GUIDE 2026

Nouveaux Systèmes Énergétiques
Comité stratégique de filière

ctbm
CENTRE TECHNIQUE NATIONAL DU BIOGAZ ET DE LA MÉTHANISATION

atee Club Biogaz
ASSOCIATION TECHNIQUE ENERGIE ENVIRONNEMENT

POUR RÉALISER UN PROJET DE **VALORISATION DU CO_2 BIOGÉNIQUE** ISSU DE MÉTHANISATION



CONTRIBUTIONS & REMERCIEMENTS

Le Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation (CTBM)[1] de l'Association Technique Energie Environnement (ATEE) anime le réseau recherche et innovation de la filière. Il pilote des groupes de travail sur des thématiques techniques et organise les Journées Recherche Innovation biogaz méthanisation et d'autres événements de diffusion des connaissances.

Le Club Biogaz de l'ATEE[2] rassemble les principaux acteurs français concernés par le biogaz et la méthanisation. Début 2025, il compte plus de 300 structures adhérentes (personnes morales). Son objectif est de promouvoir le développement des différentes filières de production et de valorisation.

Le Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Énergétiques (CSF NSE)[3] est l'interface entre l'État et les acteurs des nouvelles industries de la transition énergétique. Il est organisé en groupes de travail (GT) dont des GT filières (solaire, éolien, biogaz…) et des GT transverses (contenu local, recherche…). Le GT Biogaz représente la filière des gaz renouvelables et notamment de la méthanisation au sein du CSF NSE. Au sein des travaux du GT Biogaz, le sous-groupe de travail Industrialisation – Compétitivité vise à accélérer l'industrialisation et la performance économique de la filière.

PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS :

GRDF[4] **|** Expertise, données et relecture

CARBONE & ENERGIES[5] **|** Construction et rédaction du guide

CAPCOO[6] **|** Expertise marché, retours terrain et données



[1] CTBM | ATEE- www.atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/ctbm

[2] Club Biogaz | ATEE – www.atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz

[3] Nouveaux systèmes énergétiques – Faire de la transition énergétique un levier de réindustrialisation - www.systemesenergetiques.org

[4] GRDF : le réseau de distribution de gaz en France | GRDF.FR - www.grdf.fr

[5] Carbone & Energies - https://www.linkedin.com/company/carboneetenergies/

[6] CAPCOO | Collectif d'agriculteurs méthaniseurs - https://www.capcoo.fr/



SOMMAIRE

CODE COULEUR DES MODIFICATIONS DU GUIDE 2023

- Mises à jour mineures
- Mises à jour majeures
- Ajouts

AVANT-PROPOS 04

INTRODUCTION 06

SECTION I - GUIDE DU PRODUCTEUR 10

SECTION II - COMPLÉMENTS THÉMATIQUES 28

1 LES APPLICATIONS À FORT POTENTIEL 29

1. Voies conventionnelles de valorisation du CO_2
2. Voies innovantes et en devenir de valorisation du CO_2

2 VALORISER DU CO_2, COÛTS ET ENJEUX 40

1. Procédé de liquéfaction du CO_2
2. Transport routier du CO_2 liquide
3. Usages directs par canalisation
4. Qualité alimentaire du CO_2
5. Intérêts et attentes des consommateurs de CO_2

3 ASPECTS ÉCONOMIQUES D'UN PROJET 68

4 ÉTUDES DE CAS 72

1. Fiches fictives
2. Témoignages

5 RESSOURCES COMPLÉMENTAIRES 83

6 GLOSSAIRE ET ANNEXES 85



AVANT-PROPOS

CONTEXTE ET ACTIONS

En faveur de la valorisation du CO_2 biogénique de méthanisation

Un guide technique Valorisation du CO_2 de méthanisation[7] est paru en mai 2020, porté par le Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation (CTBM) du Club Biogaz de l'Association Technique Énergie Environnement (ATEE). Ce guide a permis de faire émerger un socle commun de concepts et d'informations sur la possibilité de valoriser le CO_2 et reste une porte d'entrée incontournable pour s'initier au sujet.

Un second guide[8] paru en mai 2023, porté par le CTBM et le Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Energétiques (CSF NSE), avec le soutien de GRDF, avait pour objectif de formaliser les informations, questions, retours d'expériences et données collectés par certains acteurs de la filière afin de les mettre à disposition des producteurs de biométhane et contribuer ainsi à l'accélération du déploiement des projets et à la prise en compte des opportunités et contraintes.

Ce nouveau guide est une mise à jour du précédent qui enrichit les thématiques abordées avec de nouveaux éléments et qui en intègre de nouvelles.

[7] Guide technique de valorisation du CO_2 de méthanisation, CTBM – ATEE, Mai 2020

[8] Guide pour réaliser un projet de valorisation du bioCO_2 issu de méthanisation , CSF NSE et CTBM, Mai 2023

CE GUIDE VISE À APPUYER LA STRUCTURATION ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE EN :

- Aidant les exploitants d'unité de méthanisation en injection à appréhender et anticiper les différentes étapes de développement d'un projet de valorisation du CO_2 biogénique de méthanisation ;
- Faisant connaitre les enjeux de la valorisation du CO_2 biogénique issu de méthanisation pour en faciliter la diffusion auprès des consommateurs, des fournisseurs de matériels et des financeurs, et pour inspirer de nouveaux producteurs.

NOUS PROPOSONS DEUX PARCOURS LECTEURS

Les producteurs et futurs producteurs de biométhane pourront se reporter au « Guide du producteur » (page 10), pour découvrir les grandes étapes d'un projet de valorisation de CO_2 biogénique, ainsi qu'aux « Etudes de cas » (page 72).

L'ensemble des lecteurs pourra se référer à la section « Compléments thématiques » (page 28) qui permet d'apporter des précisions sur les points clés d'un projet de valorisation du CO_2 biogénique issu de méthanisation.

NOTA BENE - AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ

Un projet de valorisation du CO_2 biogénique issu de méthanisation est complexe et nécessite un fort accompagnement. Les informations proposées ici présentent un retour d'expérience sur la filière et sur certains projets portant sur la valorisation du CO_2 biogénique. Elles visent à sensibiliser le lecteur aux questions à se poser pour développer un projet de valorisation de CO_2 biogénique. Ce guide n'a pas vocation à remplacer une étude technico-économique adaptée à un projet spécifique et il est fortement recommandé de passer par des bureaux d'études, fournisseurs et autres Assistants à Maitrise d'Ouvrage (AMO) pour mener à bien son projet. Compte tenu de la dynamique du secteur, il est possible que les informations présentées dans ce guide (prix, références, voies de valorisation, contraintes règlementaires) ne soient pas extrapolables à tous les contextes et qu'elles deviennent obsolètes. Au moment de lancer son projet, il est donc recommandé de se renseigner et de s'entourer de ressources compétentes.



LA DÉFINITION

« Le CO_2 biogénique est issu du carbone contenu dans la biomasse d'origine agricole ou forestière, émis lors de sa combustion ou dégradation, ainsi que celui contenu dans la matière organique du sol. »
(Source : Base Carbone de l'ADEME)

INTRODUCTION

LE MARCHÉ ACTUEL DU CO_2

En France, le marché du CO_2 liquéfié représente environ 500 000 tonnes (500 kt) et plus de 50 usages, principalement dans l'industrie agroalimentaire (IAA) - conservation, surgélation, carbonatation, serres agricoles - et la production de glace carbonique.

DU CÔTÉ DE LA PRODUCTION,

Le CO_2 purifié, conditionné et distribué provient de quelques grands sites. Il est capté sur les sites de production d'ammoniac, de vaporeformage du gaz naturel et de production de bioéthanol. Certaines de ces sources sont parfois soumises à des contraintes économiques et techniques (augmentation du prix de l'énergie liée aux tensions géopolitiques, multiplication des opérations de maintenance sur certaines installations vieillissantes, évolution du parc de production pour remplacer les énergies fossiles).

DU CÔTÉ DE LA CONSOMMATION,

La demande est variable au cours de l'année notamment avec un pic durant l'été, principalement causé par une hausse de production des boissons rafraichissantes et de glaces carboniques, ainsi que d'un besoin d'apport en CO_2 supplémentaire pour les serres agricoles.

Marché actuel du CO_2 marchand en France[9]

Capacités de production destinée à un usage marchand [10]

(hors production pour autoconsommation)

~800 – 1 000 ktCO_2/an

- Vaporeformage **20-25 %**
- Production Bioéthanol **45-50 %**
- Production Ammoniac **20-25 %**
- Méthanisation **5-10 %**[11]

Collecte et transport

Demande actuelle

~500-800 ktCO_2/an

- **~70 %** Serres agricoles/IAA
- **~30 %** Autres

[9] Source : Résumé public de l'étude concernant les marchés de valorisation du CO_2, Club CO_2, Juillet 2025

[10] À noter que seule la capacité de production de CO_2 destiné à un usage marchand est considérée ici. On estime qu'entre 20 et 25 % supplémentaires de CO_2 non marchand sont autoconsommés dans la production d'engrais.

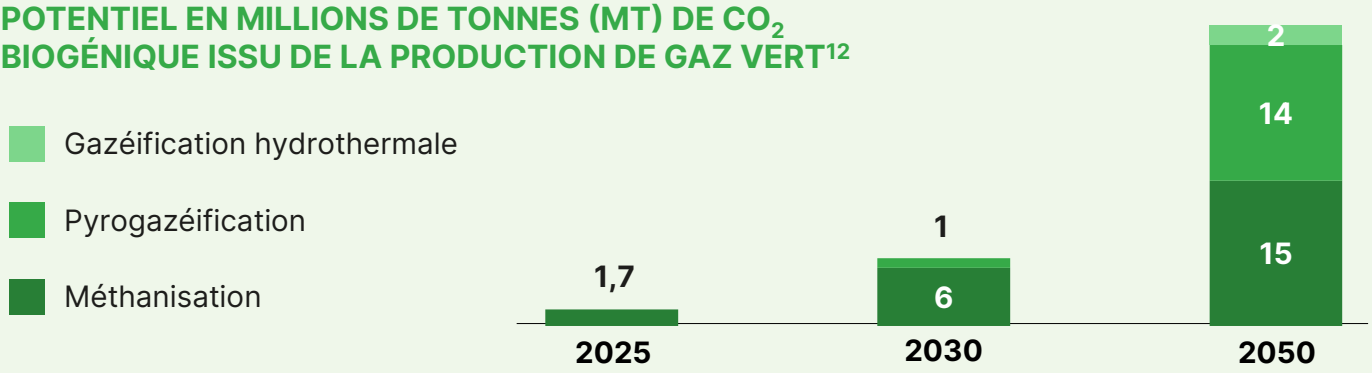
[11] Source : ATEE, Janvier 2026

LE MARCHÉ FUTUR DU CO_2

Le marché du CO_2, jusqu'alors dimensionné pour répondre à des usages conventionnels, est en pleine évolution dans le cadre des objectifs climatiques et de souveraineté énergétique. De nouvelles voies de valorisation apparaissent telles que la production de carburants synthétiques bas carbone ou la séquestration technologique du CO_2.

Parmi l'ensemble des sources de CO_2 mobilisables, la production de gaz vert, incluant la méthanisation, la pyrogazéification et la gazéification hydrothermale, pourrait répondre à une grande partie de la demande.

POTENTIEL EN MILLIONS DE TONNES (MT) DE CO_2 BIOGÉNIQUE ISSU DE LA PRODUCTION DE GAZ VERT[12]



POTENTIELLES SOURCES DE CAPTURE

Sources émettrices

- Reformage CH_4
- Ammoniac
- Bioéthanol
- Prod gaz vert
- Bioraffinerie
- Ciment et chaux
- Papier/Carton
- Electricité
- Déchets
- Chaleur/vapeur
- DAC[13]

Collecte et transport

DEMANDE FUTURE

Estimation des besoins[12]

2030 : 2-5 Mt CO_2/an
2050 : 15-30 Mt CO_2/an

Usages historiques

Serres
IAA
Autres

Usages futurs

E-fuels
E-chemicals
Méthanation

Séquestration

Stockage géologique
Minéralisation

[12] Source : Étude du Captage, Stockage et Utilisation du CO_2 biogénique en France, Club CO_2, 2024

[13] DAC : Direct Air Capture

LE CO_2 BIOGÉNIQUE : UN COPRODUIT DE LA MÉTHANISATION

La méthanisation produit du biogaz, un mélange de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). Dans le cadre des unités d'injection, si le méthane est séparé pour être injecté dans les réseaux, le CO_2 se retrouve disponible à l'évent, fortement concentré. Il existe plusieurs moyens de valoriser ce CO_2 présent dans l'off-gaz[14] :

- Le liquéfier et le purifier pour le transporter et le valoriser tel quel chez des utilisateurs. C'est la voie la plus mature, avec de nombreuses réalisations en Europe.
- Le transporter par canalisation : cette voie prometteuse nécessite des aménagements réglementaires (en cours) et l'existence de consommateurs ou le développement d'une solution mutualisée de liquéfaction à proximité.
- Le transformer et le valoriser sur place via la transformation chimique (méthane, méthanol, kérosène), la minéralisation et le stockage. De nombreuses solutions sont en développement, parfois avec des maturités technologiques élevées, mais de nombreux freins de marché existent. À long terme, cette voie pourrait surpasser en volume les autres voies de valorisation.

LE CO_2 BIOGÉNIQUE DE MÉTHANISATION DISPOSE DE NOMBREUX ATOUTS

Les sites de méthanisation ont donc l'opportunité d'accéder à ce marché en se positionnant comme producteurs de CO_2 pouvant approvisionner toute l'année un écosystème local de consommateurs :

- Production stable et régulière (peu de saisonnalité), à coût maitrisé ;
- Production locale, de proximité ;
- Production décentralisée dans les territoires, avec de nombreux sites à travers la France qui garantissent une diversité des sources d'approvisionnement ;
- Concentration élevée à l'évent de l'épurateur (95 à 99 %)[15] ;
- CO_2 biogénique neutre pour l'environnement.

[14] Off-gaz de méthanisation : gaz résiduel rejeté par les systèmes de traitement du biogaz, composé principalement de CO_2, d'impuretés et parfois de méthane résiduel.

[15] D'après retour terrain

VALORISER LE CO_2 BIOGÉNIQUE DE MÉTHANISATION C'EST :



Développer l'économie circulaire dans les territoires

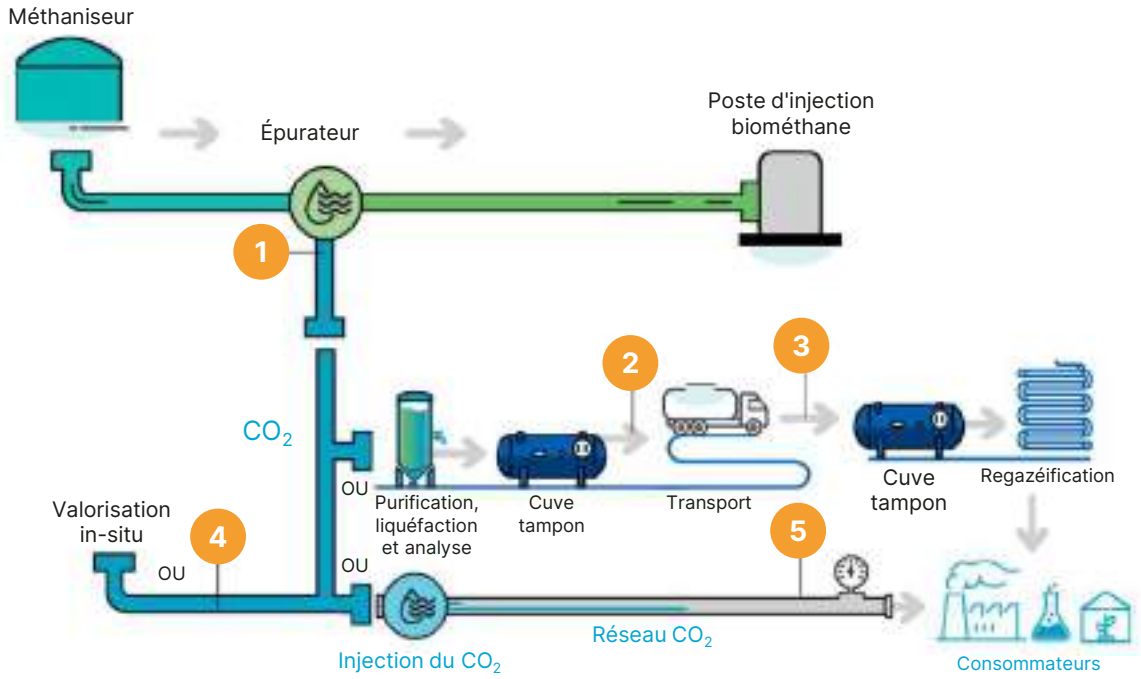


Réduire les émissions de gaz à effet de serre



Augmenter les revenus des producteurs de biométhane

DIFFÉRENTES OPTIONS POUR VALORISER SON CO_2



1 Vente de l'off-gaz à un tiers qui s'occupe du traitement et du transport de CO_2

2 Vente du CO_2 liquéfié à un tiers qui s'occupe du transport

3 Vente du CO_2 liquéfié directement à un consommateur équipé de cuves de réception

4 Valorisation *in situ*

5 Vente du CO_2 traité à un consommateur via un réseau

POURQUOI SE LANCER DANS LA VALORISATION DE CO_2 BIOGÉNIQUE ?

- Améliorer la performance technique et environnementale de son unité de méthanisation en récupérant le CH_4 présent dans les off-gaz pour l'injecter dans le réseau ;
- Diversifier ses sources de revenus par la vente de CO_2 ;
- Accentuer son ancrage territorial en renforçant son rôle d'acteur de l'économie circulaire.

SECTION 1

GUIDE DU PRODUCTEUR

Quelles sont les huit étapes à suivre pour développer votre projet de valorisation du CO_2 biogénique issu de méthanisation ? Comment évaluer votre potentiel et comment trouver des débouchés adéquats ?

Cette section vous permettra de développer un projet sur mesure, adapté à votre potentiel, et de n'oublier aucune étape clé.



GUIDE DU PRODUCTEUR

Pour optimiser la durée du projet, certaines étapes peuvent se faire en parallèle, comme présenté dans « Agenda typique d'un projet de liquéfaction de CO_2 » (page 27).



VOTRE PROJET PAS À PAS

Indicateurs	500 - 5 000€	5 000 - 15 000€	50 000 - 100 000€	Quelques semaines	Quelques mois

1 CONNAITRE SON POTENTIEL

Simplifié : 100 Nm^3/h de biométhane injecté ↔ 1 000 t/an de CO_2 liquide

Détaillé : calcul complet, à croiser avec celui de l'(ou des) équipementier(s) (étape 6) et à faire confirmer par un bureau d'études ou expert indépendant, l'objectif étant de partir d'un potentiel réel avant toute approche de plan d'affaires.

2 DÉFINIR SON RÔLE

- Mettre à disposition l'off-gaz
- Investir (liquéfacteur, citerne)
- Organiser le transport (du CO_2)
- Opérer un réseau

Le niveau de risque idéal dépend de la bonne maitrise des sujets et de l'appétit des porteurs de projet. Tout au long des étapes qui suivent, le rôle pourra ou devra s'adapter en fonction des partenaires et des enjeux du projet.

3 IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

- Lister les principaux débouchés (consommation, qualité, localisation, saisonnalité)
- Prospecter pour trouver de futurs clients

Go/no go

4 REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

Avant d'engager une étude de faisabilité technico-économique, passer en revue les paramètres clés pour vérifier la faisabilité du projet et éviter les principaux écueils.

- Foncier disponible
- Clients prêts à s'engager
- Cas de production d'un CO_2 de qualité alimentaire : étude de faisabilité alimentaire
- ...

Go/no go

5 MISE EN PLACE DE L'HACCP (cas du CO_2 alimentaire)

Mettre en place une démarche HACCP[16] pour déterminer :

- Un plan de surveillance
- Une stratégie d'analyses
- Des mesures correctives

6 RÉALISER UNE ÉTUDE DE FAISABILITÉ

Elle permet notamment de détailler le plan d'affaires (CAPEX, OPEX, rentabilité).

Go/no go

7 CONSULTATIONS ET NÉGOCIATIONS

- Consulter les fournisseurs et comparer les offres
- Négocier les contrats de construction et de fourniture d'équipements
- Négocier les contrats avec les clients

8 OBTENIR LES AUTORISATIONS

- Un permis de construire et/ou une déclaration de travaux peuvent être nécessaires ; Informer également la DREAL (via un « porter à connaissance »)
- Pour les débouchés « alimentaires », un dossier sanitaire est nécessaire

9 DOSSIER DE FINANCEMENT

Pour finaliser le projet, il vous faudra :

- Évaluer les besoins financiers
- Identifier les risques et y répondre
- Rechercher des subventions
- Finaliser le tour de table

DÉMARRAGE DE LA CONSTRUCTION.... LE PROJET EST LANCÉ



[16] Hazard Analysis Critical Control Point ; méthode qui permet de prévenir et d'identifier les dangers liés aux pratiques d'hygiène alimentaire

COMPRENDRE CHAQUE ÉTAPE

1 CONNAITRE SON POTENTIEL

On peut estimer très simplement, mais de manière approximative, le potentiel de production de CO_2 avec la règle suivante : une unité de biométhane de 100 Nm^3/h produit environ 1 000 tCO_2/an liquide.

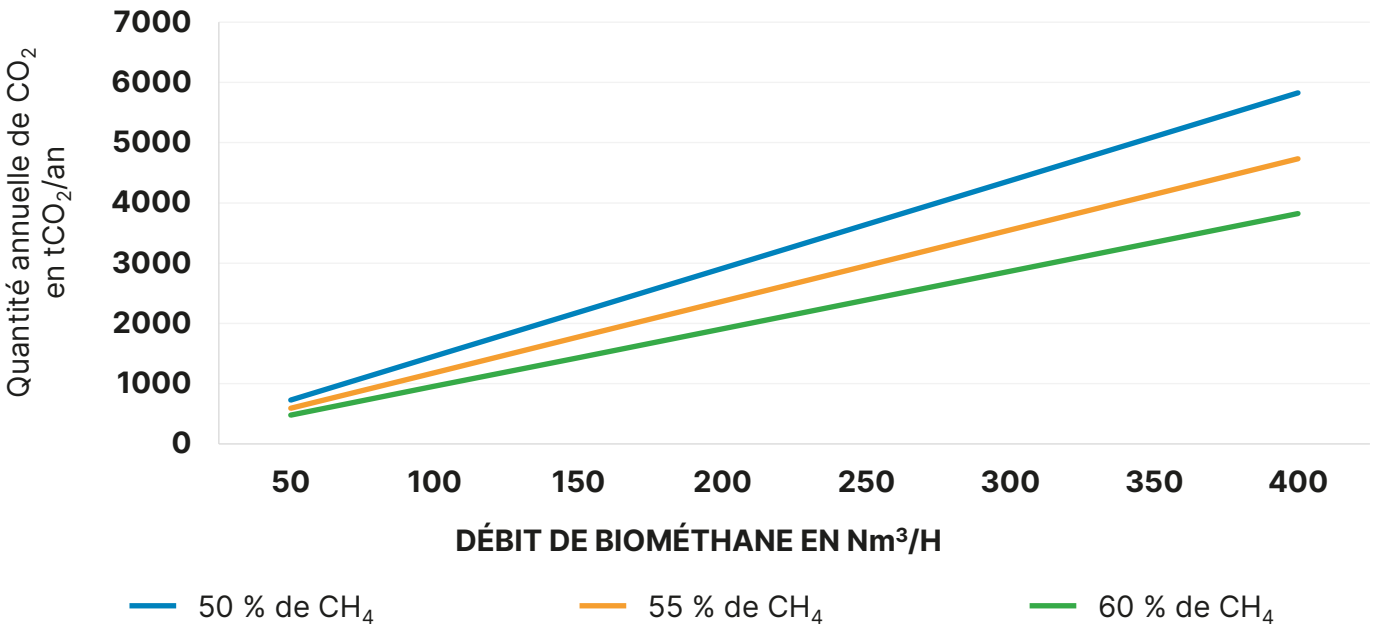
Une approche plus complète consiste à prendre en compte l'ensemble des paramètres, dont notamment :

- Le taux de méthane dans le biogaz : 45-65 %.
- Le taux des molécules autres que le CO_2 et le CH_4 dans l'off-gaz.
- Le rendement de l'épurateur.
- Le rendement carbone : dans un liquéfacteur, une partie du CO_2 n'est pas liquéfié et part à l'évent. Le rendement carbone permet de définir la part de CO_2 que l'on liquéfie sur la part de CO_2 disponible. Ce rendement carbone est généralement de l'ordre de 90 % à 95 % et ne doit donc pas être oublié. Il augmente toutefois si les gaz d'évent du liquéfacteur sont recirculés dans l'épurateur.
- La taille type des machines de liquéfaction (300, 400, 500, 600… $kgCO_2/h$). Par exemple : pour valoriser 310 kg/h, il n'est pas forcément nécessaire de surinvestir dans un liquéfacteur de 400 $kgCO_2/h$. (La notion de palier de production est clarifiée dans la partie « Procédé de liquéfaction du CO_2 », page 40).
- Le taux de disponibilité de l'installation, qui représente les temps d'arrêt de l'installation, notamment pour des raisons de maintenance : 94-98 %.

À NOTER | Le potentiel de production de CO_2 d'une unité n'est pas toujours entièrement valorisable sur le marché.

L'ABAQUE CI-DESSOUS DONNE RAPIDEMENT LE TONNAGE ATTENDU EN FONCTION DU TAUX DE MÉTHANE DANS LE BIOGAZ

Estimation de la quantité de CO_2 liquéfié, en fonction du débit de biométhane injecté en Nm^3/h et du taux de CH_4 dans le biogaz (plage 50-400 Nm^3/h). (voir en Annexe 1 page 87 , pour une plage plus grande de débit de biométhane).



Les hypothèses considérées pour cet abaque sont notamment : un rendement carbone de 92 % et un taux de disponibilité de 97 % (soit environ 8500 heures). On peut également réaliser soi-même le calcul détaillé avec quelques hypothèses, via les formules en Annexe 5, page 91.

Enfin, il est recommandé d'exiger des fournisseurs de matériels la fourniture d'un engagement de performance de leur installation (capacité de production, consommation énergétique, maintenance…) et les conditions de ces garanties (en particulier, la composition des off-gaz). Si cette information n'est pas disponible en début de discussion, il est très fortement conseillé de l'avoir dans la version finalisée de l'offre du fournisseur retenu.

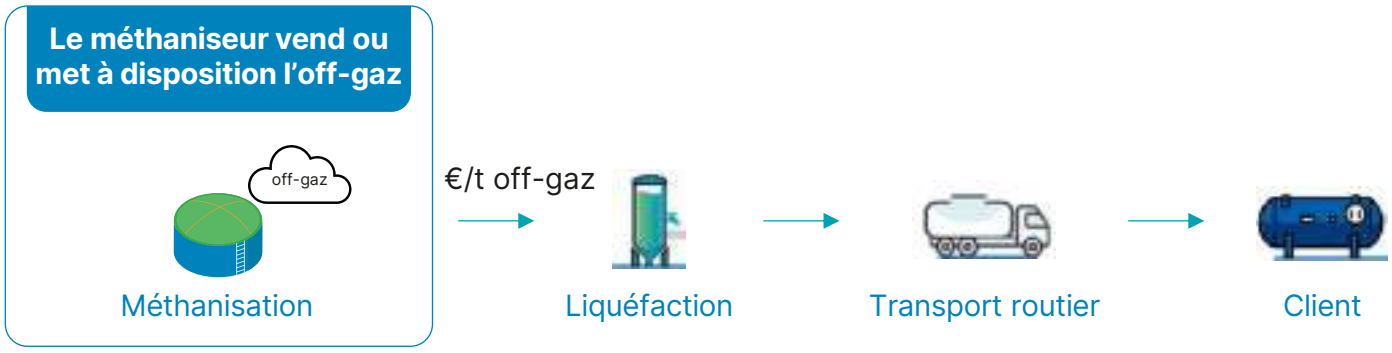
2 DÉFINIR SON RÔLE

IL EXISTE PLUSIEURS RÔLES POSSIBLES POUR UN PORTEUR DE PROJET, AVEC DIFFÉRENTS NIVEAUX DE COMPLEXITÉ.

1. PARTENARIAT AVEC UN TIERS-INVESTISSEUR

Le premier rôle consiste à mettre l'off-gaz à la disposition d'un tiers. Un contrat peut être discuté mettant en avant, d'une part, le prix de l'off-gaz et, d'autre part, les obligations de chacun (par exemple, qui se charge d'exploiter l'unité ?).

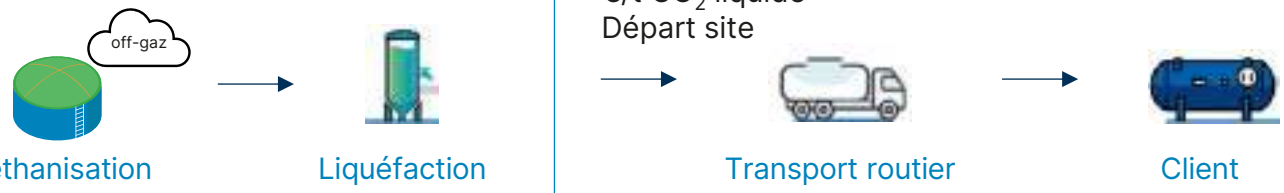
Des synergies peuvent également être trouvées pour la conduite des installations ou encore la mise à disposition de terrains ; différentes configurations existent. Si cette option minimise les risques, elle limite aussi la part de la valeur rétrocédée au producteur.



2. PORTER L'INVESTISSEMENT

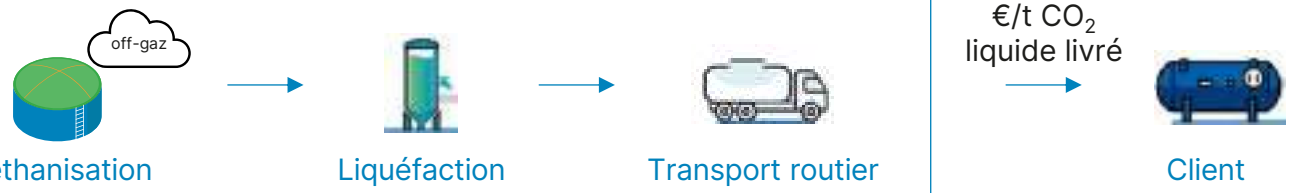
Il est aussi possible de s'intéresser uniquement à la construction d'un liquéfacteur de CO_2 et de vendre le CO_2 au départ site. Dans ce cas-là, on porte l'investissement dans une machine de plusieurs centaines de milliers d'euros et on supporte les risques de marchés (débouchés du CO_2, variation du prix de l'électricité) ou de fonctionnement (maintenance, etc.). On conserve toutefois son indépendance et la rentabilité peut être plus forte, surtout si le projet dispose d'atouts comme une bonne localisation. Un intermédiaire ou le client peut se charger de la commercialisation du CO_2 et du transport.

Le méthaniseur investit dans une unité de liquéfaction et vend le CO_2 départ site



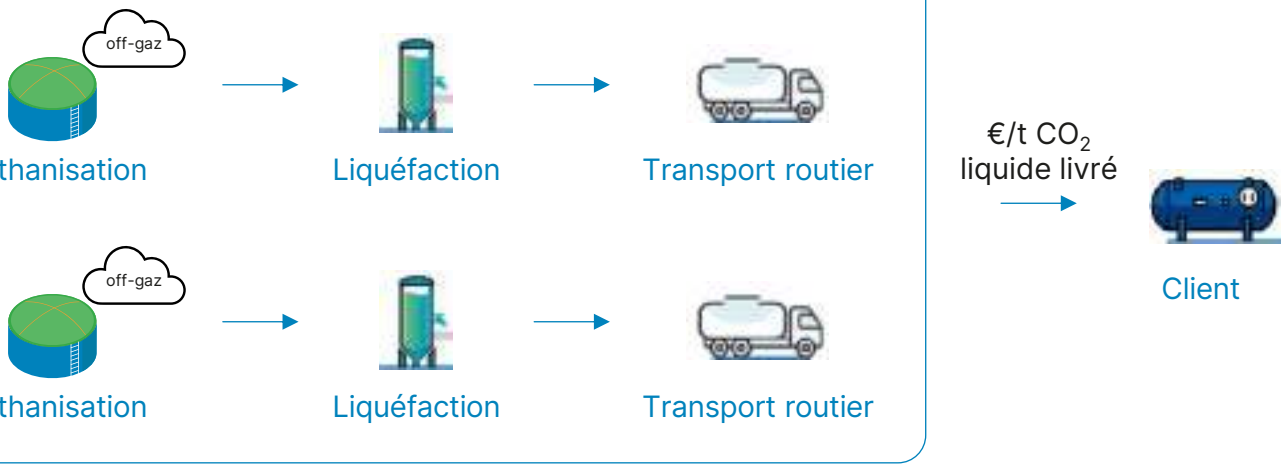
Par extension, on peut aussi organiser la livraison du CO_2, par exemple à quelques clients qui ont des contrats d'approvisionnement réguliers. Il n'est pas nécessaire d'avoir son propre chauffeur et son propre camion[17], ni même sa propre citerne, puisque des entreprises spécialisées proposent ce service. Néanmoins, on peut décider d'investir dans une citerne (jusqu'à environ 200 000 € pour une citerne neuve de grande capacité avec ses accessoires) et la faire tracter par un tiers.

Le méthaniseur investit dans une unité de liquéfaction, gère le transport et vend le CO_2 au prix livré



Il est également possible d'intervenir sur un plus large périmètre, en coordonnant une flotte de camions, voire de liquéfacteurs, en investissant avec ou chez les autres. C'est une activité nécessairement plus risquée et qui va demander des compétences spécialisées et dont la rentabilité peut être affectée par de nombreux facteurs.

Investissement dans plusieurs liquéfacteurs et gestion d'une flotte de camions



[17] Le transport de CO_2 nécessite des qualifications et est soumis à la règlementation ADR (transport de matières dangereuses)

3. VALORISATION DIRECTE PAR CANALISATION OU SUR SITE

Il convient également de mentionner les valorisations directes par canalisation ou sur site, pour lesquelles des opportunités peuvent exister. Compte tenu de la maturité technique ou du marché de ces solutions, une bonne connaissance du sujet est un prérequis pour un porteur de projet qui voudrait investir et exploiter.

3 IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Identifier les débouchés constitue un des points majeurs d'un projet de valorisation du CO_2. Les porteurs de projets devront être particulièrement vigilants sur ces aspects.

IL EXISTE PLUSIEURS VOIES DE VALORISATION

A L'ACCÈS DIRECT AUX CLIENTS FINAUX

Les retours d'expérience des projets existants ont montré qu'il est préférable pour un méthaniseur de cibler des clients à proximité, notamment pour les raisons suivantes :

1. Établir des relations commerciales durables avec des partenaires locaux. A certaines périodes de l'année, notamment lorsque la demande en CO_2 est élevée, les consommateurs peuvent faire face à des difficultés d'approvisionnement, ainsi savoir qu'un producteur à proximité est en capacité de les approvisionner rapidement renforce leur intérêt.

2. Éviter le transport du CO_2 sur les longues distances pour limiter les coûts associés et les impacts environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, pollution atmosphérique).

3. S'appuyer sur l'image du CO_2 produit localement, vendu en circuit court. Des retours d'expérience ont montré que valoriser le CO_2 au lieu de le rejeter dans l'atmosphère est vu positivement par les acteurs locaux (citoyens, industriels, pouvoirs publics...).

Il existe différentes façons de rechercher des consommateurs de CO_2 à proximité de son exploitation

- Utiliser le tableau de débouchés permet de représenter rapidement le potentiel et les principaux paramètres (voir le Tableau récapitulatif des débouchés actuels du CO_2, page 34, de la partie « Voies conventionnelles de valorisation du CO_2 »).
- Cartographier les potentiels prospects.
- Participer à des événements locaux et nationaux (par exemple, des salons spécialisés) pour échanger avec des consommateurs de CO_2 et comprendre leurs besoins. Cela permet également de se constituer un carnet d'adresses.

- Rechercher par code NAF dans la base SIRENE peut être utile (par exemple, avec le code NAF 01.13Z : "Culture de légumes, de melons, de racines et de tubercules" pour identifier les maraichers), mais son utilisation est assez complexe. Il est possible de sous-traiter l'étude à un bureau d'études spécialisé.
- Utiliser des réseaux sociaux professionnels. Les acheteurs de grands groupes sont généralement sur les réseaux sociaux professionnels comme LinkedIn. Il existe des fonctionnalités de recherches avancées pour identifier des prospects. Vous pouvez les compléter avec des outils de prospection avancés (RocketReach, Kaspr, LinkedIn Sales Navigator...).
- Se renseigner sur les associations de consommateurs (France Boissons, FFMI, ANIA...).
- Contacter la Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI) de votre département : elle peut proposer des annuaires d'entreprises dans l'agroalimentaire, les cultures sous serres, d'autres applications industrielles ou le transport.

Une fois la base de contacts établie, il est nécessaire de collecter des informations pour identifier le besoin existant. Cela constitue une étape clé pour commencer à dimensionner le projet et réfléchir à son rôle.

Prospect	Type d'usage	Quantité annuelle	Format	Exigences qualité	Distance (km)	Prix d'achat départ site	Problématiques actuelles
Entreprise X	Serres	1000 tCO_2 /an Min : 30 t/mois Max : 200 t/mois	Liquide	Surveillée	100	100 €/t	Ruptures d'approvisionnement fréquentes
Entreprise Y	Carbonatation de bière	30 tCO_2 /mois	Liquide	ISBT[18]/EIGA[19] et certification alimentaire	60	120 €/t	Développer une image locale/circuit court
Entreprise Z	Glace carbonique		Liquide	EIGA/ISBT	30	110 €/t	Prix trop élevé
...							

N.B. : les prix indiqués sont des exemples

B DES SOCIÉTÉS INTERMÉDIAIRES SPÉCIALISÉES DANS LE TRANSPORT ET LE COMMERCE DU CO_2

Les premiers retours d'expérience des porteurs de projet ont montré qu'il peut être difficile de trouver des clients. La prospection et la sécurisation de débouchés est une étape indispensable avant d'investir dans un tel projet.

Pour faciliter la recherche de clients, il est possible de passer par une société intermédiaire spécialisée dans la commercialisation de CO_2.

[18] ISBT : International Society of Beverage Technologists

[19] EIGA : European Industrial Gas Association

AVANTAGES

- Vente du CO_2 aux bornes de l'installation
- Pas de prise en charge des aspects logistiques et des utilisateurs finaux
- Contrat potentiellement sécurisé sur le long terme
- Les risques liés aux marchés sont limités
- Maitrise de la situation concurrentielle

INCONVÉNIENTS ET POINTS D'ATTENTION :

- Intérêts parfois divergents de ces sociétés et des producteurs
- Partage de la valeur
- Exigences/contraintes contractuelles

4 REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

La revue des paramètres clés vise à valider rapidement que le projet a un potentiel de réalisation, notamment avant d'engager des frais d'étude. Les principaux points à valider sont les suivants :

01 AI-JE LA PLACE D'INSTALLER L'UNITÉ ET DE FAIRE LES AMÉNAGEMENTS DE VOIRIE ?

Le procédé de liquéfaction est composé de différents équipements qui nécessitent un emplacement dédié sur le site de méthanisation (un exemple de plan d'installation est présenté dans la partie « Valoriser du CO_2, coûts et enjeux » page 40).

En termes d'espace au sol, une unité de liquéfaction nécessite typiquement :

- Pour l'équipement principal : de 10 à 15 mètres de long et de 2,5 à 5 mètres de large, distances auxquelles il faut rajouter une bande de 1 mètre libre autour pour la maintenance. Si l'installation a besoin d'être dans un bâtiment, prévoir également une hauteur sous plafond suffisante pour la colonne de distillation.
- Pour les armoires de contrôle : de 2 à 3 mètres de long et 1 mètre de large.
- L'emplacement pour la(les) cuve(s) de stockage.
- Un poste de chargement pour transvaser le CO_2 liquide de la cuve au camion.
- Dans le cas d'une production de CO_2 alimentaire, un emplacement optionnel pouvant accueillir des appareils de mesure spécifiques. La taille dépend du type et du nombre d'équipements.
- Il est recommandé de prévoir des espaces supplémentaires pour des équipements éventuellement nécessaires pour les besoins du projet (par exemple, des équipements de traitement optionnels).
- Une voie d'accès pour les camions. Celle-ci doit prévoir une entrée et une sortie séparées. Le camion doit pouvoir circuler autour de l'installation tout en limitant les manœuvres. De manière générale, il est préférable d'avoir une voie d'accès en sens unique avec une entrée et une sortie de part et d'autre de l'unité, afin que le camion puisse entrer d'un côté et sortir de l'autre.

02 AI-JE LES COMPÉTENCES TECHNIQUES POUR OPÉRER UN PROCÉDÉ DE LIQUÉFACTION ?

Une installation industrielle de liquéfaction de CO_2 requiert des compétences techniques en génie chimique pour garantir son bon fonctionnement et intervenir en cas d'incident. Il est donc recommandé de disposer d'un opérateur qualifié dédié à la conduite de la chaîne de production. Cette exigence est particulièrement critique lorsque le CO_2 est destiné à un usage alimentaire, en raison des standards de qualité élevés (cf. partie « Qualité alimentaire du CO_2 », page 55). Le respect des conditions opératoires (pression, température, débit nominal, teneur en eau, état des filtres) doit être assuré par une surveillance et des ajustements réguliers, faute de quoi des lots peuvent rapidement être hors spécifications.

Par ailleurs, l'opérateur doit maîtriser les bonnes pratiques applicables aux installations de production destinées à l'industrie agroalimentaire, notamment en matière d'hygiène et de prévention des risques qui doivent être appliquées de manière rigoureuse.

Cela nécessite de vérifier :

- Si la personne qui opère le méthaniseur est compétente pour opérer également l'unité de production de CO_2 et si une formation est nécessaire pour monter en compétence.
- Si le recrutement d'un salarié supplémentaire s'avère nécessaire et si le site est en capacité de l'accueillir.

03 AI-JE BIEN DÉFINI LES MODALITÉS DE TRANSPORT ?

Le transport est un critère clé à bien évaluer avant de lancer son projet, car les dépenses associées représentent une part importante du coût de revient du CO_2.

Concernant le transport routier du CO_2 liquide, avant de simuler différents scénarios (internalisation complète, partielle ou externalisation totale) pour déterminer la meilleure option, il est recommandé de contacter les sociétés spécialisées en transport de gaz dangereux afin de comprendre leurs offres. Une fois que la localisation des potentiels clients a été identifiée, il est intéressant de demander plusieurs devis pour estimer les coûts.

Le choix de la meilleure option dépendra de différents paramètres du projet (organisationnels, financiers, etc.). Pour plus de détails, se référer à la partie « Transport routier du CO_2 liquide », page 48.

La collecte du CO_2 gazeux et le transport par canalisation peuvent également être envisagés (cf. partie « Usages directs par canalisation », page 53).

04 DES SUBVENTIONS EXISTENT-ELLES POUR MON PROJET ?

Des aides financières non remboursables, européennes, nationales ou régionales, destinées à soutenir des projets spécifiques peuvent être captées dans le cadre d'un projet de liquéfaction de CO_2. Les subventions peuvent concerner l'étude de faisabilité et la conception/réalisation du projet. Elles peuvent être accordées dans le cadre d'appels à projets avec des objectifs et des cahiers des charges bien définis.

- Consulter les sites des organismes de financement (Commission européenne, ADEME, BPI) afin de vérifier la publication récente de subventions pertinentes ;
- Contacter les services de l'Etat dans votre région, les services de la région, etc. ;

Le montant de la subvention varie d'un projet à un autre et peut être différent selon la taille et la nature de la structure qui porte le projet. Pour être octroyée, le projet doit répondre à des critères d'éligibilité et à des conditions d'utilisation précises, définis par l'organisme qui l'accorde. En général, une subvention est octroyée dans le cadre d'un objectif précis d'intérêt public. Pour la méthanisation, ce serait par exemple diminuer les émissions de CO_2 pour contribuer aux ambitions climatiques nationales, ou produire du CO_2 de qualité alimentaire pour répondre aux besoins des industries locales, etc. Les subventions peuvent être accordées pour les projets innovants et réplicables.

En contrepartie de l'attribution de la subvention, l'organisme subventionneur peut exiger du porteur de projet de produire et de suivre des indicateurs techniques et économiques justifiant de la bonne utilisation de la subvention, de partager son retour d'expérience, etc.

POINT D'ATTENTION

Au-delà d'un certain TRI projet[20], les subventions ne sont pas forcément octroyées ou les montants sont revus à la baisse.

05 AI-JE UNE IDÉE DES COÛTS D'INVESTISSEMENT D'UN TEL PROJET ?

L'investissement dans une installation de liquéfaction de CO_2 est conséquent. Cela varie en fonction du débit de CO_2 en sortie d'épuration, mais la fourchette moyenne de prix est de 1 à 4 M€.

Les données économiques fournies dans ce guide constituent une première base pour estimer les investissements nécessaires et élaborer un business plan simplifié.

06 LE PRIX DE VENTE DU CO_2 EST-IL COMPATIBLE AVEC MON PROJET ?

Il existe une forte variabilité des prix livrés du CO_2, typiquement de 90 à 300 €/tCO_2 liquide. Il est nécessaire de s'accorder sur une gamme de prix de vente adaptée aux caractéristiques du projet (cf. partie « Études de cas », page 72).

07 EST-CE QUE JE PEUX AVOIR DES ENGAGEMENTS DE REPRISE DU CO_2 ? (BASE DE CONTRAT)

Quatre points clés sont à considérer :

- Il est conseillé que ces engagements entrainent des pénalités en cas de baisse trop forte des consommations (mécanismes appelés « take or pay ») ; attention toutefois, de manière réciproque, des pénalités pourraient être exigées en contrepartie dans le cas d'un défaut de livraison.
- S'assurer que les acheteurs puissent s'engager sur une durée suffisante.
- Vérifier la solidité financière des acheteurs.
- Si les acheteurs ne requièrent pas de qualité alimentaire, alors il n'est pas nécessaire de réaliser une étude de faisabilité alimentaire et une démarche HACCP.

[20] Le TRI (« Taux de Rentabilité Interne ») d'un projet est un indicateur financier utilisé pour évaluer la rentabilité d'un projet d'investissement

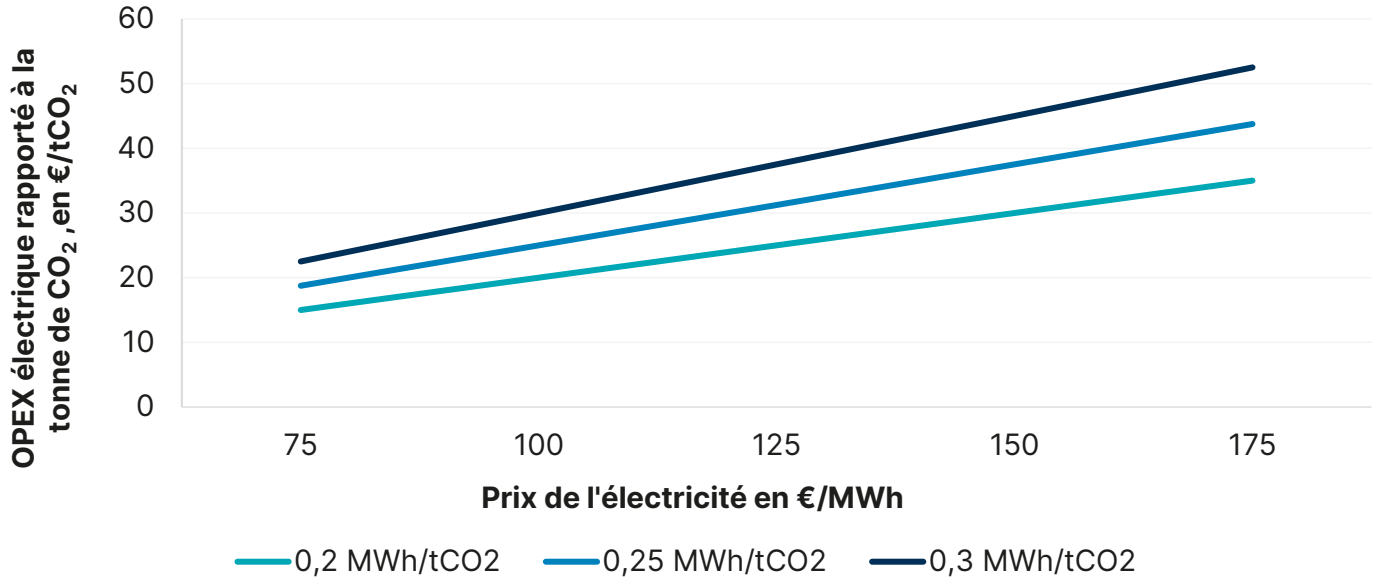
- En amont d'un projet, il est possible d'avoir un engagement des clients grâce à la signature d'une lettre d'intention (ou LOI, « Letter of Intent »). Elle joue un rôle crucial dans le processus de négociation, car elle permet de formaliser les discussions et d'éviter les malentendus. Elle définit les principaux éléments de la négociation, tels que :
  - La durée ;
  - Les conditions de confidentialité ;
  - Les fourchettes de prix.

Elle peut également servir de base pour la rédaction d'accords plus détaillés à mesure que les négociations avancent. Sans contrat, des LOI signées sont à minima requises pour demander un financement auprès des banques.

08 QUELLE MAÎTRISE AVONS-NOUS SUR LES COÛTS D'ÉLECTRICITÉ ?

Pour un acteur doté d'un liquéfacteur consommant 0,25 $MWh_{élec}/tCO_2$ produit et payant son électricité 120 €/MWh, l'électricité représente 30 €/tCO_2 en termes de coût, soit un impact très important. Plus la facture d'électricité est élevée, plus l'unité devra être performante. Si les coûts sont trop élevés ou susceptibles de varier fortement à la hausse, la piste liquéfaction est peut-être à abandonner.

INFLUENCE DE L'ÉLECTRICITÉ



09 SUIS-JE BIEN AU COURANT DES DERNIÈRES ÉVOLUTIONS EN MATIÈRE DE CO_2 ?

Avant de se lancer, il est préférable de se renseigner sur les dernières tendances et évolutions (concurrence, normes, prix) dans le domaine du CO_2 : webinaires, salons, ressources complémentaires, centres d'expertise... Echanger avec les acteurs du secteur permettra de conforter la viabilité du projet ou de l'annuler s'il ne s'avère pas assez solide.

10 AI-JE BESOIN D'UNE ÉTUDE DE FAISABILITÉ ALIMENTAIRE ?

Il est important de comprendre les attentes des clients en matière de qualité alimentaire, en échangeant avec eux. Une certification type FSSC 22000 est-elle nécessaire ? Quelle est la pureté du CO_2 attendue ? Le client base-t-il son cahier des charges uniquement sur des référentiels commerciaux existants ou ajoute-t-il des exigences spécifiques ? La plupart des grands groupes de l'industrie agroalimentaire ont leur propre cahier des charges. Il est important d'estimer les efforts supplémentaires à fournir pour y répondre.

Une étude préalable pour évaluer son potentiel d'alimentarité est recommandée, car en fonction des types d'intrants utilisés dans le méthaniseur :

- la mise en conformité du CO_2 aux référentiels commerciaux existants (notamment EIGA/ISBT) et aux exigences spécifiques des clients,
- la mise en place d'un système d'analyse des dangers et des points critiques pour leur maîtrise (HACCP),

peuvent être plus ou moins complexes et coûteuses pour le porteur de projet.

Pour mener à bien cette étude, il faut se faire accompagner par un prestataire spécialisé. Il existe un écosystème facilement accessible (conseils, experts) dans le domaine de la sécurité alimentaire.

Dans un premier temps, les étapes suivantes, détaillées dans la partie « Qualité alimentaire du CO_2 » page 55, peuvent être suivies pour déterminer si le projet est faisable :

1. Caractériser les flux d'intrants et identifier les contaminants pouvant potentiellement être présents ;
2. Vérifier les réglementations applicables ;
3. Réaliser des analyses de l'off-gaz.

A ce stade, une première interaction avec les fournisseurs permet de sélectionner ceux qui seront capables de fournir des équipements adéquats pour respecter le cahier des charges du client.

GO OU NO GO ?

- Au vu de cette évaluation, le projet et ses porteurs disposent-ils des bons atouts pour réussir ?
- C'est aussi l'occasion de revoir le positionnement initial (étape 2) en fonction des risques et des opportunités qui doivent être identifiés à ce stade.
- Faut-il rechercher des partenaires complémentaires qui maitrisent les compétences manquantes ?
- Atteindre la qualité alimentaire est-elle faisable ? Ou dois-je m'orienter vers des débouchés n'exigeant pas ce niveau de qualité ?

Une démarche itérative pour consolider cette phase préliminaire n'est pas à exclure.



5 MISE EN PLACE DE L'HACCP (cas du CO_2 alimentaire)

Si les résultats de l'étude de faisabilité alimentaire sont positifs, un système d'analyse des dangers et des points critiques pour leur maîtrise (HACCP) doit être mis en place (pour plus d'informations, voir la partie « Qualité alimentaire du CO_2 », page 55. Dans le cadre de la production de CO_2 de qualité alimentaire, cela est obligatoire et consiste notamment à :

- Mettre en place un système de traçabilité des intrants et du CO_2.
- Identifier les dangers et évaluer les risques associés pour la santé humaine.
- Définir des mesures de prévention et de contrôle des risques identifiés.
- Déterminer les solutions pour éliminer les contaminants.
- Définir une stratégie d'analyse en identifiant les appareils nécessaires et en élaborant des protocoles d'analyses.

Toutes ces actions représentent des coûts. Elles doivent donc être estimées en parallèle dans l'étude technico-économique. Les fournisseurs de procédés doivent être également consultés pour identifier les équipements qui solutionneront les problématiques mises en évidence lors de l'HACCP.

6 RÉALISER UNE ÉTUDE DE FAISABILITÉ

Pour cette étape, il est vivement conseillé d'être accompagné par un spécialiste. Le montant varie entre 3 000 et 10 000 € selon les spécificités du projet et le niveau de détail souhaité.

L'ÉTUDE DOIT COUVRIR LES POINTS SUIVANTS :

- Dimensionnement de l'installation.
- Prise en compte des externalités positives :
  - Biométhane récupéré ;
  - Conformité règlementaire : récupérer le CO_2 permet de recirculer le CH_4 pour respecter le seuil réglementaire de 0,5 % de CH_4 dans les off-gaz[21] et améliorer le bilan de gaz à effet de serre (GES) du biométhane pour la certification RED 3[22] ;
  - Le cas échéant, chaleur récupérable sur le compresseur CO_2 et le groupe froid (par exemple, pour alimenter le digesteur).
- Prise en compte des variations saisonnières sur les débouchés.
- Synthèse économique (CAPEX, OPEX, rentabilité), ainsi que le prix cible de la tonne de CO_2 vendue.

[21] Légifrance : Arrêté du 12 août 2010 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2781 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

[22] Directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables amendée par la Directive 2023/2413. Pour la certification RED, il est possible de soustraire au bilan GES du biométhane les émissions évitées grâce à la capture de CO_2 biogénique jusqu'en 2036 si le CO_2 est réémis en aval de la chaine de valeur (CCU). Il n'y pas de limite de temps lorsque le CO_2 est stocké (CCS).

7 CONSULTATIONS ET NÉGOCIATIONS

CONSULTATIONS DES FOURNISSEURS ET NÉGOCIATIONS DES CONTRATS (MOE)

Dans un premier temps, la consultation des fournisseurs de procédés de purification et de liquéfaction du CO_2, puis dans un second temps, les fournisseurs de voiries et réseaux divers (VRD) et les prestataires de génie civil.

Ces étapes du projet sont cruciales ; il est recommandé de se faire accompagner par un bureau d'études en Maîtrise d'Œuvre (MOE). Cette prestation peut atteindre 100 k€ dans le cas d'un accompagnement « clé en main » qui comprend :

- La conception technique (élaboration des plans, dimensionnement des solutions techniques, etc.) et la construction du cahier des charges fournisseurs.
- La comparaison des offres reçues (au moins 3 offres de fournisseurs), incluant :
  - Les performances : rendement carbone, consommation électrique, quantité de CO_2 produite par an ;
  - Point de fonctionnement et garanties (engagements) de performance et conditions de ces garanties (spécification des off-gaz par exemple) ;
  - La composition garantie : le taux de pureté du CO_2 (par exemple 99,9 % ou 99,3 %) et, le cas échéant, la conformité à une spécification technique (la norme EIGA par exemple, en Annexe 2, page 88) et les conditions de la garantie ;
  - La comparaison des investissements sur une même base de périmètre : matériels, services et raccordements (le cas échéant, la nécessité ou non de construire un bâtiment pour abriter les équipements).
- La négociation et la rédaction des contrats avec les fournisseurs : ils doivent être les plus précis et exhaustifs possibles. Ils doivent rappeler les réglementations qui s'appliquent aux fournisseurs (par exemple, le règlement n° 1935/2004 relatif aux matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires en cas de production de CO_2 de qualité alimentaire, et autres règlements spécifiques (Annexe 4, page 90), les clauses suspensives, les responsabilités de chaque partie clairement explicitées en cas de non-conformité du CO_2 aux exigences définies, etc. (Plus de détails dans la partie « Procédé de liquéfaction du CO_2 », page 40).
- La supervision du projet incluant la coordination des entreprises, le suivi des travaux d'aménagement du site, le respect des délais et des coûts, ainsi que la vérification de la conformité des ouvrages au cahier des charges.



NÉGOCIATIONS AVEC LES CLIENTS

La signature des contrats vient normalement après la signature des LOI lorsque le projet est plus avancé. **À noter que dans certains cas, il est possible de signer directement des contrats en amont du projet :**

- Ces contrats seront définis sur le modèle d'affaires choisi et l'analyse des risques ;
- Ils devront intégrer les clauses suspensives indispensables (obtention des autorisations, du financement, etc.) ;
- Il est recommandé d'indexer le prix du CO_2 au prix de l'électricité, via une formule permettant de protéger, dans une certaine mesure, le producteur des hausses du prix de l'énergie.

Il est possible de se faire accompagner par une entreprise spécialisée dans le commerce du CO_2 qui se chargera de négocier les contrats avec les clients finaux.

8 OBTENIR LES AUTORISATIONS

Le liquéfacteur est une installation industrielle soumise aux Directives Européennes :

1. Sur les équipements sous pression,
2. Les machines et,
3. La compatibilité électromagnétique (voir les règlements spécifiques, Annexe 4, page 90).

Un permis de construire ou une déclaration de travaux (demande à formaliser auprès de la mairie) est nécessaire. Il n'existe pas de rubrique ICPE dédiée à la liquéfaction de CO_2. Néanmoins un « porter à connaissance » auprès de la DREAL ou des DDPP/DDCSPP peut être pertinent pour informer de l'ajout du liquéfacteur sur le site de méthanisation.

Le transport de CO_2 liquéfié entre dans le cadre de la règlementation ADR. Le chauffeur doit être habilité et la citerne de transport agréée.

Dans le cas de la collecte de CO_2 et de son transport sous forme gazeuse par canalisation, des autorisations spécifiques et démarches administratives sont nécessaires avant le commencement des travaux. Le Club Biogaz de l'ATEE a été désigné par la DGPR pour mettre à jour le « Guide professionnel applicable aux canalisations de transport de gaz de biomasse non épuré ». Cette mise à jour est en fin de rédaction et définira l'ensemble des dispositions particulières complémentaires ou substitutives à retenir pour les canalisations de transport de CO_2 biogénique issu de méthanisation.

Pour le volet alimentaire (cf. partie « Qualité alimentaire du CO_2 », page 55) :

- Dans le cadre d'un projet de CO_2 de qualité alimentaire, Il est nécessaire de réaliser les études préalables (HACCP), ainsi qu'une déclaration auprès de la Direction Départementale (et de la Cohésion Sociale) de la Protection des Populations ;
- Selon les attentes des clients, il peut être demandé d'être certifié, par exemple FSSC 22000. La mise en place de cette certification peut se faire après la mise en route de l'installation.

9 DOSSIER DE FINANCEMENT

À destination des banques et des investisseurs, le dossier de financement doit comporter :

- Une présentation du projet, dont l'étude économique (voir étape 6, précédemment) ;
- L'évaluation des ressources et des besoins ;
- Une présentation du tour de table des investisseurs potentiels ;
- Une évaluation des risques et leur maitrise ;
- Les éléments sur la négociation des contrats de fourniture de CO_2.

C'est un dossier similaire à une unité de méthanisation, avec une grande différence néanmoins : contrairement au biométhane injecté sur le réseau, la reprise du CO_2 n'est pas garantie. Il est donc absolument primordial de sécuriser des engagements d'achat de CO_2 de la part de clients afin de disposer d'un dossier solide auprès des banques et autres investisseurs.

VOUS ÊTES PRÊTS À LANCER VOTRE PROJET !



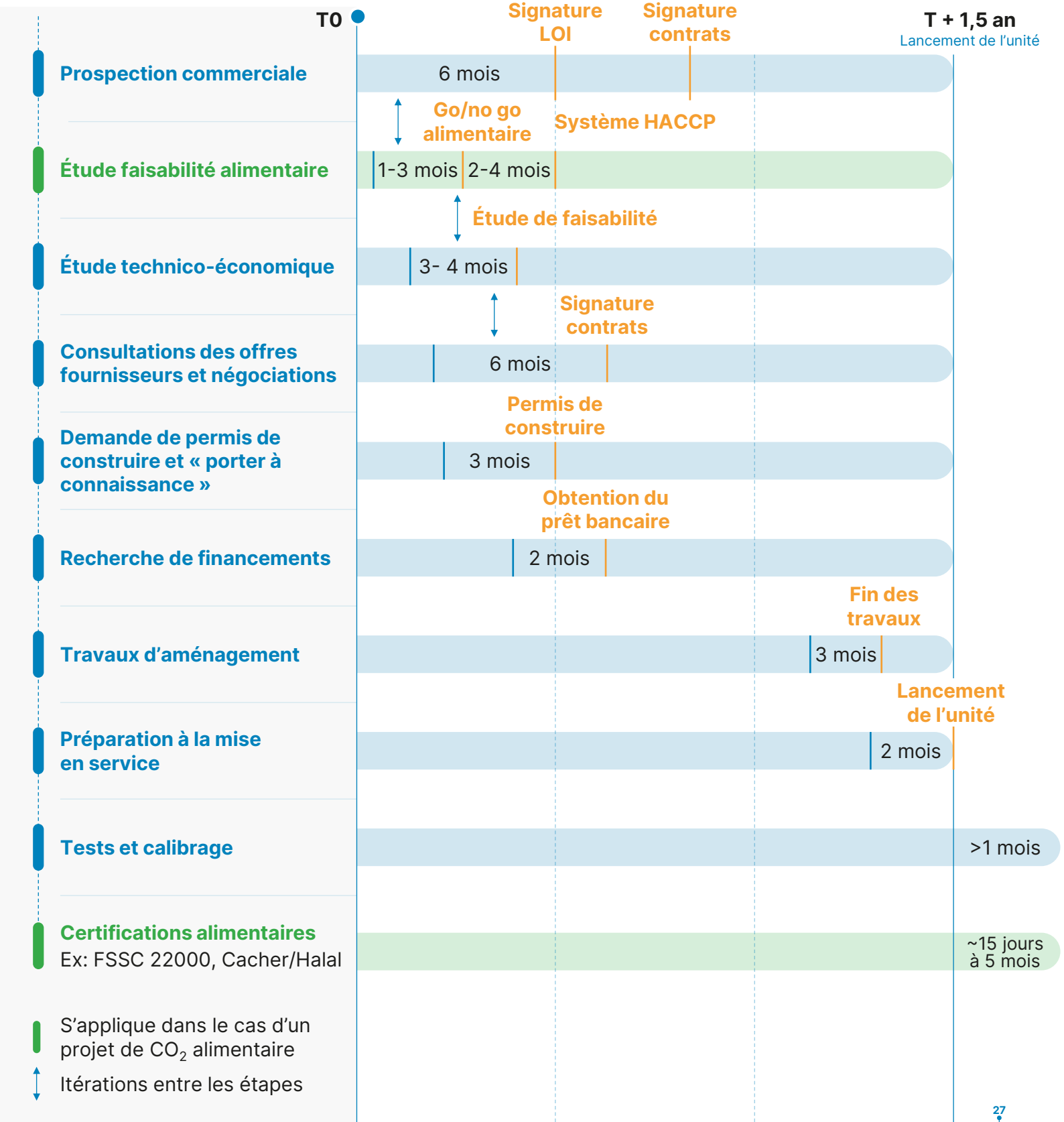
AGENDA TYPIQUE D'UN PROJET DE LIQUÉFACTION DE CO_2

POUR UN MAXIMUM D'EFFICACITÉ

Il est préférable d'avancer sur les tâches en parallèle, en positionnant des jalons et des go/no go.

UN AGENDA DE PROJET

Permet de suivre le projet et de le finir dans les temps. Celui présenté ci-dessous est un exemple, certaines étapes peuvent être raccourcies ou rallongées selon les spécificités du projet.



SECTION 2

COMPLÉMENTS THÉMATIQUES

Vous avez un projet en tête ?
Vous connaissez votre potentiel et avez réfléchi à des débouchés ?

Cette section vous permettra de creuser certains points présentés dans les 9 étapes clés du « Guide du producteur » (page 10). Les différents usages du CO_2, la qualité alimentaire ou encore le transport du CO_2 y sont notamment détaillés.





1. LES APPLICATIONS À FORT POTENTIEL

PANORAMA DES USAGES DU CO_2 EN FRANCE

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, le CO_2 est employé pour répondre à différents besoins.

LA CAPTURE ET L'UTILISATION DU CARBONE (CCU)

Recouvre un ensemble d'applications dans lesquelles le CO_2 capté est utilisé. Le CO_2 peut être utilisé directement (sans transformation, il est utilisé pour des usages traditionnels comme dans l'agroalimentaire ou dans l'industrie, ou indirectement dans différents produits, dans des procédés industriels, tels que la production d'e-fuels, de produits chimiques, etc.). Lorsque le CO_2 d'origine biogénique est utilisé comme matière première dans des procédés CCU, on parle de bioCCU.

LA CAPTURE ET LE STOCKAGE DU CARBONE (CCS)

Fait référence au processus consistant à capter le CO_2, puis à le stocker de manière permanente dans des réservoirs naturels ou dans des matériaux (par exemple, le stockage géologique ou la minéralisation dans des matériaux de construction). Le stockage permanent d'un CO_2 d'origine biogénique est désigné sous le terme bioCCS.

CCS

SÉQUESTRATION OU MINÉRALISATION IN-SITU
(Nouvelles applications)
- Aquifères salins profonds
- Anciens gisements d'hydrocarbures

MINÉRALISATION EX-SITU
(Nouvelles applications)
- Agrégats de béton recyclé
- Ciment

CCU

IAA
- Carbonatation des boissons
- Refroidissement cryogénique et surgélation
- Mise sous atmosphère modifiée ("MAP")
- Extraction d'arômes

CHAÎNE DU FROID
- Transport et distribution
- Fluide frigorigène

AUTRES USAGES
- Agent d'extinction dans les extincteurs
- Propulseur dans les aérosols
- Agent d'expansion des mousses
- Extraction assistée du pétrole ("EOR")

PROCÉDÉS INDUSTRIELS
- Décapage
- Traitement des métaux
- Solvants pour peinture
- Soudure
- Durcissement du béton
- Nettoyage cryogénique

AGRICULTURE
- Cultures sous serres
- Protection des vendanges

CHIMIE
(Nouvelles applications)
- Polymères
- Molécules intermédiaires (e-méthane, méthanol)

CARBURANTS SYNTHÉTIQUES
(Nouvelles applications)
- E-méthane
- E-méthanol
- E-fuels (e-SAF, e-diesel)

1. Voies conventionnelles de valorisation du CO_2

Il est important de bien comprendre les usages du CO_2 pour engager des relations avec les consommateurs. Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, que ce soit sous forme liquide, gazeuse, solide ou supercritique, le CO_2 est employé dans des usages variés.



1.1 SERRES AGRICOLES

Le CO_2 est utilisé en serre agricole pour améliorer la croissance et la vigueur des plantes, on parle d'enrichissement au CO_2. Avec une concentration entre 350 et 1200 ppm, il permet d'augmenter les rendements de 25 à 30 %.

Deux sources de co_2 pour enrichir les serres :

- En le récupérant dans les fumées des brûleurs à gaz naturel reliés à des systèmes de chauffage à eau chaude ou des génératrices spéciales de combustion de carburant, souvent utilisés pour chauffer les serres.
- En stockant du CO_2 liquide sur site, acheté à un vendeur de CO_2 comme un méthaniseur local. Ce CO_2 est vaporisé et injecté en complément de celui produit sur place l'hiver et vient le remplacer l'été, quand les brûleurs sont à l'arrêt. Cela a un effet saisonnier important : la consommation est la plus élevée au printemps et la plus faible en hiver. Cependant, il est important de noter que certaines serres ne sont pas chauffées et nécessitent donc un approvisionnement constant en CO_2 toute l'année. Les serres chauffées se situent majoritairement dans l'Ouest du territoire national (Bretagne, Pays de la Loire et Sud-Ouest).

POINTS D'ATTENTION

- Il n'est pas toujours demandé que le CO_2 soit conforme EIGA/ISBT. Cependant, les serres sont sensibles à certains polluants (CH_4, acétaldéhyde, éthylène, propène, composés soufrés), ce qui peut impliquer la mise en place d'un suivi avec analyseur.
- Saisonnalité importante en termes de consommation.



1.2 INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE

LE CO_2 EST UTILISÉ DE DIFFÉRENTES MANIÈRES DANS L'INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE :

- **Auxiliaire technologique :** substance utilisée lors de la fabrication d'un aliment pour répondre à un objectif technique, sans avoir vocation à se retrouver dans le produit final. Parce qu'il est en contact avec les denrées alimentaires, son utilisation est encadrée par le droit alimentaire, notamment en matière de sécurité sanitaire et de traçabilité (article 18 du règlement (CE) n°178/2002). Les opérateurs doivent s'assurer que les éventuels résidus, techniquement inévitables, ne présentent aucun risque pour le consommateur et n'altèrent pas l'aliment.

- **Additif alimentaire :** un additif est une substance ajoutée pour des fonctions spécifiques. D'un point de vue réglementaire, la législation européenne définit le CO_2 comme additif alimentaire (E290). Elle définit la qualité attendue pour des applications de contact alimentaire. Cette réglementation s'applique également aux usages de CO_2 en tant qu'auxiliaire technologique et ingrédient. Le CO_2 est utilisé en tant qu'additif pour protéger les huiles alimentaires contre l'oxydation, fabriquer des poudres alimentaires par cryobroyage, ajuster le pH des produits laitiers, foisonner les produits crémeux ou encore pour stabiliser des ingrédients alimentaires.
- **Ingrédient :** un ingrédient est un composant de base de l'aliment. Un gaz est décrit comme ingrédient alimentaire quand il est utilisé dans la préparation d'une denrée et est toujours présent dans le produit fini, même sous une forme altérée, par exemple dans la carbonatation des boissons gazeuses.

MISE SOUS ATMOSPHÈRE MODIFIÉE (MAP)

La mise sous atmosphère modifiée (MAP) consiste à remplacer l'air par un mélange de gaz, principalement du CO_2, afin de ralentir le développement microbien et prolonger la durée de conservation des aliments. Il est particulièrement efficace pour les produits frais (viandes, volailles, poissons, produits laitiers). Des concentrations de 20 à 30 % permettent d'allonger la conservation de plusieurs jours à plusieurs semaines.

REFROIDISSEMENT ET SURGÉLATION

Dans l'industrie alimentaire, le contrôle de l'activité bactérienne est un enjeu majeur.
Le refroidissement rapide et la surgélation sont des leviers efficaces, largement utilisés avec le CO_2.

Le CO_2 permet :

- La surgélation rapide des aliments, bloquant la croissance microbienne tout en préservant la texture et la qualité ;
- Le refroidissement des produits pour limiter l'échauffement lors des opérations de transformation (découpe, croûtage).

ÉTOURDISSEMENT DES ANIMAUX

L'anesthésie au CO_2 est considérée comme moins violente que l'anesthésie électrique. Certains abattoirs utilisent des méthodes d'étourdissement avec du CO_2 (typiquement 300 à 350 gCO_2/porc), possiblement en mélange à 85 %.

EXTRACTION D'ARÔMES – CAS DU CAFÉ

L'extraction de la caféine au CO_2 repose sur les propriétés uniques du dioxyde de carbone lorsqu'il se trouve à un état intermédiaire entre liquide et gaz. Dans cet état dit « supercritique », le CO_2 combine la capacité de diffusion d'un gaz et le pouvoir de dissolution d'un liquide. Ce comportement en fait un solvant sélectif idéal pour séparer la caféine sans entraîner les composés volatils responsables du goût et de l'arôme. La consommation peut être seulement de quelques centaines de tonnes de CO_2 par an, le reste étant recyclé en boucle fermée.

ACIDIFIANT

Le CO_2 est utilisé ici pour augmenter l'acidité d'un aliment, lui apporter une note gustative caractéristique et améliorer ses qualités organoleptiques. Lorsqu'il est dissous dans l'eau, le CO_2 forme de l'acide carbonique, ce qui abaisse le pH de l'aliment : cette acidification confère un goût plus vif tout en jouant un rôle dans la préservation et la stabilité microbiologique.

CARBONATATION DES BOISSONS

Les industries de boissons gazeuses (bière, eau gazeuse, soda) sont consommatrices de CO_2, à hauteur de 4 à 9 gCO_2/L de boisson, soit des dizaines de milliers de tonnes de CO_2 par an à l'échelle du territoire national. Les grandes brasseries industrielles sont très souvent équipées d'unité de récupération du CO_2 issu de leur propre procédé, ce qui n'est pas le cas des brasseries artisanales qui consommeront cependant de petites quantités. Le CO_2 peut être également utilisé pour la production de vin, mais dans des quantités faibles (avec la possibilité pour les producteurs de vin de récupérer le CO_2 émis durant la fermentation alcoolique).

POINTS D'ATTENTION

1. Pour chaque utilisation dans l'industrie agroalimentaire, le CO_2 doit respecter les exigences de qualité alimentaire décrites dans la partie « Qualité alimentaire du CO_2 », page 55.
2. Pour la mise sous atmosphère modifiée, le CO_2 est généralement mélangé avec l'azote dans les emballages. Traditionnellement, l'industriel se fait livrer les deux molécules par le même fournisseur de gaz pour des raisons logistiques et contractuelles. Dans le cas d'un mélange de CO_2 issu d'un méthaniseur et d'azote fourni par un autre fournisseur, le partage des responsabilités peut être délicat. Une traçabilité rigoureuse du CO_2 sur toute la chaîne de valeur est à prévoir pour permettre la contractualisation et éviter tout risque de litige.
3. L'utilisation du CO_2 dans l'industrie des boissons est soumise à des exigences strictes en matière de qualité, définies notamment par le référentiel ISBT.



1.3 CHAÎNE DU FROID

TRANSPORT CRYOGÉNIQUE

Par exemple pour le transport de denrées alimentaires sensibles sur de longues distances :

- Sous forme de glace carbonique placée dans des conteneurs ou des caisses isothermes. Son avantage est sa faible humidité et sa sublimation lente, idéal pour le transport longue distance ou de produits sensibles (viandes, vaccins). En général, un intermédiaire se charge de transformer le CO_2 liquide en glace.

- Solution de système de froid cryogénique en circuit ouvert : le CO_2 n'est pas recyclé comme un fluide frigorigène classique en cycle fermé, c'est un usage ponctuel, en mode cryogénique. Après détente, le CO_2 se gazéifie et est évacué. Un véhicule consomme entre 30 et 100 tCO_2/an.

FLUIDES FRIGORIGÈNES

Ils sont utilisés dans des groupes froids en boucle fermée pour maintenir une température de -20° à +4°C.

Les fluides frigorigènes conventionnels sont progressivement interdits par la réglementation européenne pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les fluides frigorigènes hydrofluorocarbures (HFC) utilisés majoritairement (R410A, R404A, R407C, R134a, R125) seront progressivement bannis des usages pour laisser place à des alternatives moins impactantes.

Le CO_2, désigné R744, répond aux exigences de la nouvelle réglementation sur les fluides frigorigènes de 2024. Son utilisation pour le refroidissement commercial (ex : supermarché), industriel et le transport frigorifique pourrait s'accroître dans les prochaines années.

POINTS D'ATTENTION

- Pour le transport cryogénique, les clients souhaitent généralement le même degré d'humidité que la norme EIGA.
- Il est possible que, par souci de simplicité, les clients souhaitent de la qualité alimentaire.
- Certains clients demandent un approvisionnement en bouteilles plutôt qu'en citernes.



1.4 AUTRES UTILISATIONS

NETTOYAGE CRYOGÉNIQUE ET DÉCAPAGE (GLACE ET NEIGE)

Cette technique s'applique à de nombreux domaines (ex : métallurgie, plasturgie, fonderie ou industries agroalimentaires). Le nettoyage au CO_2 est apprécié car il est efficace, non abrasif et non corrosif. Il repose sur l'utilisation de glace carbonique ou de bâtonnets solides de CO_2, projetés à l'aide d'un pistolet pour nettoyer et décaper les surfaces, tout en générant beaucoup moins de déchets que le sablage ou l'usage de solvants. La production nécessite environ 2,5 kg de CO_2 pour obtenir 1 kg de glace carbonique.

POINT D'ATTENTION

D'après certains retours terrain, il est possible que les prestataires choisissent du CO_2 de qualité alimentaire afin de simplifier la logistique.

1.5 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES DÉBOUCHÉS ACTUELS DU CO_2

Usage	Qualité demandée	Quantité type (pour 1 site conso.)	Variabilité saisonnière
Carbonatation des boissons	**Obligatoire:** • E290 • Démarche HACCP **Contractuelle:** • ISBT • Certification alimentaire *(ex : FSSC22000)*	Variable	Léger pic l'été
IAA autre que boisson • MAP • Refroidissement et surgélation • Etourdissement des animaux • Additifs alimentaires	**Obligatoire:** • E290 • Démarche HACCP **Contractuelle:** • EIGA ou ISBT • Certification alimentaire *(ex : FSSC22000)*	De 3 t/an à quelques centaines/an	-
Serres agricoles	Selon cahier des charges du client	100 – 2000 tCO_2 /an	Pic l'été
Autres • Transport cryogénique • Rinçage/décapage • Solution froid/fluide frigorigène • Extincteurs • ...	Selon cahier des charges du client	-	-

POURQUOI PARFOIS LA QUALITÉ ALIMENTAIRE EST DEMANDÉE POUR DES APPLICATIONS NON ALIMENTAIRES ?

Pour rationaliser leurs flux logistiques, les fournisseurs de CO_2 ont pris comme référence de qualité la plus exigeante qui est la qualité alimentaire, permettant ainsi d'approvisionner tous leurs clients sans contrainte logistique. Les clients se sont donc habitués à recevoir ce niveau de qualité.

2. VOIES INNOVANTES ET EN DEVENIR DE VALORISATION DU CO_2

DANS QUEL BUT ?

Les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine, en forte hausse depuis la révolution industrielle, sont la cause principale du changement climatique. Pour y répondre, l'Union européenne s'est dotée du Pacte vert, qui fixe une réduction de 55 % des émissions d'ici 2030 par rapport à 1990 et une neutralité carbone en 2050. En France, cette trajectoire est déclinée dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), dont la troisième édition est attendue en 2026.

IL EXISTE TROIS MANIÈRES D'ABAISSER LE NIVEAU DES EMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE :

1. **L'évitement,** qui consiste à ne pas développer d'activités fortement émettrices.
2. **La réduction,** qui consiste à réduire les émissions à la source, par exemple, en améliorant l'efficacité énergétique des systèmes ou en substituant les carburants d'origine fossile par des e-fuels.
3. **L'élimination,** qui consiste à retirer du dioxyde de carbone de l'atmosphère. Ce processus peut se faire naturellement par des mécanismes biologiques et géologiques, ou par des actions humaines, notamment à travers des technologies comme la capture et la séquestration du carbone de CO_2 biogénique (BioCCS) ou le captage direct dans l'air (DAC).

2.1 LA SÉQUESTRATION DU CARBONE

STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO_2

Le CO_2 est capté, transporté, puis injecté et stocké dans des formations géologiques souterraines comme des aquifères salins profonds ou des réservoirs de pétrole et de gaz épuisés.

On parle de CCS (Carbon Capture and Storage) quand il est d'origine fossile, généralement émis sur les sites industriels, et de BioCCS (Biogenic Carbon Capture and Storage) quand il est issu de la production de biogaz ou de l'utilisation de biocarburant ou de biocombustible.

Il est possible de séquestrer du CO_2 en reposant sur des principes physiques (injection sous forme supercritique et piégeage dans des formations souterraines) ou sur des principes chimiques par minéralisation *in situ* qui consistent à faire réagir le CO_2 directement avec les minéraux présents dans la roche (par exemple : basaltes, péridotites) pour former des carbonates solides et stables (comme la calcite, magnésite, sidérite).

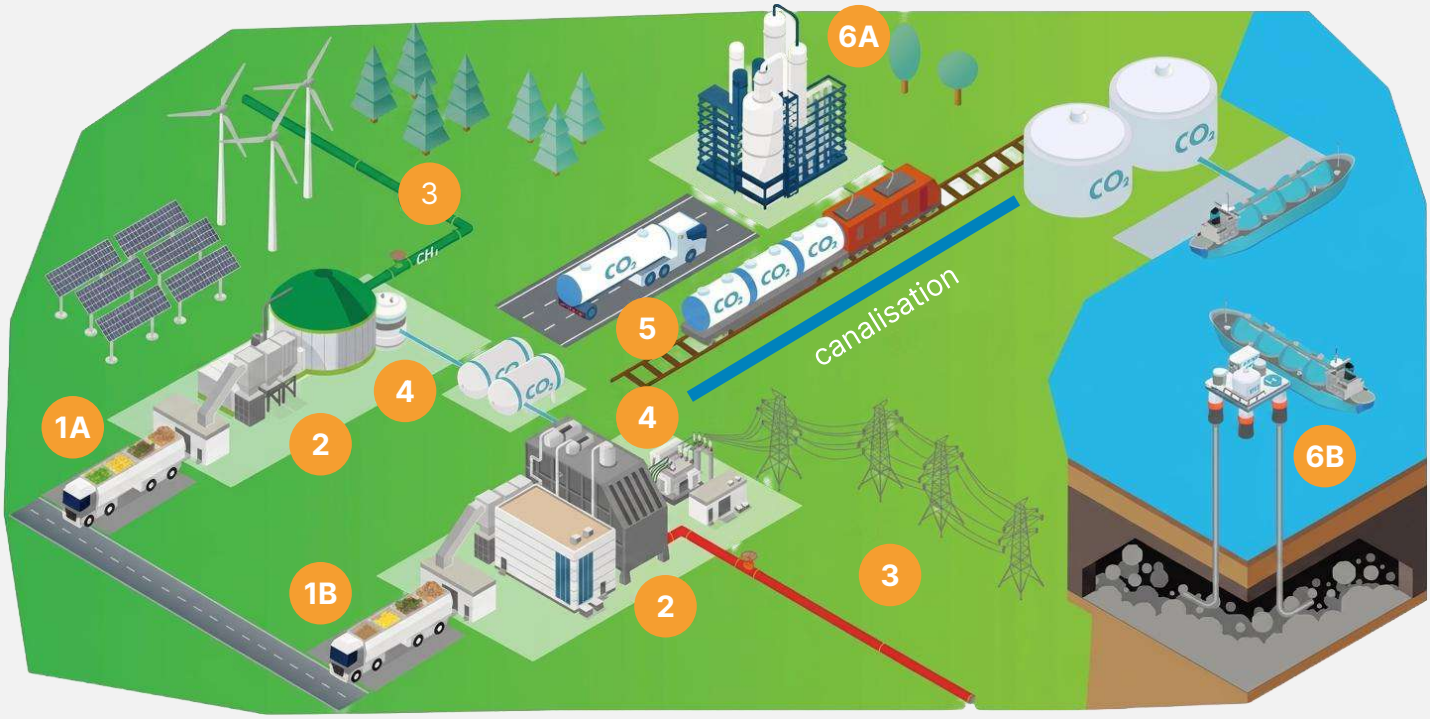
STOCKAGE DU CO_2 DANS DES MATÉRIAUX PAR MINÉRALISATION EX SITU

La minéralisation du CO_2 regroupe un ensemble de technologies émergentes visant à piéger le CO_2 sous une forme chimiquement stable. Cette technique permet d'améliorer les performances techniques du matériau tout en stockant du CO_2 pour du long terme. Cela permet également de générer des crédits carbone d'élimination, au même titre que pour la séquestration géologique.

Les principaux procédés sont :

- L'utilisation pour le curage du béton : le CO_2 injecté sert à améliorer le durcissement et le séchage des bétons (typiquement 1 $kgCO_2$ pour 1 m^3 de béton) ;
- L'utilisation pour la carbonatation des déchets de bétons recyclés. Les restes de pâtes de ciment réagissent pour former du carbonate de calcium. Cela permet de stocker environ 5-20 $kgCO_2$/t de déchets de béton.

PRINCIPE DU BIOCCS



Source de l'illustration : AFEN et BCG[23]

Légende

1. Transport de biomasse vers un digesteur ou une installation anaérobie
   - A Biométhane : transport de la biomasse vers un digesteur anaérobie
   - B Cogénération : transport de biomasse ou de déchets organiques vers une usine
2. Production de biométhane ou de chaleur et d'électricité
3. Distribution : le biométhane, la chaleur et l'électricité sont distribuées via les réseaux existants
4. Capture et purification du CO_2
5. Transport du CO_2 vers le site de stockage par camion, train ou canalisation
6. Stockage du CO_2
   - A Soit le CO_2 est séquestré dans la production de produits durables
   - B Soit il est stocké géologiquement. Il est injecté et stocké dans des formations géologiques souterraines comme des aquifères salins profonds ou des réservoirs de pétrole et de gaz épuisés.

[23] Elimination du dioxyde de carbone - Atteindre le plein potentiel français, AFEN & BCG, Mars 2025

COMMENT SONT FINANCÉS LES PROJETS DE STOCKAGE DU CO_2 ?

Le stockage du CO_2 biogénique est coûteux et, par conséquent, des revenus doivent être générés. Pour cela, des crédits carbone d'élimination, appelés crédits CDR (« Carbon Dioxide Removals ») sont vendus sur le marché volontaire. Les entreprises qui souhaitent compenser leurs émissions résiduelles ou historiques peuvent en acheter. Ces crédits sont considérés comme de haute qualité et leurs prix varient selon la méthode de séquestration employée. Par exemple, pour les crédits BioCCS, aujourd'hui le prix varie entre 250 et 350 €/tCO_2.

ÉTAT DES LIEUX

DU CÔTÉ DE LA RÉGLEMENTATION ET DES INCITATIONS POLITIQUES :

En 2024, l'UE a instauré le cadre CRCF (« Carbon Removal Certification Framework ») pour structurer la filière du CDR, dont le BioCCS. Un acte délégué plus détaillé, définissant des méthodologies de certification pour les activités de séquestration du CO_2 biogénique, est paru en février 2026. À terme, le marché volontaire des crédits CDR pourrait être intégré au marché réglementé européen (EU ETS), permettant aux entreprises soumises aux quotas carbone d'acheter des crédits CDR. Cela permettrait d'augmenter la demande en CDR et ainsi donner plus de visibilité à long terme pour les porteurs de projets.

DU CÔTÉ DU MARCHÉ DES CRÉDITS CARBONE CDR :

C'est un marché volontaire qui reste peu mature, mais en forte expansion, porté par l'augmentation des ambitions climatiques. Certaines technologies sont déjà opérationnelles et le potentiel de développement est important. Aujourd'hui, celui-ci est porté par quelques multinationales comme Microsoft (qui représente plus de 70 % des achats de crédits) et, en France, par des entreprises comme Airbus, Cap Gemini ou Schneider Electric. Le suivi du marché des crédits CDR peut se faire via la plateforme **CDR.fyi — Carbon Removal Market Data, Leaderboards & Intelligence**.

DU CÔTÉ DES PROJETS :

1. **En Europe,**

   - Des projets de grande envergure avancent sur des volumes significatifs de CO_2 (ex. Northern Lights – projet de séquestration géologique en Mer du Nord).

     Le consortium Northern Lights, composé d'Equinor, de Shell plc et de TotalEnergies, a injecté et stocké les premiers volumes de CO_2 dans le réservoir situé à 2,6 km sous le fond marin, à 100 km au large des côtes de l'Ouest de la Norvège. Le CO_2 est capté sur des sites industriels fortement émetteurs, puis est chargé sur un navire et ensuite acheminé par un pipeline de 100 km de long et injecté dans le réservoir Aurora.

     Le début de l'injection de CO_2 marque l'achèvement de la première phase du projet, qui affiche une capacité totale de 1,5 $MtCO_2$/an. Parmi les clients industriels du projet figurent Hafslund Celsio et Heidelberg Materials en Norvège, Yara aux Pays-Bas et Ørsted au Danemark. L'ambition du projet est d'atteindre plus de 5 $MtCO_2$/an d'ici 2028[24].

[24] Northern Lights achieves first injection, storage of CO_2 volumes in North Sea, Oil & Gas Journal, Août 2025 - *https://www.ogj.com/energy-transition/news/55312049/northern-lights-achieves-milestone-with-first-co2-injection-in-north-sea*

2 En France,

Concernant la séquestration géologique du CO_2 :

- L'ADEME a publié l'étude EVASTOCO$_2$ qui fait une estimation des capacités au niveau national.
- Des études des couches géologiques et estimations de potentiels de stockage sont en cours.
- Des premières demandes de permis pour injecter du CO_2 dans les réservoirs géologiques ont été faites.
- Et des premières études de faisabilité technico-économique dans le cadre de projets pilotes ont été réalisées.

Concernant la séquestration du CO_2 dans des matériaux, des unités sont déjà en fonctionnement :

- Par exemple, l'entreprise suisse Neustark a développé sa propre technologie de minéralisation du CO_2 dans du béton recyclé : en 2025, elle installe une première unité sur le site Lafarge de Gennevilliers[25].
- Carboncure, entreprise Canadienne, a développé une technologie pour injecter du CO_2 dans la production de ciment pour améliorer, avant tout, ses performances techniques. Le CO_2 est stocké dans les centrales à béton dans des réservoirs pressurisés qui sont régulièrement remplis par les fournisseurs de gaz. Leur technologie est déjà déployée sur certains sites industriels français comme la centrale à béton BML près de Lyon[26].

Par ailleurs, GRDF a lancé en 2025 un appel à projets pour identifier des solutions techniques de séquestration adaptées à la filière méthanisation, CINQ projets lauréats ont été retenus[27] :

- CARBOROK (Voltigital) : minéralisation du CO_2 dans des granulats de béton recyclé, via un procédé continu évitant la liquéfaction. Une solution de stockage solide et locale.
- SYRENE (E-Ethylène) : conversion du CO_2 en éthylène par électrolyse, un gaz à forte valeur ajoutée utilisé dans la fabrication de polymères, notamment pour les canalisations.
- NEOSTOCK (Carbon Impact, Eosys et l'Université de Lorraine) : étude prospective du potentiel de stockage géologique du CO_2 dans les couches profondes du Grand Est.
- BIOCO$_2$-DISSOLVED (BRGM et Naldeo Technologies & Industries) : intégration du CO_2 biogénique dans un projet d'injection en aquifère profond, couplé à une installation géothermique.
- RAINBOW (ex-Riverse) : développement d'une méthodologie de certification carbone pour la séquestration du CO_2 issu de méthanisation, en lien avec le cadre Européen CRCF.

[25] Neustark déploie sa technologie en France en partenariat avec Lafarge, Neustark, Décembre 2024 - https://www.neustark.com/fr/actualites/neustark-d%C3%A9ploie-sa-technologie-en-france-en-partenariat-avec-lafarge

[26] Recyclage d'eaux usées et capture du CO_2 avec CarbonCure Technologie, Batirama, Février 2024 - https://www.batirama.com/article/69533-recyclage-d-eaux-usees-et-capture-du-CO$_2$-avec-carboncure-technologie.html

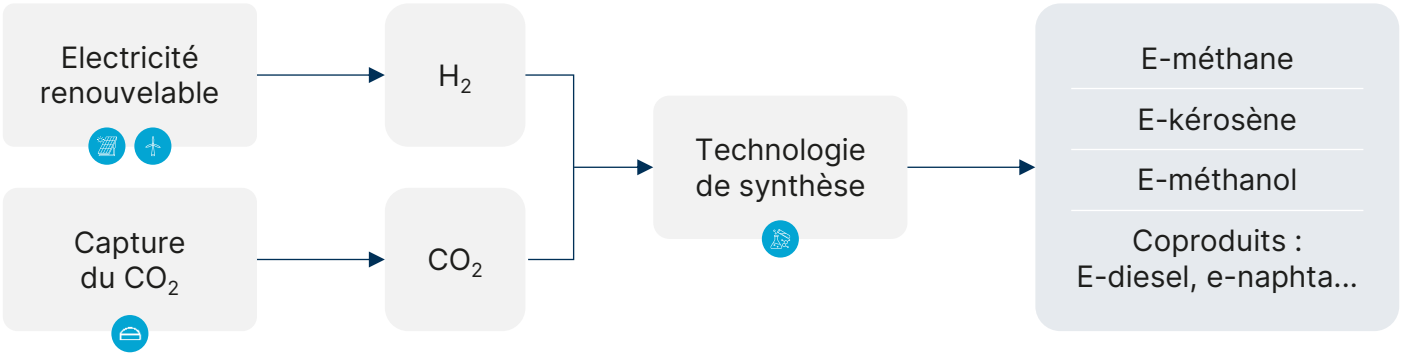
[27] Séquestration du CO_2 biogénique de méthanisation : les projets lauréats de l'AAP GRDF 2025, Projet-méthanisation, Juin 2025 - https://projet-methanisation.grdf.fr/actualites/sequestration-du-bioco

2.2 LA CONVERSION EN CARBURANTS DURABLES (E-FUELS) ET PRODUITS CHIMIQUES (E-CHEMICALS)

La décarbonation de l'économie européenne nécessite l'intégration de multiples vecteurs énergétiques, existants comme nouveaux, et des intermédiaires chimiques (CO, méthanol, oléfines), ainsi que des matériaux polymères (plastiques, mousses…). Pour les vecteurs énergétiques, les e-fuels durables joueront un rôle essentiel dans la transition énergétique et dans l'atteinte des objectifs européens de dé-fossilisation.

La production d'hydrogène (H_2) obtenu par électrolyse de l'eau et la capture du CO_2 permet la production d'e-méthane, d'e-méthanol ou encore d'e-crude, un produit intermédiaire destiné à être raffiné pour la production d'e-fuels. Les producteurs d'e-fuels doivent viser une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 70 % sur l'ensemble du cycle de vie de leur carburant pour se conformer au cadre européen. Ainsi, le CO_2 biogénique est privilégié.

PRINCIPE



ÉTAT DES LIEUX

DU CÔTÉ DE LA RÉGLEMENTATION ET DES INCITATIONS POLITIQUES :

L'UE impose des obligations d'incorporation d'e-fuels à travers les réglementations FuelEU Maritime et ReFuelEU aviation, stimulant la demande et incluant des pénalités importantes sur les consommations fossiles en cas de non-respect. Le CO_2 fossile est pour le moment autorisé pour être utilisé dans ces applications, mais devra être remplacé à terme par du CO_2 biogénique. Ainsi, les producteurs sécurisent dès maintenant des contrats d'approvisionnement en CO_2 biogénique.

DU CÔTÉ DE LA DEMANDE :

- **Aviation :** application des objectifs d'intégration d'e-fuels de ReFUEL Aviation (0,7 % en 2030 et 35 % à 2050). Pour y répondre, il y a un besoin de production de e-kérosène.
- **Maritime :** Fuel-EU a défini une trajectoire de réduction des émissions de GES des carburants utilisés à bord des navires sur l'ensemble de leur cycle de vie (Well-to-Wake), de -2 % en 2025 à -80 % en 2050. Pour y répondre, le e-méthanol, e-méthane et e-diesel sont des solutions envisagées.
- **Pétrochimie :** utilisation possible de e-naphta.
- **Réseaux de gaz :** injection de e-méthane pour atteindre les objectifs de décarbonation fixés.

La principale problématique rencontrée aujourd'hui est le coût de production des e-carburants et e-chemicals bien au-dessus des produits conventionnels auxquels ils doivent se substituer.

DU CÔTÉ DES PROJETS :

Les projets sont quasi-intégralement tournés vers la décarbonation de l'aviation (projets e-kérosène représentant 3,3 Mtep (tonnes équivalent pétrole), du maritime et de la chimie (2,2 Mtep de projets d'e-méthanol). Cette priorisation confirme le rôle des e-fuels dans la décarbonation des secteurs difficilement électrifiables. Pour plus d'informations, **l'édition 2025 de l'Observatoire international des e-fuels**[28] dresse un état des lieux de tous les projets en cours en Europe.

[28] Observatoire international des e-fuels, Sia Partners, Avril 2025

2. VALORISER DU CO_2, COÛTS ET ENJEUX

1. PROCÉDÉ DE LIQUÉFACTION DU CO_2

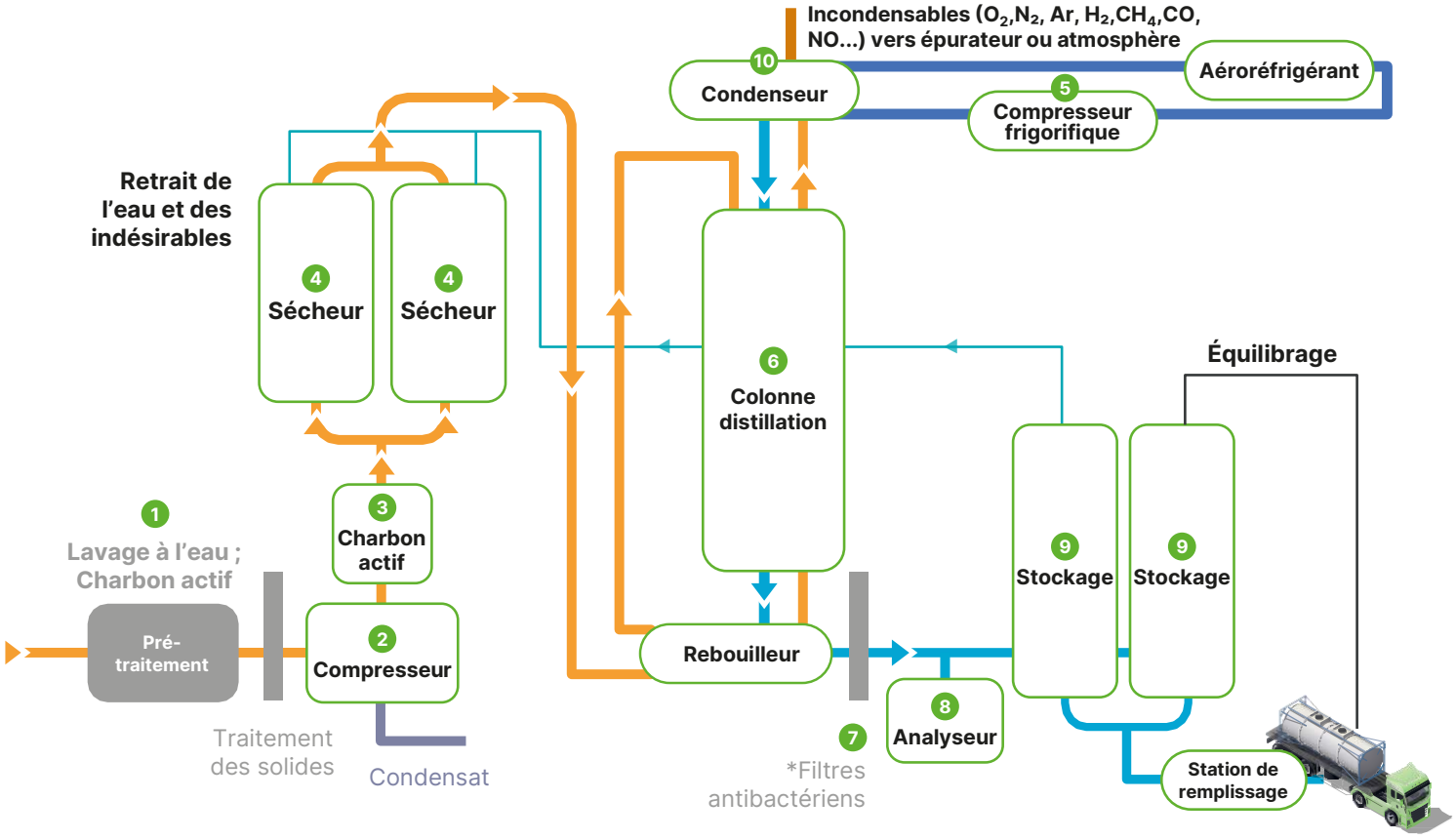
On entend par procédé de liquéfaction toutes les étapes qui permettent le traitement du CO_2 après épuration, la liquéfaction étant l'étape finale qui permet la transformation du CO_2 gazeux en CO_2 liquide, qui est ensuite stocké dans des cuves cryogéniques.

La taille, le type et le nombre d'équipements qui sont intégrés au procédé de liquéfaction dépendent notamment des paramètres suivants :

- Débit d'off-gaz à traiter
- Nature des intrants
- Type d'épurateur
- Qualité du CO_2 attendu selon l'usage (industriel ou alimentaire)

1.1 ASPECTS TECHNIQUES

Schéma représentant les étapes successives d'une unité classique de liquéfaction de CO_2 (des différences peuvent exister entre les fournisseurs).



*Peut être placé sur le liquide ou le gaz

Off-gaz riche en CO_2 | Fluide frigorigène | Flux Gazeux riche en incondensables

Flux CO_2 liquide | Équipements optionnels | Gaz de régénération

Source du schéma : Enerflux

01 PURIFICATION (OPTIONNELLE)

L'étape de purification peut être ajoutée et est adaptable en fonction des composés présents dans l'off-gaz. Un lavage à l'eau permet d'éliminer les composés solubles comme les alcools, certains soufrés, cétones et éthers.

Puis, pour les composés lourds, selon leur type et leur teneur, plusieurs technologies sont utilisées : l'adsorption sur du charbon actif (élimination des soufrés, composés organiques volatiles (COV)), quand il y en a peu. Quand il y en a beaucoup, des réactions chimiques ou biologiques sont des méthodes utilisées dans d'autres filières de captation, mais encore peu courantes en méthanisation.

02 COMPRESSION

La compression a deux objectifs au sein d'une unité de liquéfaction : atteindre la pression nécessaire pour pouvoir liquéfier le CO_2, entre 15 et 22 bar, et permettre d'épurer économiquement certains composés.

La compression est l'étape qui consomme le plus d'énergie dans le procédé. Il en existe plusieurs types : compresseur à piston, avec garniture d'étanchéité téflon pour éviter la contamination du CO_2 par l'huile, et compresseur à vis sèche ou à vis lubrifiée avec système de récupération d'huile en aval, etc. Attention, pour produire du CO_2 de qualité alimentaire, l'huile utilisée doit être compatible avec des utilisations en contact alimentaire, si nécessaire.

03 CHARBON ACTIF

Une étape de traitement avec le charbon actif sous haute pression en amont du sécheur peut être nécessaire selon la pureté des off-gaz. Ceux-ci sont plus efficaces avant l'étape de séchage quand le gaz est humide. Il est également une barrière mécanique pour les vapeurs d'huile afin de protéger le sécheur.

POINT D'ATTENTION

Lors du lancement d'une unité avec du charbon actif sous haute pression, il y a un risque d'incendie ! Il faut monter en charge progressivement et surveiller la température.

04 SÉCHAGE PAR ADSORPTION (PSA OU PTSA)

Pour de nombreuses applications, la teneur en eau doit être minime, par exemple, pour l'utilisation du CO_2 sous la forme de glace carbonique pour le transport de denrées sensibles. Ceci est également problématique pour la liquéfaction. Ainsi, le séchage permet d'éliminer toute trace d'eau, mais également des composés indésirables (notamment alcools et composés organiques volatils à l'état de traces).

Une part du CO_2 gazeux produit est utilisé pour régénérer l'adsorbant. Ce CO_2 peut être, par exemple, du CO_2 déclassé et stocké dans une cuve tampon pour permettre cette opération. Cela dépend des configurations propres à chaque fournisseur.

Il est possible d'optimiser la consommation d'électricité en réglant précisément l'équipement au point de régénération optimal sur chaque cycle.

05 GROUPE FROID

Le CO_2 passe de phase gazeuse à phase liquide (à -30°C) grâce au groupe froid, selon le principe du cycle thermodynamique. Un fluide frigorigène circule pour refroidir le CO_2 et fournit la température nécessaire dans le condenseur. Différentes technologies existent (groupe froid au CO_2, aux alcanes, à l'ammoniac, au réfrigérant industriel). On veillera à ce que le fluide de travail ne soit pas visé par la règlementation F-gas[29].

06 DISTILLATION

La distillation est la dernière étape de purification, elle permet la séparation des incondensables (O_2, N_2, Ar, CH_4, CO, NO) du CO_2. Un rebouilleur et un condenseur permettent la recirculation des fluides, respectivement sous formes liquide et gazeuse, dans la colonne où une séparation par transfert de phase se réalise. Le CO_2 liquide, à 99,9 % pur, est récupéré en bas de la colonne et les incondensables sont récupérés en haut de la colonne sous forme gazeuse.

07 FILTRE ANTIBACTÉRIEN (OPTIONNEL)

Un filtre antibactérien peut être utilisé en fin de procédé lorsque des intrants à risques bactériologiques sont utilisés dans le méthaniseur.

08 ANALYSEUR (OPTIONNEL)

Un analyseur en ligne peut être utilisé sur site, selon la pureté de l'off-gaz en entrée de procédé et le risque de présence de certains polluants. Les types d'analyseurs doivent être identifiés selon la qualité de production de CO_2 visée et déterminent la stratégie analytique (cf. partie « Qualité alimentaire du CO_2 », page 55).

09 STOCKAGE

Une fois le CO_2 produit, il est stocké avant d'être chargé dans un camion de transport.

Pour un même volume, il est préférable d'avoir deux cuves plutôt qu'une, afin de ne pas risquer de perdre un volume important de CO_2 en cas de contamination. Il est important de prendre en compte le volume mort des citernes.

[29] La règlementation F-gas vise à bannir les fluides réfrigérants à haut impact à effet de serre (comme le R134a). Elle induit un bannissement progressif des fluides (jusqu'à 2030).

10 RECYCLAGE DES GAZ D'ÉVENT DU LIQUEFACTEUR

L'arrêté 23 du 17 juin 2021 stipule, à l'article 47 bis, que « *les systèmes d'épuration du biogaz en biométhane sont conçus, exploités, entretenus et vérifiés afin de limiter l'émission du méthane dans les gaz d'effluents à 0,5 % en volume du biométhane produit pour les installations d'une capacité de production de biométhane supérieure à 50 Nm³/h* ».

A l'évent du liquéfacteur, le mélange gazeux comprend majoritairement du biométhane et du CO_2. Ainsi, l'installation d'un système de recirculation de la fraction de méthane résiduelle vers le ciel gazeux ou en amont de l'épurateur permet de respecter la réglementation, de tirer profit de l'injection supplémentaire de biométhane dans le réseau et d'augmenter le rendement carbone.

POINTS DE VIGILANCE TECHNIQUE

À température ambiante (+15°C) et à pression atmosphérique, la densité du CO_2 est de 1,87 kg/m³ et est 1,5 fois plus lourd que l'air. Il est incolore et inodore (avec une odeur légèrement piquante à forte concentration) et s'étale au niveau du sol, s'accumule dans les zones basses comme les puits et les sous-sols.

Il est important de rappeler que manipuler un gaz liquéfié sous pression peut avoir de fortes conséquences (Annexe 3, page 89). Attention :

- aux bouchons et augmentations de pression ;
- aux fuites et dépressions rapides ;
- aux opérations de chargement et déchargement ;
- à la concentration du CO_2 dans l'air ambiant.

1.2 SYNERGIES LIÉES À LA RÉALISATION D'UNITÉ DE MÉTHANISATION EN INJECTION + LIQUÉFACTION

Dans le cas de projets neufs intégrant une unité de méthanisation en injection et un procédé de liquéfaction, il peut exister des synergies pertinentes, dont notamment :

- Le dimensionnement optimal de l'ensemble du procédé intégrant la recirculation des gaz d'évent du liquéfacteur, de manière à maximiser le rendement carbone et réduire au maximum les fuites de méthane ;
- L'optimisation du nombre d'étages de séparation de l'épurateur (réduisant investissement et/ou consommation) ;
- L'optimisation des armoires électriques et des coûts de raccordement ;
- L'optimisation thermique, par récupération de chaleur sur les compresseurs du liquéfacteur.

Cette liste non exhaustive pourra être étudiée en détail lors des études technico-économiques.

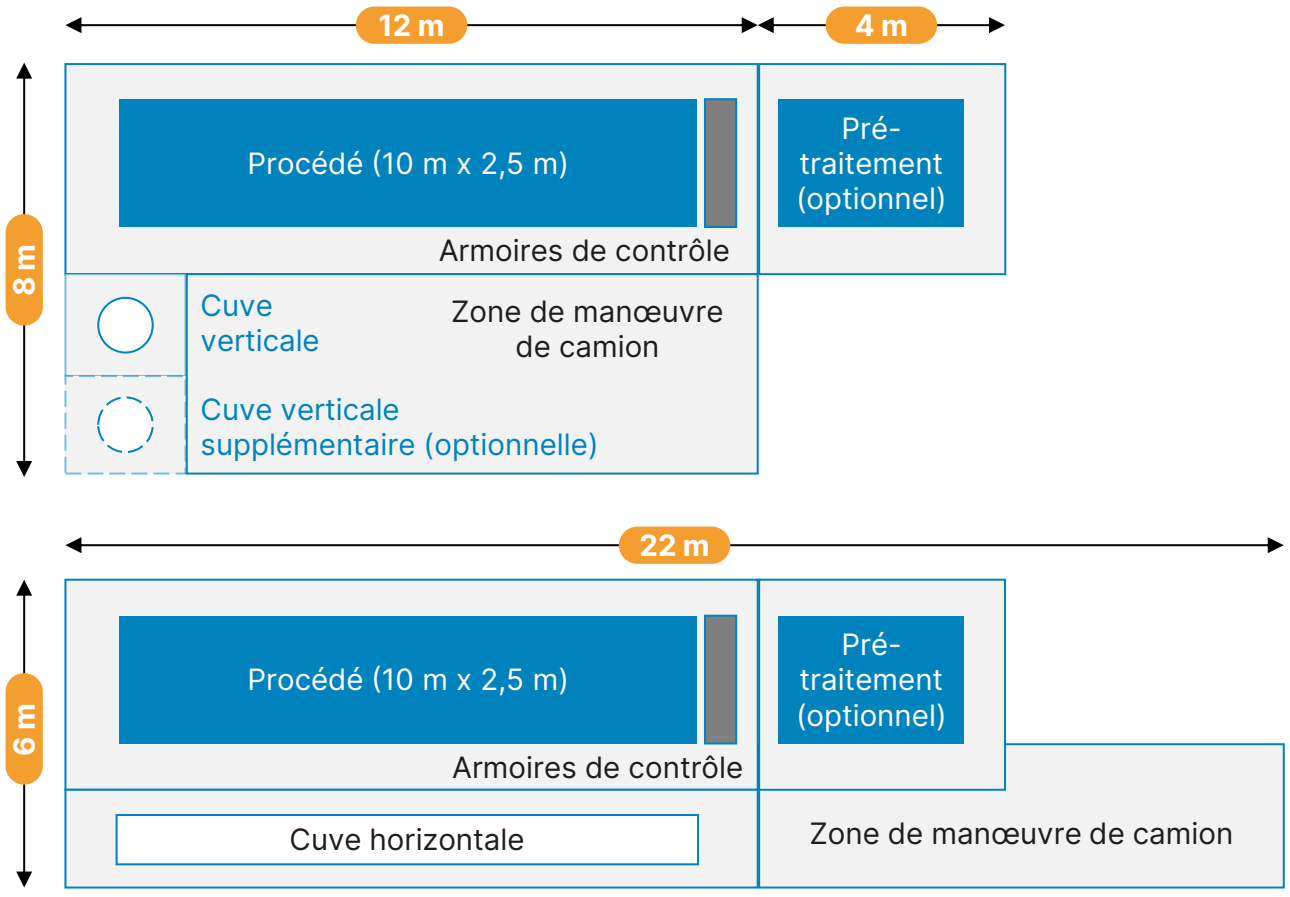


1.3 SURFACE OCCUPÉE PAR UNE UNITÉ DE LIQUÉFACTION DU CO_2

Souvent autour de 100 – 150 m^2 pour une capacité de 400 kg/h. Il faut notamment :

- Prévoir de la place pour les équipements du procédé : soit typiquement un conteneur de 2,5 m x 10 m et un espace pour circuler autour et réaliser les opérations de maintenance. Il est recommandé de prévoir un espace supplémentaire dans le cas où des équipements devraient être ajoutés (par exemple, dans le cas de l'utilisation d'un type d'intrants différent de ceux prévus initialement, il peut être nécessaire d'ajouter une étape de traitement du CO_2 supplémentaire) ;
- Prévoir un espace pour une éventuelle installation d'un laboratoire d'analyses ;
- Disposer d'une hauteur sous plafond suffisante dans le cas de l'installation d'une colonne de distillation dans un hangar ;
- Penser aux équipements électriques et de raccordement ;
- Prendre en compte la (ou les) cuve(s) de stockage : verticale(s) (jusqu'à 12 mètres de hauteur) ou horizontale(s) (2 × 10 m) ;
- Et enfin, prévoir des voiries pour la circulation des camions.

EXEMPLE D'EMPRISE AU SOL POUR UN PROJET DE 400 kgCO_2/h



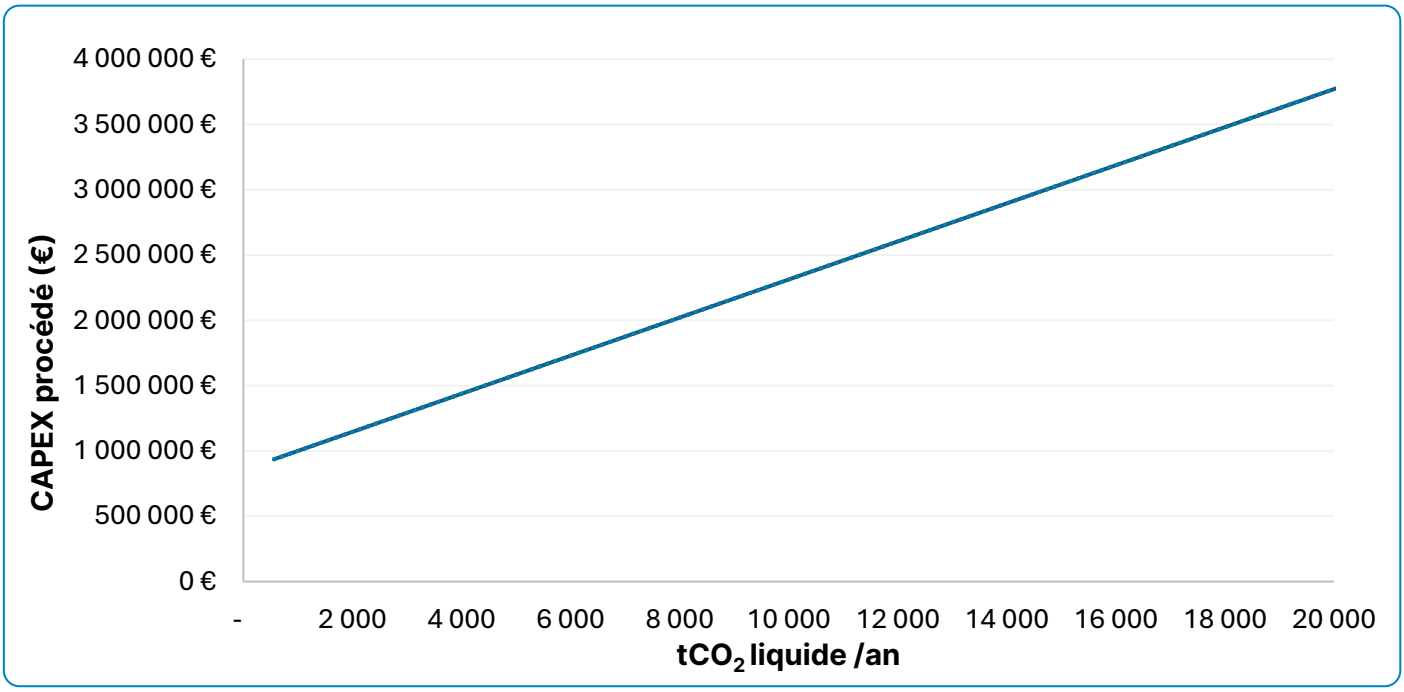
1.4 COÛTS DE PROCÉDÉ DE LIQUÉFACTION

À noter que les aspects économiques présentés dans la première version du guide de 2023 ont été actualisés à partir de données collectées lors d'entretiens avec les fournisseurs d'équipements.

Nous nous inscrivons ici dans le cadre d'un projet de liquéfaction qui représente la plupart des retours d'expérience à date.

Les montants d'investissement (CAPEX) d'un procédé de liquéfaction incluent la fourniture du procédé complet de liquéfaction et des services (ingénierie, montage, mise en service). La courbe de tendance ci-dessous permet d'estimer le coût d'investissement en fonction de la quantité de CO_2 produite chaque année. Les coûts CAPEX du procédé qui sont indiqués correspondent à des valeurs moyennes issues d'une harmonisation de différentes offres fournisseurs de procédés de liquéfaction. Les autres coûts (notamment : étude HACCP, frais de bureaux d'études de conseils, maitrise d'œuvre, étude de marché, génie civil, voiries réseaux divers (VRD), certains lots périphériques) dépendent fortement des caractéristiques du projet et ne sont pas inclus dans cette estimation. (Voir le récapitulatif des CAPEX dans la partie « Aspects économiques d'un projet » page 68, pour obtenir une vision d'ensemble).

TENDANCE CAPEX PROCÉDÉ (€) EN FONCTION DE LA CAPACITÉ DE PRODUCTION



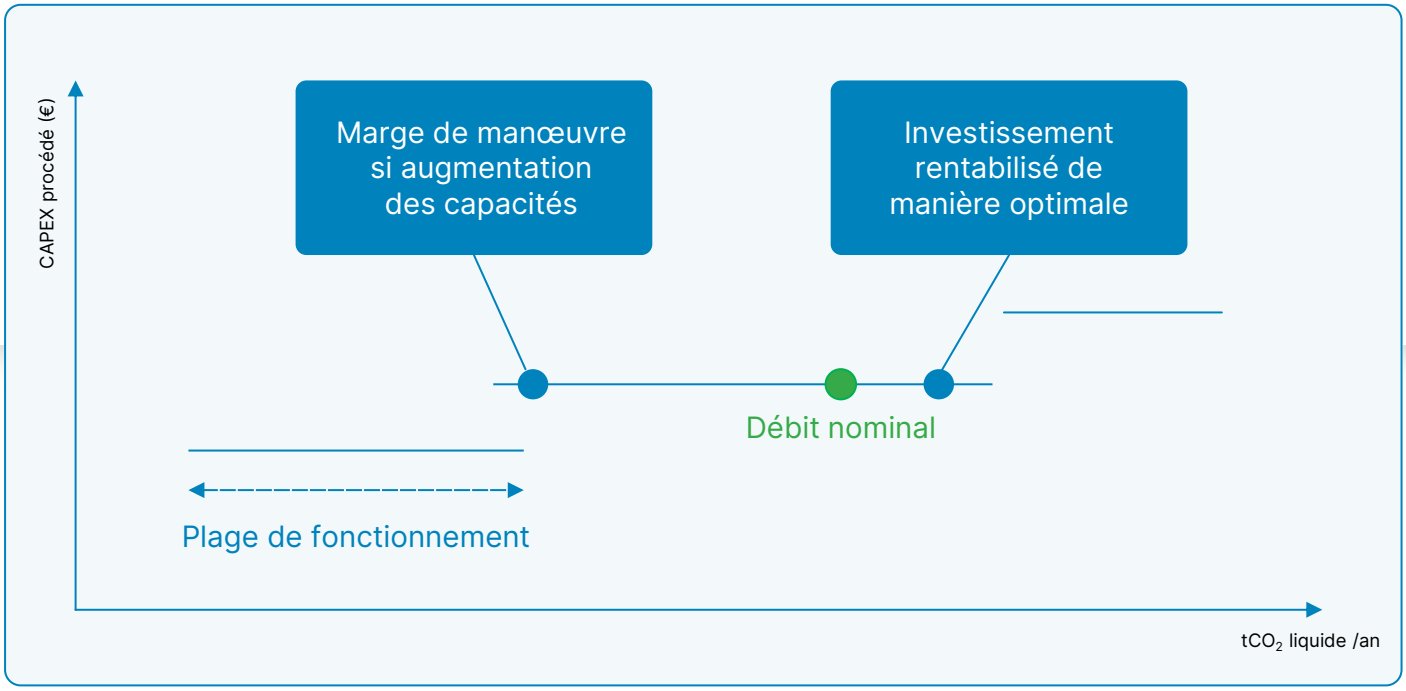
Équipements et prestations compris dans les offres des fournisseurs de procédé de liquéfaction:

- Compresseur
- Sécheur
- Groupe froid
- Liquéfacteur
- Stockage
- Instrumentation
- Equipements électriques
- Équipements divers (raccords, flexibles)
- Études/gestion de projet côté fournisseur
- Transport et déchargement des équipements
- Montage et mise en service
- Raccordements
- Formation

À noter :

La courbe de tendance offre une estimation rapide du coût d'un procédé de liquéfaction. En réalité, chaque procédé dispose de sa propre plage de débit (« plage de fonctionnement »), qui varie selon les fournisseurs.

Le choix du procédé, basé sur le débit d'off-gaz du méthaniseur, consiste donc à trouver un équilibre entre éviter le surdimensionnement pour optimiser l'amortissement de l'investissement, garder une marge de capacité en cas d'augmentation future du volume de CO_2 et garantir un fonctionnement dans les meilleures conditions. Ce point d'équilibre correspond au débit nominal.



1.5 POINTS DE VIGILANCE DANS LE CADRE D'UNE CONSULTATION DE FOURNISSEURS DE LIQUÉFACTEUR

Les performances sont clés : avant de passer commande, il faut demander aux fournisseurs de réaliser un tableau des performances (attendues et garanties) de l'installation qu'ils proposent et les conditions de référence.

Cela comprend notamment :

- La qualité du CO_2 produit.
- Le rendement carbone et le taux de disponibilité.
- La consommation d'électricité de l'installation (recommandée autour de 0,2 et 0,3 MWh/tCO_2 liquide produit).
- Les capacités maximale et minimale de traitement (en kgCO_2/h).
- Il est également souhaitable de définir la plage de fonctionnement (débit d'off-gaz min/max et teneur en CO_2 min/max).
- Il peut être nécessaire de faire valider le projet sur la base d'une analyse d'off-gaz et mettre en place le cas échéant des étapes de prétraitement.

Certains points de vigilance permettent de comparer les offres :

- Est-ce que l'installation nécessite un bâtiment ?
- Les limites de prestations et fournitures ;
- La formation de l'exploitant ;
- Quel est le type de compresseur installé ?
- Quels sont les types de filtres installés et leur durée de vie ?
- Le méthane peut-il être recirculé pour réinjection dans le réseau et quelle est la technologie employée, ainsi que les conditions opératoires ?
- Quel est le fluide de travail utilisé dans le groupe froid ?
- La conformité des équipements à l'ISO 22000 ;
- Un contrat de maintenance peut être proposé en option. Dans ce cas, il doit être chiffré et détaillé : type de maintenance, délais d'intervention, frais de déplacement, pièces de rechange et consommables inclus / exclus, conditions contractuelles…
- Le nombre et le type d'analyses préalables des off-gaz financées par le fournisseur, en précisant l'étendue de la gamme de molécules à qualifier et quantifier. De même, pour des analyses réalisées au lancement de l'installation ;
- Lors de l'assemblage du procédé chez le fournisseur, il est recommandé d'inspecter l'unité avant la livraison sur site. En général, cette étape est réalisée par le chef de projet (MOE). Il faut vérifier que les pièces qui composent le système soient bien conformes aux règles alimentaires (inspection des certificats d'alimentarité). C'est le moment où il est encore possible de changer des pièces ou des équipements ;
- Enfin, l'installation doit respecter les normes en vigueur :
  - L'ensemble des règlements CE applicables, dont la Directive des Équipements Sous Pression (DESP), Compatibilité Électromagnétique (CEM), Machine (directive Machine) ;
  - Pour la qualité alimentaire, les règlements spécifiques (Annexe 4, page 90).

POUR PLUS D'INFORMATIONS

LE GUIDE POUR L'ÉLABORATION DES DOCUMENTS TECHNIQUES DE CONSULTATION ET D'OFFRES D'UNE UNITÉ DE « TRAITEMENT DU CO_2 » ISSU DU BIOGAZ EN VUE DE SA VALORISATION[30] est un document de base qui rappelle de manière exhaustive les critères à prendre en compte lors de la consultation des fournisseurs d'équipement.



[30] Le guide pour l'élaboration des documents techniques de consultation et d'offres d'une unité de « traitement du CO_2 » issu du biogaz en vue de sa valorisation, CSF NSE, Août 2022

2. TRANSPORT ROUTIER DU CO_2 LIQUIDE

Le transport routier de CO_2 se fait en citerne roulante pour du CO_2 liquéfié. Sous cette forme, le CO_2 a une température d'environ -22°C, une pression d'environ 18 bar(g) et dispose d'une densité d'environ 1 t/m^3. La citerne est équipée de ses accessoires (pompe, instrumentation) pour transférer le CO_2 vers la citerne (fixe) du client. Dans certaines utilisations sensibles et afin de limiter les risques de rétropollution, l'équilibrage des pressions via le raccordement de la phase gazeuse de la citerne est prohibé.

Pour des raisons de qualité/traçabilité, une citerne de CO_2 transporte une seule qualité de CO_2 (alimentaire ou industriel) et doit être requalifiée s'il y a un transport de CO_2 non alimentaire ou déclassé. Le transport de CO_2 liquide est soumis à la règlementation ADR afférente au transport de matières dangereuses qu'il est indispensable de prendre en compte avec toutes les contraintes et les coûts associés.

2.1 LES DIFFÉRENTS MODÈLES D'ORGANISATION DU TRANSPORT ROUTIER

Il existe plusieurs configurations pour le transport de CO_2. Dans le modèle « centralisé » classique du transport de CO_2, quelques (grosses) usines approvisionnent des consommateurs, parfois situés très loin. Les coûts de transport sont très importants.



Schéma représentant le modèle « centralisé » classique du transport de CO_2

À NOTER

On évoque souvent une distance maximum de livraison de 250 km entre la source et le client, mais c'est un paramètre indirect : l'idée clé est plutôt de pouvoir réaliser au moins une tournée dans la journée (le chauffeur peut faire l'aller / retour dans la journée). Dans le modèle centralisé, il arrive que certains consommateurs soient approvisionnés à partir d'usines situées à des distances plus importantes.

Pour le transport de CO_2 issu de méthanisation, il existe d'autres modèles.
Dans le modèle « autonome », un producteur approvisionne un petit nombre de consommateurs, nécessairement sur des distances très courtes.

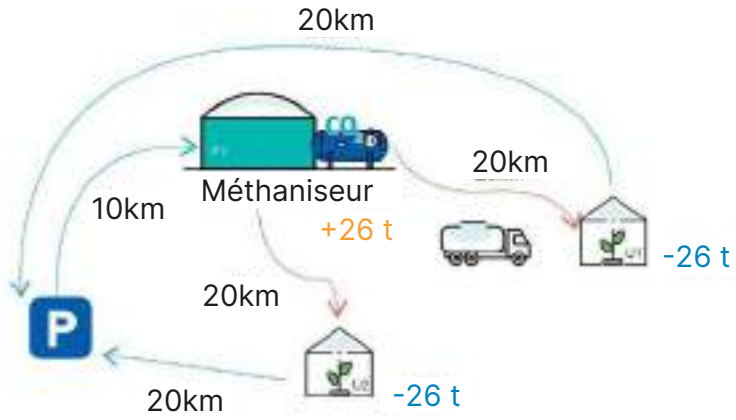


Schéma représentant le modèle « autonome » de transport du CO_2

En synergie avec les grands acteurs du marché du CO_2, il existe également le modèle « relais local » ou « proxy ». Un camion provenant d'une usine de CO_2 peut étendre sa tournée en rechargeant dans une unité de méthanisation.

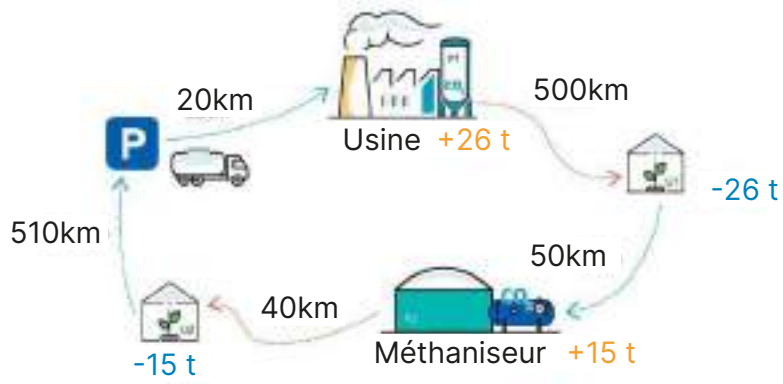


Schéma représentant le modèle « relais local » de transport du CO_2

Les producteurs de CO_2 biogénique peuvent également se regrouper entre eux pour former un modèle « coopérative », de type boucle mixte, où un camion peut combiner chargement et déchargement dans la même tournée.

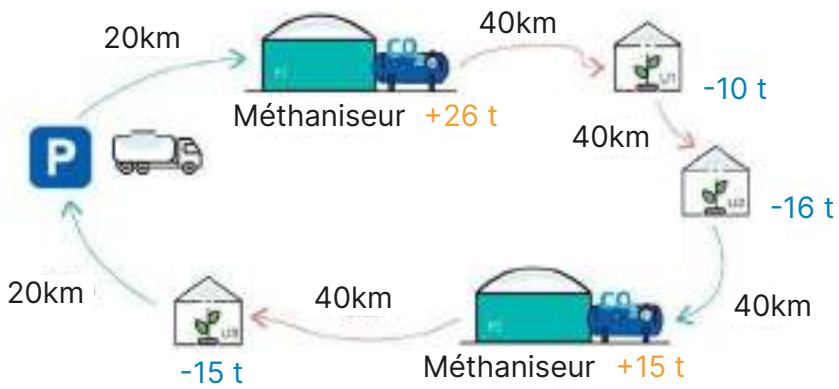


Schéma représentant le modèle « coopérative »

Pour le transport de CO_2 de qualité alimentaire, un modèle de type « boucles de collecte » peut mutualiser des équipements tels qu'un analyseur.

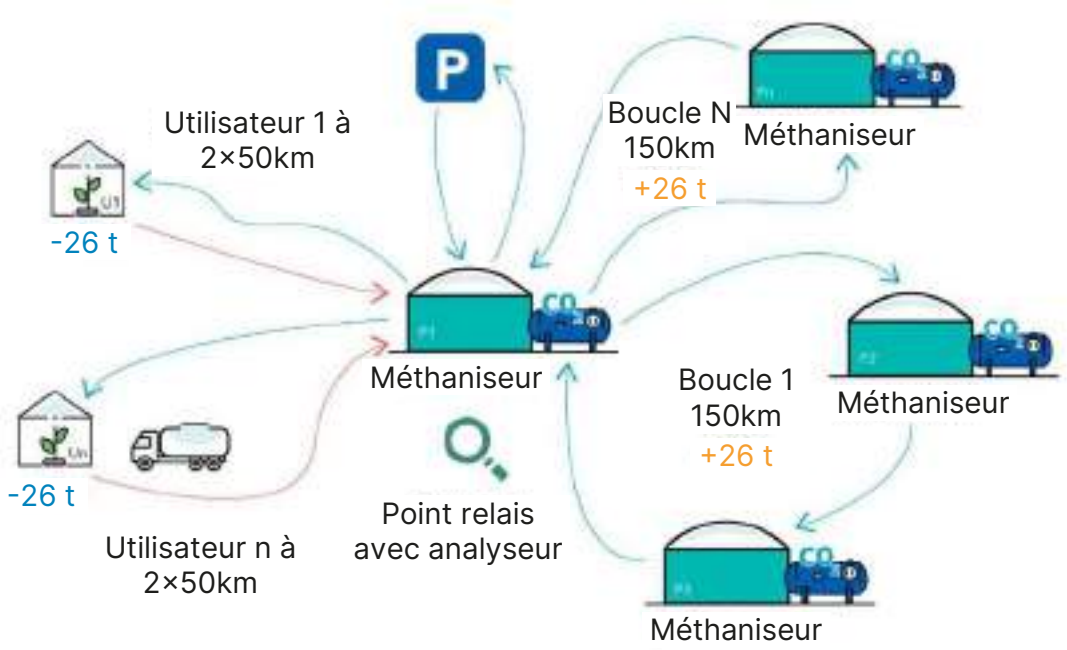


Schéma représentant le modèle « boucles de collecte »

À NOTER

Certains acteurs préfèrent travailler avec des prises d'échantillons envoyés à des laboratoires. L'avantage de cette pratique est qu'elle permet de ne pas contaminer les citernes de transport avec un CO_2 qui ne respecterait pas la qualité des autres membres du réseau.

La difficulté réside dans la fiabilité de la prise d'échantillons : dispose-t-on d'un moyen fiable de ne pas contaminer les récipients et de ne pas altérer la qualité du CO_2 ?

2.2 LES COÛTS DU TRANSPORT ROUTIER DE CO_2

Pour les projets de valorisation du CO_2 biogénique issu de méthanisation, le coût de transport du CO_2 varie typiquement entre 20 et 70 €/tCO_2 et peut représenter un coût significatif. Selon la taille du projet et le rôle souhaité par le porteur de projet, deux options existent : l'externalisation, complète ou partielle à une société de transport, ou l'internalisation en investissant dans un ou des ensembles routiers.

A. Externalisation

L'activité est confiée à une société de transport ou au client qui gère le chargement sur site et l'acheminement de la molécule jusqu'au dépotage dans la cuve du site consommateur.

La construction d'une offre de location repose sur deux éléments principaux (voir Annexe 6, page 92, pour plus détails) :

- La configuration de l'offre : les prestations incluses ou non.
- La formule de location : contrat long terme mensuel, contrat court terme journalier ou prestation ponctuelle (SPOT).

Il est difficile de construire des tendances de coûts du transport routier, car chaque cas est différent. La formule et la configuration d'une prestation varient d'un transporteur à un autre et les paramètres opérationnels qui influent sur le prix sont nombreux (distance, quantité transportée sur la période, distance d'approche, temps de chargement du camion…).

Cependant, nous proposons ici des fourchettes de coûts en fonction de la quantité transportée à l'année, sur la base de retours d'expérience d'acteurs de la filière.

Attention **:** ces estimations sont surtout pertinentes pour des locations journalières ou mensuelles. Dans le cas d'un contrat SPOT, qui est un engagement ponctuel sur un trajet unique, les prix peuvent varier de manière significative.

Estimations des coûts de transport pour une distance inférieure à 200 km*, selon la quantité de CO_2 transportée à l'année.

tCO_2/an	500 – 2000	2000 – 5000	> 5000
€/tCO_2	70-150 €	30-80 €	25-50 €

*Au-dessus de 200 km, les retours d'expérience sont peu nombreux et les modèles utilisés pour estimer des coûts de transport ne s'appliquent plus compte tenu de la multitude de paramètres qui entrent en jeu.

La sélection de la formule (location mensuelle, journalière, SPOT) dépend fortement de la quantité de CO_2 à transporter et dépend de chaque typologie de projet.

Afin de pouvoir établir une cotation chiffrée fiable, les transporteurs demandent des informations telles que :

- Les distances ou rayons d'enlèvement/livraison envisagés ;
- Les volumes de CO_2 concernés et la fréquence des rotations ;
- La durée d'engagement souhaitée ;
- Les conditions de chargement et de dépotage (équipements spéciaux, pression, etc.) ;
- Les contraintes d'horaires ou d'accès aux sites, etc.

B. Internalisation

Le transport peut être internalisé. Cela constitue un nouveau métier, avec des pratiques et des exigences spécifiques et réglementaires à maîtriser. Cette solution peut devenir rentable sur de gros volumes. Malgré un investissement initial important, la prestation peut être valorisée auprès des clients en y appliquant une marge. La mutualisation avec d'autres producteurs est également possible.

Ci-dessous quelques estimations de coûts pour chaque élément :

- Tracteur routier : 110-115 k€.
- Les investissements dans la (ou les) citerne(s) ADR spécialisée(s) CO_2. Une citerne neuve de capacité maximale (28000 L) vaut de 180 à 250 k€. Des citernes plus petites (18000 – 20000 L) peuvent valoir beaucoup moins.
- Les coûts au kilomètre : ils incluent les dépenses de carburants et l'usure du matériel (pneumatiques).
- D'autres coûts annexes (assurance, maintenance des équipements) sont aussi à considérer.
- Salaire conducteur : environ 70 000 €/an brut (incluant les charges). Le conducteur doit être formé sur les procédures liées au chargement et au dépotage d'une citerne.

Quelques considérations à prendre en compte :

- Contrôle réglementaire à faire régulièrement.
- Besoin d'un espace pour garer le (ou les) ensemble(s) routier(s).
- L'ensemble routier de transport de gaz est un système technique assez poussé. Il existe seulement quelques fournisseurs en Europe.

QUELQUES POINTS D'ATTENTION :

1. Requalifier une citerne roulante qualité alimentaire après avoir été polluée peut être une étape coûteuse et impactant la logistique. Tout projet devant mutualiser les moyens de transport entre plusieurs producteurs de CO_2 devra faire l'objet d'une analyse fine de la qualité du CO_2 et des moyens de contrôle.

2. Le temps de chargement d'une citerne peut être long, il est important de prendre en compte cette contrainte dans le plan d'affaire et les négociations des contrats avec les clients et les prestataires de transport.

3. Utilisation d'une métrologie adaptée : la mesure utilisée pour facturer le CO_2 doit obligatoirement provenir de l'ensemble de mesurage routier certifié du camion, généralement un débitmètre Coriolis, conformément à la recommandation OIML R117.

   Le pont-bascule, bien qu'utilisé sur certains sites, n'est pas autorisé pour cette transaction : il sert uniquement à peser un ensemble roulant, pas à mesurer un produit vendu. Son utilisation expose les sites à des risques fiscaux et douaniers en cas de contrôle. Certains transporteurs possèdent déjà les équipements conformes, autrement, le coût d'un tel système est d'environ 80 k€.

4. La taille des stockages sur les sites clients est également un élément clé. En effet, cela permet d'envisager des livraisons dites « complètes » et d'optimiser la durée et le coût des tournées. Cela permet également d'amortir les variations journalières et saisonnières des consommations clients.

5. Une formation selon le chapitre 1.3 de la réglementation ADR est obligatoire pour toute personne autre que les conducteurs dont le travail est lié au transport de marchandises dangereuses. La nature de la formation est à adapter selon les fonctions et les responsabilités de la personne concernée[31].

6. Un Conseiller à la Sécurité pour le Transport de Marchandises Dangereuses (CSTMD) formé pour les marchandises de classe 2 doit être désigné pour mener un audit et rédiger un rapport sur les activités de l'entreprise liées au transport de marchandises dangereuses. Depuis le 1er janvier 2021, toute entreprise dont l'activité comporte chargement, transport ou déchargement de matières dangereuses est tenue d'effectuer sa déclaration de conseillers à la sécurité en ligne[31].

POUR PLUS D'INFORMATIONS

La brochure **LE TRANSPORT DES MATIÈRES DANGEREUSES (2025)[31]** publiée par l'INRS présente les obligations générales fixées par l'ADR pour transporter des marchandises dangereuses et explique en quoi leur respect participe à la prévention des risques professionnels.

[31] Le transport des matières dangereuses, INRS , Novembre 2025

3. USAGES DIRECTS PAR CANALISATION

La valorisation des off-gaz d'épuration riches en CO_2 issus des unités de méthanisation peut être envisagée sans recourir à une liquéfaction sur chaque site. Dans ce cadre, la mise en place de canalisations de collecte, même sur de courtes distances entre un ou plusieurs sites de production et des points de valorisation, peut être pertinente. Elle permet de transporter le CO_2 sous forme gazeuse de manière continue, de limiter les équipements sur site et de simplifier l'organisation globale du projet.

Cette approche, encore émergente, présente un potentiel intéressant, même si elle suppose des évolutions réglementaires en cours. Elle peut améliorer l'équilibre économique des projets, tout en ouvrant l'accès à des débouchés existants, comme l'usage en serres ou pour d'autres industries consommatrices, ainsi qu'à des usages en développement tels que les e-fuels ou la séquestration. Ces valorisations restent toutefois conditionnées à l'atteinte de niveaux de qualité du CO_2 compatibles avec les exigences de chaque usage, ce qui implique, selon les cas, des étapes de purification supplémentaires.

PRINCIPAUX SCHÉMAS DE VALORISATION ENVISAGÉS

1. Transport de CO_2 gazeux par canalisation sur de courtes distances

Le CO_2 peut être transporté directement sous forme gazeuse à un ou plusieurs utilisateurs situés à proximité (typiquement à quelques kilomètres), via des canalisations reliant une ou plusieurs unités de méthanisation. Ce schéma permet de répondre à des besoins locaux sans recourir à une étape de liquéfaction. Selon les exigences des usages finaux, une étape de purification complémentaire peut toutefois être nécessaire. Cette configuration favorise le développement de boucles locales de valorisation et l'émergence d'écosystèmes territoriaux autour du CO_2 biogénique.

2. Mutualisation des flux pour liquéfaction centralisée

Il devient par ailleurs possible de raccorder plusieurs sources de production situées à proximité afin d'acheminer le CO_2 vers une unité de liquéfaction mutualisée, de plus grande capacité. Le regroupement des flux par canalisation permet d'atteindre une taille critique et de bénéficier d'effets d'échelle, tant sur les investissements (CAPEX) que sur les coûts d'exploitation (OPEX), améliorant ainsi la rentabilité globale des infrastructures. Ce schéma repose sur une logique de mutualisation des équipements, notamment des unités de liquéfaction et des systèmes d'analyse.



PRINCIPALES COMPOSANTES DES INSTALLATIONS

De telles installations peuvent comporter plusieurs composantes, qui dépendent de la structuration du projet, des contraintes de qualité attendues sur le CO_2 biogénique et des besoins clients :

- Canalisations ;
- Système d'épuration supplémentaire le cas échéant ;
- Stockage tampon, typiquement sous forme d'un gazomètre, si nécessaire ;
- Surpresseur/compresseur ;
- Système de contrôle et de régulation, incluant différents postes (injection, livraison) ;
- Une ou plusieurs unités de liquéfaction dans le cadre d'une valorisation mutualisée en CO_2 biogénique liquéfié.

ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

Le cadre réglementaire actuel permet de transporter le CO_2 via des canalisations en acier uniquement, ce qui peut impacter la rentabilité des projets. Des travaux sont en cours pour permettre le transport du CO_2 via des canalisations en polyéthylène haute densité (PEHD), et ainsi rendre cette solution plus accessible.

En effet, le Club Biogaz de l'ATEE a été désigné par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) pour actualiser le « Guide professionnel applicable aux canalisations de transport de gaz de biomasse non épuré » publié en 2013. Cette mise à jour, vise notamment à préciser les règles applicables au transport de CO_2 biogénique issu de méthanisation via des canalisations en PE jusqu'à 10 bar(g).

L'aboutissement de ces travaux constitue un élément clé pour faciliter le développement de solutions d'acheminement de CO_2 biogénique et soutenir l'émergence d'une filière industrielle associée.



4. QUALITÉ ALIMENTAIRE DU CO_2

1. INTRODUCTION

Le CO_2 biogénique issu de méthanisation peut répondre aux exigences de la spécification alimentaire. Cependant, cette spécification est contraignante et demande une connaissance approfondie du contexte réglementaire et des bonnes pratiques à mettre en place. **Il est nécessaire pour un porteur de projet de s'entourer d'un bureau d'études compétent afin de l'aider à répondre à ces exigences.**

1.1 QU'EST-CE QUE LA SPÉCIFICATION ALIMENTAIRE ?

La notion de spécification alimentaire regroupe plusieurs aspects. D'une part, le volet règlementaire, obligatoire, incluant notamment :

- Le respect des règlements européens (CE), et notamment le règlement 1333/2008 additifs (E290) et les spécifications additionnelles mentionnées au règlement CE 231/2012 ;
- La déclaration aux autorités compétentes (service de la DDPP ou DDCSPP) et la constitution d'un dossier, incluant notamment :
  - Le respect des programmes prérequis (PRP) en matière de bonnes pratiques alimentaires ;
  - Un plan HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point), soit, en français, un « système d'analyse des dangers et des points critiques pour leur maitrise » ; il s'agit d'une méthode d'analyse des risques particulièrement utilisée en sécurité alimentaire ;
  - La traçabilité et la maitrise des non-conformités.

Le respect du volet règlementaire est, par nature, obligatoire. Le non-respect des normes d'hygiène et de sécurité alimentaire peut entrainer de graves sanctions pour l'entreprise et ses dirigeants.

D'autre part, le volet contractuel qui n'est pas obligatoire, mais souvent demandé par les clients, incluant :

- La conformité aux référentiels commerciaux EIGA/ISBT qui sont considérés comme des standards de référence pour l'industrie agroalimentaire. À noter qu'en plus de ces spécifications, certains clients ont leurs propres exigences. On compte aujourd'hui plus de 30 spécifications différentes sur le marché français.
- La mise en place d'un système de management de la qualité alimentaire, avec certification par un tiers. La plus connue est la FSSC22000 qui est un dispositif de certification privée qui intègre l'ISO 22000, tout en reprenant d'autres exigences non couvertes par la norme, notamment Food Fraud et Food Defense. Outre l'étude HACCP, d'autres documents sont à produire (procédures de traçabilité, gestion documentaire, achats, analyses Food safety et Food defense…) afin de l'obtenir.

À NOTER

A noter, les référentiels EIGA et ISBT ont été initialement définis pour du CO_2 issu de voies de production conventionnelles (vaporeformage du gaz naturel, production d'ammoniac, production de bioéthanol). Contrairement à celles-ci, la méthanisation utilise des intrants très variés et ces référentiels constituent un bon point de départ en termes de contrôle qualité, mais ne couvrent pas l'ensemble des risques liés à leur diversité. En effet, la nature et le parcours de vie des intrants influencent directement la probabilité de présence de contaminants dans les gaz résiduels. Certains sont considérés comme sans risque, tandis que d'autres peuvent en présenter.

Exigences RÉGLEMENTAIRES

Se conformer	À mettre en place
Réglementation E290 (UE) - Utilisation du CO_2 en tant qu'additif	Système d'analyse des dangers et des points critiques pour leur maitrise

Exigences CONTRACTUELLES

Se conformer	À mettre en place
Spécifications European Industrial Gas Association International Society of Beverage Technologist	**Normes et certifications** Norme ISO22000 : Management de la sécurité des denrées alimentaires *Certifications, exemple :* FSSC22000

Pour garantir une qualité alimentaire, le CO_2 biogénique issu de méthanisation doit répondre à deux exigences fondamentales :

- **Identification et élimination des contaminants :** le gaz doit être épuré de tout contaminant susceptible de migrer en phase gazeuse, qu'il figure ou non dans les spécifications EIGA/ISBT. Des dispositifs de traitement des off-gaz adaptés doivent être mis en place, et leur efficacité démontrée, notamment par des analyses.
- **Traçabilité stricte :** la production du CO_2 doit être suivie depuis le point d'origine des intrants jusqu'au dépotage dans la cuve du client.

1.2 POURQUOI SE LANCER DANS LE CO_2 ALIMENTAIRE ?

Accès à la totalité du marché : viser une qualité de CO_2 alimentaire permet d'ouvrir l'accès à des débouchés variés (agroalimentaire, boissons, mais aussi applications moins exigeantes comme les serres agricoles). Ce positionnement offre un avantage stratégique majeur : en atteignant les standards les plus élevés, il devient possible d'adresser l'ensemble des segments du marché et de disposer de solutions de repli selon les opportunités, alors que l'inverse — partir d'une qualité inférieure — ne permet pas de remonter vers les usages les plus exigeants. Cette diversification réduit ainsi la dépendance à un seul secteur et contribue à sécuriser les volumes écoulés.

Sécurité contractuelle : les contrats pour du CO_2 alimentaire sont généralement stables et pluriannuels. Cette sécurité facilite la planification et la rentabilité des investissements.

Prix de vente plus élevé : le CO_2 alimentaire se négocie à un tarif supérieur au CO_2 de qualité industrielle. Cependant, le coût de production est plus élevé, il y a donc un équilibre économique à trouver.

Pour tout projet de valorisation du CO_2, la première étape consiste à sécuriser un débouché avant d'engager des investissements. Une fois ce débouché sécurisé, il est essentiel de vérifier si le client nécessite du CO_2 de qualité alimentaire. Si cette exigence est confirmée, le projet devra viser ce niveau de qualité, plus contraignant. En revanche, si une qualité alimentaire n'est pas indispensable, il est préférable de s'orienter vers la production de CO_2 de qualité industrielle qui est plus simple à atteindre. Cette option permet de réduire les contraintes techniques et de faciliter la mise en œuvre du projet de valorisation.

2. SE LANCER DANS UN PROJET CO_2 DE QUALITÉ ALIMENTAIRE

2.1 ÉTUDE DU POTENTIEL D'ALIMENTARITÉ

Nous proposons une méthode étape par étape qui permet d'évaluer son potentiel d'alimentarité. **Elle s'inspire des grands principes de la méthode HACCP, mais ne se substitue pas à celle-ci.**

Pour rappel, Il est fortement recommandé de travailler avec un expert en CO_2 alimentaire dans le cadre d'un tel projet. Le guide a pour vocation de donner une vision globale des tâches à réaliser. Il a pour but de sensibiliser et d'informer le porteur de projet, mais ne se substitue en aucun cas à l'expertise d'un bureau d'études.



ÉTAPE 1 CARACTÉRISATION DES INTRANTS

La complexité de produire du CO_2 de qualité alimentaire dépend directement des types d'intrants utilisés. Pour sécuriser le procédé, il est essentiel de commencer par identifier l'ensemble des intrants alimentant le méthaniseur au cours de l'année et, pour chacun, son parcours. Les intrants d'opportunité doivent être intégrés à cette réflexion. Il est donc nécessaire d'anticiper leur approvisionnement.

Voici ci-dessous quelques exemples de critères clés à renseigner :

CRITÈRE	DESCRIPTION
Filière de production	L'intrant est-il une **culture principale, une culture énergétique dédiée, un résidu de culture, un biodéchet, un effluent industriel ou agricole** ?
Nature de l'intrant	Quelle est la **nature de l'intrant** selon la nomenclature officielle ? (lisier, fumier, soupe de biodéchet, orge, maïs, graisses d'abattoir, etc.).
Origine	Quel est le **lieu de production** ou de **collecte** de l'intrant ?
Informations sur les conditions de production	Quelles sont les **différentes étapes de production** de l'intrant ? (type de cultures, historique des sols, matériaux en contact, engrais, fertilisants utilisés, etc.).
Informations sur la première vie (cas des déchets)	Quel est le **parcours de vie** de l'intrant avant qu'il ne devienne un déchet ?
Mode de transport et conditionnement / déconditionnement	Comment a-t-il été **transporté**, avec quel **emballage** et comment a-t-il été **déconditionné** ?
Pré-traitement de l'intrant	Quel type de **pré-traitement** (ex : hygiénisation) et quelles conditions opératoires ? *In situ*, *ex situ* ? Etc.
Contacts potentiels avec d'autres substances	Des **substances** peuvent-elles potentiellement être en contact avec l'intrant durant son parcours de vie ? (javel, produits phytosanitaires, agents biologiques, etc.).

Pour mener à bien cette enquête, il est recommandé d'échanger en amont avec les fournisseurs d'intrants. Ces échanges ont trois objectifs principaux :

1. **Identifier les risques de contamination :** déterminer si des contaminants peuvent se retrouver dans le CO_2.
2. **Constituer un système documentaire :** créer des preuves solides pour se protéger en cas d'incident ou de litige.
3. **Mettre en place la traçabilité :** initier un système permettant de suivre les intrants depuis leur origine. Ce système est d'autant plus important que les intrants sont des matières à risques comme des biodéchets ou des effluents. Pour des cultures principales ou des CIVE, le système peut être allégé si aucun risque n'a été identifié.

ÉTAPE 2 RÉGLEMENTATIONS ET RESPONSABILITÉS.

Pour rappel, le principe de base qui doit être garanti par la sécurité alimentaire est que les aliments ne présentent aucun danger pour la santé des consommateurs.

En suivant ce principe, de nombreuses réglementations existent pour cadrer l'industrie de l'agroalimentaire. Au niveau de l'UE, les réglementations suivantes concernent directement le CO_2. À noter que cette liste est non exhaustive, elle présente les principaux textes applicables. Une liste des différents textes est présentée en Annexe 4, page 90.

Statut du CO_2 utilisé comme gaz alimentaire

Le CO_2 gazeux est considéré comme un additif alimentaire (E290), il est donc cadré par le règlement (CE) n°231/2012 qui établit les spécifications des additifs alimentaires. Celui-ci s'applique également au CO_2 utilisé en tant qu'auxiliaire technologique ou ingrédient.

Procédures

Le règlement (CE) n°852/2004 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires. L'article 5 prévoit l'obligation pour les exploitants du secteur alimentaire de mettre en place, appliquer et maintenir des procédures fondées sur les principes de l'HACCP (Système d'analyse des dangers et de maîtrise des points critiques).

Équipements

L'unité de valorisation CO_2 est une installation industrielle soumise aux directives européennes sur les équipements sous pression (n° 2014/68). Les fournisseurs d'équipements sont également soumis aux règlements (CE) suivants :

- n° 2023/2006 relatif aux bonnes pratiques de fabrication des matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires.
- n° 1935/2004 relatif aux matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires.

Des certificats d'alimentarité attestant de la viabilité du produit au contact de denrées comestibles seront à fournir par les fournisseurs d'équipements retenus. Il est de la responsabilité des porteurs de projet de s'assurer que les fournisseurs respectent les réglementations en vigueur.

Prendre conscience des risques juridiques

En cas de non-conformité, les autorités (DGCCRF, services sanitaires) disposent de pouvoirs étendus : elles peuvent imposer le retrait des produits, le rappel des équipements ou l'arrêt immédiat de la production. Le fournisseur d'équipements est responsable si les équipements ne permettent pas d'atteindre la pureté requise, et le producteur si le CO_2 n'est pas conforme. Les sanctions peuvent être lourdes : perte de certification CE, amendes importantes, voire responsabilité civile et pénale pour mise en danger des consommateurs ou infraction sanitaire. Le juge tranche la responsabilité, qu'il s'agisse d'un défaut de procédé ou d'une mauvaise utilisation.

En cas de contamination, la DGCCRF active le système d'alerte européen, ordonne des analyses en laboratoire et lance une campagne de rappel, aux frais du producteur.

La construction d'une procédure préventive de rappel des lots est conseillée pour agir efficacement en cas d'incident.

Pour se protéger, il est essentiel de sélectionner une assurance qui prend en compte les rappels de lots et de mentionner dans les contrats (avec les fournisseurs d'équipements, fournisseurs d'intrants, clients, transporteurs) des clauses précises : par exemple, il est nécessaire de définir le point de transfert de responsabilité avec le client (lors du chargement ou au moment du dépotage).

POINT D'ATTENTION :

Cas particulier des intrants « à risques »

En méthanisation, les intrants « à risques sanitaires » sont principalement des :

- **Déchets alimentaires :** déchets de cuisine et de table, épluchures, produits périmés… ;
- **Sous-produits agroalimentaires :** pulpes, marcs, issues de céréales, lactosérum… ;
- **Déchets verts :** tontes, feuilles, résidus de jardin… ;
- **Boues de station d'épuration ;**
- **Effluents d'élevage :** lisiers, fumiers ;
- **Sous-produits animaux de catégorie 2 et 3 (SPAn2 et SPAn3) :** graisses, déchets de découpe, sous réserve de conformité **au règlement 1069/2009** qui établit des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et aux produits dérivés (déchets de cuisine et de table) non destinés à la consommation humaine.

Ces intrants représentent des risques sanitaires du fait de leur nature ou de leur parcours de vie.

Selon **le règlement (CE) n°178/2002** relatif aux principes généraux et aux prescriptions générales de la législation alimentaire qui pose un cadre général et introduit la notion de traçabilité et de conformité aux règles d'hygiène, si des déchets ou sous-produits sont utilisés pour rationner le méthaniseur, le porteur de projet doit prouver que le CO_2 provenant de ces intrants ne présente aucun risque pour la santé humaine et doit mettre en place une démarche HACCP rigoureuse, avec un système de traçabilité performant.

ÉTAPE 3 ANALYSE DE L'OFF-GAZ

Il est indispensable d'analyser les composés présents dans l'off-gaz afin de déterminer si la valorisation du CO_2 pour des usages alimentaires est envisageable.

Des laboratoires spécialisés, équipés d'analyseurs adaptés, proposent des prestations permettant d'identifier et de quantifier les composés présents dans l'off-gaz. Pour obtenir une analyse représentative, il est nécessaire de réaliser plusieurs prélèvements espacés dans le temps, afin de prendre en compte la variabilité des intrants.

Ces analyses représentent un coût et ne garantissent pas la faisabilité du projet. C'est pourquoi, une caractérisation préalable des intrants à l'étape 1 est essentielle pour éviter des dépenses inutiles. Si les intrants sont intraçables ou présentent des risques élevés, le projet en qualité alimentaire doit être écarté. Cependant, il est tout à fait possible de poursuivre le projet pour des spécifications moins contraignantes.



ÉTAPE 4 ANALYSE DES RISQUES

Lorsqu'on produit du CO_2 destiné à entrer en contact avec des denrées alimentaires ou à être directement intégré en tant qu'additif ou ingrédient, il est obligatoire d'éliminer tout risque qui pourrait porter atteinte à la santé du consommateur final.

Il existe 4 types d'agents représentant un danger pour la santé humaine :

- **Agents physiques** comme des cailloux, bouts de métaux, de bois...
- **Agents biologiques,** par exemple, des champignons, bactéries, virus, parasites...
- **Agents chimiques** comme des éléments traces, dont les métaux lourds, ou des substances comme les hydrocarbures, les dioxines ou encore des produits biocides, médicaments, produits phytopharmaceutiques...
- **Agents allergènes** (gluten, arachides...)

Pour le CO_2, le risque associé est évalué en combinant la probabilité qu'un danger soit présent dans le CO_2 et la gravité des conséquences potentielles pour la santé du consommateur.

Ainsi, il est de la responsabilité du producteur d'identifier les dangers sur sa chaîne de production, tout en considérant qu'ils peuvent être également en amont et en aval, et de limiter les risques associés.

De quelles manières le CO_2 peut-il être contaminé ?

Présence de composés dans les intrants qui migrent en phase gazeuse lors de la méthanisation.

Formation de molécules par réactions chimiques lors des différentes étapes de production.

Contaminants extérieurs qui s'introduisent dans la chaîne de production ou lors du transport, notamment lors des opérations de maintenance, de chargement dans le camion et du dépotage dans la cuve du client.

Comment évaluer ces risques ?

1. **En identifiant de manière exhaustive les contaminants** pouvant être présents dans chaque flux d'intrants **et en mesurant leur teneur dans l'off-gaz.** Cela se fait notamment grâce au travail effectué lors des étapes 1 (caractérisation des intrants) et 3 (analyse de l'off-gaz).

2. **En évaluant** quels composés seront éliminés lors de leur passage à travers les équipements de purification de la chaîne de production et ceux pouvant être résiduels malgré ces équipements.

3. **En identifiant les zones de la chaîne de production et de distribution** où une contamination d'origine extérieure peut avoir lieu.

ÉTAPE 5 MESURES COMPENSATOIRES

Selon les risques identifiés, des actions préventives, des solutions barrières et un plan de surveillance doivent être établis en conséquence. Ces solutions et le plan associé doivent être calibrés selon les spécifications contractualisées avec le client afin de pouvoir garantir leur respect.

1 Actions préventives pour limiter les risques de contamination

Cela fait référence à toutes conditions et activités de base nécessaires pour maintenir un environnement hygiénique approprié tout au long de la chaîne alimentaire. Elles constituent le socle sur lequel repose la sécurité alimentaire. Cela inclut des pratiques telles que :

- **Hygiène du personnel :** formations et pratiques d'hygiène pour le personnel manipulant les aliments.
- **Propreté des équipements :** nettoyage et désinfection réguliers des équipements de production. Un protocole clair doit être établi pour les opérations de maintenance. Lorsque la maintenance est assurée par le fournisseur, il est de la responsabilité du porteur de projet de s'assurer que les exigences liées à l'alimentarité soient mentionnées dans le contrat de maintenance.
- **Gestion des nuisibles :** les insectes et animaux autres que les mammifères sont attirés par le CO_2. Il faut donc prévoir la mise en place de mesures pour prévenir la contamination par des nuisibles (barrières, pièges…).

2 Solutions barrières pour éliminer les composés indésirables

Cela fait référence à tous les moyens physico-chimiques qui constituent des barrières aux composés indésirables. Des équipements essentiels de la chaîne de production comme l'épurateur du biogaz, le sécheur et la colonne de distillation cryogénique permettent la mise en pureté du CO_2. Des équipements additionnels peuvent être nécessaires en fonction des risques de contamination identifiés (cuves à charbon, filtres antibactériens, tamis moléculaires, etc.).

3 Mesures de surveillance pour vérifier l'efficacité des actions et solutions citées ci-dessus

Un plan de surveillance inclut toutes les actions nécessaires pour surveiller et vérifier que le CO_2 est bien décontaminé au cours de sa production. Cela est assez large et englobe entre autres la traçabilité des intrants, la surveillance de l'installation, le contrôle des conditions opératoires et l'analyse du flux gazeux et liquide. Ces mesures de surveillance nécessitent des compétences dans le domaine de la chimie et de l'alimentaire. Qu'elles soient réalisées en interne ou en externe, il est nécessaire d'être formé par un organisme spécialisé afin ne pas compromettre les prélèvements pour analyse.

Parmi celles-ci, la définition d'une stratégie d'analyse constitue une étape critique. Trois types d'analyses peuvent être définis.

A. Analyses en ligne du flux gazeux (sur site)

Cela peut se faire à partir de baies d'analyse qui permettent la mesure des gaz en continu. Ces systèmes se composent d'un ou plusieurs analyseurs de gaz pouvant mesurer une multitude de composants (CO, CO_2, NO_x, N_2O, SO_2, H_2O…) en plus des conditions opératoires (température, pression…). Ces analyses permettent à l'opérateur d'agir rapidement sur la chaîne de production si une limite est franchie et évite la perte complète d'un lot ou l'arrêt de la production.

B. Analyses de routine du CO_2 liquide (internalisées ou externalisées)

Cela nécessite un laboratoire dédié. Les analyseurs doivent être sélectionnés en fonction des molécules identifiées lors des analyses d'off-gaz. Faute d'analyseur unique, plusieurs technologies complémentaires (spectroscopie, chromatographie…) peuvent être associées pour couvrir la plage d'analyse. L'enjeu de cette étape est de mettre en place des solutions qui répondent aux besoins tout en maintenant la viabilité du projet. Selon le projet, les analyses peuvent être externalisées ou internalisées, ou un mix des deux. Elles sont généralement réalisées pour valider un lot avant sa livraison.

C. Analyses ponctuelles de l'off-gaz et du CO_2 liquide (externalisées)

Pour des raisons de maîtrise des coûts, elles sont généralement confiées à un laboratoire spécialisé externe (comme lors de l'étape 3). Ce type de laboratoire dispose de compétences et d'équipements nécessaires pour analyser une large gamme de composés et garantir la fiabilité des résultats, notamment en termes de limite de détection et de précision métrologique. Pour rappel, la nécessité de les faire et leurs fréquences sont spécifiques à chaque projet.

ÉTAPE 6 MONTAGE DE L'INSTALLATION, MISE EN ROUTE ET CALIBRAGE

1 Montage de l'installation

Lors du montage de l'installation il est important de nettoyer rigoureusement les différents équipements. Il est possible d'utiliser du CO_2 liquide alimentaire provenant d'une autre installation pour les laver et faire la mise en pureté.

2 Analyses au lancement

Les analyses d'off-gaz et de CO_2 liquéfié sont à effectuer au lancement de l'installation afin de vérifier que le CO_2 produit soit conforme aux spécifications.

Si des analyseurs sont installés sur site, il est recommandé de réaliser en parallèle des contre-analyses dans un laboratoire extérieur, possédant des instruments similaires, afin de vérifier leur bon fonctionnement.

3 Mise en place de mesures correctives

En cas de non-conformité, le procédé doit être ajusté en conséquence. Si le fournisseur a garanti que le procédé est en mesure de produire du CO_2 liquide de qualité alimentaire et que cela est clairement mentionné dans le contrat d'achat, celui-ci doit engager des actions pour les rectifier. Il est donc important de sécuriser cette clause lors de l'élaboration du contrat d'achat.

ÉTAPE 7 CERTIFICATIONS ET AUDITS

Il est courant que les consommateurs de CO_2 organisent des audits fournisseurs sur site, soit eux-mêmes ou en mandatant un prestataire. L'audit doit être préparé en amont pour être en mesure d'apporter des réponses détaillées et convaincantes aux auditeurs. Le site doit être propre et les mesures d'hygiènes respectées.

Certains acteurs de l'industrie agroalimentaire commercialisent des produits halal, casher ou vegan et peuvent exiger du CO_2 certifié conforme. Dans ce cas, des organismes de contrôle accrédités attestent de la conformité du CO_2 à ces référentiels alimentaires.

2.2 QUELLES SONT LES OPTIONS POUR ANALYSER SON CO_2 ?

Pour installer un laboratoire sur site : on considère que **le coût d'analyse devient acceptable (inférieur à 10 €/tCO_2 liquide) à partir de 10-12 ktCO_2 liquide produit par an.**

Pour des méthaniseurs plus petits, il est préférable de passer par un laboratoire externe ou de mutualiser avec d'autres méthaniseurs.

OPTION 1 : INVESTIR DANS SON PROPRE LABORATOIRE D'ANALYSES

Pour une quantité supérieure à 10-12 ktCO_2 liquide produite par an, installer son propre laboratoire d'analyses en ligne est une solution intéressante. Pour cela, quelques critères sont à vérifier pour se lancer :

Foncier disponible

Prévoir un espace séparé de l'unité de production pouvant accueillir des équipements d'analyses et instruments de mesure. Cet espace doit être conçu de manière à pouvoir accueillir un technicien pour les manipulations. À noter que les analyses sont des opérations sensibles dépendantes des conditions environnantes. Par exemple, on veillera à ne pas installer le laboratoire à proximité d'une route à fort trafic, ni à installer le laboratoire dans une zone où la teneur en humidité peut être élevée, ce qui pourrait interférer avec les mesures.

Coût €/tCO_2 de l'analyse

Le laboratoire représente un surcoût non négligeable. En fonction du nombre et du type d'équipements installés, et de la quantité de CO_2 produite, le surcoût peut être plus ou moins absorbé. Des solutions d'analyses clés en main sont aujourd'hui commercialisées. Elles ont l'avantage d'être prêtes à l'emploi et ne nécessitent pas de connaissances scientifiques poussées (bien qu'une personne compétente et formée soit nécessaire pour les opérer). Elles sont également conçues pour analyser les molécules selon les spécifications EIGA et ISBT. En revanche, elles sont généralement onéreuses et, étant standardisées, elles ne répondent pas à des besoins d'analyses spécifiques. Il y a également une dépendance au fournisseur qui se charge de la maintenance. Dans certains cas, il est préférable de concevoir son laboratoire sur-mesure, en se faisant accompagner par un cabinet d'experts.

Compétences

Opérer des équipements d'analyses et interpréter les résultats nécessitent une personne dédiée ayant des compétences en chimie analytique. Des charges salariales supplémentaires sont à prévoir.

Opportunités de prestations externes

Si d'autres méthaniseurs à proximité ont besoin de réaliser des analyses sans vouloir investir dans un laboratoire, proposer des prestations d'analyses est un moyen de rentabiliser l'investissement.



OPTION 2 : MUTUALISER/PASSER PAR UN PRESTATAIRE QUALIFIÉ

La deuxième option consiste à collaborer avec un méthaniseur disposant de son propre laboratoire et qui propose des prestations ou avec un laboratoire extérieur. Cette approche permet d'éviter le développement interne de compétences en chimie analytique et le recrutement associé. Les résultats fournis restent sous la responsabilité du laboratoire partenaire. Cette solution est particulièrement adaptée aux sites à faible débit de production, car elle contribue à limiter les surcoûts. Cependant, pour limiter le risque de perdre un lot complet, certains exploitants décident d'installer un minimum de solutions d'analyses sur site, dans un format « allégé », qui permettent d'avoir un suivi de la qualité en continu.

Concernant les coûts d'analyses, pour des cuves de stockage de 60 m^3, le prix est en moyenne de 5 à 7 €/tCO_2 avec transport aller-retour compris.

COMMENT SE PASSE CONCRÈTEMENT L'ANALYSE DANS UN LABORATOIRE EXTERNE ?

Jour 1 : une personne sur site compétente et formée officiellement à l'HACCP (formation de deux jours à l'issue de laquelle une certification est délivrée) prélève du CO_2 liquide dans un cylindre. Sur demande au laboratoire par le méthaniseur, un transporteur (habilité ADR) vient chercher l'échantillon. En général, les analyses se font quand la cuve est remplie, pour pouvoir valider le lot avant libération.

Jours 2 et 3 : les analyses sont réalisées dans le laboratoire. Un certificat d'analyses est transféré au client méthaniseur. Si les résultats sont conformes aux attentes, le CO_2 peut être expédié chez le client final. Si les résultats ne respectent pas les spécifications, le lot est déclassé. Dans ce cas, il peut être expédié vers des clients n'exigeant pas ce niveau de qualité pour leurs usages, en les informant au préalable.



5. INTÉRÊTS ET ATTENTES DES CONSOMMATEURS DE CO_2

QUEL EST L'INTÉRÊT, POUR LES CONSOMMATEURS, D'AVOIR RECOURS À DU CO_2 BIOGÉNIQUE ISSU DE MÉTHANISATION ?

Vous êtes un consommateur de CO_2 et vous vous interrogez sur la possibilité d'avoir recours à du CO_2 biogénique pour votre usage ?

La fourniture de CO_2 biogénique issu de méthanisation sera optimale pour vous dans les cas suivants :

- Votre consommation de CO_2 est régulière, typiquement de quelques centaines à quelques milliers de tonnes par an ;
- Vous souhaitez avoir un prix stable ;
- Vous désirez maitriser vos approvisionnements, en travaillant avec des acteurs de proximité ;
- Vous voulez éviter un transport routier sur de longues distances ;
- Vous avez la volonté de mettre en valeur les filières locales, l'économie circulaire et l'intérêt environnemental du CO_2 biogénique.

LE PRIX EST-IL COMPÉTITIF ?

Le CO_2 issu des unités de production d'ammoniac ou d'hydrogène est aujourd'hui principalement d'origine fossile, produit en grande quantité et soumis à la « taxe carbone ». L'augmentation de celle-ci et celle des prix de l'énergie influent donc sur le prix du CO_2. Il peut être intéressant d'étudier un approvisionnement en CO_2 biogénique, à un prix potentiellement plus compétitif.

COMMENT PROCÉDER ?

Identifier les sources de CO_2 biogénique : sur la page « Points d'injection de Biométhane en France en service » (onglet « Carte ») du site www.odre.opendatasoft.com, vous pourrez localiser l'unité de biométhane la plus proche de votre site. Vous pouvez également retrouver les sites de méthanisation ayant déjà une production de CO_2 biogénique avec le lien suivant : https://atee.fr/club-ctbm/valorisation-du-co$_2$-de-methanisation et en Annexe 7, page 93. Vous pouvez aussi échanger avec les acteurs de la filière (Club Biogaz ATEE, opérateurs de réseaux de gaz tels que GRDF, chambres d'agriculture, associations d'acteurs de la méthanisation, etc.).

Entrez en contact avec les exploitants de biométhane en précisant votre besoin :

- Quelle est la quantité souhaitée ?
- Quelle est la qualité envisagée ? (Alimentaire ? Selon quel référentiel ?)
- Quel est le niveau de prix souhaité ?

POUR ALLER PLUS LOIN

Pourquoi ne pas participer au projet, par exemple en investissant dans les moyens de production ou de transport ?

Vous pouvez aussi fédérer un petit groupe d'utilisateurs et bénéficier des avantages du CO_2 biogénique, à l'échelle du territoire.

POUR UN PRODUCTEUR, IL S'AGIT AUSSI DE CONNAITRE ET DE RÉPONDRE AUX ATTENTES DES CONSOMMATEURS

Dans le cadre de plusieurs études menées par la filière, les consommateurs de CO_2 qui seraient susceptibles d'acheter du CO_2 biogénique issu de méthanisation ont exprimé les attentes suivantes :

- La fiabilité d'approvisionnement : c'est une des raisons évoquées pour changer d'interlocuteur et se tourner vers le CO_2 biogénique de méthanisation ;
- Un prix cohérent avec le prix du marché ;
- La réactivité du fournisseur ;
- Le bon niveau de service avec une fourniture clé en main ;
- La qualité du CO_2 est souvent de type alimentaire, mais les points clés de composition, traçabilité, etc. peuvent être différents d'un client à l'autre ;
- L'aspect local et circulaire peut avoir un intérêt environnemental.

À NOTER

L'origine biogénique du CO_2 va être valorisée de manière très différente selon les consommateurs : les projets d'e-fuels, d'e-méthane et de minéralisation seront très attentifs à ce caractère (qui impacte directement la valeur du produit fabriqué à partir de CO_2).





3. ASPECTS ÉCONOMIQUES D'UN PROJET

À noter : **les valeurs présentées dans ce chapitre sont des ordres de grandeur. Il est nécessaire de réaliser sa propre étude technico-économique avec des valeurs spécifiques à son projet. Les valeurs prises comme exemples concernent le cas d'un méthaniseur injectant 400 Nm³/h de biométhane.**

3.1 LES PRINCIPAUX MONTANTS D'INVESTISSEMENT CAPEX DU PROJET

ITEM	INDICATIONS	VALEURS DE RÉFÉRENCE	EXEMPLE
Procédé liquéfaction clé en main et lots périphériques	Le procédé est constitué de tous les équipements permettant le traitement du CO_2 et sa liquéfaction. Les lots périphériques sont des éléments de construction hors offres fournisseurs de procédés de liquéfaction (dalle béton, voirie, etc.).	Procédé de liquéfaction : **950-4 000 k€** Lots périphériques : **70-200 k€** (variable en fonction des besoins du projet et du contenu des offres des fournisseurs de procédés)	Pour une injection de biométhane à 400 Nm³/h , le procédé de liquéfaction = **1 500 000 €**
Frais de construction et lancement	Ces frais incluent l'étude technico-économique, la MOE, le montage du dossier bancaire, les assurances du chantier, les aléas liés à la construction…	**> 100 k€**	Pour 400 Nm³/h = **120 000 €**
Laboratoire d'analyse	Pour un laboratoire installé sur site, les CAPEX sont liés : • aux appareils d'analyses • aux raccordements • aux appareils supplémentaires d'analyses manuelles • au petit bâtiment de protection • au terrassement • …	Le coût du laboratoire peut varier en fonction du projet (si les intrants de méthanisation sont variés et/ou présentent des risques de contamination du CO_2 , des équipements d'analyses supplémentaires peuvent être nécessaires) : **200-700 k€**	**550 k€**

Il est recommandé d'ajouter un poste de dépenses « aléas », représentant un pourcentage du CAPEX, qui sert de filet de sécurité en cas de dépenses supplémentaires.

3.2 LES COÛTS D'EXPLOITATION (OPEX)

Les coûts d'exploitation varient selon la solution choisie, le prix de l'électricité et les pratiques de l'entreprise en matière d'exploitation et de maintenance. Le formulaire suivant peut accompagner les porteurs de projet dans leur réflexion.

ITEM	INDICATIONS	VALEURS DE RÉFÉRENCE	EXEMPLE
Électricité	Ratio_consommation_électrique x tonnage_produit x Prix_électricité Le ratio de consommation électrique est la consommation en MWh/tCO_2 liquide produite (énergie électrique par tonne de CO_2 liquide produite). Pour l'obtenir, il faut lister l'ensemble des consommations annuelles . Il est recommandé de demander un engagement du fournisseur.	Ratio_consommation_ electrique = **0,21 … 0,29 MWh/tCO_2** liquide produite selon la capacité du procédé	0,24 MWh/tCO_2 x 4000 tCO_2/an x 120 €/MWh = **115 000 €**
Consommables	Les consommables sont essentiellement les consommables des compresseurs, sécheurs et filtres à charbon, groupe froid.	**De 3 à 6 k€/an**	**5 000 €/an**
Exploitation (humain)	Temps humain (en ETP) x salaire annuel chargé et environné. L'unité de liquéfaction nécessite un peu de temps humain pour fonctionner : ronde et surveillance, vérification des données de production, vérification des consommations, accueil des camions.	**De 0,1 à 0,5 ETP/an**	0,25 ETP/an x 50 k€/an/ETP **= 12 500 €**
Frais d'audit de certification alimentaire	Cela représente les frais liés aux audits annuels de la certification alimentaire.	**4000-6000 €/an**	**5 000 €/an**
Frais administratifs	Les frais administratifs incluent l'ensemble des coûts administratifs de type : • Assurances ; • Frais de comptabilité et gestion. Selon le portage, ils peuvent être mutualisés en partie avec ceux de l'unité de méthanisation.	**~1-3 %** du CAPEX procédé	**20 000 €/an**

ITEM	INDICATIONS	VALEURS DE RÉFÉRENCE	EXEMPLE
Maintenance	Le matériel du procédé peut faire l'objet d'un contrat long terme de maintenance, pouvant inclure : • La révision annuelle ; • La fourniture des pièces de rechange – le maintien d'un stock de pièces de rechange pour le porteur de projet ; • L'assistance au suivi des performances ; • Le cas échéant, l'assistance et/ou la réalisation des essais règlementaires en lien avec les équipements sous pression ; • La maintenance corrective (en cas de panne) ; • Les travaux de maintenance lourde (typiquement, à 5, 10 et 15 ans sur les compresseurs, pompes et/ou groupes froids).	**~3 %** du CAPEX des équipements	**45 000€**
Frais d'analyses	Si le porteur n'investit pas dans son propre laboratoire, les analyses sont externalisées chez un méthaniseur partenaire possédant son propre laboratoire.	Analyses externalisées = **5 à 7 €/tCO_2**	**6 €/tCO_2**

3.3 LES CHARGES FINANCIÈRES

Les charges financières dépendent du montant de l'emprunt bancaire. La part empruntée est à définir au cas par cas. Dans ce guide, nous prenons comme référence une part de fonds propres de 20 % et une part d'emprunt bancaire de 80 %.

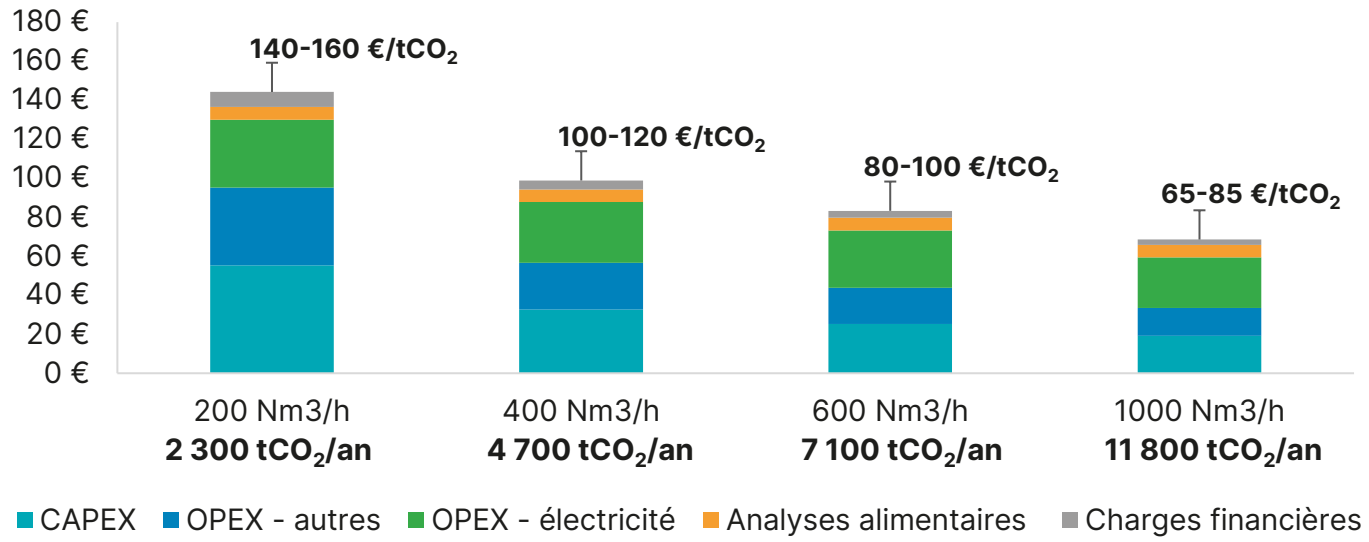
Le prêt accordé par les banques dépend de chaque projet. Elles doivent s'assurer qu'il sera rentable, solvable et capable de rembourser sa dette. Pour cela, elles se basent sur un indicateur financier qui est le DSCR (« Debt Service Coverage Ratio »), qui permet de mesurer la capacité du projet à rembourser son prêt. En d'autres termes, il indique si le projet a assez de trésorerie pour rembourser sa dette sans difficulté.

Si DSCR = 1, le projet couvre juste sa dette. Si DSCR > 1, il génère plus de liquidité que nécessaire, ce qui est rassurant pour les banques. Elles exigent souvent un DSCR entre 1,2 et 1,4 selon le niveau de risque.

3.4 LA DÉCOMPOSITION DES COÛTS (cas de CO_2 de qualité alimentaire)

En prenant le cas de méthaniseurs de tailles différentes avec un taux de 55 % de méthane dans le biogaz et dont 85 % du CO_2 est commercialisé (estimation prudente), on arrive à la décomposition suivante :

ESTIMATION DES COÛTS €/tCO_2 LIQUIDE EN FONCTION DE LA TAILLE DU MÉTHANISEUR (Nm^3/h INJECTION BIOMÉTHANE) (sans transport)



- CAPEX total : coûts liés au procédé de liquéfaction et frais de construction et de lancement
- OPEX – électricité : coûts d'électricité
- OPEX – autres : coûts de maintenance, frais d'audit, assurances…
- Analyses alimentaires : coûts d'analyses externalisées (6 €/tCO_2 en moyenne)
- Charges financières : remboursement de l'emprunt bancaire

Ces estimations ont été construites à partir de données tirées de retours d'expérience d'acteurs de la filière méthanisation. Elles ont été calculées pour le cas d'une production de CO_2 biogénique de qualité alimentaire. Il y a donc la prise en compte des coûts liés à la mise en place de l'HACCP, des audits de certifications alimentaires, des équipements permettant la mise en pureté comme des cuves à charbon actif et des analyses du CO_2.

Le coût par tonne présenté correspond à un coût moyen de production du CO_2, obtenu en rapportant l'ensemble des dépenses du projet aux volumes totaux produits sur la durée de vie de l'installation. Ils constituent des ordres de grandeur techniques et économiques et ne préjugent ni du prix de vente du CO_2, ni de la rentabilité des projets.

Ci-dessous, quelques hypothèses utilisées pour ces simulations :

- Taux de méthane dans le biogaz : 55 %
- Concentration du CO_2 en sortie d'épurateur : 99 %
- Rendement de l'unité : 92 %
- Taux de disponibilité : 97 %
- Coût d'électricité : 120 €/MWh
- Part commercialisable : 85 % de la capacité de production (estimation prudente)
- Part de fonds propres/emprunt bancaire : 20 %/80 % (taux intérêt : 4,5 % ; durée de l'emprunt : 7 ans)
- Durée de vie de l'installation : 15 ans
- % Aléas inclus dans le CAPEX : 3 % du CAPEX total

POINT D'ATTENTION

Certains paramètres peuvent avoir une influence considérable sur le prix final du CO_2, comme l'obtention d'une subvention, le tonnage de CO_2 vendu sur le tonnage total, le prix de l'électricité, etc.



4. ÉTUDES DE CAS

1. FICHES FICTIVES

MÉTHANISATION AUTONOME

Bernard est exploitant d'une unité de méthanisation avec épurateur membranaire injectant 150 Nm^3/h de biométhane. Il souhaite valoriser son CO_2 biogénique. Il envisage, en première approche, de mettre en place un liquéfacteur et de vendre le CO_2 à des acteurs du territoire.

1. CONNAÎTRE SON POTENTIEL

Dans un premier temps, Bernard estime son potentiel. Pour cela, il prend en compte le taux de méthane dans le biogaz (50 %), le taux de CO_2 dans l'off-gaz de l'épurateur (99 %) et fait une hypothèse de rendement carbone de 92 % et un taux de disponibilité de 97 % (à vérifier plus tard avec l'offre du fournisseur sélectionné).

Il obtient une quantité d'environ 2000 tonnes de CO_2 liquéfié pouvant être récupérées par an.

2. IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Dans son entourage, Bernard connait deux grandes serres chauffées à moins de 20 km, qui sont prêtes à acheter chacune 900 tCO_2/an, si le prix est compétitif. Ces serres sont avant tout motivées par la fiabilité d'approvisionnement.

Il sait que la revente de CO_2 est un point particulièrement important de son projet.

En discutant avec les serristes et en planifiant les livraisons au mois, il comprend que les 2 × 900 tCO_2 /an achetées par les serres se répartissent de la manière suivante :

- Octobre, novembre, décembre : 210 tCO_2 (soit 70 tCO_2/mois) ;
- Janvier, février, mars : 360 tCO_2 (soit 120 tCO_2/mois) ;
- Avril, mai, juin : 450 tCO_2 (soit 150 tCO_2/mois) ;
- Juillet, août, septembre : 780 tCO_2 (soit 260 tCO_2/mois).

Sa production étant de 240 $kgCO_2$/h (soit environ 170 tCO_2/mois), il y aura des mois où les serres ne consommeront pas assez et d'autres où Bernard ne pourra pas les fournir complètement.

À ce stade de l'analyse, les premiers débouchés ne sont finalement pas suffisants, même si les résultats sont encourageants. Bernard doit donc trouver d'autres débouchés (environ 500 tCO_2/an) et revoir son plan de livraison avec ses partenaires serristes.

En effectuant quelques recherches, il a pu cibler quelques brasseries qui pourraient être intéressées. L'une d'entre elles a exprimé le besoin de 600 tCO_2 par an, Bernard pourra donc fournir ce client avec ses 500 tonnes restantes.

Durant les mois d'octobre, de novembre et de décembre, il pourra fournir environ 100 tCO_2 par mois à la brasserie. Aux mois de janvier, de février et de mars, il pourra fournir environ 50 tCO_2/mois et aux mois d'avril, de mai et de juin, il pourra fournir environ 20 tCO_2/mois.

3. REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

Ayant résolu le problème des débouchés de CO_2 en ayant identifié d'autres acheteurs, Bernard passe en revue les paramètres clés du projet :

- Son prix d'électricité est correct (120 €/MWh) ;
- Il dispose de suffisamment de place pour installer son unité et faire circuler les camions ;
- Il a identifié un transporteur (chauffeur + camion) disposant des habilitations pour transporter du CO_2. Le parking du transporteur et les serres étant à proximité, il décide de ne faire que du contrat SPOT. Après discussion avec le transporteur, il estime que le prix serait entre 30 et 40 €/tCO_2 ;
- Bernard a bien compris les enjeux de qualité alimentaire, les intrants de son méthaniseur étant principalement des CIVE et des résidus de culture, il n'est pas inquiet. L'HACCP ne devrait pas être difficile à établir et la mise en conformité à la spécification ISBT demandée par le brasseur ne devrait pas engager trop de coûts supplémentaires ;
- Après négociations avec ses prospects, ceux-ci s'engagent sur l'achat de CO_2 à un prix livré entre 150 et 170 €/tCO_2. En discutant avec les fournisseurs d'équipements et avec d'autres porteurs de projet, Bernard doute sur sa capacité à rentabiliser l'investissement d'un procédé de liquéfaction de CO_2, compte tenu du faible volume produit.

IL DÉCIDE DE FAIRE APPEL À UN BUREAU D'ÉTUDES POUR RÉALISER UNE ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE QUI LUI PERMETTRA D'ORIENTER SA RÉFLEXION VERS LA SOLUTION LA PLUS OPTIMALE.



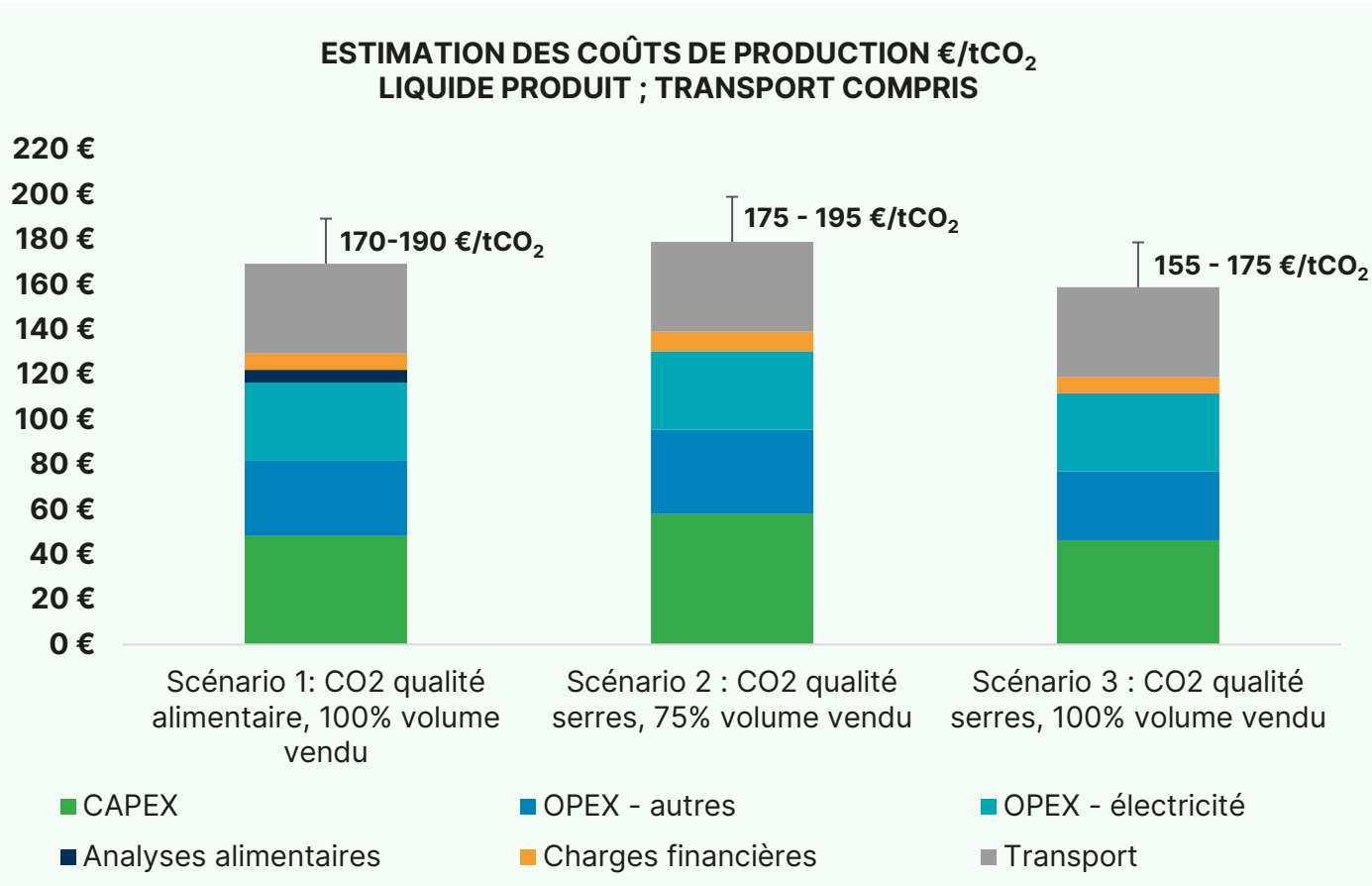
4. ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Cette étude doit permettre de :

- Valider la solution technique ;
- Définir les performances : capacité de production, rendement carbone, consommation électrique par tonne de CO_2, qualité du CO_2 produit ;
- Comparer plusieurs offres de fournisseurs ;
- Étudier les règlementations à appliquer (et, en particulier, pour la fourniture de CO_2 de qualité alimentaire) ;
- Définir un plan d'implantation préliminaire ;
- Déterminer un budget d'investissement (skid procédés et accessoires, aménagements et connexions) ;
- Définir les coûts d'exploitation dans chaque cas ;
- Valider un plan d'affaires ;
- Comparer différents scénarios possibles.

Les résultats de l'étude de faisabilité technico-économique permettent de comparer différents scénarios :

1. **Scénario 1 :** la production d'un CO_2 de qualité alimentaire conforme à la spécification ISBT, en considérant que 100 % de la production de CO_2 sera vendue.
2. **Scénario 2 :** la production d'un CO_2 de qualité non alimentaire et qui répond au cahier des charges des serristes, mais qui ne permet que 80 % de vente de CO_2 (correspondant à la demande actuelle des clients serristes).
3. **Scénario 3 :** la production d'un CO_2 de qualité non alimentaire, qui répond au cahier des charges des serristes et qui permet de vendre 100 % de vente de CO_2, dans le cas où Bernard trouverait d'autres clients qui accepteraient ce niveau de qualité.



QUELQUES OPTIONS D'OPTIMISATION DES COÛTS EXISTENT :

- Trouver des méthaniseurs à proximité qui souhaiteraient mutualiser le transport, ce qui pourrait possiblement baisser les coûts. Il faut dans ce cas que le CO_2 transporté soit de qualité semblable pour éviter de requalifier la citerne entre chaque livraison.
- Envisager d'agréger les volumes entre différents méthaniseurs et les consommateurs à proximité grâce à l'installation de canalisations. Une étude de faisabilité technico-économique devra spécialement être réalisée dans ce cadre.

À CE STADE, BERNARD PEUT EN TIRER QUELQUES PISTES DE RÉFLEXION POUR LA SUITE DU PROJET :

- **Pour les scénarios 1 et 2,** les coûts sont trop élevés par rapport au prix livré souhaité par les clients. Il faudrait envisager de relancer les négociations pour s'aligner sur un nouveau prix de vente.
- **Pour le scénario 3,** le coût de production se rapproche de la fourchette de prix souhaitée par les clients. Cependant, ce cas ne fonctionne que si Bernard trouve des débouchés pour les 20% du CO_2 liquide restant qui répond à des exigences de qualité non alimentaire :
  - Il peut chercher des débouchés existants comme des usages industriels qui pourraient possiblement avoir les mêmes besoins en termes de qualité de CO_2.
  - Il peut également se tourner vers des projets innovants de séquestration du CO_2 ou de conversion dans des carburants ou produits chimiques synthétiques (e-fuels/e-chemicals).

APRÈS RÉFLEXION, BERNARD DÉCIDE D'ATTENDRE QUE DES OPPORTUNITÉS PLUS PROMETTEUSES SE PRÉSENTENT À LUI AVANT DE SE LANCER DANS LE PROJET :

- Il garde contact avec les clients serristes dans le cas où ces derniers accepteraient de revoir leur prix d'achat à la hausse.
- Afin d'élargir sa zone de prospection, il se rapproche d'un négociant en CO_2 qui pourrait lui permettre de trouver de nouveaux clients jusqu'alors non identifiés et qui seraient intéressés d'acheter les 20 % de CO_2 restants.
- En parallèle, il explore des possibilités d'optimiser les coûts de production, notamment au niveau du transport.



MÉTHANISATION AUTONOME

Jules est exploitant d'une unité de méthanisation avec épurateur membranaire injectant 400 Nm^3/h de biométhane. Il souhaite valoriser son CO_2 biogénique. Il envisage, en première approche, de mettre en place un liquéfacteur et de vendre le CO_2 à des acteurs du territoire.

1. CONNAÎTRE SON POTENTIEL

Le taux de méthane dans le biogaz est de 50 %. Ainsi, Jules estime un potentiel d'environ 5 500 tCO_2/an liquéfié valorisable.

2. IDENTIFIER LES DÉBOUCHÉS

Il se rend compte que la prospection commerciale et la négociation des contrats de vente sont des étapes chronophages qu'il ne souhaite pas mener. Il se tourne vers un prestataire spécialisé qui se chargera de commercialiser le CO_2 à sa place. Il prend bien en compte qu'une commission sera retenue sur la vente par le prestataire.

A la suite du travail de prospection, les clients identifiés sont :

- Des brasseurs locaux qui demandent un CO_2 respectant la norme ISBT.
- Un grand groupe de l'industrie agroalimentaire qui demande un CO_2 respectant la norme EIGA et souhaite que le producteur ait mis en place la certification FSCC 22000 sur son site.
- Un industriel de production de glace carbonique, très attentif à la teneur en eau dans le CO_2.

3. DÉFINIR SON RÔLE SOUHAITÉ

Étant donné que Jules peut valoriser une grande quantité de CO_2, il souhaite maîtriser ses coûts en investissant dans un procédé de liquéfaction de CO_2 et en internalisant les analyses alimentaires en installant son propre laboratoire. Concernant le transport, il souhaiterait passer par une entreprise externe qui se charge d'agréger le CO_2 entre différents sites pour livrer les clients.

4. REVOIR LES PARAMÈTRES CLÉS

Jules passe en revue les paramètres clés de son projet et notamment **:**

- De l'espace foncier est disponible à côté de son méthaniseur pour installer un procédé complet et un laboratoire d'analyses. De l'espace supplémentaire pourra être mobilisé dans le cas où il souhaiterait investir dans sa propre citerne roulante ;
- Les engagements de reprises du CO_2 sont en cours de discussion / négociation. Les contrats sont prévus pour une durée de 3 ans à 5 ans selon les clients. Le prestataire qui commercialise le CO_2 pour le compte de Jules se chargera de renouveler les contrats ou de prospecter pour trouver de nouveaux clients ;
- Les prix moyens du CO_2 entre 120 et 130 €/tCO_2 « départ site » discutés semblent compatibles avec son projet ;

- Le prix de l'électricité est un point de vigilance. À 140 €/MWh, Jules devra faire attention à la consommation électrique de l'installation ;
- En réalisant lui-même ses propres calculs économiques, il estime que le projet sera rentable. Il est conscient que des études de faisabilité alimentaire et technico-économique approfondies sont nécessaires pour s'assurer que le projet fonctionne. Il est prêt à investir dans ces études ;
- Sur le volet qualité alimentaire, Jules souhaite vérifier la faisabilité du projet :

1. **Caractérisation des flux d'intrants :** les intrants de méthanisation peuvent être problématiques. La part CIVE ne pose pas de problème, les contaminants pouvant potentiellement être présents sont bien identifiés. En revanche, les déchets d'IAA collectés, constitués de sous-produits animaliers de catégorie 3 (SPAn3) et de denrées alimentaires végétales (ex : restes de pain, de boulangerie, meunerie…) sont variés et proviennent de plusieurs sites voisins. Cela nécessite de mettre en place un système de traçabilité et d'évaluer les risques de retrouver des composés indésirables dans l'off-gaz. Il mandate un expert spécialisé pour mener cette étude préalable.

   En discutant avec ses fournisseurs d'intrants, Jules et l'expert ont pu récupérer des fiches de traçabilité interne utilisés sur certains sites :

   - Pour les SPAn3, les sites sont coopératifs et ont partagé les fiches produits des déchets qui sont déjà tracés rigoureusement.
   - Pour les déchets végétaux, moins risqués, il a mené des entretiens avec les responsables de production et de qualité pour déterminer les risques de présence de certains éléments pathogènes ou composés chimiques toxiques dans les déchets qui pourraient migrer dans le biogaz et ainsi contaminer le flux gazeux riche en CO_2.

2. **Étude de la réglementation :** l'installation de la liquéfaction devra respecter certaines préconisations techniques, notamment le respect des règlements européens.

3. **Analyse de l'off-gaz :** ayant défini avec l'expert la gamme de molécules à analyser, il envoie des échantillons d'off-gaz à un laboratoire d'analyse externalisé pour quantifier la teneur de chaque composé présent. Pour prendre en compte la variabilité de ses intrants, il envoie des échantillons à trois reprises étalées sur trois mois.

   Les résultats d'analyse des off-gaz montrent la présence de certains éléments avec des teneurs supérieures aux limites des spécifications de l'ISBT, comme des composés soufrés (H_2S) et des composés organiques volatils (COV).

Pour être efficace sur la suite du projet, Jules décide de mener les étapes 5, 6 et 7, en parallèle **:**

- La démarche HACCP lui permet d'identifier des solutions pour atteindre la qualité alimentaire ;
- Ces solutions sont discutées avec les fournisseurs afin d'identifier des équipements adéquats ;
- Les coûts de ces équipements sont intégrés dans l'étude technico-économique.



5. MISE EN PLACE DE L'HACCP

Avec l'aide de l'expert, il mène les actions suivantes :

1. **Analyse des risques :** les contaminants provenant des intrants et pouvant potentiellement migrer dans la phase gazeuse lors de la méthanisation ont été préalablement identifiés lors de l'étape d'étude de faisabilité alimentaire. Il faut maintenant étendre cette analyse à l'ensemble de la chaîne, pour identifier des sources potentielles de contamination au niveau de la production (procédé de liquéfaction) et de la distribution (transport).

2. **Mesures compensatoires :**

- Les SPAn3 passent par une étape d'hygiénisation avant méthanisation, ce qui permet d'éliminer des éléments pathogènes (salmonellose, e-coli, clostridium). L'expert recommande tout de même de placer des filtres antibactériens dans le procédé pour avoir un filet de sécurité supplémentaire et ainsi réduire le risque.
- Pour les composés soufrés et les COV, les filtres à charbon actif sont des solutions barrières à ces composés, il devra donc prévoir un budget pour leur renouvellement régulier.
- La teneur en eau est également supérieure aux spécifications du producteur de glace carbonique. Mais, après consultation des fournisseurs d'équipements, ils assurent que la partie séchage du procédé diminuera la teneur au niveau exigé.

3. **Stratégie d'analyse :** un laboratoire d'analyses est présent à proximité sur le site d'un autre exploitant. Il revient sur sa décision d'installer son propre laboratoire car son débit de production est trop faible pour amortir l'investissement. Il enverra donc des échantillons régulièrement chez son partenaire pour analyser le lot avant expédition chez le client. Des analyses régulières plus poussées des off-gaz et du CO_2 liquide seront réalisées dans un laboratoire spécialisé.

6. RÉALISATION DE SON ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

En résumé, les résultats de l'étude sont :

- Une installation de 4500 tCO_2/an, pour un investissement complet d'environ 1,8 M€, comprenant, d'une part, la solution clé en main de procédé de liquéfaction et, d'autre part, tous les autres frais de construction et de lancement (MOE, VRD, dossier de financement…).
- Des OPEX de l'ordre de 290 k€/an comprenant des frais de maintenance, de consommables (filtres à charbon actif, filtres antibactériens…), d'électricité, d'analyses externalisées, d'assurances, de gestion commerciale, de certifications et d'audits alimentaires.
- Il estime donc son coût de production « départ site » (transport exclu) entre 80 et 90 €/tCO_2, soit 40 €/tCO_2 de moins que le prix fixé par le client. Il devra donc s'assurer que le coût du transport ne soit pas trop élevé pour rester rentable. Il devra négocier le contrat avec l'entreprise qui se chargera de distribuer le CO_2.

7. CONSULTATIONS ET NÉGOCIATIONS

Il passe par un bureau d'études spécialisé en maîtrise d'œuvre (MOE) pour consulter les fournisseurs, comparer les offres et négocier les contrats.

Cette étape lui permet également :

- D'affiner l'étude technico-économique en intégrant les offres proposées par les fournisseurs ;
- De valider la faisabilité technique du projet, notamment sur le sujet de la qualité alimentaire du CO_2.

8. OBTENIR LES AUTORISATIONS

- Jules déposera une demande de permis de construire ou une déclaration de travaux (demande à formaliser auprès de la mairie). Il fera un « porter à connaissance » auprès de la DREAL ou des DDPP/DDCSPP pour informer de l'ajout du liquéfacteur sur le site de méthanisation ;
- Dès le démarrage de la construction, Jules entamera les démarches pour monter le dossier et entrer en contact avec les services de la Direction Départementale de Protection des Populations (DDPP) ;
- Quelques mois après le démarrage, un dossier de certification sera réalisé, avec mise en place d'un système de management de la qualité alimentaire, selon la norme FSSC 22000.

9. SON DOSSIER DE FINANCEMENT

Le dossier de financement sera monté par le prestataire externe chargé de la MOE du projet. L'analyse des risques réalisée prendra en compte notamment :

- Le risque de retrait des partenaires dans le transport et de la commercialisation du CO_2 ;
- Le risque de délai et/ou de surcoût à obtenir la certification FSSC 22000 ; si le processus de certification est classique dans l'industrie alimentaire, il n'est pas répandu pour le CO_2 issu de méthanisation ;
- L'évolution, possiblement à la hausse, des prix de l'électricité et l'impact sur le prix de la tonne vendue.



2. TÉMOIGNAGES

2.1 LANCEMENT D'UN LABORATOIRE D'ANALYSES ET MUTUALISATION DU CO_2 BIOGÉNIQUE DANS LE GRAND-EST

MD Biogaz, situé à Bar-sur-Seine, exploite depuis 2019 une unité de méthanisation agricole alimentée principalement par des déchets issus de silos, des coproduits d'industries agroalimentaires (comme des pulpes de betterave ou des pelures d'oignon), ainsi que des CIVE.

Le président du site, Baptiste Dubois, et ses associés ont souhaité valoriser le CO_2 issu de la méthanisation — environ 4000 tonnes par an — afin de répondre à la demande d'industriels locaux.

Parmi ces derniers figure la société L2PI, installée à proximité immédiate du site. Elle mène une activité d'embouteillage et de distribution de CO_2 gazeux pour des producteurs de boissons gazeuses de la région. Forte consommatrice de CO_2, l'entreprise cherchait à diversifier ses sources d'approvisionnement. Le CO_2 biogénique produit localement représentait une option particulièrement attractive, sous réserve qu'il respecte les exigences de qualité alimentaire et le référentiel commercial ISBT.

Pour répondre à cette demande, une dynamique collective s'est rapidement créée. Deux autres sites de méthanisation, Arraincourt Biogaz et Méthatoul, ont manifesté le même intérêt pour la valorisation de leur CO_2. Cette volonté commune a permis d'aboutir à un contrat de commercialisation regroupant les trois méthaniseurs et L2PI.

Afin de produire un CO_2 de qualité alimentaire, chacun des sites a mis en place son propre système HACCP. Pour l'installation des unités de purification et de liquéfaction, ils se sont tournés vers le fournisseur Clarke Energy, filiale du groupe Tecno Projet Industriel (TPI).



Afin de valider la bonne conformité du CO_2 à la spécification ISBT, MD Biogaz a décidé de créer son propre laboratoire d'analyses du CO_2 directement sur son site. Ce laboratoire permet une analyse en ligne de son CO_2 et propose également un service d'analyse aux autres producteurs, optimisant ainsi l'investissement et réduisant les coûts pour les acteurs locaux. En juin 2024, l'unité de purification et le laboratoire ont été mis en service, marquant le lancement officiel de l'activité.

Depuis plus d'un an, le partenariat entre ces différents acteurs suit son cours, les sites de Méthatoul et d'Arraincourt envoient régulièrement leurs échantillons de CO_2 à MD CO_2 pour contrôle avant l'expédition chez L2PI.

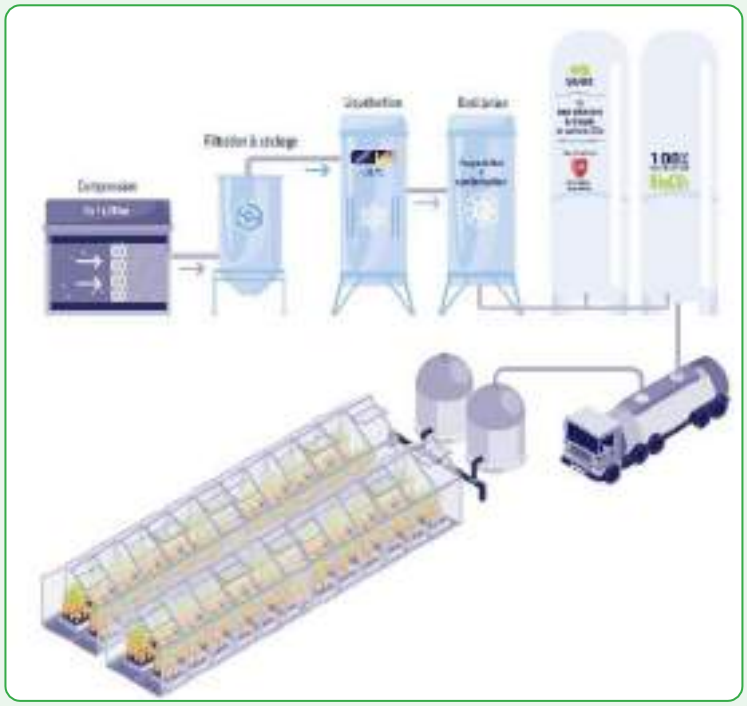
Crédit photo : © MD CO_2, 2026 – reproduction autorisée

2.2 CAPTATION ET VALORISATION DU CO_2 BIOGÉNIQUE SUR LE SITE DE MÉTHANISATION TERRES D'AQUITAINE DE SUEZ

Le site de Terres d'Aquitaine, à Saint-Selve en Gironde, est exploité par SUEZ depuis 2006. Il est dédié à la valorisation biologique des déchets organiques : biodéchets issus des grandes surfaces, des collectivités, des industries agroalimentaires, graisses, déchets et biomasses agricoles produits sur le territoire aquitain. Depuis 2020, une unité de méthanisation produit du biogaz purifié, compressé et injecté dans le réseau de distribution de gaz naturel opéré par GRDF. Après 3 ans d'études et de conception, une unité de purification et de liquéfaction du CO_2 biogénique issu de l'unité de méthanisation a été mise en service au printemps 2025. L'installation est dimensionnée pour produire jusqu'à 3500 tonnes de CO_2 par an.

Le biogaz issu de la méthanisation est épuré pour éliminer les impuretés et isoler le biométhane du CO_2. Le CO_2 est ensuite capté, purifié et liquéfié sur le site grâce à la technologie V'COOL® développée par PRODEVAL. Ce CO_2 renouvelable, concentré à plus de 99 %, répond au référentiel EIGA et est commercialisé dans le cadre d'un contrat avec une coopérative de serristes du sud de la France. Il est d'ores et déjà utilisé par 2 maraîchers landais pour favoriser la photosynthèse de plants de tomates sous serres, en remplacement du CO_2 fossile. D'autres applications locales sont étudiées telles que les usages dans l'industrie agroalimentaire ou encore la minéralisation de déchets de construction.





L'unité de captation CO_2 a bénéficié d'un financement apporté par la Région Nouvelle-Aquitaine, représentant environ 40 % du montant total d'investissement dédié à ce projet.

Un facteur clé de succès de ce projet d'économie circulaire repose sur l'écosystème favorable, avec des utilisateurs de CO_2 locaux identifiés en amont. Cette réalisation concrète permet de valoriser un gaz fatal de l'unité de méthanisation et de diminuer son impact environnemental. Elle sécurise l'approvisionnement en CO_2 des serres et améliore les rendements agricoles, tout en réduisant l'empreinte carbone des cultures sous serre.

Source des images : Terres d'Aquitaine – SUEZ repousse les limites de la valorisation des déchets organiques et produit de nouvelles ressources pour les territoires, SUEZ, dossier de presse, 2025. Image reproduite avec l'autorisation de SUEZ.

2.3 CAPTATION ET LIQUÉFACTION DU CO_2 SUR LE SITE D'ABH, PUIS SÉQUESTRATION DANS DU BÉTON PAR MINÉRALISATION

Les quinze associés de la SAS ABH se sont regroupés en février 2017 pour produire collectivement des énergies renouvelables et pérenniser leurs activités sur le territoire. Ces agriculteurs cultivent 1240 hectares et valorisent 8200 tonnes de fumier, 5000 tonnes de lisier, 23000 tonnes de résidus de cultures et dérobées. Cette matière transformée en biogaz, composé à 60 % de méthane et 40 % de CO_2, permet l'injection de 30 GWh de biométhane par an.

Après l'obtention, en 2023, de la certification RED II relative aux émissions de gaz à effet de serre de leur unité, il restait à identifier une solution de valorisation pour le CO_2 résiduel. À l'origine, ABH envisageait de produire un CO_2 de qualité alimentaire destiné à des industriels régionaux. Cependant, les contraintes logistiques liées au transport des échantillons entre le site de production, les laboratoires d'analyses et les clients ont conduit à réévaluer cette option. En collaboration avec GRDF, d'autres pistes ont alors été étudiées, notamment la séquestration du CO_2. C'est dans ce contexte qu'ABH s'est tournée vers la société suisse Neustark, spécialisée dans l'élimination du CO_2.

Dans le cadre du partenariat mis en place, ABH vend son off-gaz à Neustark, qui a financé l'installation du procédé de liquéfaction. L'unité, opérée par ABH, est conçue pour traiter environ 4200 tonnes de CO_2 par an. Le CO_2 liquéfié est ensuite transporté par camion vers plusieurs sites partenaires. Parmi eux figure Béton Fehr, où il est injecté dans des bétons de démolition selon un procédé de minéralisation reposant sur une réaction chimique entre le CO_2 et les matériaux minéraux, assurant un stockage durable du carbone.

Cette première installation française de liquéfaction du CO_2 pour minéralisation s'inscrit dans une filière émergente de captage et stockage de CO_2 biogénique, soutenue par un objectif national de neutralité carbone à horizon 2050. L'expérience alsacienne constitue ainsi un exemple opérationnel de stockage durable du CO_2 au sein de matériaux minéraux.



Crédit photo : © ABH, 2026 – reproduction autorisée

5. RESSOURCES COMPLÉMENTAIRES

RESSOURCES DOCUMENTAIRES GÉNÉRALES SUR LE CO_2 :

- Biogenic CO_2 from biomethane: The key to Europe's Carbon Strategy, septembre 2025, European Biogas Association – **www.europeanbiogas.eu**
- Captage, stockage du carbone et valorisation (CCUS) : abécédaire de la chaîne de valeur, janvier 2026, Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Énergétiques - **www.systemesenergetiques.org**
- Biogenic CO_2 from the biogas industry, septembre 2022, European Biogas Association - **www.europeanbiogas.eu**
- Présentation Valoriser le CO_2 biogénique de l'épuration du biogaz, Expobiogaz 2022 Bordeaux, Rigou et Praz, juin 2022 - **www.projet-methanisation.grdf.fr**

GUIDES DE FILIÈRE CO_2

- Guide pour réaliser un projet de valorisation du bioCO_2 issu de méthanisation, mai 2023 , Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Énergétiques - **www.systemesenergetiques.org**
- Guide pour l'élaboration des documents techniques de consultation et d'offres d'une unité de "traitement du CO_2" issu du biogaz en vue de sa valorisation, août 2022, Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Énergétiques - **www.systemesenergetiques.org**
- Guide technique Valorisation du CO_2 de méthanisation, septembre 2020, Centre Technique Biogaz et Méthanisation (CTBM) – **www.atee.fr**



GUIDES TECHNIQUES ET OPÉRATIONNELS SUR LE CO_2

- Le transport des marchandises dangereuses : l'ADR en question, novembre 2025, INRS - **www.inrs.fr**

- À retrouver sur le site de l'AFGC (Association Française des Gaz Comprimés), **www.afgc.fr :**
  - **EIGA SI 28-12** - Exploitation des citernes et équipements de CO_2 pendant le chargement et le déchargement
  - **EIGA SI 24-11** - Dangers physiologiques du dioxyde de carbone
  - **EIGA DOC 151-08** - Prévention des surpressions lors du remplissage des réservoirs cryogéniques
  - **EIGA DOC 126-11** - Spécifications minimales des gaz alimentaires
  - **EIGA DOC 125-11** - Guide de fournitures pour les gaz alimentaires
  - **EIGA DOC 056-09** - Guide du Conducteur pour le transport du CO_2 en citerne
  - **AFGC DOC 136-16** - Chargement déchargement en unité de production

RESSOURCES DOCUMENTAIRES SUR LA FILIÈRE CCUS (CARBON CAPTURE, UTILISATION, AND STORAGE)

- La force des territoires au cœur de l'élimination du carbone : projets existants et potentiel de déploiement, mars 2026, AFEN - **www.afen.fr**

- CCUS status in france : an update, mai 2026, Global CCS Institute - **www.globalccsinstitute.com**

- Global Status of CCS 2025, octobre 2025, Global CCS Institute - **www.globalccsinstitute.com**

- Élimination du dioxyde de carbone : atteindre le plein potentiel français, mars 2025, BCG (Boston Consulting Group) & AFEN (Association Française pour les Émissions Négatives) - **www.afen.fr**

- L'Observatoire international des e-fuels, avril 2025, SIA Partners - **www.sia-partners.com**



6. GLOSSAIRE ET ANNEXES

ADR :

Il s'agit de l' « Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route ». L'ADR contient des directives concernant le transport routier, l'emballage, l'arrimage du chargement, la classification et l'étiquetage des marchandises dangereuses.

ATEX :

La règlementation dite « ATEX » (pour atmosphère explosive) demande à tous les chefs d'établissement de maitriser les risques relatifs à l'explosion dans leur entreprise. Une atmosphère explosive est un lieu de travail où le risque d'explosion est possible en raison de la présence de matières inflammables et combustibles.

BIOCCS (Biogenic Carbon Capture And Storage) **:**

Le CO_2 biogénique issu de la production de biogaz ou de l'utilisation de biocarburant ou de biocombustible, est capturé puis séquestré pour le retirer de l'atmosphère, on parle alors « d'émissions négatives ».

CAPEX :

Ce sont les dépenses d'investissement, tournées davantage vers la croissance à long terme de l'entreprise.

CCS (Carbon Capture and Storage) **:**

Le CO_2 d'origine fossile, émis sur les sites industriels dû majoritairement à l'utilisation de combustible d'origine fossile, est capturé et séquestré pour éviter qu'il ne soit émis dans l'atmosphère.

DAC (Direct Air Capture) **:**

Le captage direct dans l'air consiste à capturer le CO_2 directement dans l'atmosphère.

DREAL :

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DDPP/DDCSPP :

Direction Départementale de la Protection des Personnes / Direction Départementale de la Cohésion Sociale et de la Protection des Personnes

DGPR :

Direction Générale de la Prévention des Risques

EIGA :

European Industrial Gas Association et référentiel du même nom.

HACCP :

Hazard Analysis Critical Control Point, en français, un « système d'analyse des dangers et points critiques pour leur maitrise ». Il s'agit d'une méthode d'analyse de risques particulièrement utilisée en sécurité alimentaire. Les exploitants du secteur alimentaire ont pour obligation de mettre en place, appliquer et maintenir des procédures fondées sur les principes de l'HACCP.

ISBT :

International Society of Beverage Technologists

NORME FSSC 22000 :

Food Safety System Certification. La certification FSSC 22000, basée sur la norme ISO 22000, combine les exigences mutualisées des distributeurs et des industriels en matière de sécurité des aliments.

OPEX :

Ce sont les dépenses d'exploitation, les charges courantes pour exploiter une entreprise ou un produit.

PROJET DE CO_2 BIOGÉNIQUE :

Dans le guide, la référence à un projet de valorisation du CO_2 biogénique de la méthanisation est parfois raccourcie en « projet de CO_2 biogénique » ou autre ; tous ces termes renvoient bien au même sujet.

RENDEMENT CARBONE :

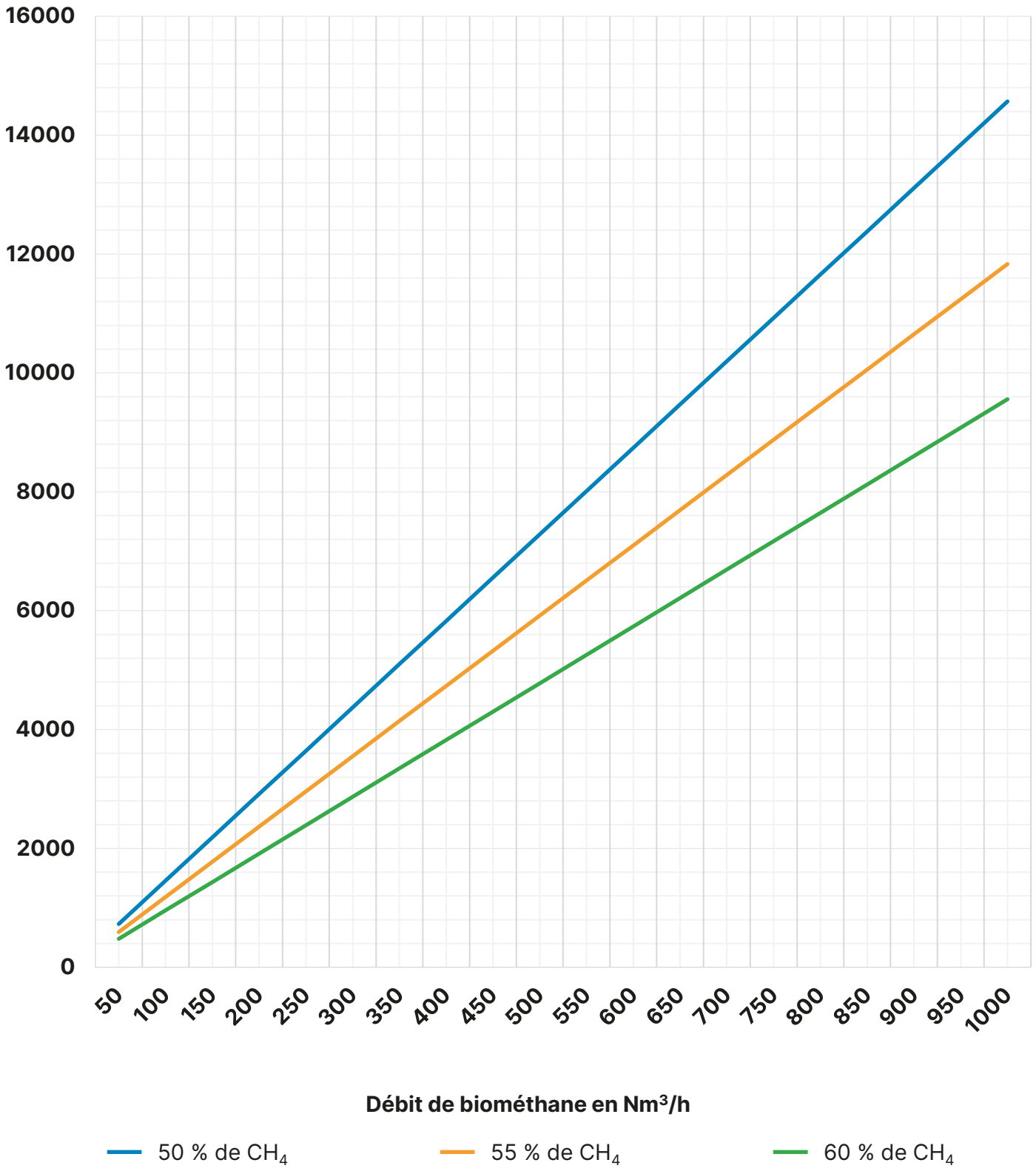
Il s'agit de la performance purificatrice de l'installation, soit la quantité (kg) de CO_2 capturée en sortie par rapport à la quantité présente en entrée de l'installation.



1. ANNEXE 1

Estimation de la quantité de CO_2 liquéfié, en fonction du débit de biométhane en Nm^3/h, et du taux de CH_4 dans le biogaz (plage 50-1000 Nm^3/h). Les hypothèses considérées pour cet abaque sont notamment : un rendement carbone de 92 % et un taux de disponibilité de 97 % (soit environ 8500 heures)

Quantité annuelle de CO_2 en tCO_2/an



2. ANNEXE 2

SPÉCIFICATIONS DU CO_2

Ci-dessous, différentes spécifications techniques selon les usages avec les résultats d'analyse d'un CO_2 liquide issu d'un site de méthanisation agricole :

	SPÉCIFICATIONS CO_2					METHA AGRICOLE
						CO_2 LIQUIDE
PARAMÈTRES	**Unités**	**Serres[32]**	**E290**	**EIGA**	**ISBT**	**Résultats**
%CO_2	%	Indifférent	>99,9	>99,9	>99,9	99,9
H_2O	ppm	<50		<20,0	<20,0	1,7
O_2	ppm	<1% v/v		<30	<30,0	1
CO	ppm	<25	<10 ppm	<10	<1,00	<0,50
NH_3	ppm	<2,5		<2,5	<2,50	<0,50
NO	ppm	<2,5		<2,5	<2,50	<0,30
NO_2	ppm	<2,5			<2,50	<0,30
Methanol	ppm			<10,0	<10,0	<1,0
CH_4	ppm	<30			<50,0	<1,0
Ethanol	ppm				<20,0	<1,0
Dimethyl ester	ppm				<20,0	<1,0
Ethane	ppm				<20,0	<1,0
Propane	ppm				<20,0	<1,0
Total CH	ppm	<50		<50,0	<50,0	<4,0
Total Non-Methane CH	ppm				<20,0	<4,0
Acetaldehyde	ppm			<0,2	<0,20	<0,003
Benzene	ppb			<20,0	<20,0	<4,000
Toluene	ppb			<20,0	<20,0	<4,000
Xylene	ppb			<20,0	<20,0	<4,000
Total BTX	ppb			<20,0	<20,0	<9,000
Toltal Sulfur	ppm	<5		<0,10	<0,10	0,04
Oxysulfure de carbone (COS)	ppm				<0,100	<0,015
H_2S	ppm				<0,10	0,03
SO_2	ppm	<5			<1,00	<0,003
Ethylene	ppm	<1			-	
Odeur du CO_2 solide					Pas d'odeur étrangère	OK
Apparence du CO_2 solide					Pas d'apparence étrangère	OK
Odeur dans l'eau				Pas d'odeur étrangère	Pas d'odeur étrangère	OK
Apparence dans l'eau					Pas d' apparence étrangère	OK
Goûts dans l'eau					Pas de goûts étrangers	OK
Apparence après sublimation				Pas de couleur ou turbidité	Pas de couleur ou turbidité	OK

[32] Serres : les valeurs sont issues d'un site spécifique et présentées à titre d'exemple. Elles ne constituent en aucun cas un standard pour la filière.

3. ANNEXE 3

PRINCIPAUX ENJEUX TECHNIQUES ET DE SÉCURITÉ (NON-EXHAUSTIF)[33]

À la température ambiante (+15°C) et à la pression atmosphérique, la densité du CO_2 est de 1,87 kg/m^3 et est 1,5 fois plus lourd que l'air. Il est incolore et inodore (avec une odeur légèrement piquante à forte concentration) et s'étale au niveau du sol, s'accumule dans des zones basses comme les puits et les sous-sols. Ainsi, il est important de rappeler que manipuler un gaz liquéfié sous pression peut avoir de fortes conséquences.

DANGERS	RISQUES	MAÎTRISE
Concentration du CO_2 gazeux dans l'atmosphère	**Anoxie (Manque d'O_2)** • **Mécanisme :** Le CO_2 remplace l'O_2 ambiant (L'air normal contient ~21 % d'O_2, l'asphyxie débute sous 18 %). • **Effets sur la santé :** Insidieux et indolore. La victime perd sa mobilité et sa voix avant de réaliser le danger. **L'empoisonnement au CO_2** (Toxicité) • **Mécanisme :** Toxicité directe. • **Effets sur la santé :** Dommages physiologiques violents. Paralysie immédiate des organes respiratoires et du cœur.	**Contre l'anoxie** **Ventilation & Inertage :** Purge systématique de l'équipement (taux d'O_2 < 2 %) et interdiction d'accès aux zones confinées sans une procédure de sécurité et un permis de travail. **Contre la toxicité** **Détecteur Portable de CO_2 (Obligatoire) :** Votre seule véritable alarme. Mesurer l'oxygène ne prévient pas l'empoisonnement au CO_2.
La détente et l'état liquide du CO_2 génèrent un froid extrême (-25°C à -40°C)	**Corps : Brûlures cryogéniques** • **Mécanisme :** Le contact direct avec du CO_2 liquide ou des pièces non isolées détruit instantanément les cellules. • **Effets sur la santé :** Lésions identiques à des brulures thermiques sévères avec nécrose profonde des tissus. **Métal : Fragilisation à froid** • **Mécanisme :** L'acier devient fragile. • **Effets sur le matériau :** Le métal perd toute sa ductilité. Il devient aussi fragile que du verre. Sous pression, l'acier peut se facturer provoquant une explosion mécanique et un rejet massif de gaz.	**Contre la toxicité**  **Gants Cryogéniques & Protection Oculaire :** Être protégé contre les brûlures cryogéniques lors de la manipulation des vannes ou lors des maintenances.
Solidification du CO_2 liquide et bouchons de glace	**Ejection foudroyante du bouchon (projectile) ou rupture du flexible (effet coup de fouet)** • **Mécanisme :** Sous 4,2 bar(g), le CO_2 liquide change brutalement d'état. Il se transforme en un mélange de gaz et de CO_2 solide (glace sèche). Un bouchon de glace peut alors se former, obstruer totalement la tuyauterie et bloque la dépressurisation. La glace sèche se sublime en gaz faisant grimper la pression emprisonnée derrière le blocage jusqu'à la rupture. • **Effets sur la santé :** Risque de blessures graves ou mortelles. **Exemple d'opération à maitriser :** Purge incorrecte menant à une dépressurisation de la phase gazeuse 	**3. Action de Prévention Obligatoire**  Ne vous fiez jamais au seul bruit ou à l'absence de débit. Assurez-vous toujours que l'équipement est totalement dépressurisé en utilisant les capteurs de pression locaux (manomètres) avant toute maintenance intrusive. **Procédure correcte :** Purge du liquide au point bas 

[33] Source : Air Liquide

4. ANNEXE 4

LISTE NON EXHAUSTIVE DES RÈGLEMENTS APPLICABLES

Liste (non exhaustive) des règlements CE à respecter pour les équipements industriels unités de liquéfaction

- Directive 2014/68/UE portant sur les Équipements sous Pression
- Directive 2006/42/CE "machines"
- Directive 2014/35/UE, matériel électrique basse tension

Plus d'informations sur : www.entreprises.gouv.fr

Liste (non exhaustive) des règlements CE à respecter pour le CO_2 de qualité alimentaire :

À retrouver sur **www.eur-lex.europa.eu :**

- **Règlement (CE) 852/2004** relatif à l'hygiène des denrées alimentaires ;
- **Règlement (CE) 2073/2005**, concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires ;
- **Règlement (CE) 2023/2006** relatif aux bonnes pratiques de fabrication des matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires ;
- **Règlement (CE) 1333/2008** sur les additifs alimentaires (CO_2 = E290) ;
- **Règlement (CE) 10/2011**, concernant les matières plastiques destinées au contact des aliments ;
- **Règlement (CE) 231/2012 :** spécifications additionnelles au 1333/2008 ;
- **Règlement (CE) 382/2021** sur la gestion des allergènes alimentaires, la redistribution des denrées alimentaires et la culture de la sécurité alimentaire.

À retrouver sur **www.economie.gouv.fr** :

- **Règlement (CE) 1935/2004**, définissant les exigences générales qui s'appliquent aux matériaux et objets destinés à entrer en contact directement ou indirectement avec les denrées, produits et boissons alimentaires mis sur le marché.

À retrouver sur **www.agriculture.gouv.fr** :

- **Règlement (CE) 178/2002**, établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire.

À retrouver sur **www.ecologie.gouv.fr** :

- Accord ADR sur la circulation de marchandises dangereuses, via transport routier

À retrouver sur **www.legifrance.gouv.fr**

- **Arrêté du 29 mai 2009** relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (dit « arrêté TMD »)

5. ANNEXE 5

FORMULE DE CALCUL DÉTAILLÉ DU POTENTIEL DE CO_2 (POUR LES MATHEUX)

Règle simple

100 Nm^3/h de biométhane injecté ≈ 1000 tCO_2 liquide produit/an

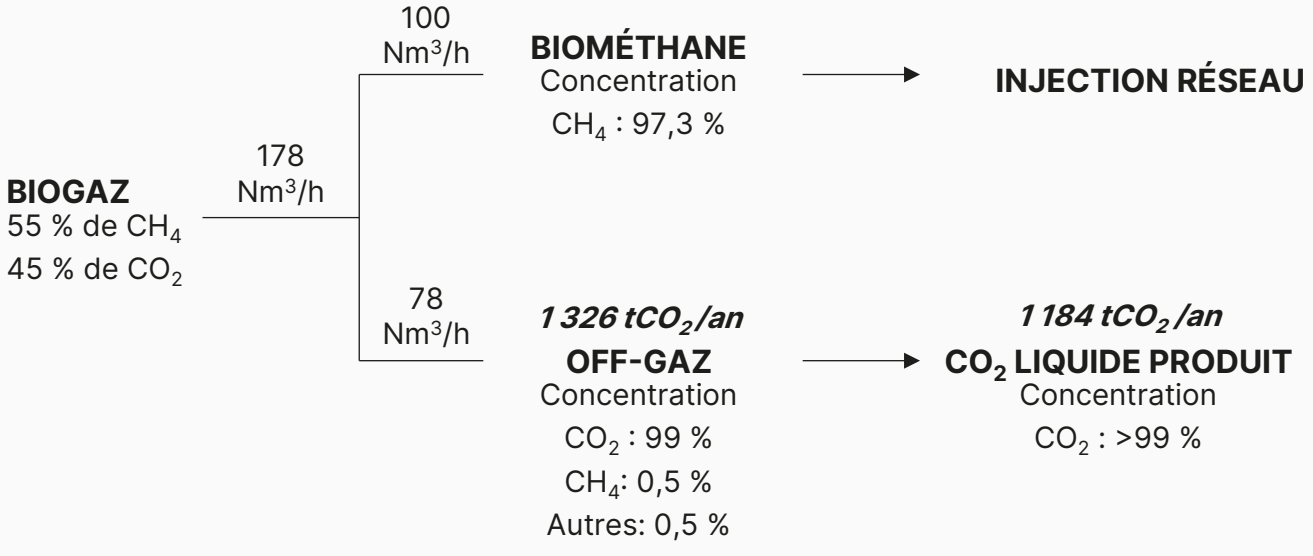
Formule complète

100 Nm^3/h de biométhane ≈ 1000 tCO_2/an

- $Q_{biogaz} = Q_{biométhane} \times \frac{X\%CH_{4\,biométhane} - x\%CH_{4\,off\text{-}gaz}}{X\%CH_{4\,biogaz} - x\%CH_{4\,off\text{-}gaz}}$ → Q_{biogaz} = **178** Nm^3/h
- $Q_{total,\ off\text{-}gaz} = Q_{biogaz} - Q_{biométhane}$ → $Q_{total,off\text{-}gaz}$ = **78** Nm^3/h
- $\dot{m}CO_{2\ total,\ off\text{-}gaz} = Q_{total,\ off\text{-}gaz} \times X_{CO_2,\ off\text{-}gaz} \times \rho CO_2$ → $mCO_{2\ total,\ off\text{-}gaz}$ = **151** $kgCO_2/h$
- $\dot{m}CO_{2capture} = \dot{m}CO_{2total,\ off\text{-}gaz} \times \eta_{carbone}$ → $mCO_{2\ capture}$ = **139** $kgCO_2/h$
- $mCO_{2\ capture,\ annuel} = \dot{m}CO_{2\ capture} \times$ disponibilité → $mCO_{2\ capture,\ annuel}$ = **1 184** tCO_2/an

$Q_{biométhane}$	=	**100** Nm^3/h
$x\%CH4_{\ biométhane}$	=	**97,30** %
$x\%CH4_{biogaz}$	=	**55** %
$x\%CH4_{off\text{-}gaz}$	=	**0,50** %
$x\%CO2_{off\text{-}gaz}$	=	**99,00** %
ρCO_2	=	**1,97** kg/Nm^3 *(0°C, 1 bar)*
$\eta_{carbone}$	=	**92** %
disponibilité	=	**8 500** h/an

VISION D'ENSEMBLE DES FLUX GAZEUX EN SORTIE DE MÉTHANISATION (CAS D'UN MÉTHANISEUR INJECTANT 100 NM^3/H DE BIOMÉTHANE DANS LE RÉSEAU, 55 % DE CH_4 ET 45 % DE CO_2)



6. ANNEXE 6

COMMENT SE CONSTRUIT UNE OFFRE DE LOCATION DE TRANSPORT ?

1. LA CONFIGURATION DE L'OFFRE

1. **Terme fixe :** conducteur + tracteur, taxes et assurances

2. **Terme kilométrique :** carburant (indexation sur indice CNR) et maintenances (entretien et pneumatiques tracteurs).

3. **Coûts additionnels :** ces éléments font partie du cadre tarifaire de toutes les solutions, mais leur impact pourra différer selon les formules des prestataires (par exemple, inclus dans un forfait ou facturés à l'acte). Cela comprend les péages, découches du chauffeur, flexibles et raccordements, heures supplémentaires du chauffeur et sa mobilisation les week-ends et jours fériés.

4. **Citerne roulante ou châssis avec ISO container :** la citerne roulante (semi-remorque) ou le châssis avec un ISO-container est fourni par le transporteur (location) ou par le client (achat).

2. LA FORMULE DE LOCATION

1. **Contrat long terme mensuel :** mise à disposition d'un conducteur et d'un tracteur pour le mois complet (en général 160-190 heures pour le mois). Cette offre est intéressante pour des quantités importantes de CO_2 à transporter, autrement cela est trop onéreux.

2. **Contrat court terme journalier :** mise à disposition d'un conducteur et d'un tracteur pour la journée (9h). Il faut prendre en compte les km d'approches entre le parking du transporteur et le méthaniseur et potentiellement la découche du conducteur si celui-ci est loin de son domicile.

3. **Prestation ponctuelle (SPOT) :** prestation de livraison entre le méthaniseur et le client, facturée à la distance parcourue. Cette formule est utile pour un besoin ponctuel, mais elle engendre des coûts élevés et la disponibilité n'est pas garantie.



7. ANNEXE 7

CARTOGRAPHIE DES SITES DE MÉTHANISATION VALORISANT LEUR CO_2 BIOGÉNIQUE

Le GT Valorisation du CO_2 du Club Biogaz alimente et met à disposition une carte regroupant les sites de méthanisation qui valorisent leur CO_2 biogénique. Début 2026, voici l'aperçu des sites en fonctionnement et en développement :



LÉGENDE :

- Production à potentiel alimentaire (rouge)
- Production à usage principal pour la production d'e-méthane (jaune)
- Production à usage principal industriel (bleu)
- Projets en développement (gris)
- Production à usage principal CCS (vert)

Une carte publique et interactive est disponible via ce lien :
https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1-toX2yWEswEZ_TbTAchbR5xm_loRh8c&usp=sharing.

Nouveaux Systèmes Énergétiques
Comité stratégique de filière

CENTRE TECHNIQUE NATIONAL DU **BIOGAZ** ET DE LA **MÉTHANISATION**

ASSOCIATION TECHNIQUE ENERGIE ENVIRONNEMENT
atee Club Biogaz



Ne pas jeter sur la voie publique - Tous droits réservés

Crédits photo :
Grégory Brandel

Crédits design :
POKESLIDE