2
Dioxyde d'azote	NO ₂	0,5
Dioxyde de soufre	SO ₂	0,5

La volatilité du marché CO₂ n'impacte pas les charges des serristes car si prix trop cher car offre pas assez élevée, les serristes ne sont pas prioritaires sur les livraisons. Il y a une baisse de la consommation plutôt qu'un achat à prix plus élevé

Valorisation du CO₂ dans les serres – Retour serristes – Généralités

Quels critères sur la quantité max de d'éthylène et NO_x ?

- VLEP et valeurs critiques pour les plantes de certains composés potentiellement présents dans les effluents gazeux à injecter dans les serres :

Composé		VLEP (sur 8h) ^[1]		Valeurs critiques pour les plantes	
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Monoxyde de carbone	CO	20	23	100 à 500 ^[2] 30 à 50 ^[3]	114 à 573 ^[3]
Dioxyde de carbone	CO ₂	5000	9000	2000 à 30000 ^[2]	3600 à 54000 ^[2]
Monoxyde d'azote	NO	2	2,5	0,1 à 0,5 ^[2]	-
Dioxyde d'azote	NO ₂	0,5	0,96	0,8 à 1 ^[3] 5 ^[4]	-
Dioxyde de soufre	SO ₂	0,5	1,3	0,1 à 0,5 ^[2,3]	0,26 à 1,31 ^[2,3]
Hydrogène sulfuré	H ₂ S	5	7	-	-
Ethylène	C ₂ H ₄	-	-	0,01 à 0,5 ^[2,3]	0,01 à 0,57 ^[2,3]
Poussières		-	10 (5 alvéolaire)	-	-

^[1] source : Articles R4412-149 et R4412-150 du code du travail

^[2] source : Wacquant C. « Maîtrise de la conduite climatique tomate sous serre et abris en sol » CTIFL (1995)

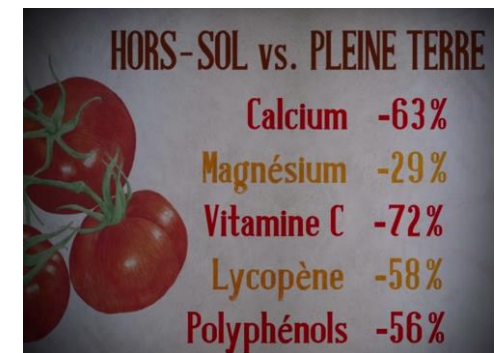
^[3] source : Roy et al. « Biomass combustion for greenhouse carbon dioxide enrichment » (2014)



Valorisation du CO₂ dans les serres – Retour serristes – Généralités

Le goût est-il différent ?

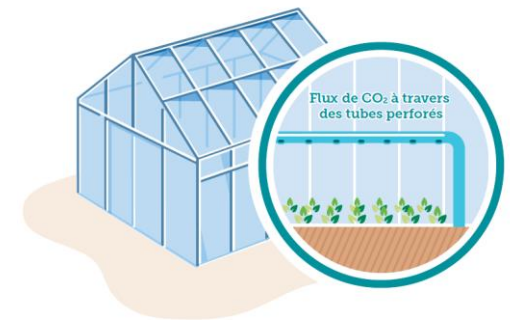
- ▶ Consensus autour de la culture hors sol notamment → cas de 90% des tomates françaises
- ▶ Croissance rapide + milieu de culture aqueux → Baisse des nutriments dans les fruits et légumes du fait des effets de dilution dans le fruit
- ▶ « Je n'exclus pas que les variétés choisies (tomates) pour être utilisé aujourd'hui dans ces formats-là (hors-sol), n'aient peut être pas le même niveau de nutriments que celles qui sont choisies pour être en sol. » (Ludovic Guinard Directeur Général délégué du CTIFL, Cash Investigation, juin 2019)



Valorisation du CO₂ dans les serres – Retour serristes – Besoins chaleur

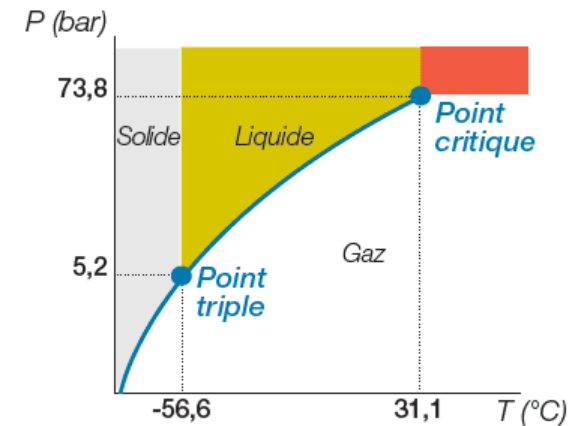
Spécificités	Culture conventionnelle	Culture biologique
Période de culture	Toute l'année	Vente interdite du 21 décembre au 30 avril (mais plantation possible)
Besoin chaleur (kWh/m ² /an)	250 - 400	150
Puissance d'appel (W/m ²)	Serre DPG : 75 Serre verre : 100	~ 50 (Variable suivant les périodes des premières cultures)
Spécificité	N/A	A compter de 2025 obligation pour tous les producteurs AB d'utiliser une source de chaleur renouvelable

- ▶ Stockage de chaleur dans ballon d'eau chaude pour la nuit : 30 à 130 m³ par hectare de serre
- ▶ Régime de température de l'ordre de 45 à 60°C → Intérêt de la chaleur fatale basse température
- ▶ Coût chaleur : chaudière gaz naturel (35 €/MWh) & cogénérateur (<10 €/MWh)
- ▶ Solution d'énergies fatales envisageables :
 - Epuration par lavage aux amines nécessitant une chaudière biomasse (Greenmac, Arol Energy, Frames..);
 - Chaleur du digestat chaud ;
 - Chaleur fatale excédentaire hygiénisation.



Valorisation du CO₂ dans les serres – Conditionnement

- ▶ Conditionnement comprimé du CO₂ non pertinent car niveau de pression pour atteindre liquéfaction faible (~ 40/50 bar)
→ perte d'intérêt pour le transport (rapport 600 des densités entre liquide/gaz)
- ▶ L'approvisionnement en CO₂ exogène se fait exclusivement sous forme liquéfiée



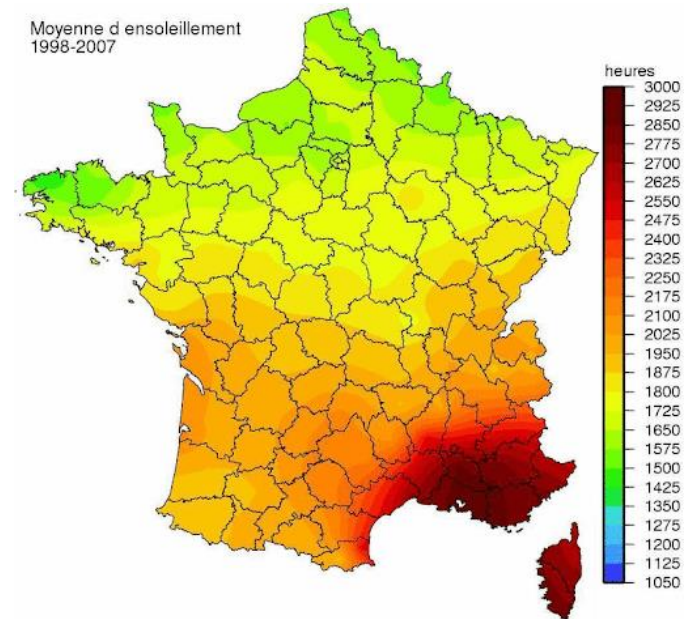
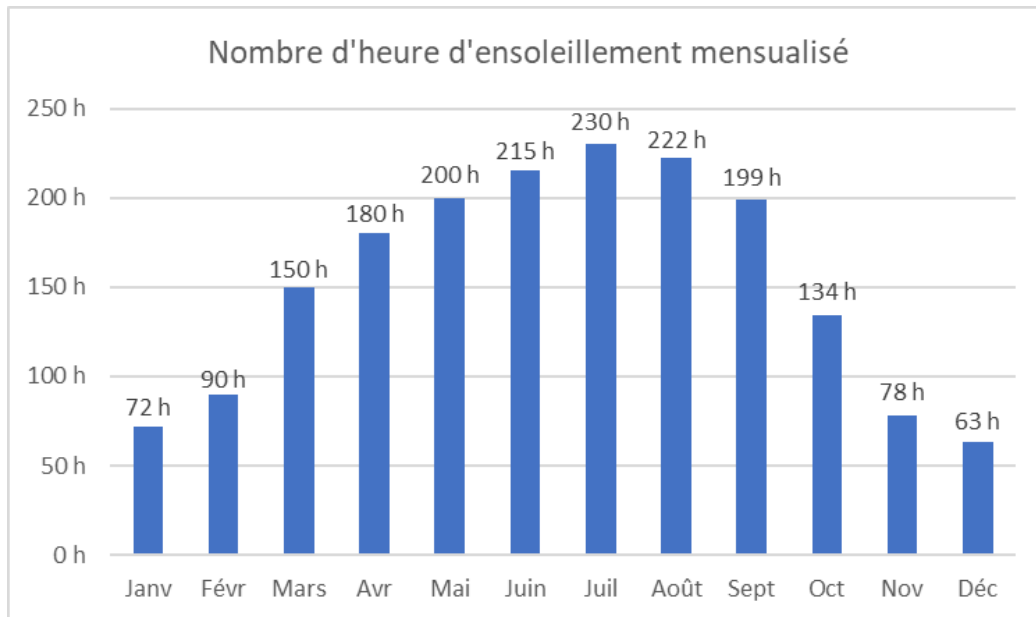
Visite Méthatreil



- ▶ Unité injection $135 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{h} \rightarrow 200 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{h}$ ou $1\,700 \text{ t}_{\text{CO}_2}/\text{an}$
- ▶ Liquéfaction & distillation des off-gas : 12 bara / - 25 °C
- ▶ Conditionnement CO_2 (20 bar / -20 °C) :
 - Cuve de stockage 60 m^3
 - Cuve transport 21 m^3 (19 m^3 effectifs) \rightarrow Chargement/déchargement $\rightarrow 45 \text{ min} + 1\text{h}30$
- ▶ Bureau d'étude spécialisé Cryocollect (Paris, filiale de Verdemobil) \rightarrow Travaux également sur le BioGNL
- ▶ Forte tension à venir sur l'approvisionnement \rightarrow été + besoins COVID
- ▶ Prérequis pour la contractualisation de leur contrat d'approvisionnement en CO_2 (CDC particulier, traçabilité, etc) \rightarrow **Non aucun**

Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Enrichissement des serres en BioCO₂

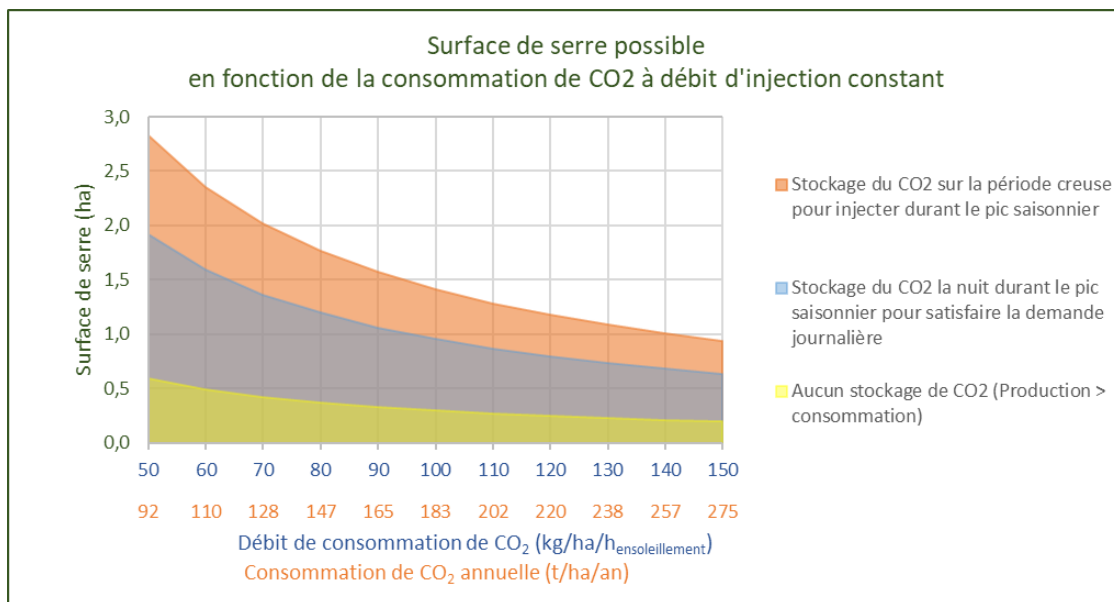


► Hypothèses d'ensoleillement moyen : Unités situées en région Centre Val de Loire

→ Base météorologique de Châteauroux (<https://www.meteo-centre.fr/norme-chateauroux.php>)

Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Scénario 1 – STEP – 37 Nm³_{CH₄}/h



- Tonnage : 0,5 t_{CO₂}
- Volume : 270 m³
- Diamètre : 8 m

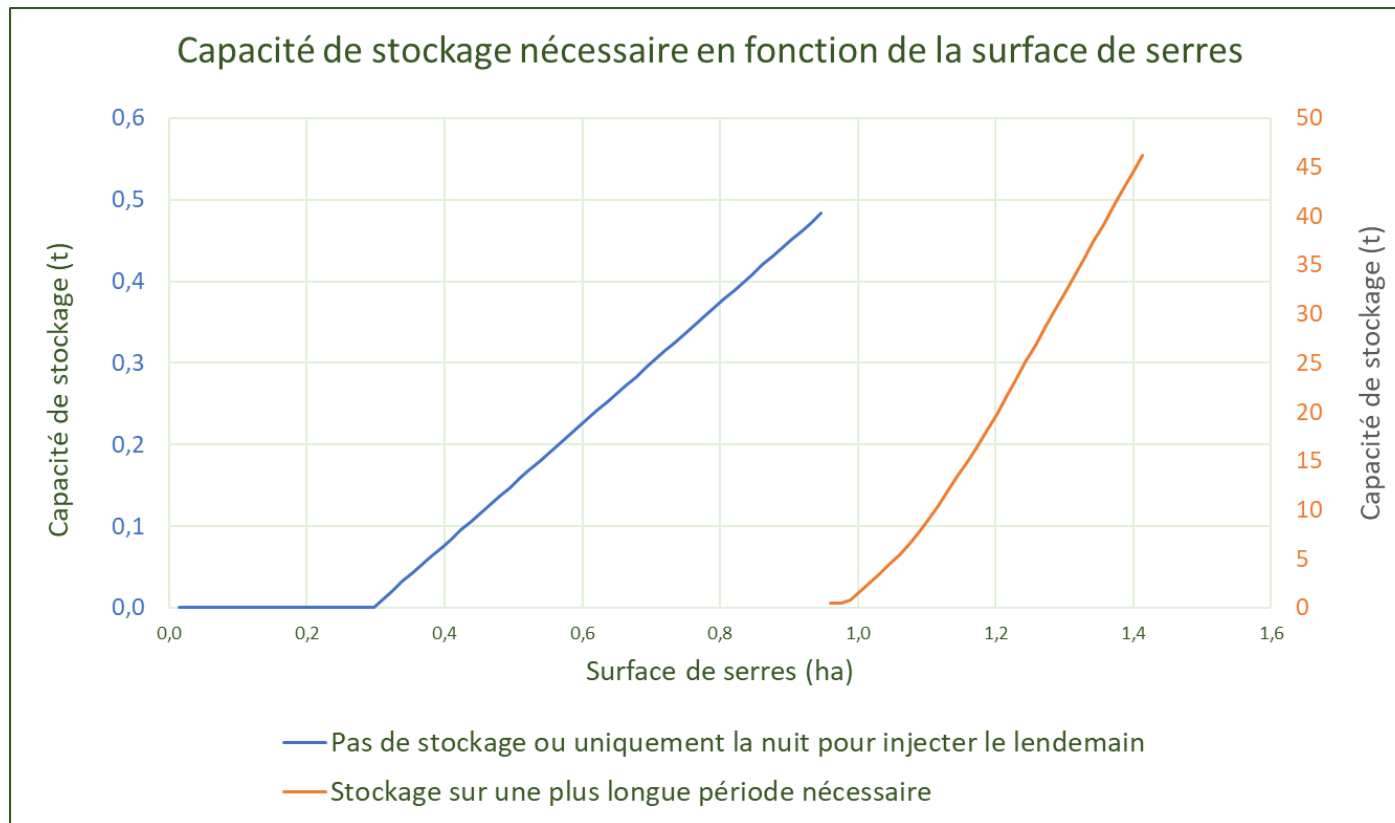
Consommation à 100 kg/ha/h	Sans stockage	Avec stockage la nuit* pour injecter le lendemain	Avec stockage sur toute l'année
Surface de serre possible :	0,3 ha	1,0 ha	1,4 ha
Capacité stockage :	-	0,5 t	46 t
Part du BioCO ₂ valorisée :	21%	68%	100%

Important : les surfaces estimées correspondent à une alimentation constante en CO₂ provenant uniquement de la méthanisation (valables pour les deux autres scénarios)

*.Nuit durant le pic saisonnier.....

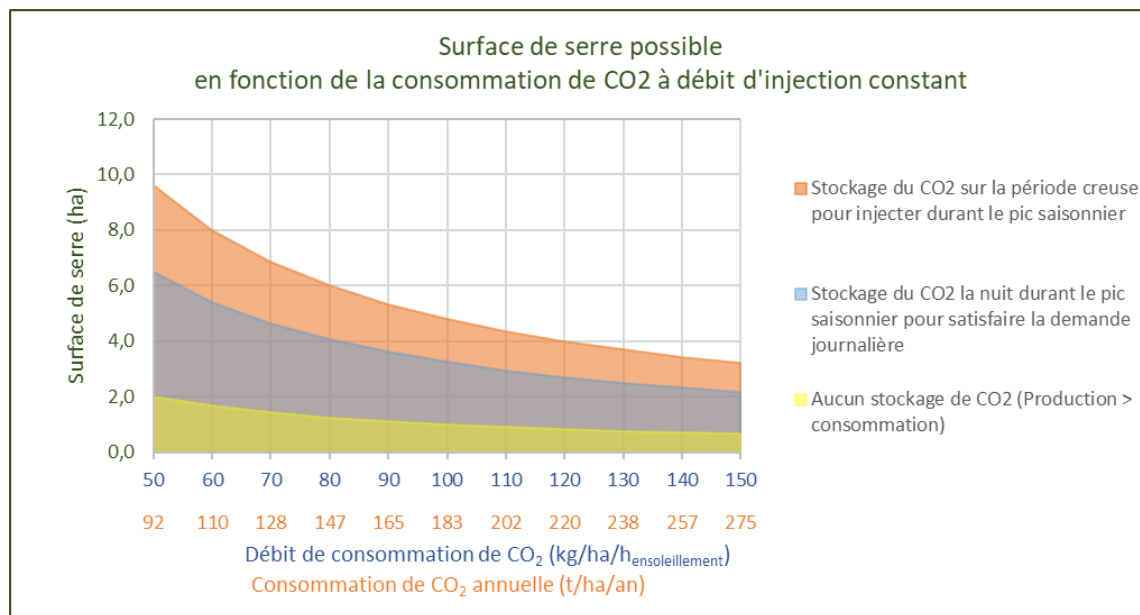
Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Scénario 1 – STEP – 37 Nm³_{CH₄}/h



Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Scénario 2 – Agricole individuel – 75 Nm³_{CH₄}/h



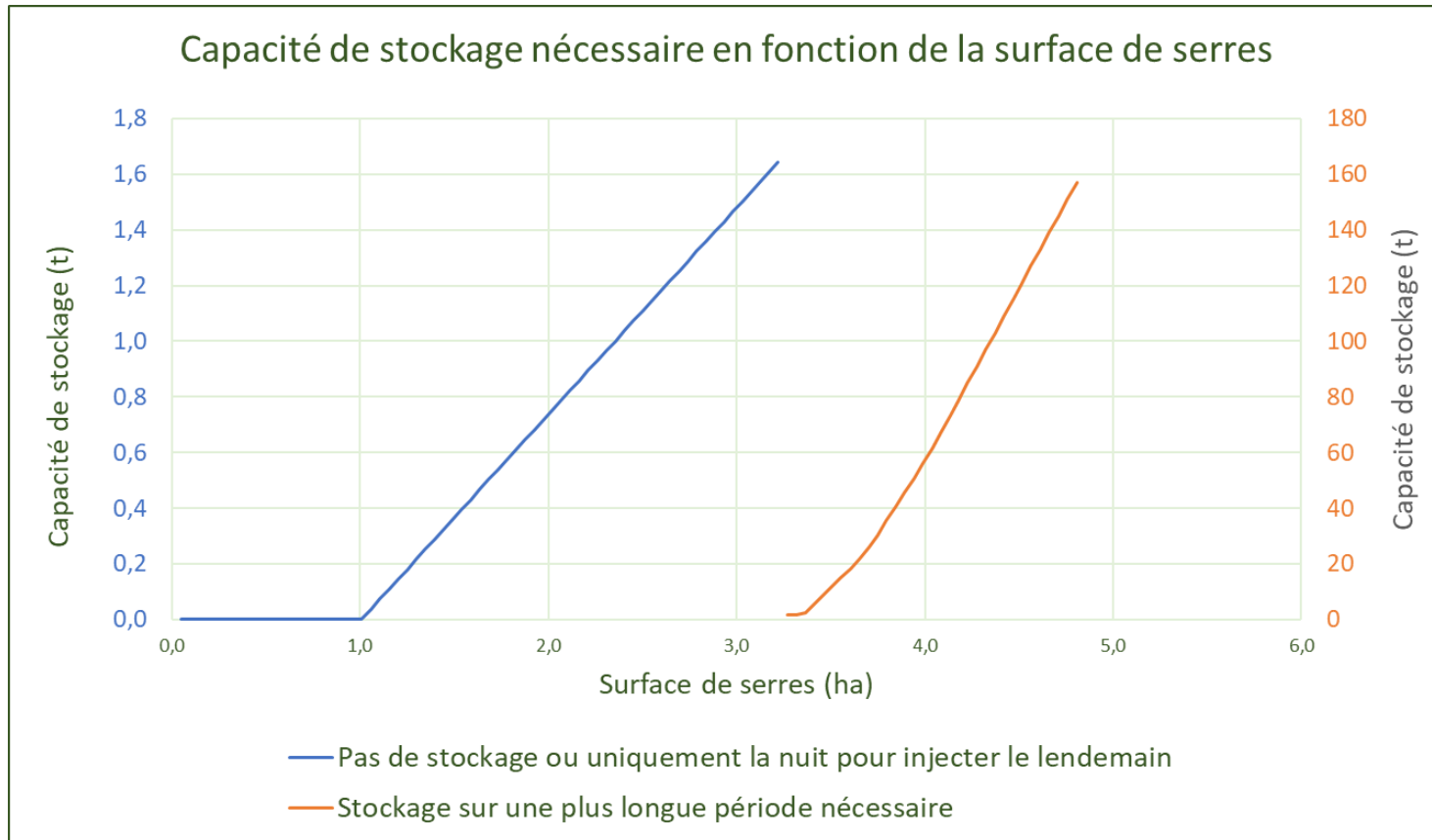
- Tonnage : 1,6 t_{CO₂}
- Volume : 885 m³
- Diamètre : 12 m

Consommation à 100 kg/ha/h	Sans stockage	Avec stockage la nuit* pour injecter le lendemain	Avec stockage sur toute l'année
Surface de serre possible :	1,0 ha	3,3 ha	4,8 ha
Capacité stockage :	-	1,7 t	157 t
Part du BioCO ₂ valorisée :	21%	68%	100%

* Nuit durant le pic saisonnier

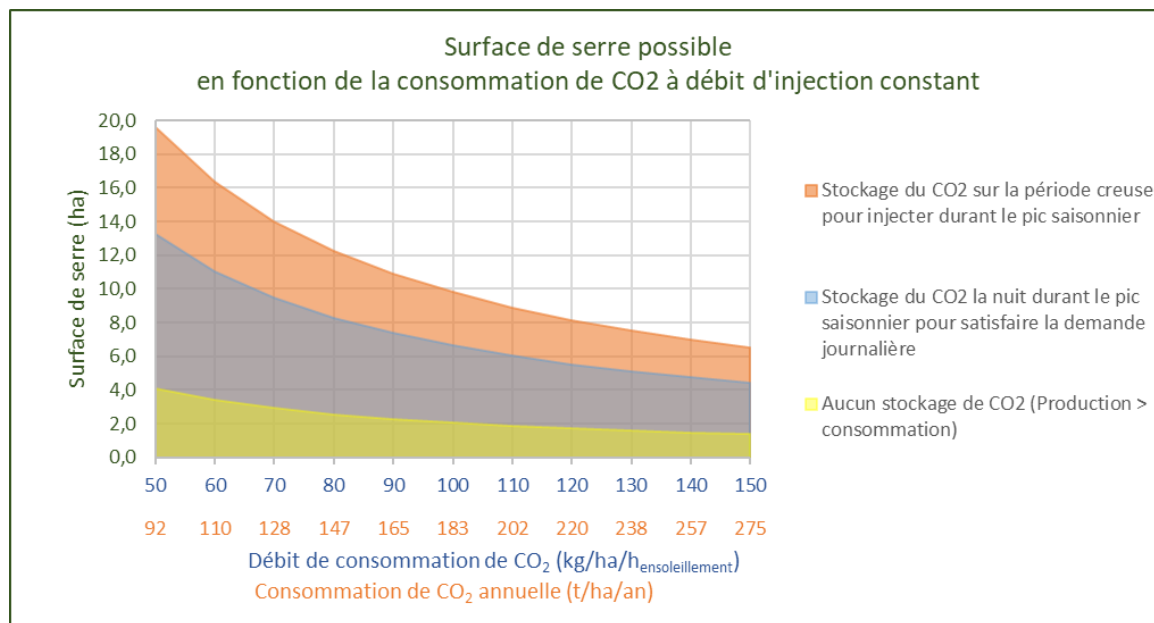
Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Scénario 2 – Agricole individuel – 75 Nm³_{CH₄}/h



Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Scénario 3 – Petit collectif agricole – 150 Nm³_{CH₄}/h



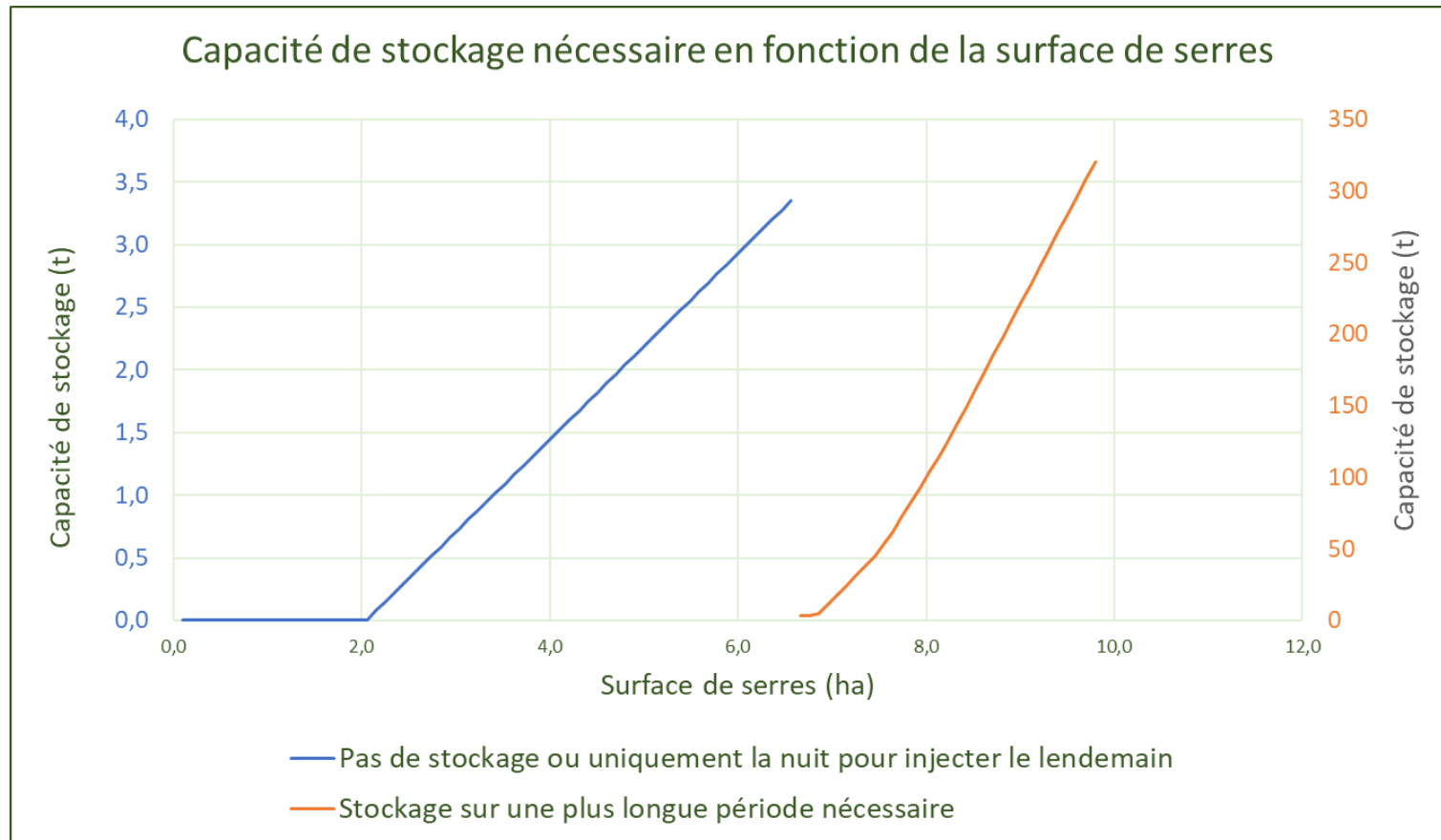
- Tonnage : 3,3 t_{CO₂}
- Volume : 1 820 m³
- Diamètre : 15 m

Consommation à 100 kg/ha/h	Sans stockage	Avec stockage la nuit* pour injecter le lendemain	Avec stockage sur toute l'année
Surface de serre possible :	2,1 ha	6,6 ha	9,8 ha
Capacité stockage :	-	3,4 t	320 t
Part du BioCO ₂ valorisée :	21%	68%	100%

* Nuit durant le pic saisonnier

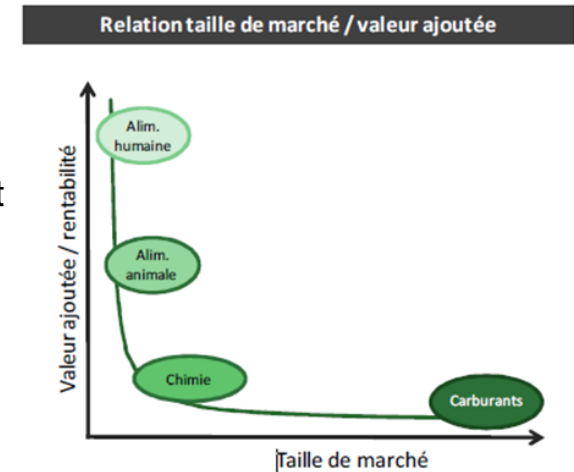
Valorisation du CO₂ dans les serres – Application scénario d'étude

Scénario 3 – Petit collectif agricole – 150 Nm³_{CH₄}/h



Valorisation du CO₂ pour la culture d'algues – Généralité

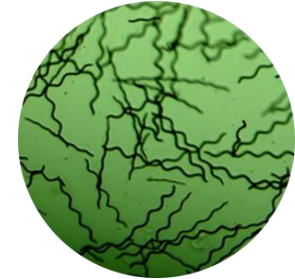
- ▶ Une douzaine seulement sur les centaines de milliers estimées sont exploitées dont trois en alimentation humaine (spiruline, chlorelle, ondontella aurita)
- ▶ Le marché aujourd'hui :
 - Alimentation humaine (74%)
 - Alimentation animale (24%)
 - Produits à haute VA (1%) : pigments et polysaccharides pour la médecine et la cosmétique
- ▶ Variation du prix : 10 €/kg_{MS} à plus de 1 000 €/kg_{MS}
- ▶ Modes de cultures :
 - Raceway → Investissements moindres
 - Photobioréacteurs → Meilleur contrôle des conditions de cultures



* <https://www.agro-media.fr/actualite/spiruline-la-production-francaise-devrait-doubler-dici-2022-44443.html>
http://www.socialter.fr/fr/module/99999672/755/la_spiruline_au_secours_des_agriculteurs_franais

Valorisation du CO₂ pour la culture d'algues – Focus sur la spiruline

- ▶ Surface moyenne exploitée par les spiruliniers aujourd'hui (500 à 1 000 m²)
- ▶ 30 fois d'eau en moins nécessaire que pour la protéine de soja
- ▶ 3 fois plus de protéine que le bœuf
- ▶ Très riche en minéraux, oligo-éléments, vitamines et acides aminés
- ▶ Marché spiruline en 2020 :
 - 400 t/an consommé dont 10% produit en France
 - ~140 spiruliniers essentiellement centré sur les circuits courts
 - Forte concurrence avec la Chine, l'Inde et les USA notamment



* <https://www.agro-media.fr/actualite/spiruline-la-production-francaise-devrait-doubler-dici-2022-44443.html>
http://www.socialter.fr/fr/module/99999672/755/la_spiruline_au_secours_des_agriculteurs_franais

Valorisation du CO₂ pour la production de carbonate de calcium

- Problématique : la surfertilisation en engrais organique amène par l'acidification du sol un lessivage en azote et phosphore mais également en **CaO**
- Utilisation du carbonate de calcium (CaCO₃) pour amender les terres (chaulage) pour augmenter le pH du sol. Les sols peu calcaires seront plus sensibles à ce phénomène (Bretagne, mettre autres régions). La mise en place de couvert permet de limiter le lessivage des nitrates et donc de recourir au chaulage.
- Réaction en jeu : $Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$
- Apport d'environ 100 à 300 kg/ha/an de CaO nécessaire → 100 g de CaCO₃ apporte 54g de CaO

	Sc1	Sc2	Sc3	
Débit de CO2	16	53	108	Nm3/h
Consommation CO2	247	840	1 714	t/an
Consommation Ca(OH)2	416	1 413	2 883	t/an
Production CaCO3	562	1 910	3 895	t/an
Production H2O	101	344	701	t/an
Surface nécessaire (ha) - 100 kg/ha	3 037	10 314	21 035	
Surface nécessaire (ha) - 300 kg/ha	1 012	3 438	7 012	

Estimation des quantités produites et consommées lors de la réaction de carbonatation

- 1 million de tonnes consommées par an en Bretagne (PICACHAUX) → problématique autour des surfaces épandables plus que sur le marché
- Picachaux : solution **d'épuration** du biogaz par neutralisation chimique à la chaux, pas applicable sur un flux de CO₂

Bilan des consultations

20 entreprises ont été contactées dont :

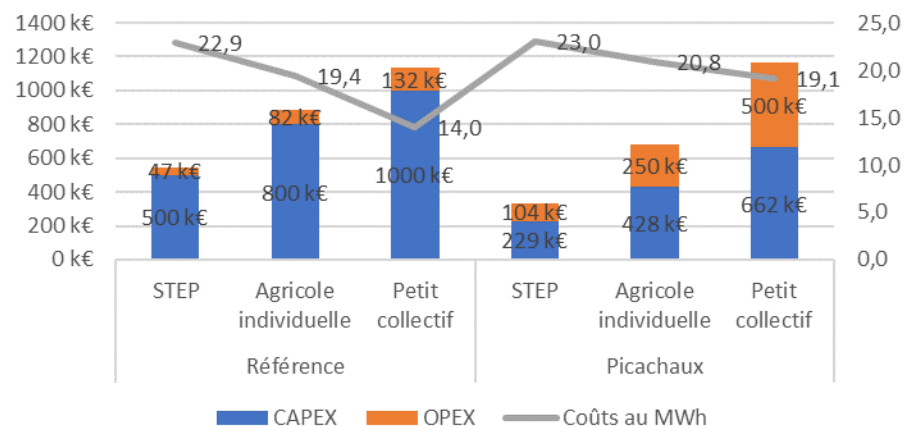
- ▶ 8 équipementiers pour le conditionnement du CO₂
- ▶ 6 producteurs/utilisateurs d'algues
- ▶ 3 serristes
- ▶ 2 concepteurs de serres
- ▶ 1 producteur de carboglace

Phase 3 : Business plan avec valorisation du CO₂

Carbonate de calcium

- ▶ Au vu des quantités de CaCO₃ produites, le projet Picachaux semble prendre l'hypothèse d'un biogaz composé à ~33% de CO₂ → taux faible pour de l'agricole mais cohérent avec une méthanisation STEP
- ▶ Incertitude forte sur l'évolution des CAPEX par rapport au débit (1 seul chiffrage de référence)
- ▶ Prix des matières :
 - Ca(OH)₂ : ~150 €/t (hyp. à 150)
 - CaCO₃ : entre 55 et 85 €/t (hyp. à 70)
- ▶ L'achat de Ca(OH)₂ représenterait 80/90% des OPEX → sensibilité à son coût très élevée
- ▶ Premiers résultats économiques montrent que solution plus pertinente pour les petites unités
- ▶ Corrélation certaine des prix entre les deux matières puisque CaCO₃ utilisé pour créer le Ca(OH)₂

Comparaison de la solution Picachaux avec une épuration "classique"



		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Ancien tarif	TRI référence	9,3%	8,1%	7,9%
	TRI CaCO ₃ - calcul S3d	10,3%	8,3%	6,7%
Tarif provisoire avec subvention ADEME	TRI référence	7,0%	5,0%	4,5%
	TRI CaCO ₃ - calcul S3d	7,8%	5,0%	3,1%
Tarif provisoire sans subvention ADEME	TRI référence	8,0%	6,3%	5,9%
	TRI CaCO ₃ - calcul S3d	8,9%	6,3%	4,6%

Serres existantes

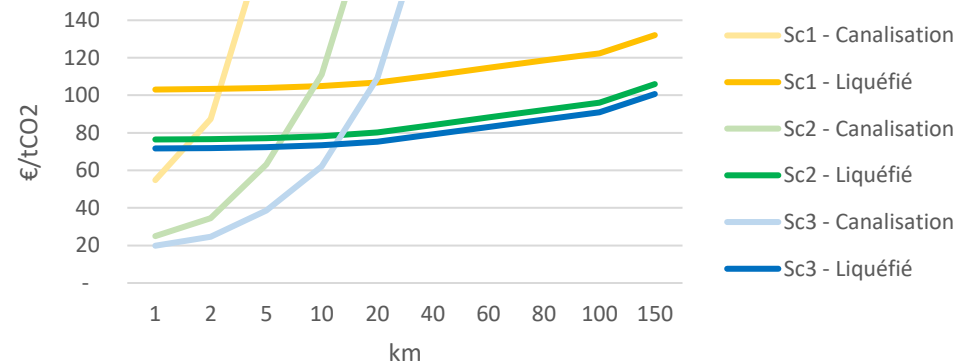
$$\text{Coût de production} = \left(\frac{\text{CAPEX}}{15} + \text{OPEX} \right) / t\text{CO}_2$$

* OPEX hors frais bancaire sur endettement

Coût de production

- ▶ Les 100 €/t sont tout de suite atteint pour le scénario 1 liquéfié, laissant peu de marge possible
- ▶ La liquéfaction devient plus pertinente économiquement à partir de :
 - 3 km pour le Sc1
 - 6/7 km pour le Sc2
 - 15 km pour le Sc3
- ▶ Produits supplémentaires considérés
 - Récupération CH₄ : hypothèse de 1% du débit d'injection
 - Récupération chaleur : ~0,01/0,02 kW_{th}/t_{CO2}
 - +40 % pour la STEP et +20 % pour l'agricole

Coût de production du CO₂ livré hors externalités

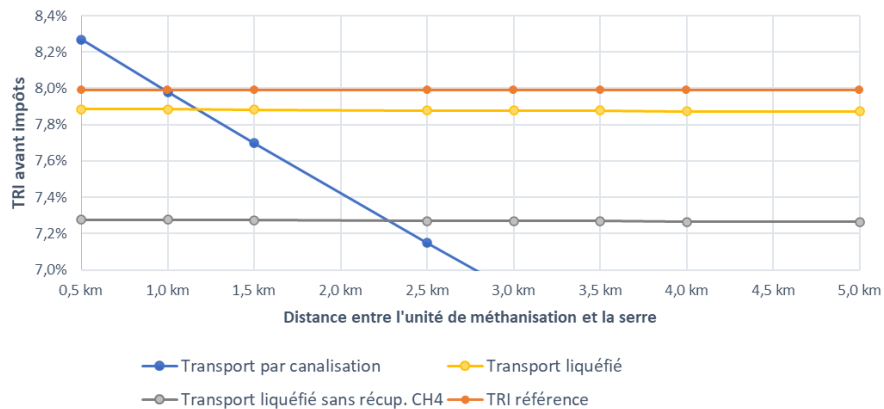


Produits générés	Sc1	Sc2	Sc3
Vente CO ₂	25 935 €	88 085 €	179 645 €
Biométhane récupéré	4 960 €	8 740 €	15 445 €
Chaleur valorisée (réduction autoconsommation)	5 853 €	10 140 €	17 920 €

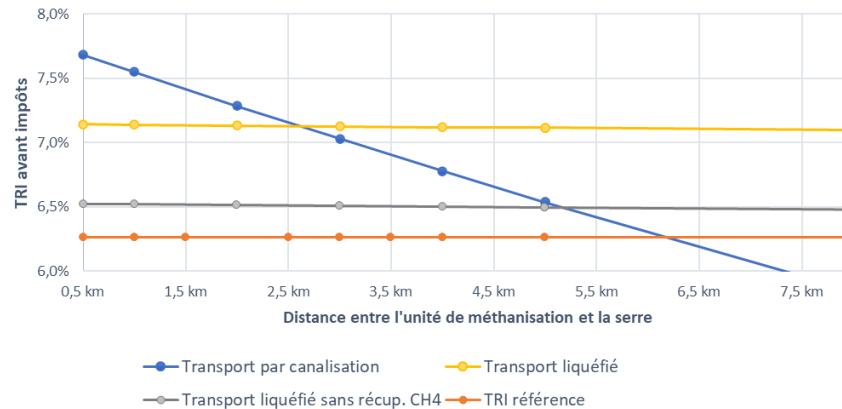
* CO₂ vendu 100 €/t transport inclus et biométhane/chaleur au prix du tarif d'achat

Serres existantes – résultats économiques

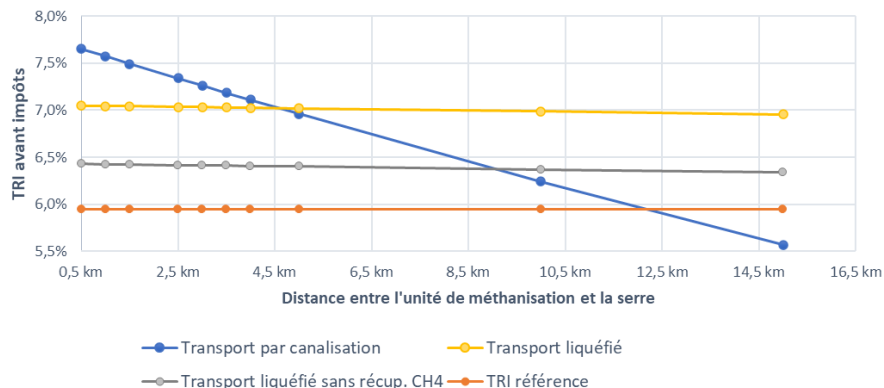
Rentabilité d'une unité STEP de 37 Nm³/h selon le mode de transport du CO₂ avec 15% de subvention



Rentabilité d'une unité agricole de 75 Nm³/h selon le mode de transport du CO₂ avec 15% de subvention



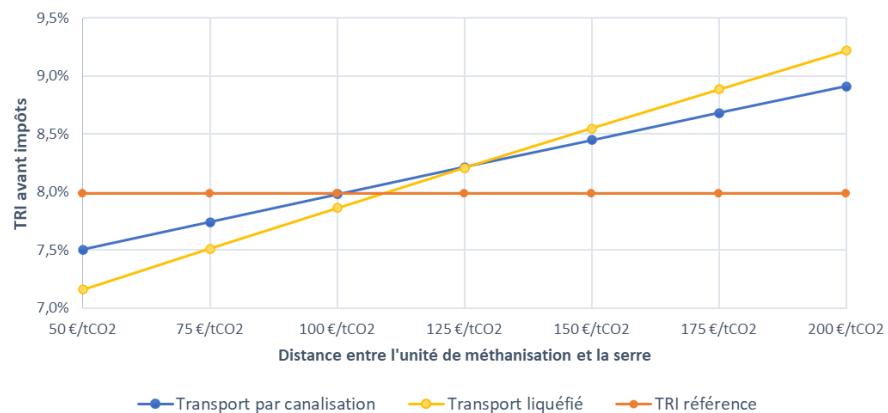
Rentabilité d'une unité agricole de 150 Nm³/h selon le mode de transport du CO₂ avec 10% de subvention



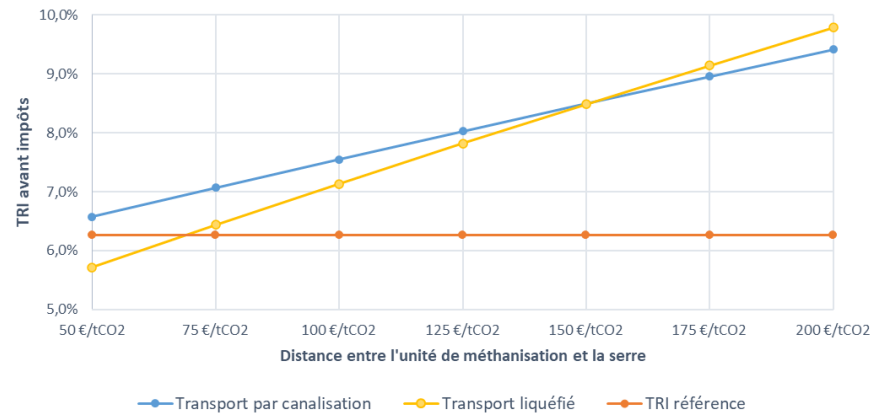
- ▶ Résultats pour tarif d'achat provisoire sans aide ADEME
- ▶ Les produits supplémentaires dont bénéficie le scénario liquéfié ont un impact significatif sur la compétitivité de la solution liquéfiée

Serres existantes – résultats économiques

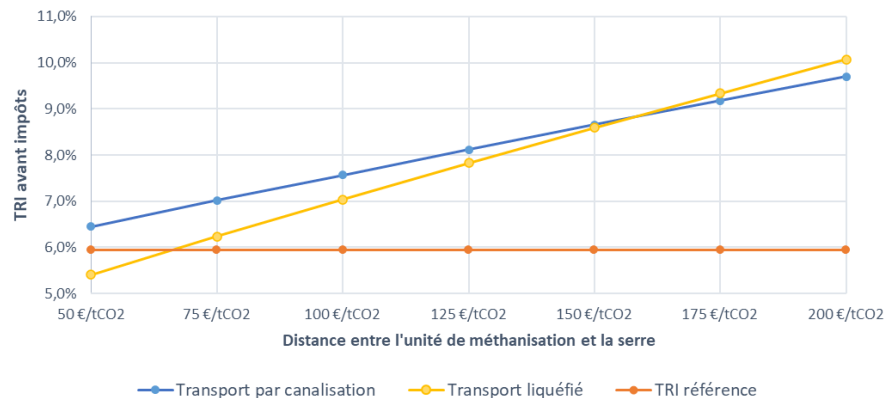
Rentabilité d'une unité STEP de 37 Nm³/h selon le mode de transport du CO₂ avec 15% de subvention



Rentabilité d'une unité agricole de 75 Nm³/h selon le mode de transport du CO₂ avec 15% de subvention



Rentabilité d'une unité agricole de 150 Nm³/h selon le mode de transport du CO₂ avec 10% de subvention



- Résultats pour une distance de 1 km
- Les externalités sont incluses dans le scénario liquéfiée

Serres existantes – Analyse de sensibilité

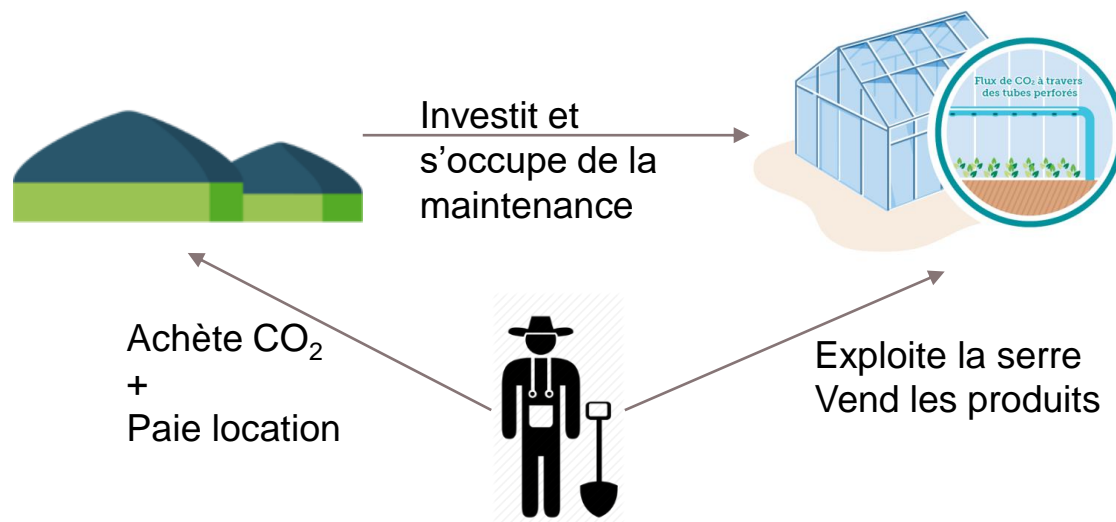
- ▶ Rappel TRI référence à 1 km (canalisation / liquéfaction)
 - Sc1 : 8 % / 7,9 %
 - Sc2 : 7,5 % / 7,1 %
 - Sc3 : 7,6 % / 7 %
- ▶ Prix de vente du CO₂ (référence à 100 €/t)
 - 80 €/t → -0,2 % TRI pour le Sc1 / -0,5 % pour Sc2 et Sc3
 - 120 €/t → +0,2 % TRI pour le Sc1 / +0,5 % pour Sc2 et Sc3
- ▶ Sans prendre en compte les produits sur bioCH₄ récupéré et économisé (liquéfaction uniquement) :
 - Sc1 : -0,6 % TRI (croise à 2,5 km le TRI canalisation versus 1,2 km)
 - Sc2 : -0,5 % TRI (croise à 5 km le TRI canalisation versus 3 km)
 - Sc3 : - 0,6 % TRI (croise à 9 km le TRI canalisation versus 4,5 km)

Multiplication par 2 de la distance seuil entre canalisation et liquéfaction

Nouvelles serres – Hypothèses

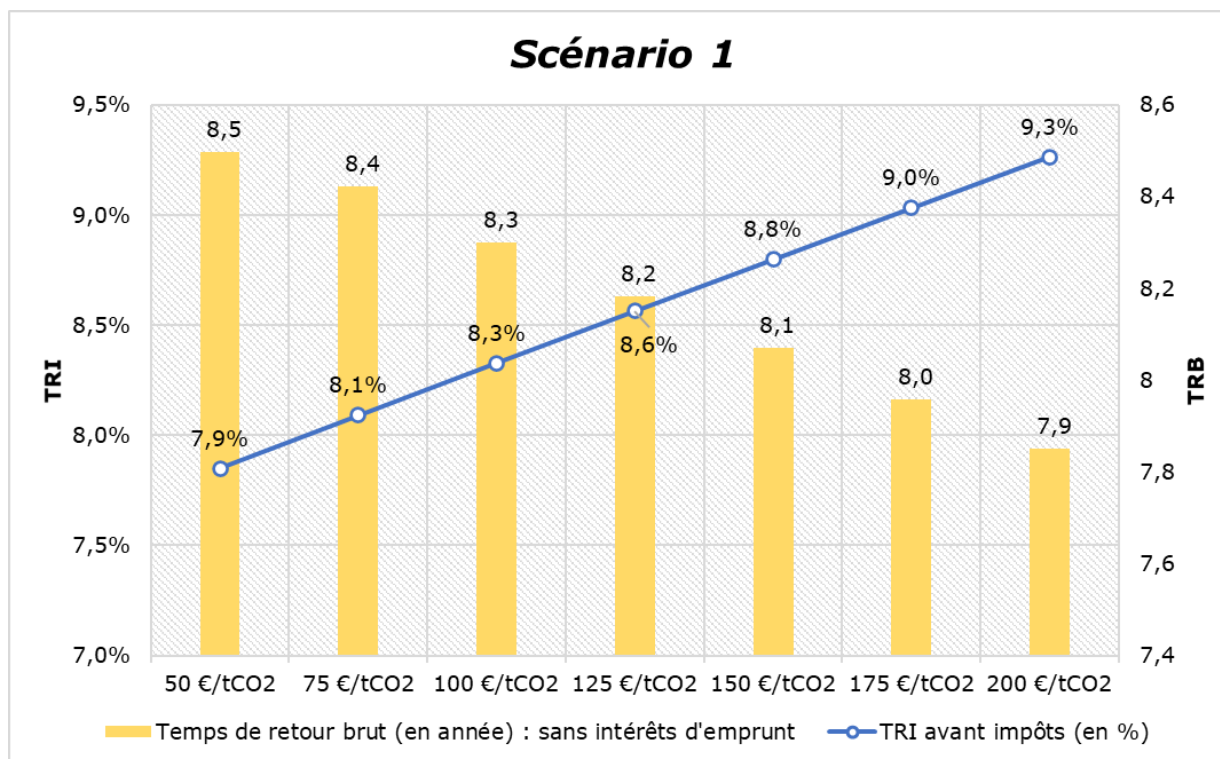
Hypothèses

- ▶ Business model simulé :



- ▶ Solution de transport par canalisation à 1 km avec stockage à hauteur de 68 % du CO₂ produit
- ▶ Coût chaleur 30 €/MWh (porté par l'exploitant des serres)
- ▶ Prix de vente du CO₂ : 100 €/t
- ▶ Location des serres : 5 % de marge sur coût de revient

Nouvelles serres – Sensibilité sur le prix de vente du CO₂



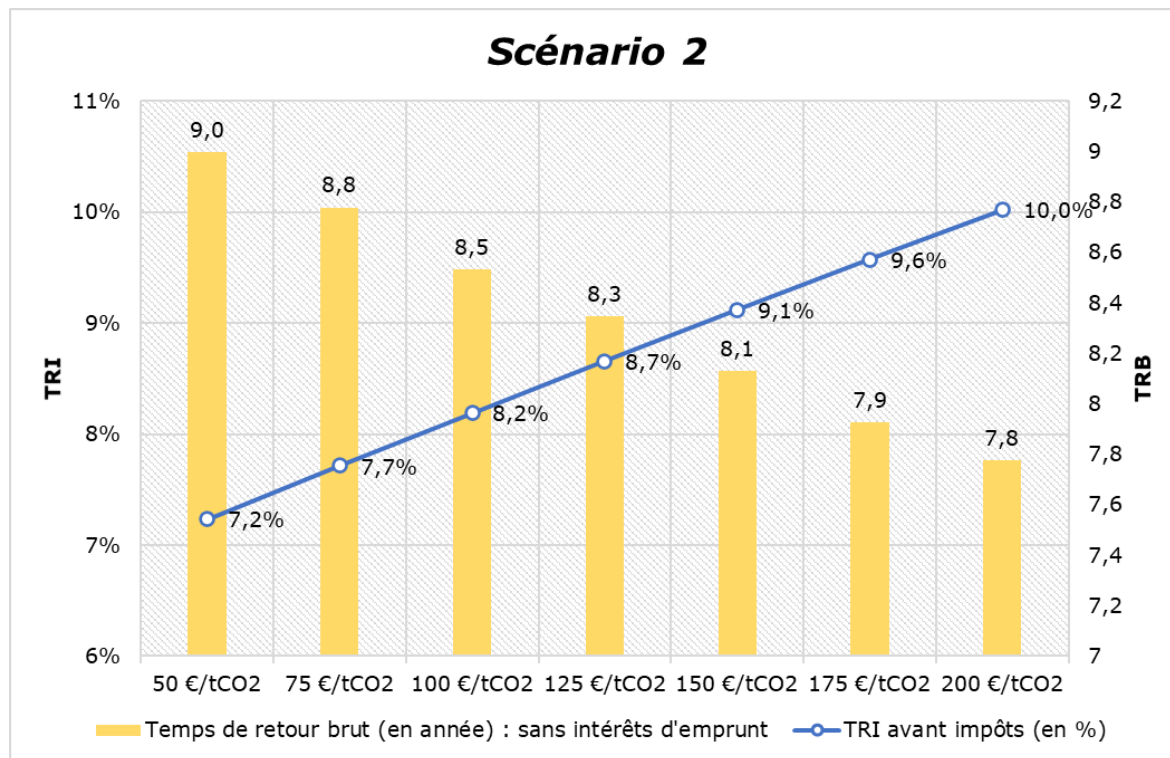
TRI de référence sans valorisation du CO₂* : **8%**

TRI de référence avec valorisation** du CO₂* en serres existantes : **8%**

* Avec 15% de subvention (autres que l'Ademe)

** Valorisé à une distance équivalente de 1 km

Nouvelles serres – Sensibilité sur le prix de vente du CO₂



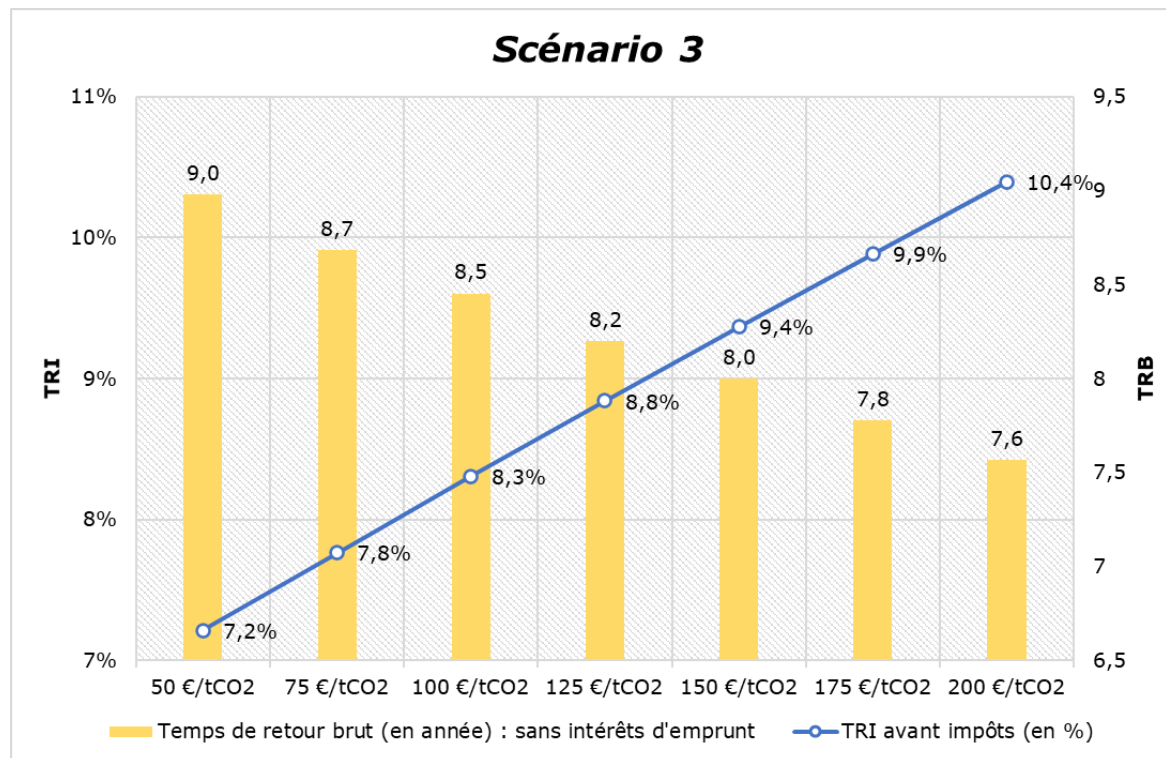
TRI de référence sans valorisation du CO₂* : **6,3%**

TRI de référence avec valorisation** du CO₂* en serres existantes : **7,5%**

* Avec 15% de subvention (autres que l'Ademe)

** Valorisé à une distance équivalente de 1 km

Nouvelles serres – Sensibilité sur le prix de vente du CO₂



TRI de référence sans valorisation du CO₂* : **5,9%**

TRI de référence avec valorisation** du CO₂* en serres existantes : **7,6%**

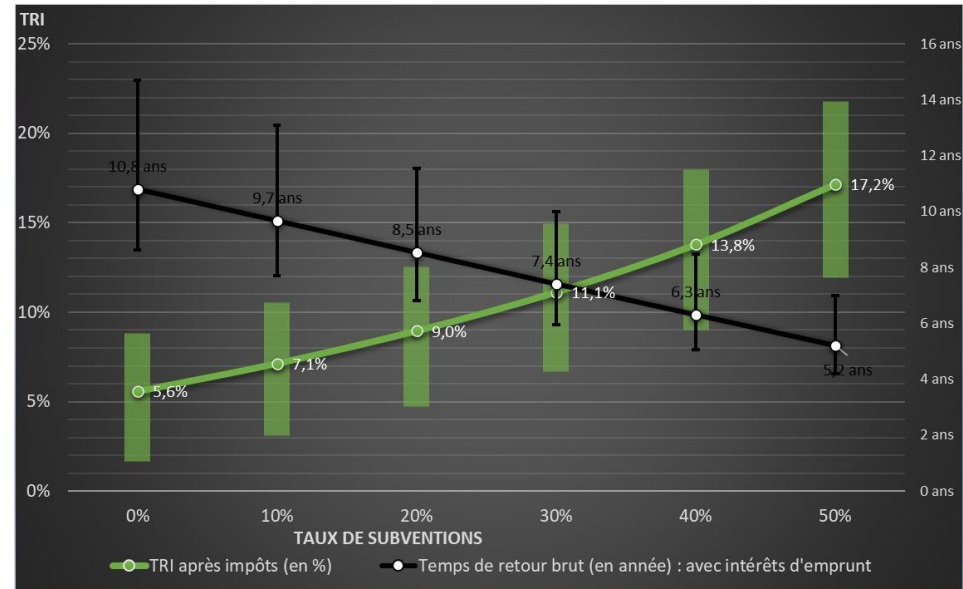
* Avec 10% de subvention (autres que l'Ademe)

** Valorisé à une distance équivalente de 1 km

Phase 3 : BP avec valorisation du CO₂

Algues – Etude de cas sur la base du scénario 1

ANALYSE	
Montant des investissements	1 563 243 €
Taux de subventions	0%
Durée du Business Plan : 15 ans	
Montant à financer par le porteur de projet	1 563 243 €
Intérêts d'emprunts annuels moyens	12 134 €/an
Somme des revenus après impôts	2 350 774 €
Somme des revenus actualisés	2 017 023 €
Valeur actuelle nette	453 779 €
Cash flow annuels moyens (sur 15 ans)	156 718 €/an
Cash flow annuels moyens actualisés sans intérêts d'emprunt	134 468 €/an
Cash flow annuels moyens actualisés avec intérêts d'emprunt	122 334 €/an
Taux moyen de couverture de la dette	142%
Temps de retour brut (en année) : sans intérêts d'emprunt	10,0 ans
Temps de retour brut (en année) : avec intérêts d'emprunt	10,8 ans
TRI avant impôts (en %)	6,8%
TRI après impôts (en %)	5,6%
Indice de profitabilité : VAN/Inv	0,29
Cout de revient spiruline (€/kg)	19,14

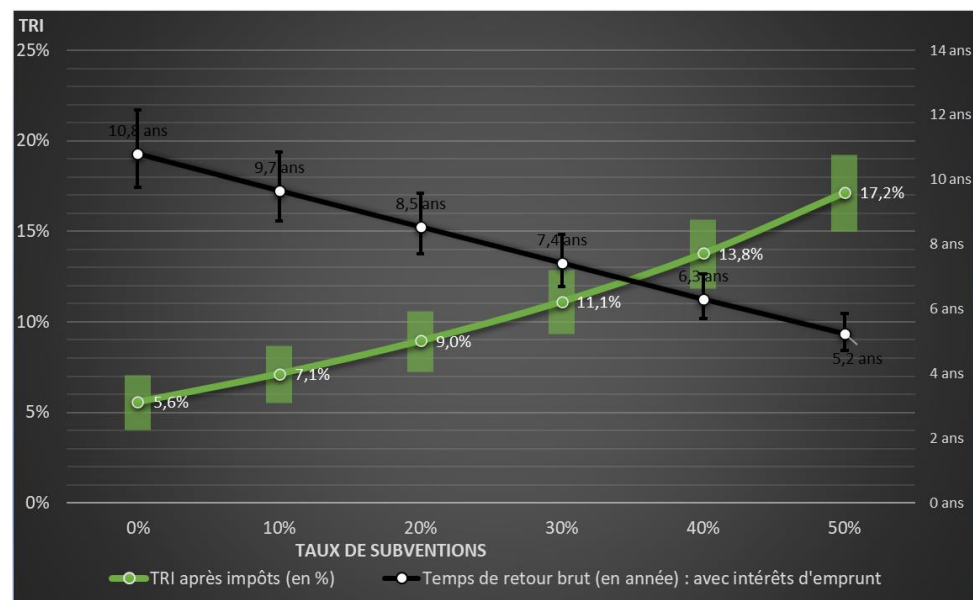


Très forte sensibilité du BP sur le prix de vente de la microalgues → 20 €/kg_{MS} ± 5%

Phase 3 : BP avec valorisation du CO₂

Algues – Etude de cas sur la base du scénario 1

ANALYSE	
Montant des investissements	1 563 243 €
Taux de subventions	0%
Montant à financer par le porteur de projet	
Intérêts d'emprunts annuels moyens	12 134 €/an
Somme des revenus après impôts	2 350 774 €
Somme des revenus actualisés	2 017 023 €
Valeur actuelle nette	453 779 €
Durée du Business Plan : 15 ans	
Cash flow annuels moyens (sur 15 ans)	156 718 €/an
Cash flow annuels moyens actualisés sans intérêts d'emprunt	134 468 €/an
Cash flow annuels moyens actualisés avec intérêts d'emprunt	122 334 €/an
Taux moyen de couverture de la dette	142%
Temps de retour brut (en année) : sans intérêts d'emprunt	
Temps de retour brut (en année) : avec intérêts d'emprunt	10,8 ans
TRI avant impôts (en %)	6,8%
TRI après impôts (en %)	5,6%
Indice de profitabilité : VAN/Inv	0,29
Cout de revient spiruline (€/kg)	19,14

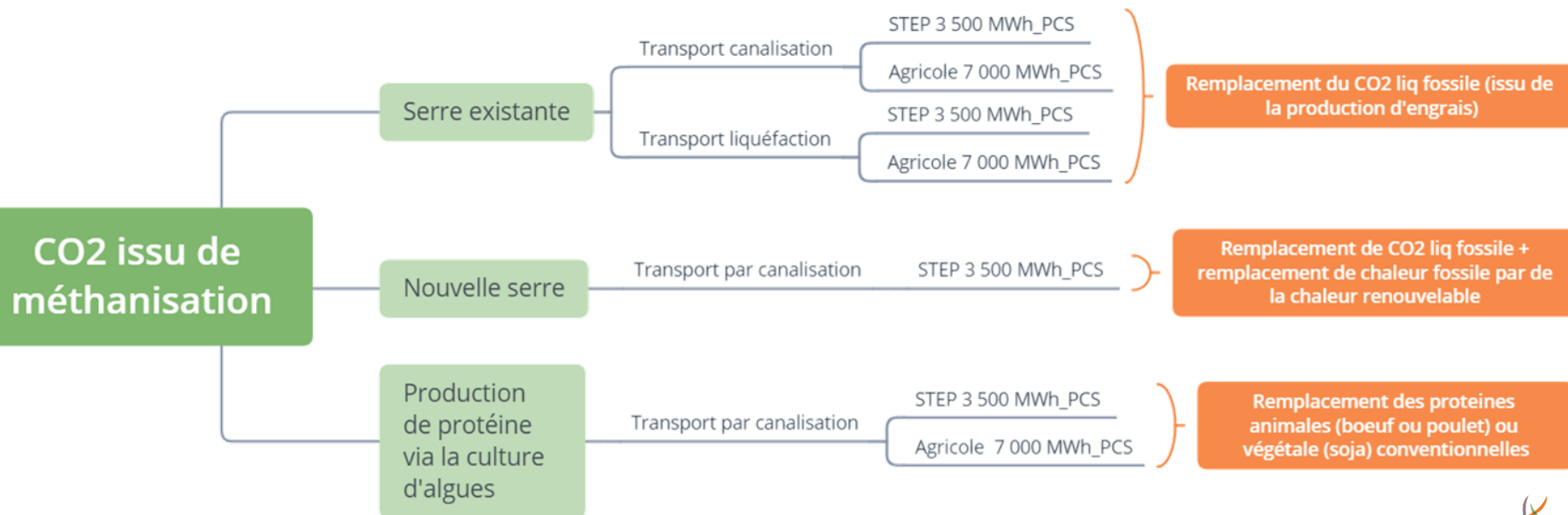


Faible sensibilité du BP sur le coût du CO₂ → 100 €/tCO₂ ± 100%

Phase 4 : Bilan GES

Scénarios étudiés et scénarios de comparaison

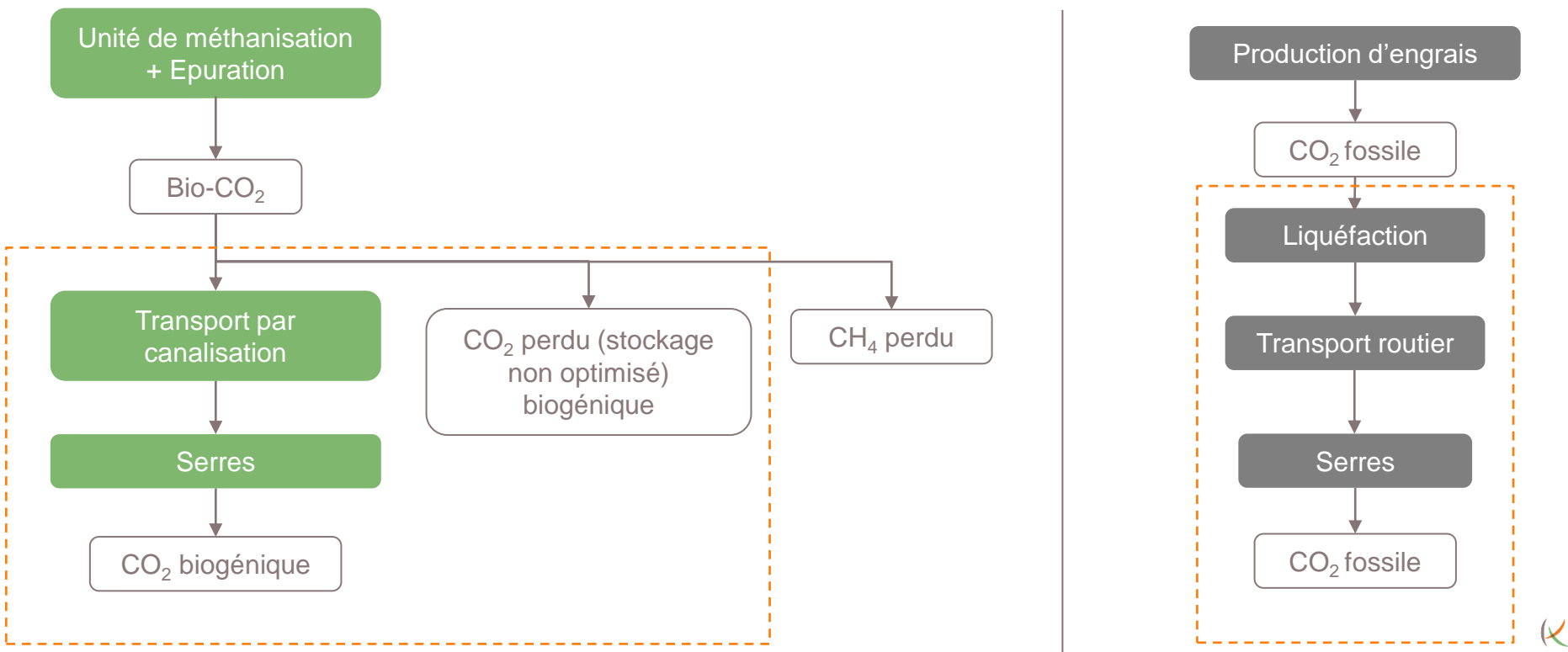
- ▶ 3 scénarios : **serre existante, nouvelle serre et culture de microalgues**
- ▶ 2 modes de transport du CO₂ : **par canalisation ou liquéfaction**
- ▶ 2 variantes :
 - Méthanisation **STEP** d'une capacité de production de CH₄ de 3 500 MWh PCS/an
 - Méthanisation **agricole** d'une capacité de production de CH₄ de 7 000 MWh PCS/an



Frontière des systèmes

Systeme 1 : Utilisation du CO₂ dans une serre existante, transport par canalisation

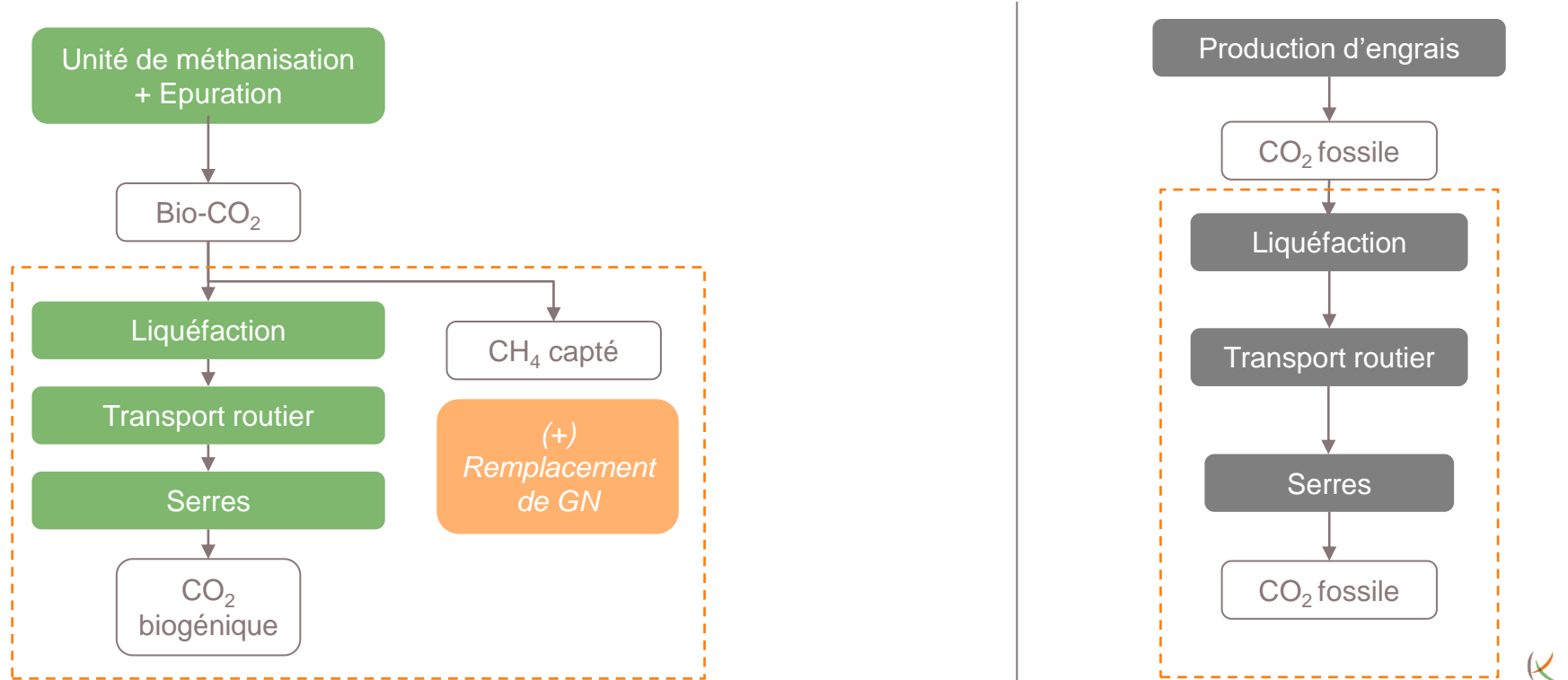
- ▶ Le CO₂ produit par la méthanisation sert à remplacer ce CO₂ liquide, issu de la production d'engrais fossile
- ▶ Unité fonctionnelle : t_CO₂



Frontière des systèmes

Systeme 1 : Utilisation du CO₂ dans une serre existante, transport par liquéfaction

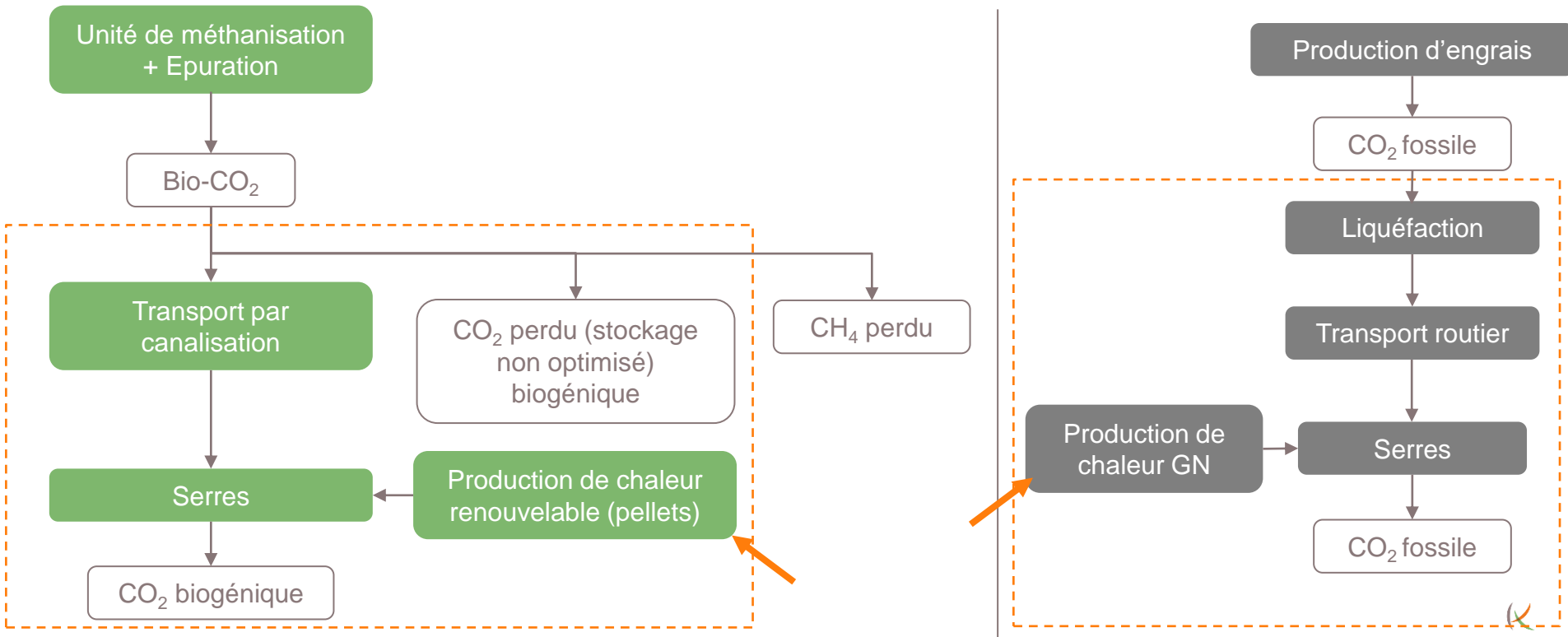
- ▶ Le CO₂ produit par la méthanisation sert à remplacer ce CO₂ liquide, issu de la production d'engrais fossile
- ▶ Unité fonctionnelle : t_CO₂



Frontière des systèmes

Système 2 : Utilisation du CO₂ dans une nouvelle serre, transport par canalisation

- ▶ Le CO₂ produit par la méthanisation sert à remplacer ce CO₂ liquide, issu de la production d'engrais fossile
- ▶ Unité fonctionnelle : t_CO₂



Frontière des systèmes

Systemes 1 et 2 : Utilisation du CO₂ dans en serre, transport par canalisation ou liquéfaction

► Notes sur les frontières du système :

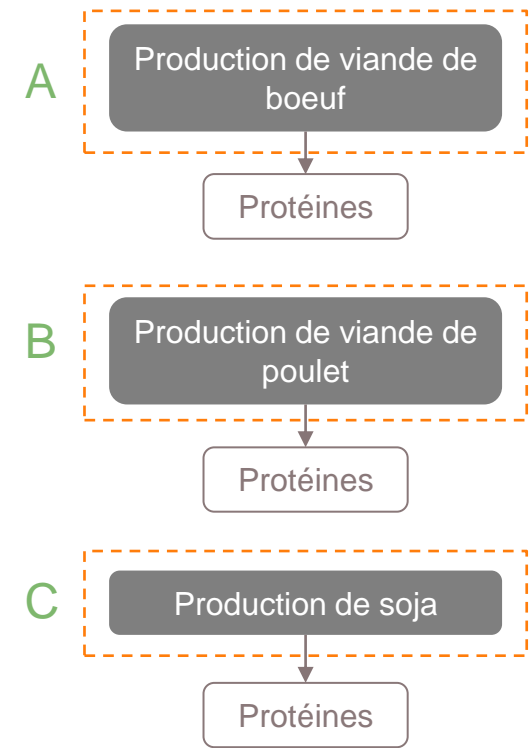
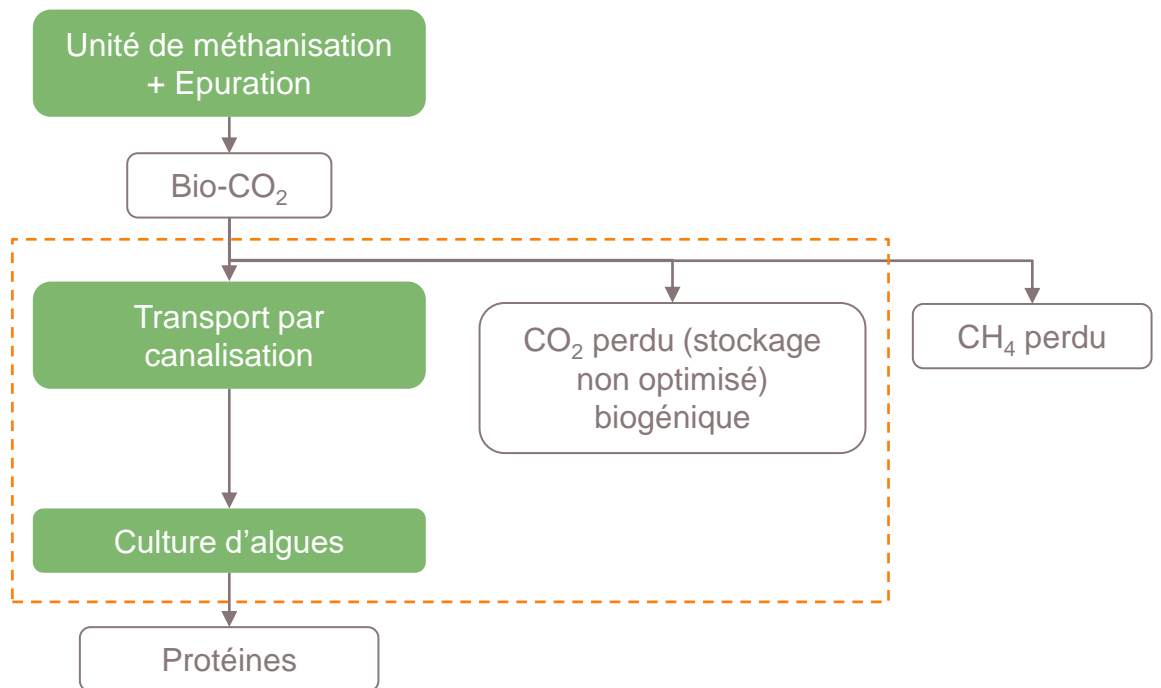
- La production de CO₂ qu'il soit issu de la méthanisation ou de la production d'engrais est exclue parce que le CO₂ est un déchet à ce stade
- Le CH₄ perdu dans le scénario valorisation du CO₂ n'est pas intégré aux frontières car aurait été perdu par la méthanisation de toute façon
- En revanche, dans le scénario liquéfaction le biométhane supplémentaire qui est capté donne lieu à un crédit d'impact
- La distance de transport après liquéfaction est arbitraire
- Tous les intrants et sortants autres que le CO₂ pour la culture sous serres sont négligés puisque équivalents entre les deux scénarios
- **Le CO₂ utilisé est considéré comme « relâché » en fin de processus. Il est biogénique dans le cas de la méthanisation et fossile dans le cas du conventionnel. Aucun effet de stockage par les plantes n'est pris en compte**
- **La manière de traiter le CO₂ fossile en fin de cycle est discutable. La filière engrais étant bien établie, il peut également être considéré que ce CO₂ aurait de toute façon été relâché dans l'atmosphère. Cette nuance sera présentée dans les résultats.**
- Dans le scénario serre existante, aucune modification n'est apportée à part la production de chaleur

Frontière des systèmes

Système 3 : Utilisation du CO₂ pour la production de protéine via la culture d'algues

- ▶ Le CO₂ produit par la méthanisation sert à la production d'algues pour leur contenu en protéine. Ce contenu en protéine est utilisé en remplacement de protéine animale pour l'alimentation humaine (bœuf ou poulet) ou végétale pour l'alimentation animale (soja)

- ▶ Unité fonctionnelle : t_{protéine}



Frontière des systèmes

Systemes 3 : Utilisation du CO₂ pour la production de protéine via la culture d'algues

► Notes sur les frontières du système :

- La production de CO₂ de la méthanisation est exclue parce que le CO₂ est un déchet à ce stade
- Le CH₄ perdu dans le scénario valorisation du CO₂ n'est pas intégré aux frontières car aurait été perdu par la méthanisation de toute façon
- La distance de transport après liquéfaction est arbitraire
- Les intrants pour la culture d'algues sont l'électricité, l'eau, l'apport d'engrais. L'impact du traitement de l'eau usée a été intégré.
- A noter également que par rapport à la production conventionnelle de protéines, le scénario méthanisation offre un gain via le remplacement de gaz naturel par du biométhane, **mais ce gain n'a pas été imputé à la valorisation du CO₂**

Hypothèses et ratios d'émission utilisés

	Paramètre généraux	Valeur	Unité	Source
TRANSPORT	Distance transport CO2 liq conv.	50	km	Arbitraire
	Distance transport CO2 liq métha.	10	km	Etude éco S3d
	Distance transport pellets	50	km	Arbitraire
	Distance transport cendres	5	km	Arbitraire
RATIOS CO2	Injection de bio-CH4 - STEP (prod. + comb.)	0,0147	kCO2kWh PCS	Base Carbone ADEME, Biométhane, injecté dans les réseaux - Issu de la filière STEU
	Injection de bio-CH4 - moyen (prod. + comb.)	0,0395	kgCO2/kWh PCS	Base Carbone ADEME, Biométhane, injecté dans les réseaux - Mix moyen
	Gaz naturel (prod. + comb.)	0,214	kgCO2/kWh PCS	Base Carbone ADEME, mix moyen français
	Gaz naturel (prod. + comb.)	0,244	kgCO2/kWh PCI	Base Carbone ADEME, mix moyen français
	Electricité (prod. + utilisation)	0,0599	kgCO2/kWh	Base Carbone ADEME, Electricité - 2020, mix moyen français - consommation
	Production et transport de soja	3,25	kgCO2/kg	Agribalyse (Impact 2002+, ReCiPE 2016 Midpoint €, IPCC 2013 GWP100a) - Soybean, average mix, transported to FR
	Production CO2 liq	0,49	kgCO2/kg	EcolInvent (ILCD, Impact 2002+, ReCiPE 2016 Midpoint €, IPCC 2013 GWP100a) - market for carbon dioxide, liquid
	Transport CO2 liq	0,0984	kgCO2/t.km	Base Carbone, Ensemble articulé - citerne, PTR4 40T
	Granulés de bois (prod. + comb.)	0,111	kgCO2/kg	Base Carbone, Granulés bois - 8% d'humidité
	Transport granulés bois et/ou cendres	0,152	kgCO2/t.km	Base Carbone, Rigide - 12 à 20 tonnes - Diesel routier, incorporation 7% biodiesel
	Production viande de bœuf	17	kgCO2/kg_poids vif	Base Carbone - Bœuf - conventionnel, fourrage intensif - sortie de ferme
	Production viande de poulet	1,99	kgCO2/kg_poids vif	Base Carbone - Poulet - moyenne nationale - Sortie de ferme
	Production engrais binaire NP	4330	kgCO2/t_N	Base Carbone - Engrais binaire NP, Europe
	Traitement de l'eau usée	0,262	kgCO2/m3	Base Carbone - Traitement des eaux usées - Hors Infrastructure
Production eau de réseau	0,132	kgCO2/m3	Base Carbone - Eau de réseau - Hors Infrastructure	

Résultats bruts

► Utilisation en serres

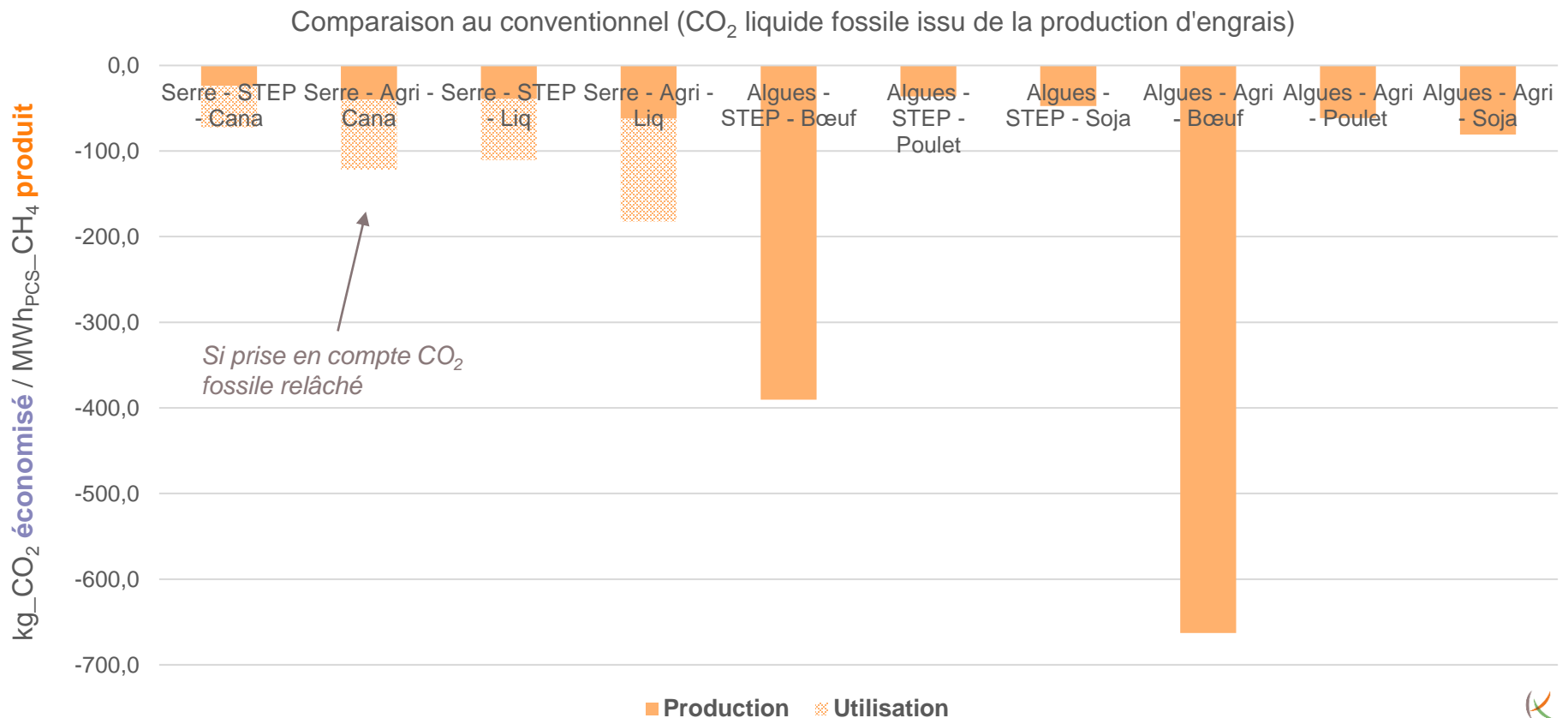
→ **Note** : Le scénario “Nouvelle serre” revient simplement à remplacer de la chaleur fossile (GN) par de la chaleur renouvelable. Ce crédit est représenté **en orange** dans le tableau.

SCENARIO		RESULTATS BRUTS		
Transport CO ₂	Modèle de méthanisation	Valorisation et utilisation du CO ₂ de méthanisation	Valorisation et utilisation du CO ₂ (production d'engrais)	Bilan (t _{CO2} /an)
Canalisation	STEP (3 500 MWh _{PCS} /an)	0,3 t _{CO2} /an + 86 t_{CO2}/an	85 + 170 t _{CO2} /an + 770 t_{CO2}/an	-84 -938
	Agricole (7 000 MWh _{PCS} /an)	1 t _{CO2} /an	280 + 570 t _{CO2} /an	-282
Liquéfaction	STEP (3 500 MWh _{PCS} /an)	-14 t _{CO2} /an	124 + 250 t _{CO2} /an	-137
	Agricole (7 000 MWh _{PCS} /an)	-20 t _{CO2} /an	416 + 840 t _{CO2} /an	-436

► Culture d'algue pour la production de protéines

SCENARIO		RESULTATS BRUTS		
Transport CO ₂	Modèle de méthanisation	Valorisation et utilisation du CO ₂ de méthanisation	Valorisation et utilisation du CO ₂ (production d'engrais) (t _{CO2} /an)	Bilan (t _{CO2} /an)
Canalisation	STEP (3 500 MWh _{PCS} /an)	48 t _{CO2} /an	Prod. Viande de bœuf : 1 400 Prod. Viande de poulet : 175 Prod. Soja : 215	-1352 -127 -167
	Agricole (7 000 MWh _{PCS} /an)	160 t _{CO2} /an	Prod. Viande de bœuf : 4 800 Prod. Viande de poulet : 590 Prod. Soja : 727	-4640 -430 -567

Résultats en **CO₂ économisé** par scénario, ramené à la **production de méthane** de l'unité



Phase 5 : Analyse multicritères & propositions d'actions

Analyse multicritères – Aujourd'hui

		Injection dans des serres*		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 1	Marché	2,0	3,5	2,0	2,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,0	2,0	5,0	2,7
	Maturité technologique	4	4	3	1	1	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	0	3	4	4	2	0
	Note finale	Pas adapté	3,4	3,5	2,9	2,5	Pas adapté
Scénario 2	Marché	2,5	4,0	2,0	2,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,0	2,0	4,3	2,7
	Maturité technologique	4	4	3	2	1	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	1
	Note finale	2,8	3,4	3,5	3,1	Pas adapté	2,2
Scénario 3	Marché	2,5	4,0	0,0	2,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,0	2,0	4,0	2,7
	Maturité technologique	4	4	3	2	1	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	2
	Note finale	2,8	3,4	Pas adapté	3,1	Pas adapté	2,4

- ▶ Marché = potentiel & accessibilité
- ▶ Facilité de mise en œuvre = critère technique (conditionnement et qualité du CO₂, foncier nécessaire, maturité technologique)

* Un transport par canalisation du CO₂ a été supposé dans le cadre des serres nouvelles et liquéfié dans le cas des serres existantes

Analyse multicritères – 2030

		Injection dans des serres*		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 1	Marché	1,0	3,5	3,5	3,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,3	2,3	5,0	2,7
	Maturité technologique	4	4	4	4	3	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	1	3	4	4	2	1
	Note finale	2,2	3,4	4,0	3,6	2,9	2,2
Scénario 2	Marché	1,5	4,0	3,5	3,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,7	2,7	4,3	3,0
	Maturité technologique	4	4	4	4	3	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	3
	Note finale	2,6	3,4	4,0	3,7	Pas adapté	2,6
Scénario 3	Marché	1,5	4,0	3,5	3,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,7	2,7	4,0	3,0
	Maturité technologique	4	4	4	4	3	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	3
	Note finale	2,6	3,4	4,0	3,7	Pas adapté	2,6

- ▶ Forte croissance du marché algues / moins de possibilité pour trouver des serres existantes non desservie en bioCO₂
- ▶ Photobioréacteurs au stade industriel / baisse du coût de revient du CO₂ liquide

* Un transport par canalisation du CO₂ a été supposé dans le cadre des serres existantes et liquéfié dans le cas des nouvelles serres

Points forts / freins

Spécificités	Points forts	Freins identifiés
Serres	<ul style="list-style-type: none"> Modèle économique éprouvé et compatible avec le prix de vente du CO₂ industriel (sauf Sc1 liquéfié) Qualité du CO₂ requise peu contraignante 	<ul style="list-style-type: none"> Prix de revient du CO₂ fortement dépendant de la distance BP des serres fortement dépendant du prix de la chaleur
Algues	<ul style="list-style-type: none"> Grande variété de produits finaux Perspectives de marché très grandes Une forte dynamique du secteur en lien avec la méthanisation (Fermentalg, SunOleo, Bioeasy, Coldep, ...) Impact GES important 	<ul style="list-style-type: none"> Traçabilité de la qualité alimentaire Aujourd'hui représente un marché de niche et prix de revient du produit final trop peu compétitif BP fortement dépendant du prix de la chaleur Flou réglementaire sur l'utilisation du digestat comme source de nutriments
Picachaux	<ul style="list-style-type: none"> Peu gourmande en énergie Adaptée pour des tous petits débits (~50 Nm³/h biométhane) 	<ul style="list-style-type: none"> Balance économique chaux/carbonate de calcium trop déséquilibrée pour méthaniseur > 50 Nm₃/h biométhane Impact environnemental de la solution inconnue Encore au stade de R&D
Carboglace	<ul style="list-style-type: none"> Revente du CO₂ liquide aux producteurs qui ont déjà leur marché 	<ul style="list-style-type: none"> Traçabilité de la qualité alimentaire Prix de revient du CO₂ livré (cible à 70 €/t)

Propositions

- ▶ Aider la localisation de la production et l'usage du CO₂ (ex : cartographie des sites de méthanisation et serres)
- ▶ Reconnaissance du caractère renouvelable du CO₂ issu de méthanisation
 - Dans les labels des produits finaux déjà existants
 - Dans un label « produit à partir de bioCO₂ »
 - Certificats verts / crédits carbone
 - Intégration au label Bas Carbone : quelle adéquation avec la méthodologie Carbon Agri déjà validée ?
- ▶ Acceptabilité du bioCO₂ par le marché :
 - Constitution d'un suivi de la qualité des off-gas sur différents **types d'unité (rations)** et de **systèmes d'épuration**.
 - Création d'une démarche HACCP dédiée à la vente du bioCO₂ (agrément sanitaire ?)
- ▶ Faciliter la mise sur le marché :
 - Soutenir l'innovation par des AAP (démonstrateur, unités industrielles)
 - Investissements dans les entreprises (exemple : TEREKA & DualMétha)
- ▶ Intégration d'un quota, à l'image des biocarburants, dans l'alimentation animale
- ▶ Groupe de travail/cluster sur le bioCO₂ regroupant des acteurs de la méthanisation, du méthanol, ...
- ▶ Développer de nouveaux marchés ne nécessitant pas de respecter la spécification EIGA (molécules d'intérêt biosourcées, séquestration du CO₂ par CCS, ...)

Phase 6 : Conclusions

► D'un point de vue technique :

- Le coût de la liquéfaction de CO₂ (et de son transport) reste onéreux (seuil de rentabilité vers 75 Nm³/h de biométhane à 100 €/t). Malgré la multiplication des acteurs sur ce segment, il apparaît comme nécessaire d'encourager l'installation de pilotes/démonstrateurs pour faire abaisser les coûts de production pour les petites unités.
- L'injection directe peut alors être envisagée mais les seuils de rentabilité se situent vis-à-vis de la liquéfaction respectivement, à un prix de 100 €/t_{CO₂}, vers 1 km, 3 km et 5 km pour les scénarios 1, 2 et 3.

► D'un point de vue qualité :

- La traçabilité de la qualité alimentaire (présence de pathogènes plus que pureté du CO₂) reste le principal verrou de la valorisation du CO₂ dont près de 80% aujourd'hui de son utilisation en France est de près ou de loin liée à l'agroalimentaire.
- L'injection du CO₂ dans les serres est la solution la moins contraignante à mettre en place du fait d'exigences moindre en termes de qualité où seules les limites VLEP sont de rigueur.

- ▶ Le nerf de la guerre pour les serristes et producteurs d'algues ne se situent pas au niveau du CO₂ mais de la chaleur. Le CO₂ pesant pour moins 5% des OPEX, une marge semble bien exister sur son prix de revente si ces installations bénéficient d'une chaleur bas coût.
- ▶ La production d'algues reste un secret bien gardé et il est difficile d'en maîtriser tous les enjeux. Cependant plusieurs acteurs se démarquent et s'intéressent à la méthanisation. La variété du marché des algues et ses perspectives de développement sont une force, son coût de production pour s'y imposer sa faiblesse.
- ▶ D'un point de vue bilan carbone,
 - la liquéfaction bien que plus énergivore que l'injection directe est légèrement plus intéressante car elle permet de récupérer du CH₄ et de valoriser plus de CO₂.
 - Revenu en tCO₂_{évitées}/MWh_{P_{CS}}, les scénarios STEP sont moins performants du fait d'un flux de biogaz plus riche en CH₄
 - La valorisation par production de microalgues, notamment à destination de l'alimentation humaine, ressort avec le meilleur résultat selon les hypothèses de l'étude
 - Il apparaît cependant compliqué de mettre l'ensemble des solutions de valorisation du CO₂ sur un pied d'égalité (définition des frontières subjectives, bilan sur substitution du CO₂ industriel vs substitution d'un produit final)

Merci de votre attention !



Matthieu METAYER

Chef de projet

metayer@sol3d.com

07 56 97 14 18



Erwan LEBOUCHER

Chargé d'études

leboucher@sol3d.com

06 07 50 59 37



L'énergie des déchets

www.sol3d.com

GROUPE KERAN

S3d Ingénierie

4 rue Viviani

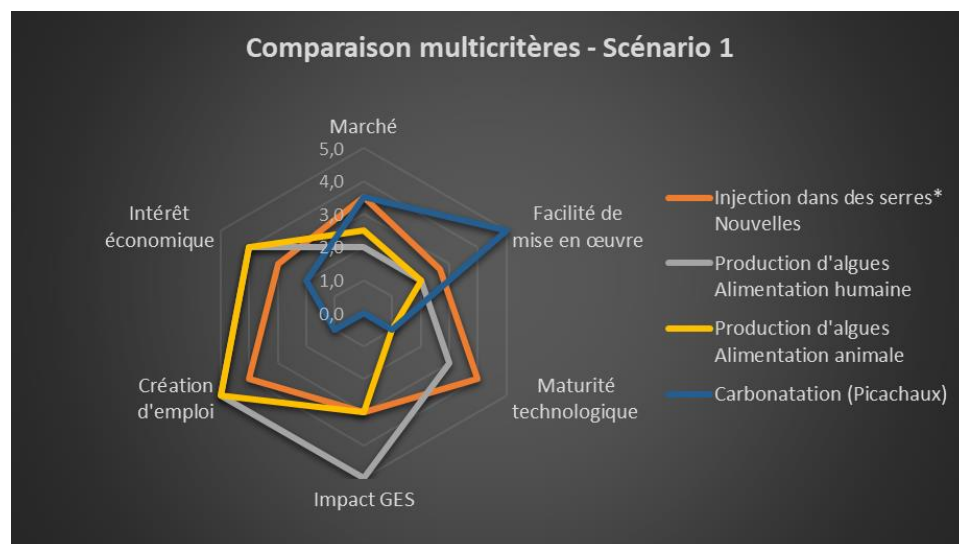
44200 Nantes

Analyse multicritères – Scénario 1 – Aujourd’hui

		Injection dans des serres*		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 1	Marché	2,0	3,5	2,0	2,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,0	2,0	5,0	2,7
	Maturité technologique	4	4	3	1	1	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	0	3	4	4	2	0
	Note finale	Pas adapté	3,4	3,5	2,9	2,5	Pas adapté

► Méthaniseur de 40 Nm³/h_{bioCH₄} pas adapté pour :

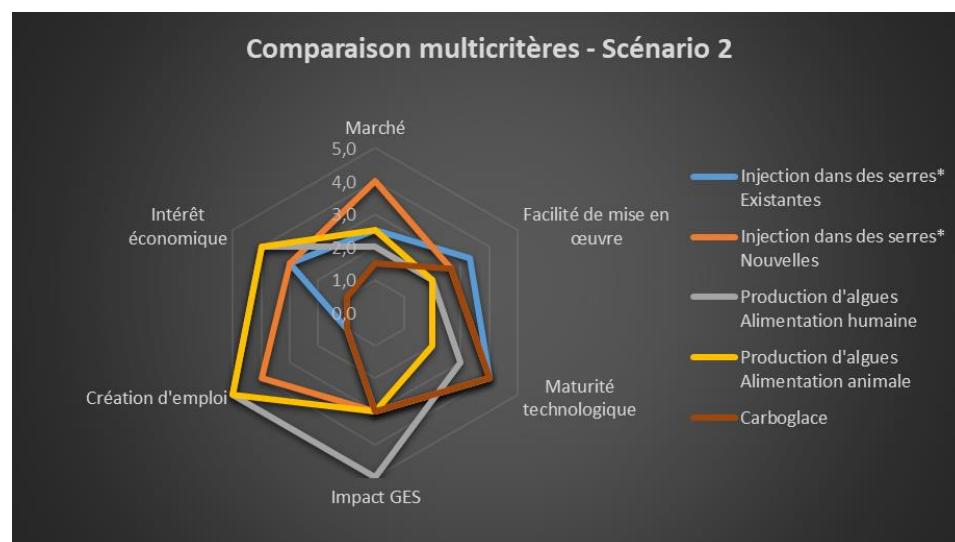
- Application liquéfiée (serres existantes et carboglace) car prix de revient trop élevé
- Production d'algues (alim. Animale) : L'absence d'intérêt économique réside dans le coût de production de l'algues et non du prix de vente du CO₂ (100 €/t serait acceptable)



Analyse multicritères – Scénario 2 – Aujourd’hui

		Injection dans des serres		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 2	Marché	2,5	4,0	2,0	2,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,0	2,0	4,3	2,7
	Maturité technologique	4	4	3	2	1	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	1
	Note finale	2,8	3,4	3,5	3,1	Pas adapté	2,2

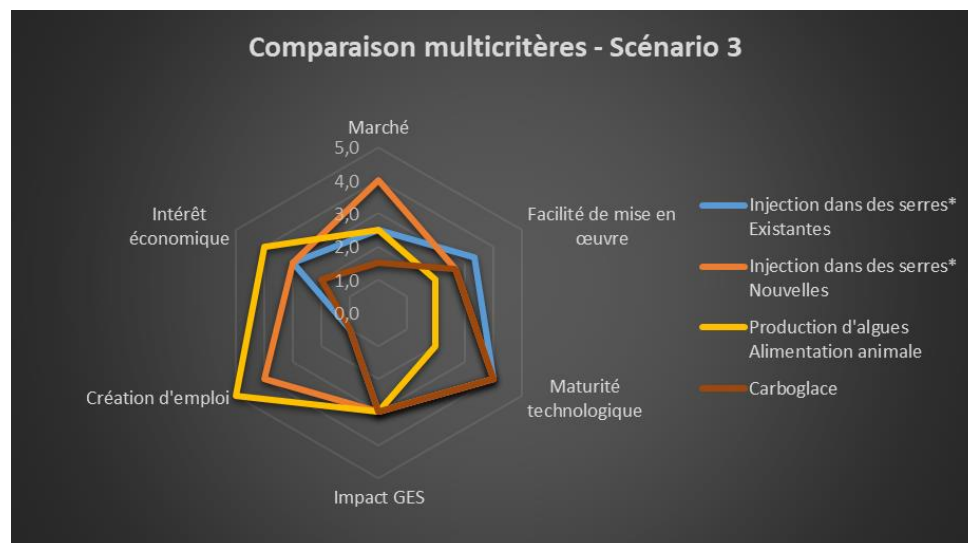
- La solution Picachaux présente un TRI similaire à celui d'un épurateur classique → pas d'intérêt dans le cadre de la valorisation du CO₂



Analyse multicritères – Scénario 3 – Aujourd’hui

		Injection dans des serres		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 3	Marché	2,5	4,0	0,0	2,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,0	2,0	4,0	2,7
	Maturité technologique	4	4	3	2	1	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	2
	Note finale	2,8	3,4	Pas adapté	3,1	Pas adapté	2,4

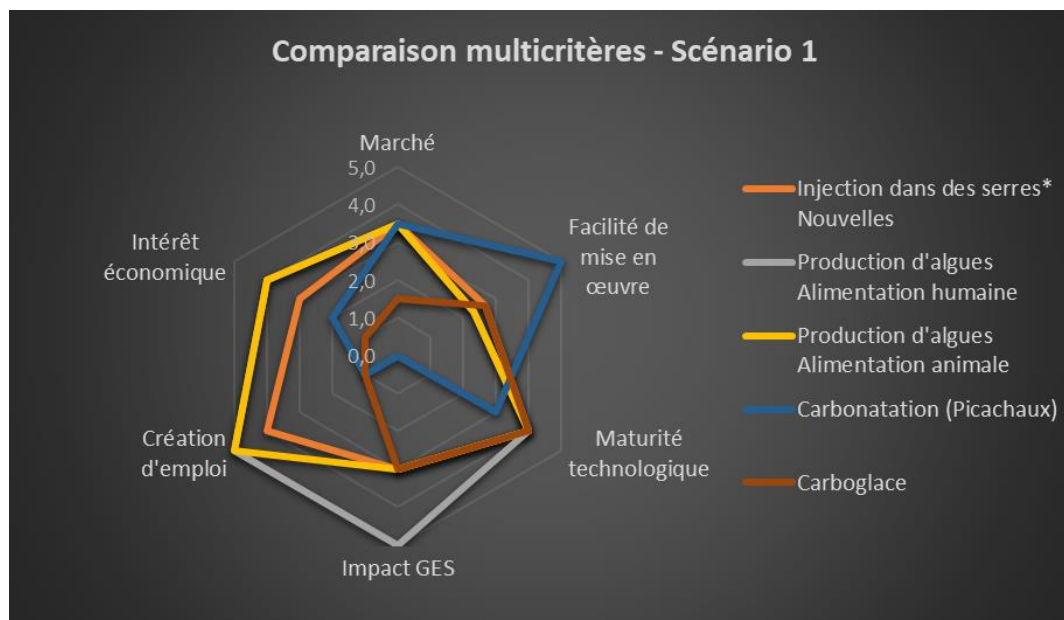
- Saturation rapide du marché spiruline si pas de développement de celui-ci



Phase 4 : Comparaison des solutions

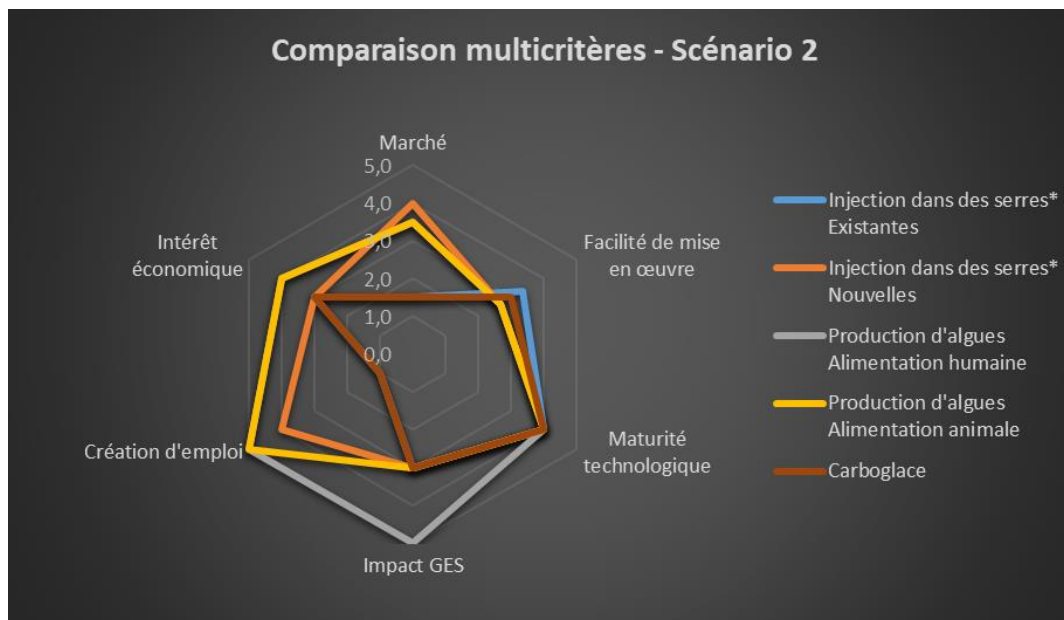
Analyse multicritères – Scénario 1 – 2030

		Injection dans des serres*		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 1	Marché	1,0	3,5	3,5	3,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,3	2,3	5,0	2,7
	Maturité technologique	4	4	4	4	3	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	1	3	4	4	2	1
	Note finale	2,2	3,4	4,0	3,6	2,9	2,2



Analyse multicritères – Scénario 2 – 2030

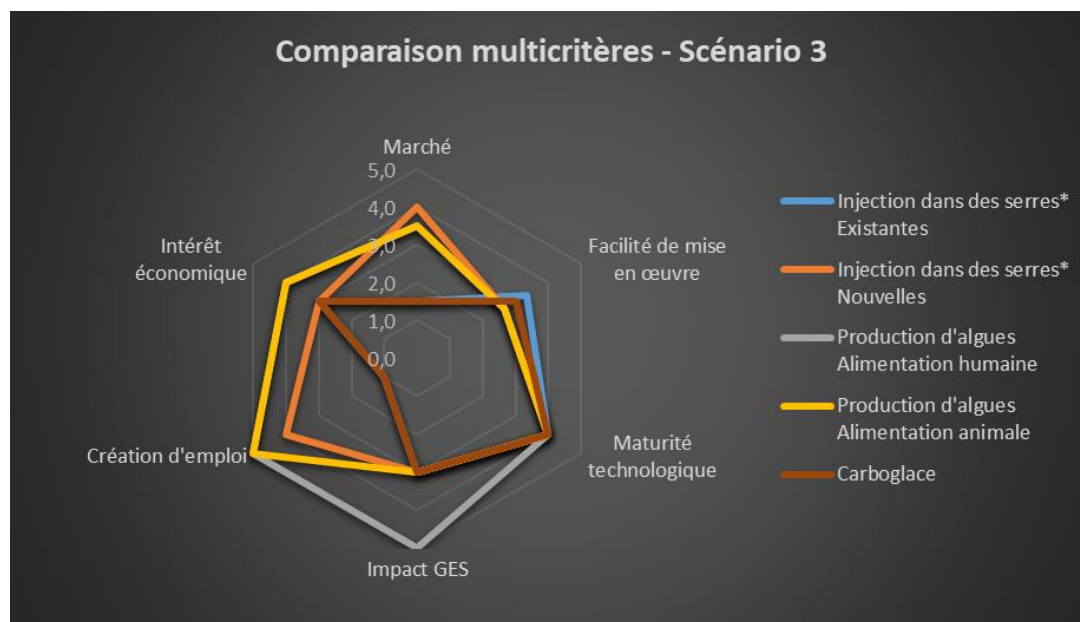
		Injection dans des serres		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
		Scénario 2	Marché	1,5	4,0		
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,7	2,7	4,3	3,0
	Maturité technologique	4	4	4	4	3	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	3
	Note finale	2,6	3,4	4,0	3,7	Pas adapté	2,6



Phase 4 : Comparaison des solutions

Analyse multicritères – Scénario 3 – 2030

		Injection dans des serres		Production d'algues		Carbonatation (Picachaux)	Carboglace
		Existantes	Nouvelles	Alimentation humaine	Alimentation animale		
Scénario 3	Marché	1,5	4,0	3,5	3,5	3,5	1,5
	Facilité de mise en œuvre	3,3	2,7	2,7	2,7	4,0	3,0
	Maturité technologique	4	4	4	4	3	4
	Impact GES	3	3	5	3	NC	3
	Création d'emploi	1	4	5	5	1	1
	Intérêt économique	3	3	4	4	0	3
	Note finale	2,6	3,4	4,0	3,7	Pas adapté	2,6



Listing des entreprises contactées