



Nouveaux Systèmes Énergétiques

Comité stratégique de filière

GUIDE POUR L'ÉLABORATION DES DOCUMENTS TECHNIQUES DE CONSULTATION ET D'OFFRES D'UNE UNITÉ DE « TRAITEMENT DU CO₂ » ISSU DU BIOGAZ EN VUE DE SA VALORISATION

GROUPE DE TRAVAIL MÉTHANISATION

SOUS-GROUPE DE TRAVAIL INDUSTRIALISATION-COMPÉTITIVITÉ

Août 2022

Table des matières

I. Généralités	6
I.1. Objectifs du document.....	6
I.2. Notions et définitions.....	6
I.3. Du biogaz au biométhane et au CO ₂ biogénique	7
I.4. Utilisations possibles et étude de faisabilité.....	8
II. Valoriser le CO₂ issu d'une unité de méthanisation	11
II.1. Conception initiale de l'unité de méthanisation et de valorisation du CO ₂	11
II.1.1. Point clefs du projet de valorisation du CO ₂ biogénique	11
II.1.2. Calcuette BioCO ₂ : un outil de sensibilisation et d'aide à la décision	12
II.1.3. Conception pour un investissement différé.....	12
II.2. Paramètres de production du flux de CO ₂ biogénique brut.....	12
II.2.1. Modalités de production du CO ₂ biogénique brut.....	12
II.2.2. Composition du flux de CO ₂ biogénique brut.....	13
II.2.3. Caractérisation des flux de CO ₂ biogénique : l'exemple de Methatreil (Machecoul, 44)	14
II.2.4. Valorisation du CO ₂ biogénique et risque ATEX	16
II.3. Spécifications du flux de CO ₂ biogénique valorisable	17
II.3.1. Utilisation de CO ₂ biogénique en serres agricoles	18
II.3.2. Utilisation de CO ₂ biogénique dans l'industrie agro-alimentaire.....	19
II.3.3. Méthanation biologique et catalytique.....	19
II.3.4. Autres utilisations émergentes pour le CO ₂ biogénique	20
II.3.5. Synthèse : principaux paramètres mesurés sur le flux de CO ₂ en fonction des utilisations	20
II.4. Modalités de production de CO ₂ biogénique	21
II.4.1. Instrumentation process	21
II.4.2. Besoins en prétraitement en sortie d'épuration du biogaz	21
II.4.3. PSA (Pressure-Swing Adsorption).....	22
II.4.4. Absorption par un solvant.....	25
II.4.5. Distillation cryogénique (Cryo distillation).....	27
II.4.6. Réaction avec des carbonates.....	29
II.4.7. Récupération de biométhane supplémentaire	29
III. Contenu général des appels d'offres (DCE)	30
III.1. Conditions administratives et contractuelles.....	30
III.2. Planning du projet	31
III.3. Rappel du contexte réglementaire.....	31
III.4. Descriptif du projet	32
III.5. Fournitures, travaux et prestations.....	32
III.6. Spécifications techniques	33

III.6.1.	Définition des valeurs « minimale, nominale et maximale »	33
III.6.2.	Spécifications liées au dossier ICPE	34
III.6.3.	Récupération de chaleur	34
III.6.4.	Spécifications techniques aux interfaces	35
III.6.5.	Qualité et provenance des matériaux	36
III.6.6.	Paramètres de suivi et indicateurs de performances	36
III.7.	Conditions d'essais et réception	37
IV.	Contenu attendu des offres	40
IV.1.	Description du process	40
IV.2.	Fournitures et prestations incluses	41
IV.3.	Études et documentation fournies.....	41
IV.4.	Options	42
IV.5.	Limites de fournitures et spécifications aux interfaces.....	42
V.	Points d'attention	43
VI.	Annexes.....	45
Annexe 1.	Liste de documents de référence.....	45
Annexe 2.	Norme européenne EU 231/2012 – Additifs alimentaires.....	46
Annexe 3.	Référentiel EIGA	47
Annexe 4.	Fiche CO ₂ Industriel – L'air Liquide.....	48
Annexe 5.	Fiche CO ₂ alimentaire – L'air liquide	48
Annexe 6.	Liste des documents à fournir par les entreprises	49

Tableaux

Tableau 1.	Composition du flux de CO ₂ biogénique brut.....	14
Tableau 2.	Composition du CO ₂ pour injection dans le ciel d'une serre, pour dilution à hauteur de 1 500 fois et concentration max 1 000 ppmv de CO ₂ (Source : CTIFL).....	18
Tableau 3.	Qualité du CO ₂ et principaux résidus en fonction des utilisations	20
Tableau 4.	Purification par PSA – données d'entrée / sortie.....	23
Tableau 5.	Exemple d'adsorbants existants pour le captage de CO ₂	24
Tableau 6.	Purification par Adsorption – données d'entrée / sortie	26
Tableau 7.	Spécification liquéfaction cryogénique	28
Tableau 8.	Tableau des limites de fournitures et interfaces.....	43

Illustrations

Figure 1.	Schéma des flux de l'épuration du biogaz et de la purification du CO ₂	7
Figure 2.	Applications industrielles pour le CO ₂ selon ses propriétés.....	8
Figure 3.	Production de CO ₂ en fonction des débouchés (source : GRDF).....	9
Figure 4.	Voies de valorisation de CO ₂ en fonction de sa pureté	17
Figure 5.	Schémas de principe du procédé PSA	23
Figure 6.	Schémas de principe d'absorption par solvant	25
Figure 7.	Schémas de principe du procédés de distillation cryogénique.....	27

Remerciements

Ce document est issu d'un travail collectif avec la participation de :

Structure	Membre du groupe de travail
AIR LIQUIDE	Solène VALENTIN
ASTRADE	Jacky BONNIN
ATEE	Alice L'HOSTIS
BIOGAZ INGENIERIE	Stéphane DUTREMEE
BIO-VALO	Garance RONOT
CH4 PROCESS	Fabien HALLIER
CLARKE ENERGY	Jean-Marc COLOMBANI Olivier GARCIA
ENGIE	Sandrine VANEPPH
GASEO	Clément CONTER
GRDF	Bastien PRAZ
GREENLANE BIOGAS	Sébastien PROVENT
IAR - Pôle compétitivité	Mouhamed NIAKATE
NIPPON GASES	Nathalie BRIXY
PRODEVAL	Eric PEYRA Vincent PAOLOZZI
STORENGY	Flavien BEAUDOUIN Julien CAMY-PORTENABE
TEREGA	Vincent DE TOFFOL Didier MARRON
UP	Nicolas JULIEN Antonin MONNE

Un grand merci à toutes et à tous

I. Généralités

I.1. Objectifs du document

L'un des moyens de diminuer les coûts de la filière biométhane est d'industrialiser la brique épuration (voir le premier guide édité concernant l'épuration : [Guide pour l'élaboration des documents techniques d'une unité d'épuration du biogaz – Nouveaux systèmes énergétiques \(systemesenergetiques.org\)](#)) et un autre est de favoriser la récupération et la valorisation du CO₂ produit par la brique « épuration du biogaz » pour obtenir des revenus supplémentaires pour l'unité de méthanisation.

Dans cet objectif, une première étude prospective¹ a été réalisée par le Club Biogaz de l'ATEE, pour identifier les différentes filières de valorisation du CO₂ issu d'une unité de méthanisation ainsi que les conditions générales de cette valorisation.

Les travaux du CSF sur ce sujet se situent dans le prolongement de cette étude, avec une calculatrice présentée plus loin et le présent document. Un webinar a eu lieu en 2021 pour présenter ces travaux en amont, animé par des membres du présent groupe de travail².

Ce document a pour objectif de détailler les conditions techniques permettant la valorisation du CO₂ issue d'installations de méthanisation, tant du point de vue du producteur que du point de vue de l'utilisateur potentiel, et proposer aux différents acteurs **un cadre, un référentiel commun et cohérent** sur lequel constructeurs, fournisseurs, bureaux d'études et porteurs de projets peuvent se baser dès les étapes de conception préliminaires.

NOTE SUR LA STANDARDISATION

*Pour limiter les **coûts** des projets, il est recommandé de se baser sur des **conceptions standardisées, industrielles et éprouvées**. Tout écart à un standard comporte des **risques**, à la fois fonctionnels et financiers. Ainsi, plutôt que d'imposer une conception ou un contenu à un fournisseur, **il est recommandé d'étudier avec lui une proposition standard**, avec d'éventuelles « options ».*

En tout état de cause, lorsqu'un fournisseur propose ou accepte une conception hors de ses standards, il en porte la responsabilité – avec le MOE et l'AMO le cas échéant.

I.2. Notions et définitions³

Le **biogaz brut** se compose des éléments suivants : le méthane (CH₄, 50 – 75 %), le dioxyde de carbone (CO₂, 25 – 45 %), l'eau (H₂O), l'azote (N₂), l'oxygène (O₂), l'hydrogène sulfuré (H₂S), l'ammoniaque (NH₃), et des éléments traces (organo-halogénés, siloxanes, métaux lourds).

L'**épuration** du biogaz consiste à éliminer du biogaz brut les substances indésirables et les traces de polluants (ammoniaque, éléments soufrés, minéraux...) et augmenter sa teneur en méthane (par retrait du CO₂ et autres composés gazeux) pour produire un gaz comparable au gaz naturel.

¹ [Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation | ATEE](#)

² [Webinaire du 9 juin sur les actions épuration et CO₂ du GT Industrialisation – Nouveaux systèmes énergétiques \(systemesenergetiques.org\)](#)

³ Source : « Principes et procédés d'épuration du biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel - Phase : Faisabilité du projet d'injection » Étape : Considérations générales - 19/08/2011 (ADEME/GRDF).

Le **biométhane** ainsi obtenu constitue du biogaz épuré et enrichi doté d'un pouvoir calorifique équivalent à celui du gaz naturel.

L'**évent** est un gaz pauvre fatalement produit lors de l'épuration du biogaz en biométhane, contenant essentiellement du CO₂, le méthane non extrait et des impuretés issues du biogaz. En fonction de la quantité de méthane et d'impuretés (COV) qu'il contient, celui-ci peut nécessiter un traitement supplémentaire (oxydation thermique, biofiltre) afin d'éviter toute émission polluante à l'atmosphère. Dans certains cas, il peut être redirigé vers la chaudière biogaz pour valorisation.

La **purification** du CO₂ consiste à obtenir un CO₂ à la qualité voulue à partir de l'évent produit par la plupart des unités d'épuration du biogaz, constitué à plus de 90% (95%) de CO₂ mais contenant certaines substances le rendant parfois impropre à l'utilisation en l'état.

1.3. Du biogaz au biométhane et au CO₂ biogénique

Le schéma ci-après présente de façon simplifiée le processus d'épuration du biogaz brut, jusqu'à la purification du CO₂ le cas échéant. Les valeurs sont des moyennes indicatives, toutes technologies confondues (plutôt membranaire ou PSA très performant).

Cependant, chaque projet doit être analysé à partir des valeurs qui lui sont propres et des technologies choisies : chaque fournisseur produira un bilan des flux correspondant au projet et à son offre.

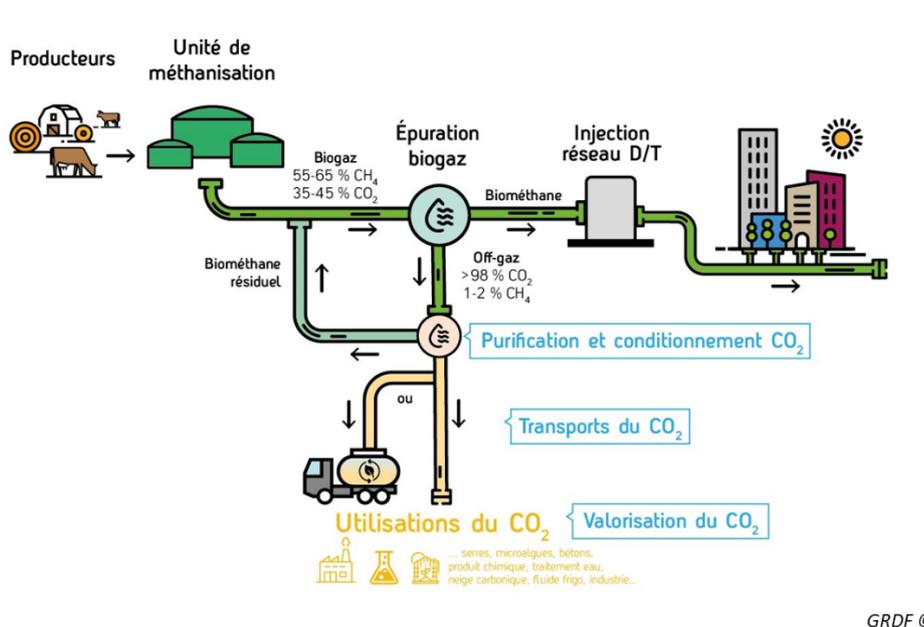


Figure 1. SCHÉMA DES FLUX DE L'ÉPURATION DU BIOGAZ ET DE LA PURIFICATION DU CO₂

Vers une valorisation de près de 100% du biogaz ?

Comme le montre la figure ci-dessus, le CO₂ représente près de la moitié du biogaz produit et est à ce jour rarement valorisé. En outre, en sortie d'épuration du biogaz en biométhane, l'évent est en réalité un flux de CO₂ extrêmement concentré (95 à 99% de CO₂) et déjà canalisé. Capter ce flux et le valoriser serait une belle opportunité pour l'installation et pour le climat.

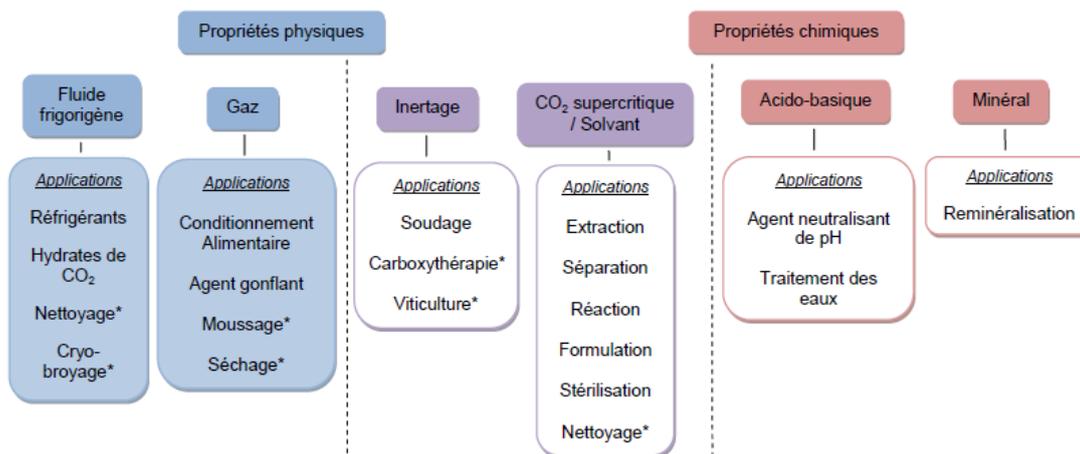
1.4. Utilisations possibles et étude de faisabilité

Les utilisations du CO₂ biogénique tendent à se développer, ne serait-ce que pour correspondre aux politiques publiques de limitation des émissions et pour bénéficier ainsi des budgets correspondants tels que l'évitement de taxes ou la valorisation de budgets et subventions.

En termes d'utilisation, les principales pistes à étudier sont les suivantes (pour les détails, voir [le guide de l'ATEE](#) et [CO2 industriel | myGAS Air Liquide](#)) :

- **Agriculture** : le CO₂ est utilisé en serres pour améliorer la productivité des cultures mais aussi pour la production d'algues ou encore en aquaculture.
- **Industries** : de nombreuses branches industrielles utilisent déjà du CO₂ telles que les industries agro-alimentaires et la chaîne du froid, et d'autres essayent de le développer telles que les industries chimiques ou la construction.
- **Energie** : une voie actuellement en développement est l'utilisation du CO₂ combiné à de l'hydrogène « vert » (produit à partir d'énergies renouvelables) pour produire du méthane de synthèse selon les procédés de méthanation biologique ou catalytique.

Pour l'industrie, le CO₂ présente plusieurs intérêts de par ses propriétés :



* Application de niche : représentant des quantités de CO₂ moindres à ce jour mais sont susceptibles de représenter des volumes de CO₂ valorisables plus importants à l'avenir.

Figure 2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES POUR LE CO₂ SELON SES PROPRIÉTÉS⁴

D'un autre côté, chaque utilisation peut requérir des qualités, conditionnements, périodes de disponibilité et coûts d'achat de CO₂ différents induisant pour le producteur des conditions de purification, de stockage et des coûts de production différents.

Ainsi, lorsqu'il y a des besoins logistiques (stockage, transport), la compression ou la liquéfaction peuvent être nécessaires⁵ :

- Transport de 5 à 10 km : CO₂ comprimé possible
- Transport > 10km : CO₂ sous forme liquide, transporté par camion ou navire à une pression de 15 bars et à une température de -30 °C.

⁴ Source : Les filières de valorisation du CO₂ : État de l'art et avis d'experts, Cas des activités de traitement et valorisation des déchets, Rapport final (septembre 2014), L. Dumergues, B. Favier, R. Alvaro Claver –APESA

⁵ Sources: ATEE + <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-transport-et-stockage-du-co2> + Leung 2014 An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies

- Il est aussi possible de transporter le CO₂ dans son état supercritique dans des conditions de température et pression de 32.1 1C et 72.9 atm (conditions de transport en réseau de CO₂ par pipeline).

Les conditions de production du CO₂ sont donc très fortement dépendantes des modalités de conditionnement et de distribution. Ainsi, pour des conditions de sécurité et de traçabilité et pour éviter de multiplier les types de cuves, les distributeurs proposent majoritairement un seul type de CO₂, répondant aux critères EIGA (voir annexe) :

- > 95% du marché de distribution est du CO₂ liquide de qualité EIGA, très exigeante et très coûteuse (CAPEX et OPEX), même pour les utilisations moins exigeantes
- Moins de 5% du marché correspond à une utilisation dans des process de production industriels notamment, avec diverses qualités (Norme alimentaire E290 ou pas de norme / référentiel)
- Utilisation en serre agricoles de CO₂ avec diverses qualités : effet de proximité

En conséquence, même les utilisateurs qui auraient besoin d'un CO₂ de qualité alimentaire « E290 » (réglementation européenne sur les additifs) ou avec des exigences moindres que celles du référentiel EIGA en général, n'ont que peu d'alternatives actuellement et se retrouvent en compétition avec les autres utilisations plus exigeantes –boissons gazeuses, froid médical, industries de pointe...

Note sur le marché du CO₂

Pour les utilisateurs, il peut y avoir un intérêt à bénéficier d'un CO₂ d'une qualité et d'une périodicité adaptée à leurs besoins, à un prix stable par le biais d'un contrat longue durée ou d'un partenariat avec une unité de méthanisation locale, à bénéfice mutuel.

Dans le cas d'un CO₂ « non EIGA », les moyens de stockage et de distribution spécifiques doivent être intégrés à l'étude.

Le schéma ci-dessous rappelle les modèles d'affaires pour valoriser ce CO₂ en fonction des débouchés – à identifier via une étude de marché spécifique au projet :

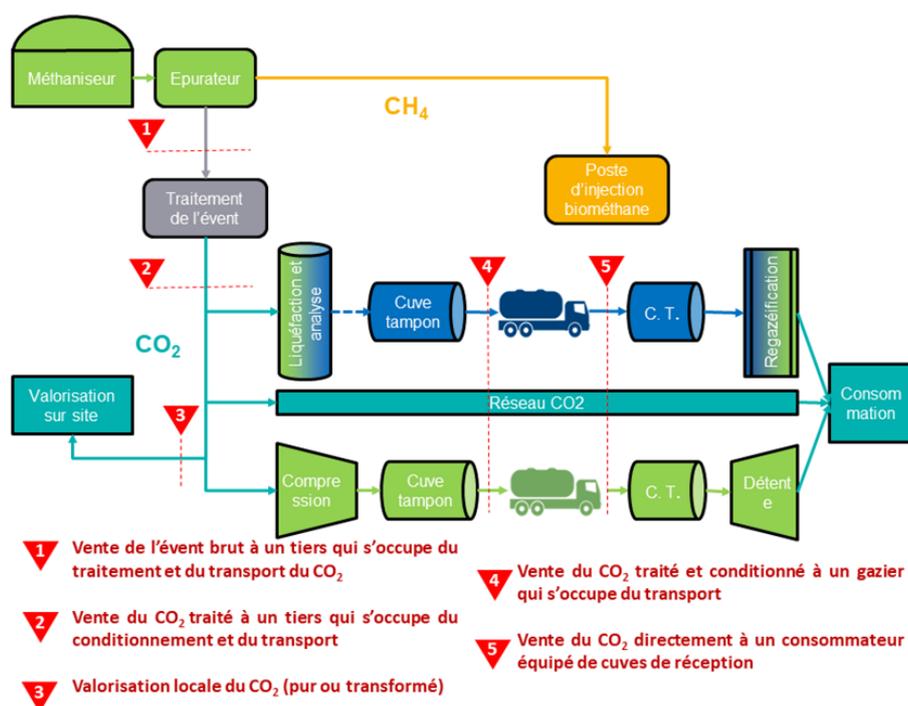


Figure 3. PRODUCTION DE CO₂ EN FONCTION DES DÉBOUCHÉS (SOURCE : GRDF)

Ainsi, avant de décider de produire du CO₂ sur son unité de méthanisation ou même de lancer des consultations, **le porteur de projet doit impérativement réaliser une étude de marché** pour vérifier la faisabilité et la rentabilité de la valorisation du CO₂ produit par son installation.

Pour réaliser son étude de marché, le porteur de projet peut s'appuyer sur plusieurs outils :

- L'étude prospective⁶ réalisée par le Club Biogaz de l'ATEE, qui présente les différentes filières de valorisation du CO₂ issu d'une unité de méthanisation ainsi que les conditions générales de cette valorisation.
- La « calculette CO₂ », outil d'aide à la décision à destination des porteurs de projets, élaborée par le présent groupe de travail (informations via les sites de GRDF, ATEE-CTBM...) (voir chapitre suivant).

⁶ [Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation | ATEE](#)

II. Valoriser le CO₂ issu d'une unité de méthanisation

II.1. Conception initiale de l'unité de méthanisation et de valorisation du CO₂

Comme expliqué dans le « *Guide pour l'élaboration des documents techniques de consultation et d'offres d'une unité d'épuration du biogaz en vue de biométhane* »⁷, les technologies d'épuration du biogaz ne sont pas strictement comparables concernant la valorisation du CO₂ de méthanisation : certaines comme le lavage à l'eau ne permettent pas de récupérer ce CO₂ (ou très partiellement). D'autres produisent un évent plus riche en CH₄ et autres polluants. D'autres encore permettent d'obtenir directement deux flux valorisables (biométhane et CO₂ biogénique).

Et la méthanation du biogaz brut ?

On note actuellement une dynamique de développement de technologies de méthanation du biogaz brut, *In Situ* ou en réacteurs : par essence, cette filière ne produira qu'un flux très limité de CO₂ biogénique mais elle augmentera de façon très significative la production de biométhane pour un gisement de biomasse donné.

II.1.1. Point clefs du projet de valorisation du CO₂ biogénique

1. Définir le **flux riche en CO₂** (qualité, quantité, variabilité)
2. Réaliser une **étude de marché** pour **caractériser les usages** possibles sur le **territoire**
3. Définir le **cahier des charges technique** du CO₂ à produire en accord avec ces **usages** et en incluant la **logistique** et en gardant en mémoire que :
 - a. Le référentiel EIGA n'est pas obligatoire
 - b. Si besoin de transport et/ou stockage, intégrer la compression ou la liquéfaction
 - c. La liquéfaction permet de récupérer le CH₄ de l'évent : l'équilibre technique et financier est à envisager sur l'ensemble « épuration biogaz + valorisation CO₂ », en prenant en compte un surdimensionnement de l'épurateur pour absorber la recirculation du flux « enrichi » en CH₄ en sortie de liquéfaction.
4. Réaliser une étude de faisabilité technico-économique de l'unité de valorisation du CO₂ (dimensionnement, coûts, revenus)

Il est donc essentiel de réfléchir à la valorisation du CO₂ dès la conception initiale de l'unité de méthanisation.

⁷ [CSF Méthanisation - Épuration du biogaz et purification du CO₂ \(biogazvallee.eu\)](http://biogazvallee.eu)

II.1.2. Calculette BioCO₂ : un outil de sensibilisation et d'aide à la décision



Une « calculette » a été développée par GRDF dans le cadre du CSF et avec plusieurs contributions du présent groupe de travail : [Calculette Valorisation BioCO₂ \(grdf.fr\)](https://www.grdf.fr/valorisation-bio-co2).

L'objectif de la calculette est d'éveiller la curiosité des producteurs de biométhane sur ce sujet. A ce titre, elle reste un outil pédagogique sans valeur technique ou commerciale puisque les calculs sont simplifiés et les données basées sur des ordres de grandeurs.

ATTENTION : les données datant de 2021, elles ne tiennent pas compte de l'inflation de début 2022.

Pour consolider et améliorer l'outil, **toutes les contributions sont les bienvenues** : retour d'expérience utilisateur, devis, données réelles...

II.1.3. Conception pour un investissement différé

Si le projet n'est pas mûr pour un investissement dès la conception initiale, par manque de débouchés sécurisés par exemple, il est possible de la prévoir **en option** et d'anticiper quelques aménagements :

- Réserver un espace suffisant à proximité de l'unité d'épuration et facile d'accès pour construire et exploiter ultérieurement l'unité de valorisation du CO₂
- Prévoir dans l'AO d'épuration, les dispositions techniques nécessaires au raccordement de l'évent à l'unité de valorisation du CO₂
- Réserver un espace suffisant pour stocker le CO₂ purifié si c'est la solution prévue ainsi que les futurs accès pour le chargement/déchargement des cuves de transport le cas échéant
- Prévoir les raccordements et autorisations pour l'injection de méthane de synthèse supplémentaire (méthanation biologique ou catalytique)

II.2. Paramètres de production du flux de CO₂ biogénique brut

II.2.1. Modalités de production du CO₂ biogénique brut

Comme vu précédemment, la plupart des procédés d'épuration du biogaz produisent un flux très riche en CO₂ en parallèle du flux de biométhane. C'est ce flux qui est appelé « CO₂ biogénique brut » :

- Le **débit** de ce flux est directement proportionnel au débit de biogaz épuré
- La **composition** de ce flux est directement liée à la composition du biogaz et au procédé d'épuration du biogaz en biométhane
- L'état de ce flux (**gazeux / liquide**) est directement lié au procédé d'épuration du biogaz
- La **régularité** de production est liée au procédé d'épuration, à ses performances, mais peut aussi être liée aux capacités d'injection et à la régularité de production du biogaz

Tous ces éléments doivent être connus avant d'aborder l'étude de marché et la consultation des fournisseurs.

II.2.2. Composition du flux de CO₂ biogénique brut

Lorsqu'il existe, le flux de CO₂ biogénique est généralement très riche, composé à plus de 95% de CO₂, et rejeté directement à l'atmosphère en un flux canalisé (**évent**).

La composition de ce flux dépend de la composition initiale du biogaz et du procédé d'épuration du biogaz. Ce flux de gaz est très concentré en CO₂ mais contient également d'autres éléments chimiques qui conditionnent les procédés de purification, de transformation, voire d'usages (brut ou après purification).

Parmi ces composés, dont la présence dépend à la fois des intrants, du procédé de méthanisation et du procédé d'épuration du biogaz, les éléments suivants peuvent poser problème selon le mode de valorisation envisagé :

- Les **Composés Organiques Volatils (COV)**, les huiles et les **Éléments Trace Métalliques (ETM)** : peuvent être problématiques pour une valorisation du CO₂ en qualité alimentaire ou en serre.
- **L'Oxygène** : peut induire des atmosphères explosives dangereuses en cas de liquéfaction.
- **L'eau** : problématique lors de la liquéfaction mais son traitement est généralement prévu.

À partir de la composition du biogaz, on peut déduire une composition moyenne du flux de CO₂ biogénique brut issu de l'unité d'épuration du biogaz.

Ajuster le traitement du flux de CO₂ brut à l'utilisation

Pour certaines utilisations telles que l'injection en serre ou certaines utilisations industrielles, il est possible que le CO₂ biogénique brut soit de qualité suffisante pour être valorisé en l'état ou après un simple passage sur charbons actifs, avec éventuellement une phase de stockage précédant une étape de compression ou de liquéfaction, sans purification complémentaire.

Le **cahier des charges** pour la fourniture d'une solution de purification du CO₂ devra préciser la **qualité attendue pour ce CO₂ biogénique** en fonction des utilisations (voir chapitre suivant).

Le tableau ci-dessous peut être utilisé comme base pour **les cahiers des charges de consultation**. Le porteur de projet devra l'adapter au projet et à la technologie d'épuration du biogaz : il sera basé sur la qualité des événements (« offgas ») telle que garantie par son fournisseur de la solution d'épuration du biogaz. Ainsi, le fournisseur de l'unité de valorisation du CO₂ pourra proposer tous les traitements nécessaires à l'obtention de la qualité de valorisation requise :

Paramètre	Unité	Épuration membranaire	PSA	Valeur minimale	Valeur nominale	Valeur maximale
Débit instantané	Nm ³ /h	-	-	(projet)	(projet)	(projet)
Production annuelle	T/an	-	-	(projet)	(projet)	(projet)
CO ₂	% vol	95 à 99%	94 à 96%	95	(projet)	100
CH ₄	ppmv	6 000 à 17 000	18 000 à 46 000	0,3	(projet)	1,5
Composés azotés (total N ₂)	ppmv	200 à 1 100	0 à 16 000	0	(projet)	20 000
O ₂	ppmv	1 500 à 6 400	3 000 à 4 000	1 500	(projet)	7 000
H ₂ O	ppmv	0 à 20 000	0 à 17 000	0	(projet)	20 000

COV (total)	ppmv	13 000 à 20 000		1	(projet)	
Soufre total (S)	ppmv	0,8 à 5,5 <0.94 µg/Nm ³				
Monoxyde de carbone	ppmv	1 000				
Méthanol	ppmv	5 800 à 1 7000	17 800 à 46 000			
Température	°C				(projet)	
Pression	mBarg				(projet)	

Tableau 1. COMPOSITION DU FLUX DE CO₂ BIOGÉNIQUE BRUT

Sources des valeurs : analyses réalisées sur certains site (confidentiels) et calculs.

II.2.3. Caractérisation des flux de CO₂ biogénique : l'exemple de Methatreil (Machecoul, 44)

Le site de Méthatreil (Machecoul, 44) est le premier à avoir mis en service en France une unité de liquéfaction de CO₂ couplée à l'épuration du biogaz sur une unité de méthanisation.

Dans le cadre du CSF, une série d'analyses a été menée sur ce site pour évaluer la qualité du flux de CO₂ produit à différents stades de production et par rapport aux normes alimentaires.

Ce travail a pu être mené avec la collaboration des exploitants de Méthatreil ainsi que de l'entreprise VERDEMOBIL, constructeur de l'installation de production de CO₂. Un grand merci à tous les contributeurs.

II.2.3.1. Présentation synthétique du site

L'installation de méthanisation traite des matières en provenance d'élevages (effluents) et des matières végétales brutes (tontes, sous-produits de maraichage, ensilage d'herbe). Elle présente les caractéristiques suivantes :

1. Unité de méthanisation en infiniment mélangé,
2. Incorporation directe des matières solides dans le digesteur,
3. Injection d'oxygène dans le ciel gazeux (abattement biologique de l'H₂S),
4. Unité d'épuration (capacité d'injection 125 Nm³/h de biométhane) avec :
 - Filtre à charbon actif,
 - Sécheur par condensation à l'eau glacée,
 - Filtration membranaire à 3 étages.

Le biométhane est injecté dans le réseau de distribution GRDF.

Les gaz pauvres sont repris directement par l'unité de liquéfaction ou rejetés à l'atmosphère si cette dernière est en arrêt.

L'unité de liquéfaction est dimensionnée pour traiter un flux de 100 Nm³/h de gaz pauvre (évent ou « offgas ») avec une capacité maximale de 150 Nm³/h pour une teneur de 99 % de CO₂ dans les gaz pauvres.

II.2.3.2. Principaux résultats de la campagne d'analyses

Les prélèvements et analyses ont été réalisés par un laboratoire spécialisé dans les analyses de gaz sur des sites industriels au cours de 3 campagnes étalées sur 4 mois.

Chaque série d'analyses a été réalisée selon le même protocole, aux mêmes points de prélèvement, avec des analyses en continu sur les principaux gaz et des prises d'échantillons ou de prélèvements pour les éléments ou les gaz secondaires.

Mis à part une courte période de redémarrage de l'installation, l'unité de liquéfaction a été maintenue en fonctionnement continu et régulier sur la totalité des périodes de prélèvements.

Les séries d'analyses ont porté sur les principaux flux de gaz :

1. Le biogaz brut, issu de la méthanisation avant les étapes de prétraitement.
2. Les gaz pauvres (évent ou « offgas ») issus de l'unité d'épuration, en sortie d'épuration.
3. Les gaz pauvres (évent ou « offgas ») issus de l'unité d'épuration, en sortie de filtre à charbon actif de l'unité de pré-traitement du CO₂.
4. Le CO₂ liquéfié, issu de l'unité de compression et liquéfaction.
5. Le gaz enrichi, issu de l'unité de liquéfaction et réinjecté dans le biogaz brut.

NOTE IMPORTANTE : entre la première campagne et les deux dernières, les méthodes analytiques ont été améliorées de façon à atteindre les limites de détection sur les mesures d'humidité et les composés soufrés.

Les résultats ont montré que :

- Les teneurs en CO₂ et CH₄ sur le **biogaz brut** sont restées stables sur l'ensemble des campagnes de mesures.
- Les teneurs en H₂S, O₂ et N₂ sur le **biogaz brut** ont fortement varié selon les conditions d'exploitation au moment du prélèvement.
- Les teneurs en éléments soufrés et en COV ont été très fortement réduits par le prétraitement de l'évent aux charbons actifs (**évent prétraité**).
- Le **gaz enrichi** issu de la séparation en colonne de distillation, qui repart en mélange avec le biogaz brut, a représenté environ 15% du flux de CO₂ du gaz pauvre.
- La distillation a permis de récupérer dans le **gaz enrichi** : 100% du CH₄, 70 et 84% de l'O₂ et 14 et 78 % du N₂ initialement présents dans l'évent.
- Les teneurs en CO₂ du CO₂ liquide sont restées stables sur les 3 campagnes. La teneur en CO₂ est exprimée sur gaz humide avec une teneur en H₂O considéré à 0,1%v. Les teneurs des autres gaz permanents ont été inférieures aux seuils de détection du laboratoire.

Par ailleurs, en référence aux 2 textes existants au niveau européen pour définir la qualité du CO₂ (Norme sur les additifs alimentaires – E290 et référentiel EIGA), les analyses du CO₂ liquide ont montré :

- La conformité à la norme sur les additifs alimentaires E290, sur les 3 campagnes.
- La non-conformité par rapport au référentiel EIGA sur l'une des 3 mesures de teneur en CO₂ (99,85% pour 99,9% minimum requis).
- Des limites de détection insuffisantes pour certaines exigences du référentiel EIGA : CO (<10 ppm), oxygène (<30 ppm). Sur ces paramètres, il n'a donc pas été possible de conclure la conformité ou non au référentiel EIGA.
- Pour les autres éléments, les mesures ont été conformes au référentiel EIGA – à l'ajustement près de la sensibilité des mesures après la 1^{ère} campagne.

II.2.3.3. Conclusion

La campagne d'analyse menée sur l'unité de production de CO₂ de Méthatreil a permis de qualifier la qualité du CO₂ et d'analyser les flux des gaz permanents et des autres composés au sein de l'unité de liquéfaction.

Sur cette campagne, on a pu constater que :

- Les étapes de pré-traitement en amont d'épuration du biogaz et de liquéfaction de CO₂ montrent leur intérêt pour réduire la pollution aux COV.
- Sans traitement complémentaire de l'évent, le CO₂ produit (évent brut) ne peut en aucun cas respecter les exigences de pureté du référentiel EIGA ni de la norme E290.
- La cryo-distillation permet d'éliminer essentiellement H₂O, O₂ et surtout CH₄, qui est récupéré pour valorisation.
- Le prétraitement sur charbon actif permet avant tout d'éliminer les COV excédentaires
- Pour éviter de multiplier les contrôles analytiques et par sécurité, il paraît nécessaire de doubler les cuves de charbon actif (à monter en lead lag) afin d'éviter une non-conformité au moment où la première cuve atteindra son niveau de saturation.

Il conviendra également de prévoir, dès la phase projet, les modalités de gestion du gaz enrichi récupéré après liquéfaction, notamment en termes de dimensionnement de l'épurateur, de pilotage des deux installations et d'interfaces.

Avertissements quant à l'extrapolation des résultats

La qualité finale du CO₂ sera très dépendante de la qualité du biogaz brut et de l'évent de l'épuration du biogaz. Bien que ces premiers résultats soient instructifs pour la filière, ils ne peuvent en aucun cas être généralisés ou extrapolés à d'autres unités.

II.2.4. Valorisation du CO₂ biogénique et risque ATEX

Si le flux de CO₂ biogénique contient encore du CH₄ lorsqu'il est valorisé, une analyse de risque ATEX doit impérativement être réalisée. En effet, la « limite inférieure d'explosivité » (LIE) du CH₄ est de **5%** dans l'air ambiant (voir guide INERIS « [Règles de sécurité des installations de méthanisation agricole](#) »).

L'étude et le zonage ATEX permettent d'identifier les zones qui pourraient atteindre cette LIE et entraîner une explosion. 3 types de « zones » existent en fonction de la probabilité d'occurrence de la formation d'une atmosphère ATEX⁸ (Risque permanent / occasionnel / potentiel).

Ainsi, en cas de stockage du CO₂ en phase liquide et de vaporisation lors de l'utilisation, le dégazage éventuel du CH₄ résiduel issu de la cuve de stockage doit être pris en compte pour éviter d'injecter ponctuellement une forte concentration de CH₄ et d'induire une **zone ATEX localisée et/ou temporaire**.

Dans les conditions normales de fonctionnement, il n'y a pas de risque de création de zones ATEX. Ces conditions normales sont les suivantes :

- En dehors des phases de démarrage de l'unité d'épuration du biogaz (i.e. lorsque le régime nominal d'épuration est établi et évite tout pic ponctuel de CH₄),
- En dehors des phases de démarrage de l'unité de purification et/ou de liquéfaction du CO₂ (idem).

⁸ [Explosion sur le lieu de travail. Zonage et marquage des appareils ATEX - Risques - INRS](#)

L'ensemble de ces risques doit être évalué lors de l'étude de dimensionnement afin de mettre en œuvre les mesures adéquates en amont (enlèvement du CH₄, contrôle de la composition, etc.) et/ou en aval (ventilation et instrumentation de la serre, pilotage de l'injection CO₂) pour éliminer complètement ce risque.

II.3. Spécifications du flux de CO₂ biogénique valorisable

En fonction de l'étude de marché, le CO₂ produit devra répondre à certains critères de qualité (composition) mais aussi d'état (comprimé, liquéfié – ou non) et parfois de périodicité ou régularité d'approvisionnement.

La caractérisation de ce flux est nécessaire pour déterminer l'adéquation avec la valorisation souhaitée et pour concevoir les procédés de traitement adaptés. Ainsi, la teneur en oxygène (O₂) est un paramètre très important pour la conception des installations de liquéfaction du CO₂ (risques explosifs), ou encore pour la compatibilité du flux de CO₂ avec un procédé de méthanation.

Le schéma ci-après illustre les voies de valorisation possibles en fonction de la qualité du CO₂ produit :

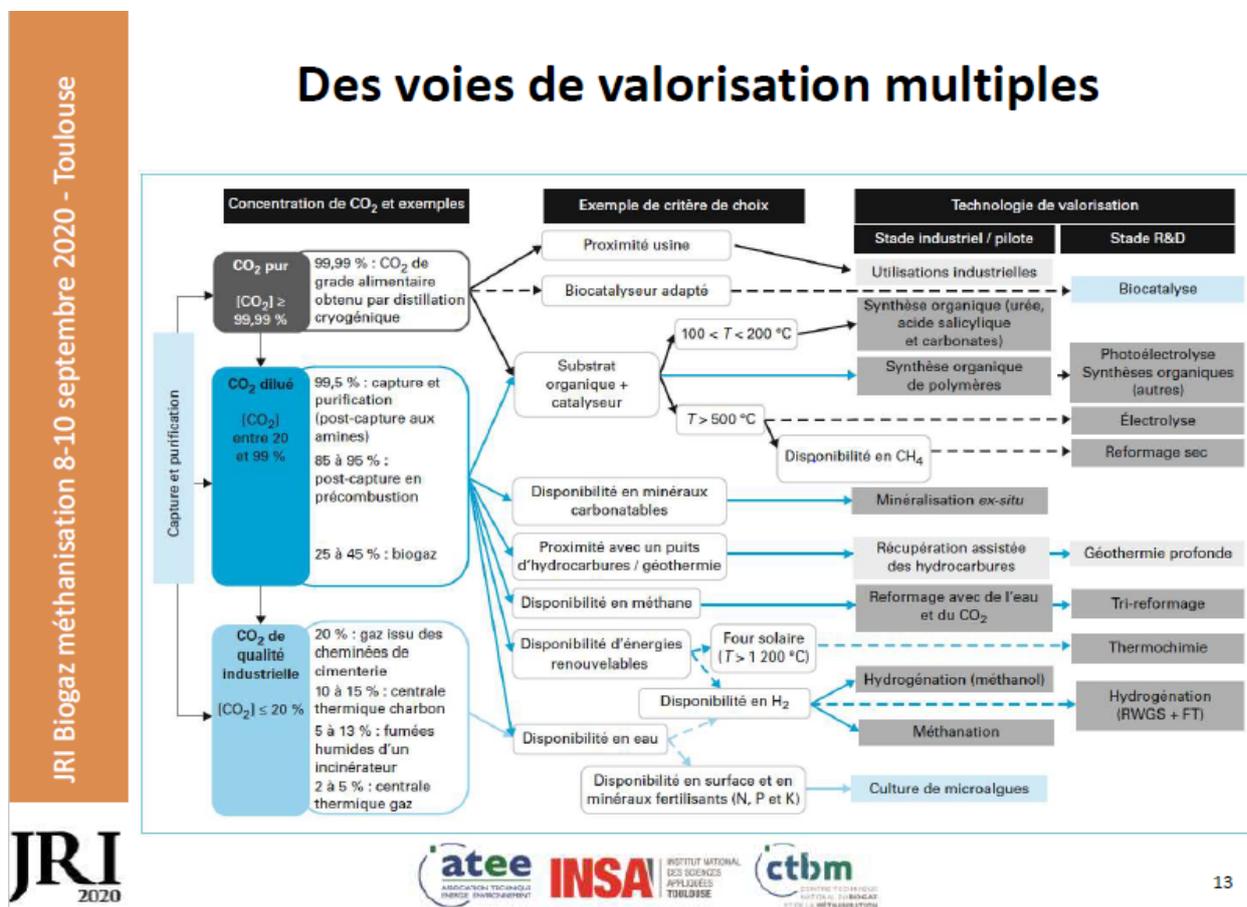


Figure 4. VOIES DE VALORISATION DE CO₂ EN FONCTION DE SA PURETÉ⁹

⁹ Source : JRI Biogaz méthanisation 2020, VALORISATION DU CO₂ DE METHANISATION

Référentiels pour la qualité du CO₂

Il n'existe actuellement que 2 référentiels standards pour définir la qualité du CO₂ (*référentiels complets en annexes*) :

- La réglementation européenne sur les additifs alimentaires = **CO₂ alimentaire « E 290 »**
- Le [référentiel EIGA \(Doc 070\)](#) (European Industrial Gases Association) basé sur les exigences de l'industrie des boissons gazeuses et qui sert de guide dans l'industrie du gaz mais qui n'a pas valeur de norme ou de réglementation au sens strict.

En dehors de ces référentiels, chaque distributeur et chaque utilisateur est libre de définir une qualité de CO₂ selon ses propres critères (voir ci-après).

Divers travaux menés en Europe pour qualifier et sécuriser les usages de CO₂ biogénique selon le référentiel EIGA donnent des résultats analytiques prometteurs mais restent encore trop peu nombreux pour que la filière méthanisation puisse apporter des garanties. Par ailleurs, il est possible que l'image du CO₂ issu de méthanisation suffise à constituer un frein à sa valorisation en qualité EIGA. En conséquence, la *certification EIGA n'est à l'heure actuelle pas un critère accessible* permettant d'envisager de valoriser le CO₂ biogénique via les circuits de distribution classiques ou via les filières exigeant la qualité EIGA.

II.3.1. Utilisation de CO₂ biogénique en serres agricoles

Voir le « [Guide technique – Valorisation du CO₂ de méthanisation](#) » du CTBM (ATEE) pour les modalités d'utilisation du CO₂ en serres agricoles.

Pour une utilisation en serre, la concentration moyenne visée en CO₂ dans l'atmosphère de la serre est de 1 000 ppmv, soit un débit de 10 kg/ha/h de CO₂. (recommandation CTIFL – Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et légumes) et **une dilution à hauteur de 1 500 fois**.

	Seuil Plante	Homme VME	Homme VLCT	Seuils pour du CO ₂ à 99% vol. devant être dilué 1500 fois pour injection dans serres	
Ethylène (C ₂ H ₄)	0,01 ppmv	1 ppmv	5 ppmv	15 ppmv	19 mg/Nm ³
Dioxyde de Soufre (SO ₂)	0,1 ppmv	2 ppmv	5 ppmv	150 ppmv	429 mg/Nm ³
Oxydes d'azote (NO et Nox)	0,7 ppmv	25 ppmv	3 ppmv	1 050 ppmv	1,4 g/Nm ³
Aldéhydes formique (CH ₂ O)	0,7 ppmv	0,5 ppmv	1 ppmv	750 ppmv	1,0 g/Nm ³
Acroléine (C ₃ H ₄ O)	1 ppmv		0,1 ppmv	150 ppmv	375 mg/Nm ³
Propylène (C ₃ H ₆)	10 ppmv	20 ppmv		15 000 ppmv	28,1 g/Nm ³
Monoxyde de carbone (CO)	100 ppmv	50 ppmv		75 000 ppmv	93,8 g/Nm ³

Tableau 2. COMPOSITION DU CO₂ POUR INJECTION DANS LE CIEL D'UNE SERRE, POUR DILUTION À HAUTEUR DE 1 500 FOIS ET CONCENTRATION MAX 1 000 PPMV DE CO₂ (SOURCE : CTIFL)

Par ailleurs, certains composés comme le toluène et le benzène n'apparaissent pas dans la liste donnée dans le document du CTIFL. On peut toutefois penser qu'ils seront surveillés mais ces composés sont facilement piégés sur charbon actif.

Pour aller plus loin, quelques éléments complémentaires concernant l'utilisation du CO₂ en serre sont consultables sur ce site canadien : [Le gaz carbonique dans les serres \(gov.on.ca\)](#).

Risque ATEX pour l'utilisation en serre

En cas de stockage du CO₂ en phase liquide suivi d'une vaporisation en serre, le dégazage éventuel du CH₄ résiduel issu de la cuve de stockage doit être pris en compte (*Risques et études ATEX : voir chapitre correspondant*).

Outre les **contrôles** et **alarmes**, il est fortement recommandé de prévoir une **ventilation** de la serre permettant d'assurer un taux de renouvellement d'air suffisant et démontrant l'absence de « zones mortes » afin d'éviter de créer des zones ATEX localisées et/ou temporaires dans le ciel de la serre.

II.3.2. Utilisation de CO₂ biogénique dans l'industrie agro-alimentaire

Quelques expériences de qualification de CO₂ biogénique pour l'utilisation par l'industrie agro-alimentaire ont été relatées par des participants au GT, essentiellement sur des recettes 100% végétales (Grande-Bretagne).

Cependant, malgré les résultats obtenus à ce jour (voir encadré), il semble difficile voire risqué d'envisager ce type d'usage comme débouché généralisable et durable pour le CO₂ biogénique pour les raisons suivantes :

- Les coûts d'investissement et de fonctionnement liés à la purification et à la vérification de la qualité et de la traçabilité nécessaires pour le référentiel EIGA sont difficilement supportables pour des installations agricoles ou territoriales moyennes (plusieurs centaines de milliers d'euros de CAPEX et OPEX importants également).
- L'impact de la variabilité des recettes en entrée de méthanisation n'est pas connu.
- La responsabilité en cas de problème sanitaire ou qualitatif sera difficile à porter par les porteurs de projets.
- La possibilité d'un risque ou l'image même de la méthanisation comme source de CO₂ biogénique peut être un frein pour certains industriels, notamment lorsque la recette comporte des sous-produits animaux (y compris des fumiers, lisiers...) et même s'ils sont hygiénisés.

Étude de cas : expérimentation industrielle sur une unité de méthanisation de biodéchets

Cette étude a été réalisée en 2019¹ sur le premier processus industriel à grande échelle de valorisation du biogaz avec purification simultanée du méthane et du CO₂ dans l'une des plus grandes usines de production et de purification de biogaz d'Europe, située dans le nord de l'Italie. L'usine de méthanisation a une capacité de digestion de 400 000 t/an de biodéchets et produit 6 250 m³/h de biogaz. L'unité de production de CO₂ biogénique visait une qualité EIGA pour un usage par l'industrie alimentaire et des boissons.

Résultats : après le processus de distillation final, le CO₂ biogénique s'avère chimiquement et microbiologiquement adapté aux applications alimentaires. Une évaluation des aspects économiques et énergétiques et une comparaison avec des procédés de purification alternatifs mettent également en évidence la rentabilité du procédé pour cet usage.

II.3.3. Méthanation biologique et catalytique

Concernant l'utilisation du flux de CO₂ biogénique en méthanation (biologique ou catalytique), la qualité nécessaire n'est pas standardisée et dépend de chaque fournisseur de technologie. Notamment la

quantité d'O₂ présente dans le flux CO₂ brut est souvent trop importante (>0,1% / 1000ppm) pour un procédé sur échantillon brut sans traitement supplémentaire.

Ce point est donc à **étudier en détail avec les fournisseurs de solutions de méthanation**, qui devront au minima préciser les qualités attendues, voire, le cas échéant, mettre en œuvre les solutions de traitement préliminaire nécessaires.

II.3.4. Autres utilisations émergentes pour le CO₂ biogénique

Compte tenu des enjeux de la réduction des émissions de CO₂ et de la séquestration du carbone, de nombreuses initiatives voient le jour, continuellement, pour séquestrer le CO₂ émis ou réduire des « empreintes carbone ».

Une association Européenne ([CO₂Value Europe \(co2value.eu\)](http://co2value.eu) en anglais) est active sur ces sujets de récupération et séquestration de carbone, en animant une communauté mobilisée sur ces sujets et en présentant des projets de R&D.

De nombreuses pistes sont à suivre et à tester éventuellement au moyen de partenariats locaux (à identifier lors de l'étude de marché), comme par exemple :

- La valorisation par **l'industrie chimique** – *exemple : la société CleanO2 propose de valoriser les émissions de CO₂ issues de chaudières gaz naturel sous forme de produit (savon, détergent - <https://www.cleano2.ca/>)*
- L'injection dans **le ciment ou le béton**.

II.3.5. Synthèse : principaux paramètres mesurés sur le flux de CO₂ en fonction des utilisations

	<i>Serres agricoles *</i>	<i>Qualité industrielle</i>	<i>Qualité alim. (E290) - Extrait</i>	<i>Référentiel EIGA - Extrait</i>
CO₂	Indifférent	> 97%	> 99%	> 99.9% v/v.
Humidité		< 200 ppmv		< 20 ppm v/v
Ammoniac		Selon utilisateur		< 2,5 ppm v/v
Composés azotés	< 1 050 ppmv en NO et NO ₂	Selon utilisateur		< 2.5 ppm v/v en NO et NO ₂
Huiles		Selon utilisateur	< 5 ppm	< 5 ppm m/m
Monoxyde de carbone	< 75 000 ppmv	Selon utilisateur	< 10 ppm	< 10 ppm v/v
Composés soufrés	< 150 ppmv (dioxyde de S.)	Selon utilisateur	Voir annexe	< 0.1 ppm v/v (S tot. et autres)
Autres	Voir annexe	Selon utilisateur	Voir annexe	Voir annexe

Tableau 3. QUALITÉ DU CO₂ ET PRINCIPAUX RÉSIDUS EN FONCTION DES UTILISATIONS¹⁰

(*) pour du CO₂ à 99%vol destiné à être dilué 1 500 fois pour injection dans une serre.

Méthanation biologique et catalytique : ces technologies sont encore en développement et ne disposent pas de critères communs (voir chapitre correspondant).

¹⁰ Sources : travaux Club Biogaz et du CSF ; « Les filières de valorisation du CO₂ rapport 2014 » ; normes, référentiels et fiches produits de fournisseurs. Exemples et référentiels complets en annexe.

II.4. Modalités de production de CO₂ biogénique

La purification et la liquéfaction ne sont pas obligatoires

Comme vu précédemment, la purification de l'évent n'est pas obligatoire pour la valorisation du CO₂. De même, la liquéfaction n'est nécessaire que si le stockage et le transport sur des distances conséquentes sont nécessaires. **Dans certains cas, une simple compression de l'évent sera largement suffisante pour une valorisation locale (serre, industrie).**

Si la liquéfaction est nécessaire, les procédés mis en œuvre permettent généralement de purifier le CO₂ – voir ci-après.

Il existe des unités de purification pour amener le CO₂ à une pureté de 99% ou plus. La plupart appliquent des techniques déjà éprouvées pour l'épuration du biogaz :

- Pressure-swing adsorption (PSA/VP SA)
- Absorption par un solvant
- Distillation cryogénique (Cryo distillation)
- Réaction avec carbonate

La purification de CO₂ par séparation membranaire n'est pas assez mature à l'échelle industrielle. Elle ne sera pas étudiée dans ce guide. Cette technologie nécessite des membranes très sélectives et perméables afin de laisser passer uniquement le CO₂.

II.4.1. Instrumentation process

Il est recommandé de prévoir les points de contrôles suivants lors de la conception de l'installation sur lesquels des mesures ponctuelles ou en continu pourront être réalisées :

- Flux de CO₂ biogénique brut,
- Flux de CO₂ biogénique après prétraitement ou purification (le cas échéant),
- Flux de CO₂ biogénique avant liquéfaction / compression,
- Flux de CO₂ biogénique prêt à être valorisé.

Ces différents points permettent de réaliser un suivi étape par étape pour anticiper les risques de déviation ou de non qualité et si nécessaire d'éliminer rapidement un gaz non conforme.

Attention aux coûts d'analyse et de suivi (CAPEX et OPEX)

Certaines voies de valorisation nécessitent un **chromatographe** en poste fixe pour vérifier la qualité du flux de CO₂ après traitement, en continu et de façon très précise dont le **dispositif est extrêmement coûteux (CAPEX, OPEX)** et limite très fortement la rentabilité des petites et moyennes installations de purification. C'est le cas notamment du référentiel EIGA.

II.4.2. Besoins en prétraitement en sortie d'épuration du biogaz

En fonction des modalités d'épuration du biogaz, un prétraitement plus ou moins poussé du flux de CO₂ biogénique brut peut être nécessaire :

- H₂S : en fonction des caractéristiques du prétraitement du biogaz avant épuration et de la technologie de purification du CO₂, un traitement poussé de l'H₂S peut être nécessaire en amont.

C'est le cas des procédés de Cryo distillation par exemple, qui intègrent en amont un traitement spécifique au charbon actif.

- H₂O : une déshydratation pour éliminer l'eau est obligatoire dans le cas d'une épuration de CO₂ par PSA ou par distillation cryogénique. Elle n'est pas nécessaire dans le cas d'épuration de CO₂ par absorption par un solvant.
- Huile minérale : si le procédé d'épuration du biogaz fait intervenir des compresseurs à huile, des traces de cette huile peuvent se retrouver dans les événements. Or, certaines utilisations imposent leur absence dans le CO₂ et certains procédés de purification du CO₂ sont très sensibles à la présence d'huiles dans le gaz. Plusieurs solutions existent, soit en conception avec l'utilisation de compresseurs garantis « sans huile » soit par la mise en œuvre de prétraitements spécifiques. Les différentes solutions doivent être étudiées en phase de faisabilité.
- L'élimination des COV lors du prétraitement du biogaz produit un événement débarrassé de COV et facilite donc la valorisation du CO₂ en norme alimentaire.

Le porteur de projet sera particulièrement vigilant sur ses **spécifications de l'événement** lors de la conception (risques de surcoûts et/ou d'inadaptation) et sur les paramètres susceptibles de modifier ces caractéristiques lors de l'exploitation.

II.4.3. PSA (Pressure-Swing Adsorption)

II.4.3.1. Description simplifiée

La technique PSA (Pressure-Swing Adsorption en anglais) ou technique d'adsorption modulée en pression utilise des adsorbants solides (tamis moléculaires) et des différences de pression pour capturer le CO₂.

C'est une technique utilisée pour l'épuration du biogaz (voir guide [CSF Méthanisation - Épuration du biogaz et purification du CO₂ \(systemesenergetiques.org\)](https://systemesenergetiques.org)) mais aussi pour la purification de l'événement de l'épurateur lorsque l'on veut valoriser le CO₂ biogénique. Dans ce cas, il s'agit d'un équipement bien distinct de l'épurateur et spécifique au flux de CO₂.

Ce procédé comporte deux opérations réalisées en alternances :

- Adsorption (Phase A) : l'événement passe les colonnes d'adsorption à haute pression (4 à 10 bars) où le CO₂ est capté par un adsorbant (Zéolithe, charbon actif, etc).
- Régénération (Phase B) : le CO₂ capté est libéré par régénération de l'adsorbant en baissant la pression dans les colonnes de régénération. Le rejet riche en méthane peut être récupéré.

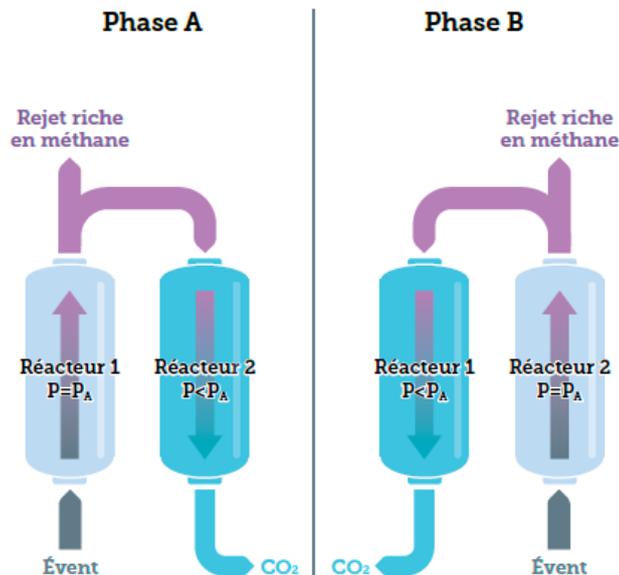


Figure 5. SCHÉMAS DE PRINCIPE DU PROCÉDÉ PSA¹¹

II.4.3.2. Avantages

- Opération réversible car l’adsorbant peut être recirculé
- Rendement d’adsorption jusqu’à 85%

II.4.3.3. Limites

- Besoins en énergie élevés pour l’étape de régénération

II.4.3.4. Spécifications et points de vigilance

Le prétraitement de l’évent sur charbons actifs en amont du procédé PSA est à adapter en fonction de la qualité de celui-ci, il permet d’éliminer les traces résiduelles de COV, H₂S, humidité et NH₃. Ce prétraitement est dimensionné par le fournisseur de technologie

	Spécification
Teneur min de CO ₂ en entrée (%)	10%
Rendement de purification	>85%
Pureté du flux de CO ₂	99.9%
État sortie de la purification	Gazeux
Consommation électrique (kWh/Kg CO ₂)	0,15 à 0,25

Tableau 4. PURIFICATION PAR PSA – DONNÉES D’ENTRÉE / SORTIE

¹¹ Source : Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation, ATEE et Club Biogaz

Plusieurs adsorbants peuvent être utilisés pour capter le CO₂ lors de ce procédé :

Adsorbants	Capacité d'adsorption (mol/kg)
Zéolithe 13X	4
Zéolithe 4A	3.6
Zéolithe 5A	4.3
Charbons actifs	1,5 à 2,5

Tableau 5. EXEMPLE D'ADSORBANTS EXISTANTS POUR LE CAPTAGE DE CO₂

Ces adsorbants classiques en charbon et zéolites ne présentent pas à la fois une forte capacité d'adsorption et une sélectivité pour le CO₂ suffisamment élevée par rapport à l'eau et à l'azote. Pour y remédier, il faut soit prétraiter le gaz par séchage et adsorption avant la purification soit utiliser d'autres types d'adsorbants comme des adsorbants enrichis aux amines ou des adsorbants hydrides formés d'oxydes métalliques liés entre eux par des composés organiques.

II.4.3.5. Équipements critiques

- Compresseurs et surpresseurs
- Système de refroidissement
- Colonnes d'adsorption et de régénération de l'adsorbant
- Pompes
- Réservoirs de stockage
- Instrumentation et système d'analyse de gaz et détection des fuites éventuelles
- Systèmes de sécurité en général

II.4.3.6. Besoins en maintenance

Il est vivement recommandé de coordonner la maintenance de cette unité avec celle de l'unité d'épuration.

- Maintenance courante : 15 à 30 minutes par jour selon les procédés, incluant la vérification des paramètres de conduite (alarmes, pressions, températures, composition du gaz en entrée et sortie).
- Vérification / recalibration de l'instrumentation et du système d'analyse de gaz
- Changement des charbons actifs du prétraitement : tous les 6 mois, 1 an ou + (dépend du dimensionnement des cuves et de la composition de l'évent)
- Maintenance annuelle : une maintenance de 24h toutes les 4 000 h (soit 2 fois/an) par le fournisseur ou une équipe agréée de 2 personnes au minimum. Une maintenance plus lourde de 2 à 3 jours selon l'installation est nécessaire toutes les 8 000 h pour intégrer une maintenance un peu plus poussée des compresseurs et surpresseurs.
- GER : maintenance majeure sur les surpresseurs et compresseurs toutes les 24 000 à 32 000h.
- Selon les cas, une provision de 10 à 25% du CAPEX initial peut être provisionnée en GER pour la durée du contrat d'injection (15ans)

NB : Le GER sur les compresseurs est variable selon les marques, certaines ne proposant pas de GER mais uniquement des maintenances ou des reconditionnements de machines, à 25 000 h ou 32 000 h ou 60 000h selon les marques.

II.4.4. Absorption par un solvant

II.4.4.1. Description simplifiée

L'absorption est une opération de séparation dans laquelle l'évent et un solvant traversent à contre-courant une colonne d'absorption. L'évent s'appauvrit en CO₂ qui est absorbé par le solvant à une certaine température. Le solvant riche en CO₂ est acheminé vers une autre colonne où il est chauffé pour libérer le CO₂. Le rejet riche en méthane peut être récupéré.

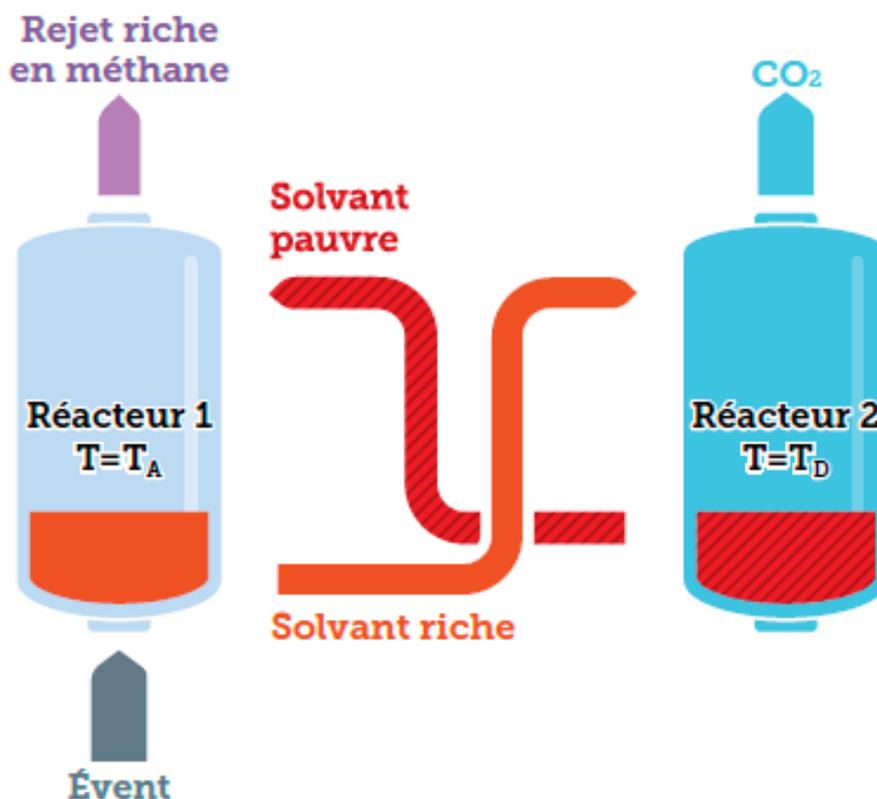


Figure 6. SCHÉMAS DE PRINCIPE D'ABSORPTION PAR SOLVANT ¹²

II.4.4.2. Avantages

- Rendement d'absorption élevé (>90%)
- Régénération possible par échauffement et/ou dépression
- Procédés le plus mature en termes de purification de CO₂

II.4.4.3. Limites

- L'efficacité de l'absorption dépend de la concentration initiale en CO₂
- Energie d'échauffement importante lors de l'étape de régénération
- Dégradation potentiel du solvant : pertes de solvant, corrosion des équipements, génération de matières volatiles.

¹² Source : Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation, ATEE et Club Biogaz

II.4.4.4. Spécifications et points de vigilance

	Spécification
Teneur min de CO ₂ en entrée (%)	NC
Rendement de purification	>90%
Pureté de CO ₂	À définir
État sortie de la purification	Gazeux
Débit min (Kg/h)	180
Débit max (T/h)	1.8
Consommation électrique (kWh/Kg CO ₂)	À définir
Consommation thermique (kWth/kg CO ₂)	À définir

Tableau 6. PURIFICATION PAR ADSORPTION – DONNÉES D'ENTRÉE / SORTIE

Les solvants les plus souvent utilisés sont à base d'amines (monoéthanolamine (MEA) et diéthanolamine (DEA)) et le carbonate de potassium.

II.4.4.5. Équipements critiques

- Compresseurs et surpresseurs
- Système de refroidissement
- Colonnes de lavage (en inox : guetter d'éventuels signes de piquage ; toutes : matériaux de garnissage, équipements internes et robinetterie)
- Pompe à eau
- Tour de dégazage
- Réservoirs de stockage
- Container (climatisation de la salle électrique, intégrité globale)
- Instrumentation et système d'analyse de gaz
- Fuites de gaz (Capteurs / campagnes de détection)
- Systèmes de sécurité en général

II.4.4.6. Besoins en maintenance

Il est vivement recommandé de coordonner la maintenance de cette unité avec celle de l'unité d'épuration.

- Maintenance courante : 15 à 30 minutes par jour selon les procédés, incluant la vérification des paramètres de conduite (alarmes, pressions, températures, composition du gaz en entrées et sortie).
- Vérification / recalibration de l'instrumentation et du système d'analyse de gaz
- Maintenance annuelle : maintenance de 1 à 3 jours selon l'installation toutes les 8 000 h, en intégrant les compresseurs pour les maintenances les plus longues.
- GER : maintenance majeure sur les compresseurs toutes les 24 000 à 32 000h.
- Selon les cas, une provision de 10 à 25% du CAPEX initial peut être provisionné en GER pour la durée du contrat d'injection (15ans)

NB : Le GER sur les compresseurs est variable selon les marques, certaines ne proposant pas de GER mais uniquement des maintenances ou des reconditionnements de machines, à 25 000 h ou 32 000 h ou 60 000h selon les marques.

II.4.5. Distillation cryogénique (Cryo distillation)

II.4.5.1. Description simplifiée

La distillation cryogénique est la technique d'épuration de CO₂ la plus répandue en Europe. Ce procédé de séparation est basé sur la différence de température d'ébullition des différents composés. Le dioxyde de carbone s'évapore à plus haute température que le méthane et les autres composés de l'évent. Le CO₂ est donc récupéré en bas de la colonne de distillation sous forme liquide. Le reste de l'évent est récupérée en haut de la colonne sous forme gazeuse (dont le CH₄ résiduel).

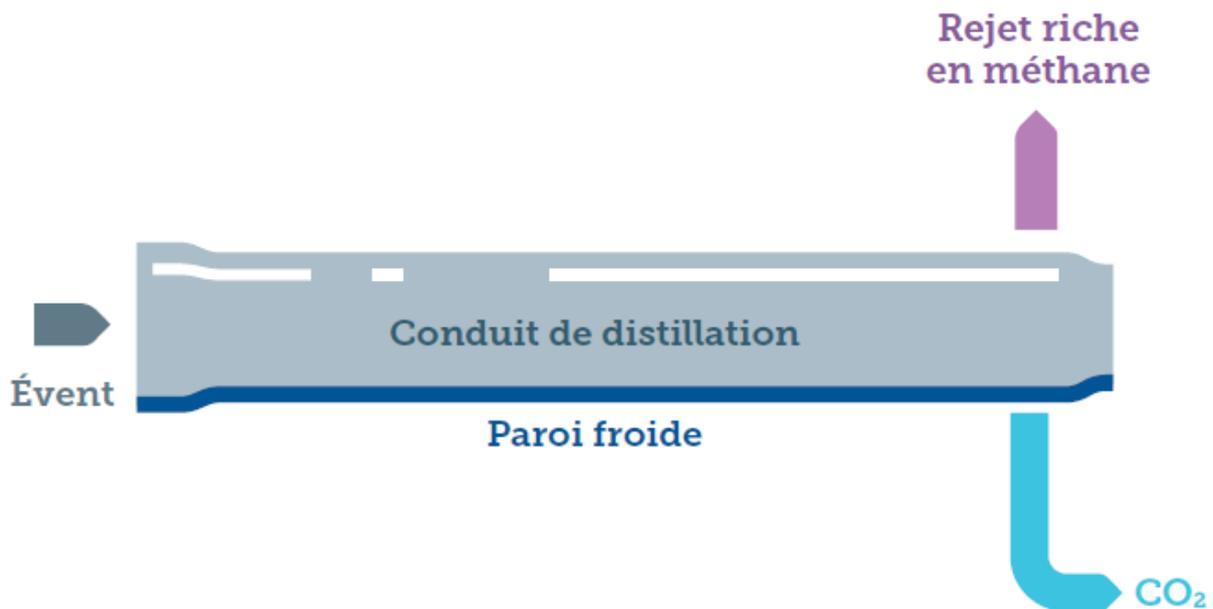


Figure 7. SCHÉMAS DE PRINCIPE DU PROCÉDÉS DE DISTILLATION CRYOGÉNIQUE¹³

L'ensemble du dispositif est sous pression car les températures d'ébullition sont négatives (entre -50 et -10 °C). Le flux gazeux est refroidi et comprimé avant la rentrée dans la colonne de distillation.

Les composés non condensables sont évacués par évent contenant entre autres O₂, N₂ et du CH₄ (5 à 20% en volume selon la concentration en entrée), que l'on pourra récupérer et réinjecter dans le ciel gazeux des digesteurs / post- digesteurs ou en entrée d'unité d'épuration, sous réserve d'adaptation aux conditions de pression et de température (entre autres).

II.4.5.2. Avantages

- Récupération de CO₂ sous forme liquide, nécessaire en cas de transport et de stockage
- La qualité de CO₂ purifié est quasiment toujours de qualité alimentaire quel que soit le procédé d'épuration du biogaz

II.4.5.3. Limites

- Procédés très consommateur d'énergie
- Opération à très basse température
- Si stockage de CO₂ sous forme liquide, il faut calorifuger les réservoirs de stockage.
- Procédé énergivore si stockage à long durée de CO₂

¹³ Source : Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation, ATEE et Club Biogaz

II.4.5.4. Spécifications et points de vigilance

	Liquéfaction cryogénique
Teneur min de CO₂ en entrée (%)	5%-99%
Rendement de purification	Selon fournisseurs
Pureté de CO₂	99.9%
État sortie de la purification	Liquide
Débit min (Kg/h)	50
Débit max (T/h)	5
Consommation électrique (kWh/Kg CO₂)	0,15 à 0,25

Tableau 7. SPÉCIFICATION LIQUÉFACTION CRYOGÉNIQUE

II.4.5.5. Équipements critiques

Les principaux équipements du procédé de la distillation cryogénique sont regroupés en fonction de l'étape de traitement :

- Compresseurs
- Séparateurs condenseurs
- Sécheurs
- Colonnes d'adsorption par charbon actif (polishing)
- Systèmes de réfrigération
- Rebouilleurs de CO₂
- Colonnes de distillation
- Condenseurs de CO₂

II.4.5.6. Besoins en maintenance

À préciser par les fournisseurs.

II.4.6. Réaction avec des carbonates

II.4.6.1. Description simplifiée

Le CO₂ réagit avec du carbonate de sodium pour produire du bicarbonate de sodium. Les applications de l'utilisation du bicarbonate sont l'environnement, la cosmétique, l'agroalimentaire ; il peut aussi être utilisé comme apport de carbone pour la croissance de la spiruline.

Ainsi, le procédé VALECarb d'ALCION Environnement (SEDE-VEOLIA) permet de produire 3700 kg de NaHCO₃ ou 4500 kg de KHCO₃ à partir de 1000 kg de CO₂.

II.4.6.2. Avantages

- Simplicité du principe et de la mise en œuvre.
- Faible encombrement de l'équipement.
- Modularité aisée de la production (Bicarbonate de Sodium ou de Potassium).
- Rendement élevé.

II.4.6.3. Limites

- Pas possible de récupérer le CO₂ pur pour d'autres utilisation que la production de bicarbonate de sodium ou bicarbonate de potassium.
- Pas possible de récupérer le méthane des événements

II.4.6.4. Spécifications, équipements principaux et points de vigilance

À étudier avec le(s) fournisseurs.

II.4.7. Récupération de biométhane supplémentaire

Le flux rejeté par la purification de CO₂ concentre le méthane éliminé :

- Plus la concentration initiale est faible dans l'événement d'épuration du biogaz, plus elle est faible dans le rejet de l'unité d'épuration (et inversement) : pour un événement d'épuration contenant 0,5% de CH₄, le rejet aura une concentration de 5 à 10% de CH₄ ; pour un événement d'épuration contenant 3 à 4% de CH₄, le rejet aura une concentration de 20 à 25% de CH₄ et les flux de recirculation seront plus importants.
- Plus la concentration initiale est élevée dans l'événement, plus l'installation de purification sera coûteuse en investissements et coûts de fonctionnement.

Selon sa qualité et le montage du projet, ce flux peut être réinjecté en tête d'épurateur mais il est généralement préférable, pour des questions de simplicité, de sécurité et de responsabilité, que ce flux soit rejeté dans le ciel gazeux des digesteurs ou post-digesteurs, où il sera dilué.

Si le fournisseur est le même pour l'épuration du biogaz et pour la purification du CO₂ et les travaux concomitants, la réinjection du rejet de la purification du CO₂ peut être plus facilement envisagée.

En revanche, la recirculation doit prendre en compte les quantités d'O₂ et N₂ afin d'éviter la saturation du biogaz en ces éléments (déconcentration).

Pour plus de précisions, se reporter au chapitre « Spécifications techniques aux interfaces ».

III. Contenu général des appels d'offres (DCE)

ATTENTION : ce chapitre est applicable à la consultation de fournisseurs de solutions de purification, de liquéfaction, de compression ou de méthanation « déportée » (en réacteur séparé) du CO₂ de méthanisation récupéré en sortie d'épurateur de biogaz.

Dans le cas d'un processus de méthanation biologique In Situ (dans le digesteur), le DCE devra être adapté pour correspondre au process et aux limites de fournitures.

En marchés publics, le Dossier de Consultation des Entreprises (« DCE ») est organisé autour de 3 documents qui sont mis à jour lors de la commande, sur la base des discussions avec l'entreprise retenue, à savoir le Cahier des Clauses Administratives Générales (ou **CCAG**, applicables à tous les fournisseurs du projet), le Cahier des Clauses Administratives Particulières (ou **CCAP**, applicables à ce lot en particulier) et le Cahier des Clauses Techniques Particulières (ou **CCTP**) qui regroupe tous les éléments techniques du projet, pour le lot concerné.

Pour un marché privé, le DCE peut être simplifié avec par exemple un « Cahier des Charges » unique, qui sera mis à jour à la commande en tant que « Contrat » ou encore 2 documents séparés (Cahier des Clauses Techniques + Cahier des Clauses Administratives), également mis à jour à la commande. Dans tous les cas, les documents de consultation puis de commande doivent contenir :

- Une description du projet avec des plans (notamment plans d'implantation), les éléments dimensionnants ainsi que les contraintes du projet et du lot
- Un minimum de spécifications techniques avec les options et limites de fournitures attendues
- Un planning prévisionnel
- Les conditions administratives et contractuelles prévues, incluant : les responsabilités et les obligations des 2 parties, les garanties, les assurances, les termes de paiement et leur validation, les pénalités, les conditions de résiliation pour les 2 parties et les modalités de règlement des litiges.
- Les conditions d'essais de réception et des essais de performances des équipements.

Se référer au « Guide sur les bonnes pratiques contractuelles pour réussir votre projet de méthanisation », publié par l'ATEE et mis à jour en 2022¹⁴.

III.1. Conditions administratives et contractuelles

Les conditions administratives et contractuelles prévues doivent être clairement exposées, comprenant notamment la **participation aux réunions de chantier**, les **conditions et termes de paiement**, les **procédures de gestion du contrat**, les **garanties** (disponibilité des installations, tenue des équipements et performances) et **assurances obligatoires**.

Les prix doivent être forfaitaires mais peuvent inclure des options et des indications de prix unitaires pour anticiper d'éventuels travaux imprévus.

¹⁴ [La boutique ATEE | ATEE](#)

Le « **Guide sur les bonnes pratiques contractuelles pour réussir votre projet de méthanisation** » (ATEE) permet aux porteurs de projet de prendre en compte les bonnes pratiques contractuelles lors de la conception et la réalisation d'une unité de méthanisation.

Il définit les différents montages juridiques (Allotissement, clés en main, etc), et présente les relations entre les différents intervenants du projet (Maître d'ouvrage, Maître d'œuvre, sous-traitant, assistant à maîtrise d'ouvrage).

Ce guide traite aussi les points de vigilance lors de l'exécution du contrat et les différents types d'assurance.

III.2. Planning du projet

Le planning du projet présenté au DCE, a minima sous forme de texte et si possible sous forme graphique, comprend a minima les dates clefs pour le lot consulté :

- Date de remise des offres,
- Période d'auditions et de mise au point,
- Date prévisionnelle de commande,
- Date de début des travaux,
- Constat d'Achèvement des Travaux (CAT) du projet global,
- Période d'essais du lot consulté,
- Dates prévisionnelles de réception (provisoire et définitive).

III.3. Rappel du contexte réglementaire

Un rappel du contexte réglementaire du projet et ses spécificités est généralement inclus dans le DCE : respect de la réglementation française et européenne, respect de la réglementation des installations de méthanisation, respect des conditions spécifiques du projet (dossier ICPE).

S'il n'est pas recommandé de se lancer dans un inventaire de la réglementation car celle-ci est en perpétuelle évolution et « nul n'est censé ignorer la loi », il est conseillé de mentionner les principaux textes en vérifiant qu'ils sont toujours applicables et en citant la référence de la dernière version. Par exemple (**liste non exhaustive**) :

- La réglementation française et européenne, destinée à assurer la conformité, la qualité et la sécurité de la fourniture et des travaux en général et celle spécifique à la sécurité des installations gazières en particulier, soit par exemple :
 - Le « Marquage CE » et ses normes applicables incluant la « Directive machine », la directive sur les instruments de mesure, la directive européenne de Compatibilité Électromagnétique (CEM) et les normes qui leur sont rattachées.
 - La directive européenne ATEX.
 - La directive européenne sur les Équipements sous pression (DESP) et la réglementation française concernant le transport du gaz.
 - Le Code du Travail et le Code de l'environnement français et les arrêtés et directives qui y sont attachés.
 - La réglementation sur la sous-traitance.
 - Les codes de conception-construction émis par le SNCT (Syndicat National de la Chaudronnerie, Tuyauterie et Maintenance industrielle) : CODETI, CODAP etc.

- Les normes techniques telles que les suites NF EN 12007 sur les Infrastructures gazières,
 - Les normes françaises d'application obligatoire.
 - Les normes sur la sécurité des machines.
 - Les normes sur la sécurité électrique des installations et sur la protection contre la foudre.
 - Les dispositions du dossier ICPE applicables à la fourniture, à citer et à préciser dans les spécifications – exemple : niveaux d'émergence de bruit, rejets atmosphériques.
 - Tout référentiel destiné à assurer la performance des installations et la protection des personnes et de l'environnement tels que la directive IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) imposant notamment d'utiliser des « meilleures techniques disponibles » (MTD)...
 - D'une manière générale toute norme applicable (NF, EN, ANSI, ISO, DIN, IEEE, IEC) relative à la sécurité, la tuyauterie, l'électricité, l'automatisme, les équipements électromécaniques, l'instrumentation.
 - Les codes et règles de calcul selon les référentiels en vigueur (Eurocode...).
 - Les règles de l'art.

III.4. Descriptif du projet

Un document ou une partie du DCE doit présenter le projet et les éléments dimensionnants pour le lot consulté soit à minima dans le cas du biogaz, du biométhane et du bio-CO₂ :

- Les process de production du biogaz (ou « mémoire technique »)
- Les débits entrants de biogaz et sortants de biométhane
- La qualité attendue de ces flux
- Les conditions de production
- Les spécifications de suivi et de contrôles si besoin
- Diverses contraintes techniques
- Les conditions d'essais, de réception et de performances attendues des installations
- Plans d'implantation des installations

Le descriptif peut également comprendre des éléments spécifiques au site (implantation, sécurité, hauteur maximale des constructions, espaces disponibles, zones ATEX, contraintes environnementales...) si cela peut avoir un impact sur la conception, voire des plans si le projet est suffisamment avancé.

III.5. Fournitures, travaux et prestations

Des précisions sur les éléments à fournir sont nécessaires pour éviter les malentendus :

- Équipements et leurs conditions de mise en œuvre (en skid, en container, sans l'un ni l'autre selon la configuration du site),
- Tuyauterie, vannes, isolées ou non, tracées ou non,
- Instrumentation, automatisme et électricité – avec précision des conditions de fourniture, pose et raccordement des armoires et réseaux correspondants.
- Conditions de disponibilité des consommables (eau, électricité) en phase chantier et sur le site (localisation, caractéristiques) et demande de précision des besoins du fournisseur
- Études et documentation requis (voir ci-après)

- Moyens de levage pour le déchargement et le montage : à prévoir ou disponibles sur site
- Les demandes particulières éventuelles en termes de formation
- Éléments de sécurité requis en phase chantier et en phase exploitation : zonage et équipements ATEX, protection incendie et gaz, protection des personnes, habilitations...

La phase de consultation est l'occasion pour le porteur de projet d'identifier **les interfaces avec les autres lots** (lot process méthanisation et poste d'injection, incluant les usages du biométhane non injecté – voir chapitre suivant) et les besoins complémentaires en termes de travaux et fourniture

Pour faciliter l'analyse des offres et permettre de comprendre l'impact potentiel que chaque proposition sur le reste du projet, un minimum de documents ou d'éléments sont à fournir par les candidats dès le stade de l'offre. Une liste « standard » de documents à fournir par le candidat aux différentes étapes du projet est proposée, pour exemple, en annexe.

En outre, une clarification des « **limites de fournitures** » et des éléments pris en charge par d'autres lots ou par le porteur de projet lui-même est impérative, au plus tard lors du comparatif des offres, afin que les responsabilités et les budgets soient sécurisés.

Il est vivement conseillé de préciser, en clair dans le DCE, que tous les documents doivent être rédigés en français pour éviter des erreurs d'interprétation.

III.6. Spécifications techniques

Le dossier de consultation doit contenir un minimum de spécifications techniques, y compris pour les options et les limites de fournitures attendues. Ces spécifications doivent tenir compte :

- Des contraintes du projet
- De la réglementation et des impositions du dossier ICPE
- Des textes de références d'application non obligatoires mais que le porteur de projet veut voir appliquées à son projet (ex : documentation INERIS, INRS, ATEE (guides techniques, label QUALIMETHA), ADEME – voir liste proposée en annexe ...)

Note sur les spécifications techniques :

On constate parfois une surenchère dans les référentiels et préconisations techniques, voire un surdimensionnement de certains équipements et instruments, ce qui peut entraîner des surcoûts importants des projets et même devenir contreproductif. C'est le cas par exemple des débits aux soupapes, ce qui provoque fuites et problèmes longs à identifier en utilisation.

La juste solution passe par un dialogue éclairé et constructif, même si le constructeur / fournisseur reste en dernier lieu responsable de sa conception et de ses performances.

III.6.1. Définition des valeurs « minimale, nominale et maximale »

Les spécifications de conception de tout procédé ou équipement doivent indiquer 3 valeurs pour chaque paramètre : minimale, nominale (design) et maximale. Si l'ensemble de ces valeurs doit être pris en compte par les entreprises pour bâtir leurs propositions, **la valeur nominale constitue la cible d'optimisation** pour la conception de l'installation.

La définition de ces valeurs est importante pour éviter qu'elle soit source d'incompréhension entre porteurs de projets et entreprises, notamment au moment de vérifier les performances d'un équipement ou d'une installation :

- **Valeur minimale** : valeur la plus basse envisageable dans des conditions normales.
- **Valeur nominale** : valeur de fonctionnement pour laquelle l'installation est optimisée (exemple, débit d'injection contractuel).
- **Valeur maximale** : valeur la plus élevée envisageable dans des conditions normales.
- **Valeur de pointe** : valeur maximale envisageable sur quelques heures seulement (durée à préciser).
- **Valeur design** : valeurs de conception de l'installation. En l'absence de précisions, les valeurs design sont les valeurs les plus contraignantes (min ou max).
- **Valeur garantie**

Pour les valeurs minimales et maximales, on évite d'intégrer les cas vraiment extrêmes ou purement hypothétiques, qui ne risquent de se produire que de temps en temps dans la vie de l'installation ou d'une durée extrêmement limitée.

De même, imposer des plages de fonctionnement très larges n'est pas forcément synonyme de sécurité pour le porteur de projet mais peut être source de risques et de surcoûts.

Par contre, on prend en compte des événements objectivement possibles, récurrents ou susceptibles d'influencer de façon significative la production de biogaz.

Par exemple, les effets de changements de rations ou de débits en fonction de la saisonnalité des intrants ou des capacités d'accueil des réseaux sont des paramètres connus et mesurables. Des marges de + 15 / 20 % au-delà des concentrations maximales peuvent être considérées pour tenir compte du rattrapage de production ou des augmentations de capacité.

III.6.2. Spécifications liées au dossier ICPE

L'installation d'épuration doit respecter les dispositions du dossier ICPE. Celles-ci doivent être clairement exposées afin que l'Entreprise adapte sa conception si nécessaire. Ces dispositions peuvent concerner par exemple :

- Les niveaux de bruit : les niveaux à respecter font partie des garanties à apporter par le fournisseur de l'unité d'épuration. Il a de ce point de vue une **obligation de résultat** et pourra décider d'une insonorisation supplémentaire peut être nécessaire.
- Rejets atmosphériques
- Rejets et consommations d'eau
- Puissance électrique installée
- Règles de sécurité du site et études de dangers
- Odeurs

III.6.3. Récupération de chaleur

La récupération de chaleur fatale peut constituer un élément important dans les choix de conception en fonction des besoins de chaleur sur le site (chauffage digesteurs, hygiénisation, chauffage d'intrants spécifiques, séchage digestat...) en permettant de limiter l'autoconsommation de biogaz ou d'autres énergies.

De tels systèmes de récupération représentent un investissement supplémentaire mais entraînent des économies en exploitation, à étudier sous forme d'option détaillée avec les fournisseurs, en intégrant les régimes de température dans les calculs de rentabilité.

Dans le cadre de la purification du CO₂, la récupération de chaleur peut être envisagée sur :

- Les systèmes de compression des gaz
- Les systèmes de refroidissement des gaz

Il est donc conseillé aux porteurs de projets d'intégrer dans leur cahier des charges une demande d'option sur ce poste, avec les éléments suivants à renseigner par les entreprises – en plus du « Contenu attendu des offres » ci-après, à renseigner également pour toute option :

- Puissance thermique récupérable en fonction des régimes de température
- CAPEX supplémentaires (Option)
- OPEX supplémentaires (électricité, consommables, entretien et GER)
- Gains estimés

III.6.4. Spécifications techniques aux interfaces

L'installation d'une unité de récupération et d'épuration de CO₂ à partir de l'évent génère plusieurs interfaces techniques importantes :

- Le raccordement du process au point de rejet de l'évent du process d'épuration de biogaz
- Le retour du gaz enrichi en CH₄ pour valorisation le cas échéant (vers méthanisation ou épuration)
- Le raccordement sur le réseau d'eau chaude en cas d'option de récupération de chaleur.

Dans les trois cas, les spécifications techniques dépendent pour partie du choix de la technologie et du constructeur de l'épuration qui a ses propres contraintes et du choix de la technologie de valorisation – dont la liquéfaction éventuelle (étude de marché).

Il est donc difficile de définir un standard mais plusieurs cas « type » sont possibles :

1. L'épuration du biogaz et la valorisation du CO₂ sont fournies par le même constructeur : ces interfaces seront comprises dans sa fourniture et il en assumera la responsabilité.
2. L'unité d'épuration du biogaz est déjà définie, voire en fonctionnement : on prendra alors les spécifications préconisées par son fournisseur. Dans le cas d'une unité en exploitation, il est de plus conseillé de procéder préalablement à des analyses représentatives de l'évent afin de les porter au cahier des charges, pour une meilleure adaptation de la solution.
3. L'épuration du biogaz et la liquéfaction du CO₂ sont mises en appel d'offre simultanément : il sera demandé aux candidats de préciser leur mode de raccordement préférentiel à l'autre unité ; l'entité en charge de la coordination des interfaces (Bureau d'études, Maître d'œuvre, Maître d'ouvrage et ses assistants) aura à charge de rendre compatible ces demandes durant la phase de dialogue compétitif.

III.6.4.1. Raccordement à l'évent

Le mode de raccordement doit permettre :

- Un fonctionnement normal de l'épuration du biogaz en cas d'arrêt de la valorisation du CO₂ (retour automatique à la mise à l'atmosphère de l'évent)
- D'éviter toute surpression dans le procédé d'épuration de biogaz
- Une commande de l'alimentation en évent à partir de l'automate de la liquéfaction du CO₂

III.6.4.2. Retour du gaz enrichi en méthane

Deux solutions sont envisageables pour recycler le gaz enrichi en CH₄, issu de la valorisation du CO₂ :

1. Profiter de sa pression (en général supérieure à celle de l'épurateur de biogaz) et le recycler directement en tête d'épurateur ; cela suppose l'accord du fournisseur de l'épuration de biogaz et une régulation ad hoc pour gérer ce retour. Le point de raccordement et ses caractéristiques, les sécurités et la régulation devront être validés par les deux process
2. Détendre et retourner ce gaz dans un des gazomètres de l'unité de méthanisation. Le point de raccordement et ses caractéristiques, les sécurités et la pression restituée devront être validés par le process méthanisation.

Dans les deux cas, le recyclage de ce gaz (**hautement recommandé**), entraîne un accroissement du débit d'épuration. Ce besoin supplémentaire, lui-même dépendant de la technologie de valorisation du CO₂, devra être pris en compte dans le design de l'épurateur.

En cas de faible concentration en CH₄ dans ce gaz enrichi, l'effet de dilution du biogaz peut impacter le rendement de l'épurateur.

III.6.4.3. Récupération de chaleur

Le raccordement de la boucle d'eau de refroidissement des moteurs au réseau de chauffage de l'unité de méthanisation suppose une parfaite coordination et régulation de l'ensemble des intervenants : besoins de la méthanisation, fonctionnement de la chaudière, récupération à partir de l'épuration du biogaz, récupération à partir de la liquéfaction du CO₂.

Dans tous les cas, il est conseillé d'imposer au fournisseur de la liquéfaction un dispositif de secours (de type aéro-refroidisseur) pour assurer le refroidissement de ses appareils en cas d'impossibilité momentanée de valorisation de la chaleur.

III.6.5. Qualité et provenance des matériaux

Il est conseillé au porteur de projet de spécifier que, sauf autorisation expresse de sa part, les matériels sont neufs et la qualité des matériaux adaptés aux conditions d'utilisation, avec, si nécessaire, des garanties de tenue dans le temps acceptables par les 2 parties.

Le porteur de projet peut également, s'il le souhaite, initier des inspections chez les fournisseurs et sous-traitants afin de s'assurer de la qualité des matériels/équipements.

Mais en l'absence de normes ou de préconisations de la profession, il est préférable de convenir d'objectifs de résultats (performances, durabilité, HSE, RSE), plutôt que d'imposer des matériaux ou des « certificats d'origine ».

III.6.6. Paramètres de suivi et indicateurs de performances

Les paramètres de suivi et indicateurs de performances doivent être :

- **Simple, clair et précis** afin d'être compris et acceptés par les différents acteurs (formule de calcul + définition des termes + périmètres concernés).
- **Facilement mesurables** notamment pour vérifier / attester que les unités atteignent les performances garanties par les constructeurs (aspects contractuels), tant à la mise en service (tests de performances et réception) qu'en cours d'exploitation (bilans annuels, respect des engagements contractuels sur la consommation électrique, notoriété du constructeur / fournisseur...).

L'installation de liquéfaction de CO₂ doit être équipée d'un minimum de métrologie pour être exploitée efficacement et suivre ses performances :

- Débitmètre sur l'évent et sur le gaz enrichi recyclé
- Analyseur de biogaz sur l'évent et sur le gaz enrichi recyclé

Le cahier des charges doit en outre prévoir la stratégie de contrôle qualité du CO₂ commercialisé, elle-même déterminée par les conditions et engagements contractuels que le porteur de projet aura pris vis-à-vis de son client final. Ceci détermine la nature, les méthodes et fréquences d'analyses.

Toute ou partie des paramètres de qualité peuvent être déterminés par :

- Un analyseur en ligne
- Des analyses en laboratoire, ce qui suppose de définir des points de prélèvement.

NB : Dès qu'un flux est obtenu par calcul, le bilan est obligatoirement bon et surtout des dérives peuvent être masquées, ce qui peut entraîner des pannes et arrêts « inexplicables ».

En revanche, il faut être conscient que le suivi en continu de trop de paramètres est très coûteux en termes d'investissement (instrumentation, câblage, programmation) mais aussi en exploitation car l'instrumentation doit être vérifiée régulièrement, recalibrée ou remplacée si nécessaire. En outre, la multiplication de l'instrumentation peut procurer un sentiment erroné de sécurité et en réalité augmente la complexité du projet.

III.7. Conditions d'essais et réception

Note sur la réception des installations

Cette phase est souvent source de conflits, de perte de temps et parfois de pertes financières pour les différents acteurs. Pour éviter de telles déconvenues, ce sujet doit être abordé lors de la phase de consultation et finalisé avant la signature du contrat.

En particulier, doivent être clairement établis :

- Les termes employés
- Les étapes et le calendrier détaillé
- Les conditions nécessaires à la réalisation des différents tests
- Les modalités de vérification des performances et de réception

Les mesures de performances peuvent être les mêmes quelle que soit la technologie, mais elles doivent être **faciles à mettre en œuvre et à valider** par toutes les parties en présence. Dans le cas contraire, cette phase risque d'être très compliquée, voire de ne pas aboutir, ce qui serait dommageable pour toutes les parties impliquées.

III.7.1.1. Phases et calendrier de réception

Il est recommandé de définir précisément les étapes de validation et de réception, et d'établir qui valide et comment se déroulent les différentes opérations.

Les définitions et étapes sont très bien décrites dans le guide publié par l'ATEE¹⁵.

Classiquement on constate de façon « contradictoire », avec au moins 1 représentant du maître d'ouvrage et 1 représentant de l'entreprise :

- Les livraisons (bons de livraison)
- La fin de montage (Procès Verbaux/constats de fin de montage, comptes-rendus de chantier)
- La fin des travaux (Constat d'Achèvement des Travaux), étape impérative avant l'autorisation de démarrage des essais

¹⁵ « Guide sur les bonnes pratiques contractuelles pour réussir votre projet de méthanisation », publié par l'ATEE

- La mise en service industrielle, incluant la montée en charge, la marche probatoire et les tests de performance ainsi que la formation du personnel d'exploitation – qui doit absolument être présent pendant – et si possible un peu avant – le démarrage en charge.
- La réception des installations, après les tests de performances, qui marque la prise de responsabilité pleine et entière des installations par le maître d'ouvrage

En plus de ces phases, des étapes intermédiaires peuvent être envisagées pour faciliter les essais à vide (tests électriques) ou encore permettre de réceptionner certaines parties de l'installation.

*La durée minimale recommandée pour la vérification des performances d'une unité d'épuration du biogaz est de **1 semaine en fonctionnement automatique, en continu (24h/24), sans arrêt imputable à l'installation elle-même.***

En cas d'interruption de cette période pour des raisons extérieures, les deux parties peuvent convenir de valider les essais (durée plancher à convenir avant) ou de les reporter (conditions de report à prévoir avant).

III.7.1.2. Modalités de mise en œuvre des essais

Les modalités de mise en œuvre des essais doivent être décrits dans un document agréé par les différentes parties et comprenant :

- Une description des conditions initiales (*exemple : débit de biogaz entrant minimal, qualité conforme au cahier des charges, marche probatoire concluante...*)
- Une définition de la durée (*exemple : Pour établir les bilans matières et les performances d'épuration, mesure des débits de tous les flux en continu sur 7 jours – ou autre moyen d'obtention des débits + analyses complètes sur chaque flux en continu – ou x fois par jour – sur la même période...*)
- Une définition des paramètres mesurés, des moyens de mesure (avec précision et marge d'erreur) et des personnes responsables de ces mesures tant au niveau financier que pour la réalisation. *De préférence, il sera choisi des méthodes homologuées ou recommandées par la profession plutôt que des solutions « maison » sans référentiel.*
- Les formules de calcul – les plus simple possibles, illustrées par des exemples moyens et extrêmes
- Une grille d'analyse simple pour faciliter la validation ou non des tests, ou leur report, en prévoyant les cas où les tests ont dû être interrompus ou n'ont pas pu être validés pour des raisons extérieures à celles du lot épuration (*exemple : conditions climatiques très particulières, indisponibilité du poste d'injection, manque de production de biogaz, biogaz non conforme en entrée, crise sanitaire...*)

III.7.1.3. Résultats mesurés

Les types et points de mesure sont précisés dans le chapitre précédent « Paramètres de suivi et indicateurs de performances ».

Les points de mesure et résultats doivent être cohérents avec les performances demandées. Demander des garanties que l'on ne peut pas vérifier est inutile.

III.7.1.4. Conditions de réception, de pénalités ou de rebut

Les conditions de réception, de pénalité ou de rebut doivent être clairement établies bien avant la signature des contrats (voir recommandations du guide publié par l'ATEE).

IV. Contenu attendu des offres

En réponse au dossier de consultation, l'Entreprise consultée élabore un dossier de réponse qui comprend une partie technique, une partie administrative et une partie financière. Une telle offre de fourniture d'une solution technique « clef en mains » ne doit pas être une simple liste d'équipements.

L'objectif du lot « épuration du biogaz » est de produire du biométhane conforme aux spécifications d'injection à partir du biogaz produit par l'unité de méthanisation, dans les conditions définies pour le projet.

En base, toute offre d'épuration du biogaz est une fourniture « clef en mains » comprenant la conception et la fourniture de tous les éléments nécessaires pour atteindre les objectifs, travaux et mise en service compris.

À ce titre, **l'entreprise retenue réalise toutes les études d'exécution** qui lui seront nécessaires pour concevoir et fournir une installation qui fonctionne comme prévu au cahier des charges et qui respecte la réglementation en vigueur. Elle réalise également les **études aux interfaces** avec les autres lots (plans guides, spécifications...).

Classiquement, l'offre d'épuration comprend :

- Une **description du process**.
- Une **liste des équipements et instruments**.
- Une **liste des consommables et pièces de rechange**.
- **Les moyens d'accès et outillage spécial**
- Les **limites de prestations et fournitures** ainsi que les **spécifications aux interfaces**.
- **Les options possibles / déconseillées**.
- **Les études et DOE (voir chapitre IV.3.), mise en service et tests de performances**.
- **La formation** de l'exploitant
- **La livraison, le montage et les travaux sur site**.
- **Garanties** : voir chapitre suivant.
- **Prix total** de l'installation tout compris et détail des options proposées.
- **Les coûts d'exploitation** : énergie, consommables, pièces de rechange et GER et estimation des temps ou coûts de maintenance, **sur 15 ans* a minima** (souvent sous-estimé).
- Un **contrat de maintenance** peut être demandé / 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...

* **ATTENTION** : la présentation des coûts d'exploitation sur 2 ou 5 ans ne permet pas d'appréhender les coûts réels de l'installation sur sa durée de vie, certains équipements nécessitant des entretiens majeurs et des remplacements d'équipements ou de pièces majeurs à 5, 7 ou 10 ans.

IV.1. Description du process

Le fournisseur décrit son procédé au moyen de schémas (schémas des flux type PFD, éventuellement PIDs simplifiés s'il le souhaite ou schémas blocs et bilans matières), et de textes décrivant les différentes étapes

du processus, le parcours et les caractéristiques des gaz (bilan massique et énergétique) en entrée et aux sorties (inclus l'évent) ainsi qu'un résumé des modalités d'exploitation et de maintenance normales afin que le porteur de projet puisse se faire une meilleure idée de son installation et des tâches qu'il aura à accomplir.

IV.2. Fournitures et prestations incluses

- Une **liste des équipements et instruments** qui seront fournis a minima, le fournisseur étant libre de rajouter des éléments ultérieurement pour assurer le bon fonctionnement, les performances et la sécurité de l'installation et des opérateurs. Les spécifications techniques sont indiquées (débit, pression, capacités diverses, puissance installée, temps de fonctionnement par an...).
- La **liste des consommables et pièces de rechange nécessaires au démarrage**, avec les quantitatifs, les caractéristiques, les marques recommandées et les prix indicatifs.
- Une **liste des consommables et pièces de rechange** sur une durée définie (durées recommandées : 2 ans, 5 ans et 10 ans) avec les fréquences de changement prévues ainsi qu'une liste de **pièces « de première urgence »**, avec pour chaque élément les délais d'approvisionnement habituels et les prix à la date de l'offre ainsi que les budgets annuels prévisionnels.
- **Moyens d'accès et outillage spécial** : pour toute opération nécessitant une intervention quotidienne d'un opérateur ou un outillage spécial, l'entreprise doit inclure dans son offre les moyens nécessaires (accès sécurisé, lecture ou graissage déporté, outillage sur mesure...).
- **Livraison, montage et travaux sur site** : ces postes doivent être inclus dans les prestations des fournisseurs et chiffrés. Ils doivent inclure les moyens de levage, à charge pour le fournisseur de s'organiser avec les équipes qui seraient présentes sur site au même moment s'il le souhaite. Ils comprennent également la participation aux réunions de chantier.

IV.3. Études et documentation fournies

Après la signature du contrat, l'entreprise fournit au porteur de projet les spécifications et « plans guides » (implantation, descentes de charges, réservations et réseaux) pour que celui-ci puisse engager les études et travaux des lots en interface. Par défaut, les études sont incluses dans les prestations des fournisseurs.

- **Études** : elles incluent les schémas (bloc, flux, PID), les notes de calcul, les bilans matière et énergie, les plans guides et toute spécification aux interfaces nécessaires à assurer la cohésion de l'ensemble de l'installation.
- **Mise en service, formation et tests de performances** : ces postes sont inclus dans la prestation. Pour éviter les malentendus, ils doivent être décrits en détail dans des documents spécifiques : planning et manuel (descriptif) de mise en service, planning et programme de formation (avec les prérequis). Le planning et les modalités des tests de performance doivent être vus d'un commun accord et les résultats interprétables sans confusion. Il faut aussi préciser s'il faut réaliser un **test d'endurance** dans le cadre des **tests de performance**. La détermination des limites de fourniture des instruments et/ou analyses entre Maître d'œuvre et Maître d'Ouvrage pour les tests de performances est aussi indispensable.
- **Dossier des ouvrages exécutés (DOE)** : ce dossier réglementaire doit être remis à la fin des travaux, au plus tard lors de la mise en service. Essentiel à la vie de l'installation, il doit contenir entre autres les plans « Tels que construits » (TQC = plans détaillés avec les modifications réalisées sur site), les schémas électriques, les notices des équipements et la notice de fonctionnement général de l'installation (manuel opératoire, manuel d'entretien et de maintenance, procédures

de sécurité...) incluant les mesures de sécurité spécifiques pour l'exploitation et la maintenance.
Attention : cet élément est demandé par la réglementation CE mais est souvent absent des prestations.

Les prestations de chantier comprennent également les échanges avec les représentants du porteur de projet (CSPS, bureaux de contrôle, maître d'œuvre...) et avec l'exploitant lorsque nécessaire.

IV.4. Options

Si le cahier des charges comporte des postes ou des configurations inhabituelles pour le fournisseur et entraînant des risques techniques et/ou des surcoûts importants, celui-ci peut proposer des options ou déconseiller certaines configurations sous réserve d'argumenter son propos.

Ainsi, si la qualité de l'évent ou le débouché du CO₂ ne sont pas certains au moment de la consultation, on peut prévoir en option :

- Le prétraitement complémentaire de l'évent (choisir des critères et valeurs cohérentes avec le projet)
- Un stockage tampon de l'évent
- Un système de stockage en cuves dédiées au site

La fourniture de base comme les options doivent être « prêtes à l'emploi », c'est-à-dire inclure la livraison, le montage, tous les équipements et instruments nécessaires au fonctionnement ainsi que le système de pilotage, inclus le pilotage du devenir du biométhane non conforme, en coordination avec le « lot méthanisation ».

IV.5. Limites de fournitures et spécifications aux interfaces

L'unité de valorisation ou de purification du CO₂ est un « bloc process » d'une installation de méthanisation, en interface avec l'unité d'épuration mais aussi avec plusieurs autres lots du projet tels que le génie civil, l'électricité et l'automatisme et les utilités.

Dans cette optique, l'entreprise fournit au porteur de projet les spécifications et « plans guides » (implantation, descentes de charges, réservations et réseaux) pour que celui-ci puisse engager les études et travaux des lots en interface.

Les limites de fournitures et spécifications aux interfaces recommandées sont les suivantes :

Poste	Lot valorisation CO ₂	Autre lot	Spécifications interface
Dalle béton	Plans guides	Études d'exécution + travaux	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dalle fournie conforme aux spécifications de l'entreprise
Électricité interne au lot	Étude, fourniture et travaux	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fourniture et pose des armoires, câblage, équipements de sécurité du lot. ▪ Climatisation du local électrique si celui-ci est installé dans un container fourni par l'entreprise. ▪ Conformité électrique de l'installation fournie incluse.
Électricité générale	Spécifications	Études d'exécution + travaux	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alimentation courants forts et faibles fournis par le client (lot électricité générale), en attente, au niveau des armoires fournies par l'entreprise. ▪ L'entreprise effectue ses raccordements.

			<ul style="list-style-type: none"> Conformité électrique globale et Consuel à la charge du client. Climatisation du local électrique si celui-ci est fourni par le client.
Alimentation de l'unité de valorisation du CO₂	Bride de connexion + vanne d'isolement	Bride de connexion + vanne d'isolement	<ul style="list-style-type: none"> Bride de connexion avec la tuyauterie en provenance de l'unité d'épuration de biogaz (Au niveau de l'évent) : en limite de « dalle CO₂ » Vannes d'isolement en amont et en aval de la bride
Si nécessaire : Livraison du CO₂ purifié	Bride de connexion + vanne d'isolement	Bride de connexion + vanne d'isolement	<ul style="list-style-type: none"> Bride de connexion avec la tuyauterie en direction du poste de livraison ou d'une connexion camion ou d'un poste intermédiaire de contrôle : limite à définir Vannes d'isolement en amont et en aval de la bride
Si nécessaire : Retour CH₄			<ul style="list-style-type: none"> Bride de connexion avec la tuyauterie de retour vers l'épurateur de biogaz : en limite de « dalle CO₂ » Vannes d'isolement en amont et en aval de la bride
Mise à la terre	Barrette de terre et liaisons équipotentielles internes	Réseaux de terre, piquets, boucles et câbles	<ul style="list-style-type: none"> Câbles (remontés de terre) fournis par le client (lot électricité générale), en attente, au niveau des armoires fournies par l'entreprise. L'entreprise effectue ses raccordements.

Tableau 8. TABLEAU DES LIMITES DE FOURNITURES ET INTERFACES

V. Points d'attention

Les points suivants demandent une attention particulière et donc un cadrage précoce des contrats de la part des porteurs de projet et des entreprises afin d'éviter les tensions et les surcoûts :

- Qualification de l'évent** : lors de la conception, le porteur de projet vérifiera que la qualité et les débits de l'évent prévue sont cohérents avec les paramètres garantis par les fournisseurs de la solution d'épuration du biogaz. Dans le cas où une déviation serait possible pour diverses raisons, des options ou des variantes peuvent être demandées ou proposées par les parties.
- Qualification et sécurisation des flux sortants** : en amont de la consultation, le porteur de projet vérifiera que la qualité et les quantités de CO₂ à valoriser dans le cadre de son étude de marché sont inchangés et réalistes. Il est recommandé qu'il consolide ses débouchés par des contrats avant de finaliser la commande du lot process de manière à disposer de données sûres.
- Exclusions** : le porteur de projet sera particulièrement vigilant sur les mentions de prestations ou de fournitures « exclues » ou « à fournir par le client ». Pour chaque exclusion, l'entreprise doit être en mesure, soit de proposer une option chiffrée, soit d'orienter son client vers un secteur d'activité ou d'autres entreprises à même de proposer la prestation ou la fourniture nécessaire.
- Planning et jalons** : les « points d'arrêts » liés à des étapes importantes et vérifiables (fourniture de documents, livraison d'équipements, procès-verbal de fin de montage...) doivent être reportés dans un planning de façon à programmer l'ensemble des études et travaux du projet et de prévoir des vérifications et validations côté porteur de projet.
- Mise en service** : pour s'assurer que l'installation démarre dans les meilleures conditions, il est préférable que la première charge de consommables soit incluse dans la fourniture de l'entreprise, en base ou en option. Si l'Entreprise exclut cette fourniture, elle doit transmettre au client toutes les informations nécessaires pour planifier et effectuer les commandes en temps voulu : spécifications techniques (qualité, quantité), marques acceptées, délais

d'approvisionnement, coûts indicatifs. De son côté, le client doit s'assurer que les installations et le personnel nécessaires à la mise en service soit opérationnels pour la mise en service en toute sécurité.

- **Formation de l'exploitant** : l'entreprise doit assurer la formation à l'exploitation en conditions normales mais aussi au suivi et à la maintenance. Cette formation doit être aussi bien théorique que pratique, incluant des exercices de maintenance à programmer pendant la mise en service (ex : démontage d'équipements, changement de filtres...). Cette formation est basée sur un programme détaillé fourni au client au plus tard lors de la commande. De son côté, le client s'engage à mettre à disposition le personnel d'exploitation nécessaire pendant la mise en service pour que l'Entreprise puisse réaliser la formation durant cette période. Si le personnel d'exploitation n'est pas disponible pour les formations au moment prévu par l'entreprise, celle-ci peut être légitime à demander des frais supplémentaires.
- **Tests de performance** : les conditions de déroulement des tests de performance et les conditions d'acceptation ou de refus des résultats – et leurs conséquences (mise en conformité, pénalité, rebut) doivent être clairement décrites dans le contrat afin d'éviter les malentendus au moment des opérations.
- **Réception des installations** : les termes contractuels et notamment ceux liés à la réception des installations doivent être précisés dans le contrat (CCAG). Ainsi, il convient de différencier les différents procès-verbaux d'étapes (partiels), le « Constat d'Achèvement des Travaux (CAT) », général pour tout le projet (tous lots), la « réception provisoire » et la « réception définitive » de chaque lot.
- **Garanties** : selon la réglementation européenne, les **garanties mécaniques** des équipements et instruments sont de **2 ans**. Les autres garanties à vérifier sont : la **garantie de disponibilité** de l'installation (**365j x 24h – arrêts pour maintenance préventive et sous réserve d'un contrat de maintenance**) et les **garanties de performances**.
- **Facturation et paiement** : si certains termes de paiement sont prévus en lien avec des étapes prévues par l'Entreprise (exemple : livraison d'équipements), ces jalons doivent être indiqués sur le planning. En temps voulu, les étapes doivent être validées par de la documentation (Procès-verbal, bordereau de livraison...). Pour éviter les tensions, les procédures et conditions de paiement doivent être clairement décrites dans le contrat (CCAG / CCAP).

VI. Annexes

Annexe 1. Liste de documents de référence

- ATEE : « Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation » Mai 2020 ([Guide technique Valorisation du CO₂ de méthanisation | ATEE](#))
- Utilisations du CO₂ industriel par L'air Liquide : [CO₂ industriel | myGAS Air Liquide](#)
- « An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies », Leung 2014
- <https://www.sede.veolia.com/fr/savoir-plus/propos/circular-economy/captation-du-co2-fermentations-viticoles>
- ATEE : « Guide sur les bonnes pratiques contractuelles pour réussir votre projet de méthanisation », publié par l'ATEE en 2020 et mis à jour en 2022, dirigé par Marie Verney - [La boutique ATEE | ATEE](#).
- Référentiel Qualimétha® (<https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/label-qualimetha>)

Annexe 2. Norme européenne EU 231/2012 – Additifs alimentaires

E 290 DIOXYDE DE CARBONE

Synonymes	Gaz de l'acide carbonique, neige carbonique, glace sèche (forme solide), anhydride carbonique
Définition	
EINECS	204-696-9
Nom chimique	Dioxyde de carbone
Formule chimique	CO ₂
Poids moléculaire	44,01
Composition	Pas moins de 99 % volume/volume sur la base de la forme gazeuse
Description	Gaz incolore dans des conditions environnementales normales ayant une odeur légèrement piquante. Le dioxyde de carbone commercial est transporté et manipulé sous la forme d'un liquide dans des cylindres pressurisés ou des systèmes de stockage en vrac, ou en blocs solides comprimés de «glace sèche». Les formes solides (glace sèche) contiennent généralement des agents de liaison comme le propylène glycol ou de l'huile minérale.
Identification	
Formation de précipité	Lorsqu'un filet de l'échantillon est passé dans une solution d'hydroxyde de baryum, il se produit un précipité blanc qui se dissout avec effervescence dans de l'acide acétique dilué.
Pureté	
Acidité	Le barbotage de 915 ml de gaz à travers 50 ml d'eau fraîchement portée à ébullition ne doit pas conférer à celle-ci une acidité vis-à-vis du méthylorange supérieure à celle de 50 ml d'eau fraîchement portée à ébullition additionnés de 1 ml d'acide chlorhydrique (0,01 N).

2012R0231 — FR — 15.05.2015 — 012.001 — 84

▼B

Substances réductrices, phosphore et sulfure d'hydrogène	Le barbotage de 915 ml de gaz à travers 25 ml de réactif au nitrate d'argent ammoniacal additionnés de 3 ml d'ammoniaque ne doit provoquer ni trouble ni noircissement de cette solution.
Monoxyde de carbone	Pas plus de 10 µl/l
Teneur en huile	Pas plus de 5 mg/kg

Annexe 3. Référentiel EIGA

Le référentiel EIGA comporte 2 textes :

1. Un texte général définissant les spécifications de tous les gaz approuvés pour être utilisés comme additifs alimentaires ou autres applications alimentaires : « MINIMUM SPECIFICATIONS FOR FOOD GAS APPLICATIONS ». [Doc 126/20](#).
2. Le référentiel complet des exigences de spécification pour le dioxyde de carbone liquide pour une utilisation dans les aliments et boissons : « CARBON DIOXIDE FOOD AND BEVERAGES GRADE, SOURCE QUALIFICATION, QUALITY STANDARDS AND VERIFICATION ». EIGA [Doc 70/17](#). Ce document inclut notamment des indications concernant le biogaz issu de méthanisation (chapitre 5.1.3.2)

Attention, il est vivement recommandé de rechercher les mises à jour de ces textes avant et pendant le projet (si applicable).

Annexe 4. Fiche CO₂ Industriel – L'air Liquide[\(CO2 industriel | myGAS Air Liquide\)](#)

DESCRIPTION	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	SECURITE & TRANSPORT	DOCUMENTS
Pression			NS
Type et taille d'emballage			L50 TP
Capacité			34 KG
Poids moléculaire			44.01 g/mol
Densité relative (gaz)			1,52 (air=1)
Raccord du robinet		AFNOR C (21,7 x 1,814 SI - à droite mâle) Raccord cadre : 38x2 Raccord sphère : 3/4 G	
N° CAS			124-38-9
Composants			CO ₂ ≥ 99,7 %
Impuretés (ppm v/v)			H ₂ O (5 bar) ≤ 200
Odeur			inodore
Couleur			incolore

Annexe 5. Fiche CO₂ alimentaire – L'air liquide[Gaz liquide alimentaire ALIGAL™ | Air Liquide](#)

Annexe 6. Liste des documents à fournir par les entreprises

Objectifs de la liste : préciser les documents qu'un fournisseur / constructeur doit fournir en fonction de chaque phase d'un projet de méthanisation.

Ce document peut être adapté, joint au DCE et à la commande, puis utilisé comme "check list" par les différents interlocuteurs pour s'assurer que les documents requis ont été produits/reçus avant de valider les prestations et les paiements.

NB : les documents administratifs à fournir (assurance, agrément de sous-traitance, habilitation du personnel, KBis, etc.) sont listés dans les CCAP / documents de commande.

Définitions générales

Documents d'Offre : Documentation correspondant à l'offre et utilisable pour les études préliminaires. Si la documentation de l'accord cadre suffit, celle-ci peut être utilisée.

Documents à fournir après la commande : Études et documents détaillés adaptés au projet et nécessaires aux études d'exécution et à la construction.

DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés, à fournir au plus tard à la mise en service de l'installation, contenant les documents "tel que construit" (TQC) nécessaires à l'exploitation et à la maintenance des éléments fournis et correspondant aux installations telles que construites, incluant les éventuelles modifications réalisées sur site, y compris après mise en service.

Exemple de liste des documents fournisseurs :

Ref.	Désignation <i>Designation</i>	Planning <i>Schedule</i>
A.	Phase Achat <i>Procurement Phase</i>	Avec l'offre <i>With the proposal</i>
A.1	DPGF <i>Overall price with price breakdown</i>	X
A.2	Planning général <i>General schedule</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.3	Liste des sous-traitants et fournisseurs <i>Subcontractors and suppliers list</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.4	Liste des utilités et consommations <i>List of utilities (electricity, water...) and consumptions</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.5	Liste des consommables, pièces de rechange et pièces d'usure pour 1 et 2 ans d'exploitation <i>List of consumables, wear and spare parts for 1 and 2 years operation</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.6	Liste des pièces GER <i>List of parts for repair and major maintenance</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.7	Liste de l'outillage spécial nécessaire / fournir pour maintenance <i>List of specific tools for maintenance</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.8	Liste des équipements et fournitures, lieux de fabrication <i>List of equipments and supplies, manufacturing sites</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.9	Fiches techniques des principaux composants fournis (capacités mini/nominal/maxi, dimensions...) <i>Data sheets for main components as supplied (capacity min/design/max, dimensions...)</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.10	Spécifications techniques (spécifications électriques, matériaux, peinture, niveau sonore, émissions, normes...) <i>Technical specifications (electrical specifications, materials, painting, noise source, other emissions, standards...)</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>

A.11	PID	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.12	Liste des consommateurs électriques <i>Electrical load list</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.13	Bilans matières et énergie <i>Mass balance and energy balance</i>	X
A.14	Plans d'ensemble (vues en plan et coupes) <i>Assembly drawings (top views and sections)</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.15	Plan de contrôle qualité <i>Quality control plan</i>	Préliminaire <i>Preliminary</i>
A.16	Références <i>References</i>	X
A.17	Assurances et documents administratifs (liste Service Achats) <i>Insurances and administrative documentation (Purchase service List)</i>	X
B.	Phase études <i>Detailed studies Phase</i>	Après commande <i>After order</i>
B.1	Planning / informations plannings détaillés <i>Schedule / Information for detailed schedules</i>	1 semaine + quand modifié 1 week + when <i>modified</i>
B.2	Analyse de risques / HAZOP / ATEX <i>Risk analysis / HAZOP / ATEX</i>	8 semaines 8 weeks
B.3	Assurances et documents administratifs (liste Service Achats) <i>Insurances and administrative documentation (Purchase service List)</i>	1 semaine + quand modifié 1 week + when <i>modified</i>
B.4	Charte de "Chantier à faible nuisance" signée <i>Charter for a "Low-impact construction site" signed</i>	Si demandé <i>If required</i>
B.5	Habilitations du personnel (Electricité, CACES...) <i>Personnel authorizations, licences and certificates (Electricity,</i>	4 semaines 4 weeks
B.6	Liste des sous-traitants et fournisseurs <i>Subcontractors and suppliers list</i>	1 semaine + quand modifié 1 week + when <i>modified</i>
B.7	Liste des équipements et fournitures, lieux de fabrication <i>List of equipments and supplies, manufacturing sites</i>	4 semaines 4 weeks
B.8	Fiches techniques des principaux composants fournis (capacités mini/nominal/maxi, dimensions...) <i>Data sheets for main components as supplied (capacity min/design/max, dimensions...)</i>	6 semaines 6 weeks
B.9	Bilans matières et énergie <i>Mass balance and energy balance</i>	6 semaines 6 weeks
B.10	Spécifications techniques (spécifications électriques, matériaux, peinture, niveau sonore, émissions, normes...) <i>Technical specifications (electrical specifications, materials, painting, noise source, other emissions, standards...)</i>	6 semaines 6 weeks
B.11	PID	6 semaines 6 weeks

B.12	Liste des consommateurs électriques <i>Electrical load list</i>	6 semaines <i>6 weeks</i>
B.13	Analyses fonctionnelles <i>System analysis</i>	Si demandé <i>If required</i>
B.14	Schémas électriques unifilaires et tout plan/schéma nécessaire aux études électriques, à l'exploitation et à la maintenance <i>Electrical diagrams and any drawing and diagram necessary for electrical studies, operations and maintenance</i>	6 semaines <i>6 weeks</i>
B.15	Liste des utilités et consommations <i>List of utilities (electricity, water...) and consumptions</i>	Selon planning <i>According to planning</i>
B.16	Liste des consommables, pièces de rechange et pièces d'usure pour 1 et 2 ans d'exploitation <i>List of consumables, wear and spare parts for 1 and 2 years operation</i>	Si modifiée <i>If modified</i>
B.17	Liste des pièces GER <i>List of parts for repair and major maintenance</i>	Si modifiée <i>If modified</i>
B.18	Liste de l'outillage spécial nécessaire / fournir pour maintenance <i>List of specific tools for maintenance</i>	Si modifiée <i>If modified</i>
B.19	Plans d'ensemble (vues en plan et coupes) côtés et repérés avec liste des pièces <i>Assembly drawings (top views and sections) with dimensions and part list</i>	6 semaines <i>6 weeks</i>
B.20	Plans guides de génie civil côtés et repérés avec réservations cotées et repérées, pièces à sceller, pentes nécessaires au process, descentes de charges statiques et dynamiques et toutes dimensions utiles <i>Drawings for civil works with dimensioned and marked reservations, parts to be sealed, slopes necessary for the process, static and dynamic loads and any necessary dimension</i>	6 semaines <i>6 weeks</i>
B.21	Plans d'exécution (vues en plan et coupes) côtés et repérés <i>Execution drawings (top views and sections) with dimensions</i>	12 semaines <i>12 weeks</i>
B.22	Tout schéma et plan complémentaires nécessaire à la définition des interfaces, au montage, au raccordement, à l'exploitation et à l'entretien <i>Any additional drawing and diagram necessary to desing the interfaces, as well as to assemble, connect, operate and maintain</i>	12 semaines <i>12 weeks</i>
C.	Phase construction Construction Phase	Après commande After order
C.1	Planning détaillé de livraison, montage, mise en service et formation <i>Detailed planning for delivery, assembling, comissioning and training</i>	6 s. avant livraison <i>6 w. before delivery</i>
C.2	PPSPS - Plan Particulier de sécurité et de protection de la santé, inclus le descriptif des modes opératoires de déchargement, montage et co-activité <i>Health and safety procedures for works onsite, including a description of the procedures for unloading, assembly and co-activity</i>	6 s. avant livraison <i>6 w. before delivery</i>
C.3	Plan de contrôle qualité <i>Quality controle plan</i>	Avant expédition (validé) <i>Before expedition (approved)</i>

C.4	Plan des zones de stockage et de montage - inclus grues <i>Storing and assembling areas drawing including cranes</i>	6 s. avant livraison <i>6 w. before delivery</i>
C.5	Plans de recollement <i>Consolidation drawings</i>	Chaque fois que nécessaire et avant réception des travaux <i>When necessary and before work acceptance procedure</i>
C.6	Notes de calcul <i>Design calculation</i>	8 semaines <i>8 weeks</i>
C.7	Tests en usines et résultats <i>Factory test ans results</i>	Avant expédition (validé) <i>Before expedition (approved)</i>
C.8	Méthodes de soudure <i>Welding methods</i>	8 semaines <i>8 weeks</i>
C.9	Certificats de conformité des matériaux (notamment béton) <i>Certificates of conformity of materials (especially concrete)</i>	4 semaines avant travaux <i>4 weeks before works</i>
C.10	Certificats CE (machines, matières, sécurité, calibration...) <i>EC Certificates (equipment, materials, safety, calibration...)</i>	Avant livraison (validé) <i>Before delivery (approved)</i>
C.11	Tous PV de contrôle (ferraillage, coffrage, résistance béton, étanchéité cuves béton et acier, étanchéité tuyauteries, mise sous pression, etc.) <i>All inspection reports (reinforcement, formwork, concrete resistance, waterproofing of concrete and steel tanks, waterproofing of piping, pressurization, etc.)</i>	Avant réception des travaux <i>Before work acceptance procedure</i>
C.12	Liste de colisage et conditions de livraison (détail du transport, moyens de levage prévus...) <i>Packing list and conditions for delivery (transportation details, lifting gears included...)</i>	Avant livraison (validé) <i>Before delivery (approved)</i>
C.13	Certificats des engins et outillages nécessaires à la réalisation des travaux <i>Certificates of the machinery and tools required to carry out the work</i>	6 s. avant livraison <i>6 w. before delivery</i>
C.14	Manuels de conduite et de maintenance <i>Operations and maintenance manuals</i>	Avant livraison <i>Before delivery</i>
D.	Phase MSI Commissioning Phase	Après commande After order
D.1	Planning, programme et manuel de formation de l'exploitant <i>Training Planing, Program and Manual</i>	Avant réception des travaux <i>Before work acceptance procedure</i>
D.2	Tous les documents d'essais et de mise en service <i>All test and commissioning documents</i>	Avant réception des travaux <i>Before work acceptance procedure</i>

D.3	DOE complet : tous les documents techniques mis à jour Tel Que Construit (TQC) <i>Comprehensive final documentation, updated "As Built"</i>	Avant réception des travaux <i>Before work acceptance procedure</i>
------------	--	--