

Outil de calcul des émissions dans l'air de CH₄, CO₂, SO_x, NO_x issues des centres de stockage de déchets ménagers et assimilés

1. CONTEXTE

Dans le cadre de la création d'un registre européen des émissions de polluants (EPER), le ministère chargé de l'environnement souhaite mettre en place un ensemble de dispositifs de collecte, d'analyse et de validation des données et préparer le rapport correspondant.

Les émissions des centres de stockage de déchets ménagers et assimilés (CSD) sont concernées par ce dispositif.

Le ministère chargé de l'environnement a donc commandité à l'ADEME la réalisation d'un guide de calcul destiné aux exploitants de CSD afin d'estimer les émissions annuelles de CH₄, CO₂, NO_x et SO_x issues de ces installations.

L'objectif du guide est de développer un outil commun d'évaluation des émissions de CH₄, CO₂, NO_x et SO_x qui pourra être utilisé par l'ensemble des exploitants de site de stockage. En effet, aujourd'hui, il existe des modèles de prédiction des émissions de biogaz mais ils diffèrent selon les organismes ou sociétés (cf annexe 2)

Cet outil doit être simple d'utilisation et doit permettre à l'exploitant de compléter rapidement sa déclaration.

L'outil de calcul sera utilisé dans le but d'estimer les émissions au niveau national et n'aura pas prétention à se substituer aux outils développés par les bureaux d'étude pour réaliser des diagnostics biogaz pour dimensionner et mettre en place un réseau de captage du biogaz sur un site donné

En effet, les données obtenues grâce à l'outil peuvent être selon les sites largement surestimées ou sous-estimées. Seuls des paramètres beaucoup plus précis que ceux présentés dans ce document peuvent permettre l'établissement d'un diagnostic plus juste.

Ce guide est un outil proposé aux exploitants de CSD pour réaliser leur déclaration annuelle. Il n'a pas de caractère obligatoire. Les exploitants, sous réserve de justification, pourront utiliser leurs propres outils d'estimation. Ce guide sera référencé dans le cadre de la déclaration annuelle des émissions polluantes des installations classées soumises à autorisation, qui assure la transposition de la décision EPER..

Champ d'application

Toutes les installations autorisées en exploitation à la date de parution de l'arrêté relatif à la déclaration annuelle sont concernées. Les décharges fermées après l'entrée en vigueur de l'arrêté précité rentrent aussi dans le champ d'application.

Le présent document concerne les émissions dans l'air des quatre polluants suivants : CH₄, CO₂, NO_x, SO_x.

Les seuils au-delà desquels une déclaration est obligatoire sont définis dans l'arrêté et sont rappelés ci-dessous :

CH₄ > 100 t/an

CO₂ > 10 000 t/an (on considère que tout le CO₂ est issu de biomasse)

NO_x > 100 t/an

SO_x > 150 t/an

Ce guide de calcul comporte principalement 5 parties :

1) Une description schématique des différents flux gazeux issus de la dégradation de la matière organique des déchets.

Ne sont pris en compte que les paramètres pertinents pour les calculs des émissions des quatre polluants CH₄, CO₂, SO_x, NO_x.

Afin d'obtenir plus de précisions sur les formules présentées dans les fiches de calcul, les exploitants peuvent se reporter à l'annexe 1.

2) Des fiches de calcul des émissions des différents polluants. Ces fiches se veulent simples d'utilisation. C'est pourquoi, il n'est donné aucune explication des calculs. L'objectif étant qu'elles puissent être complétées rapidement par les exploitants. L'incertitude attachée à l'estimation est précisée au point 4 et détaillée à l'annexe 3..

3) L'annexe 1 reprend dans le détail la méthodologie ainsi que les calculs réalisés.

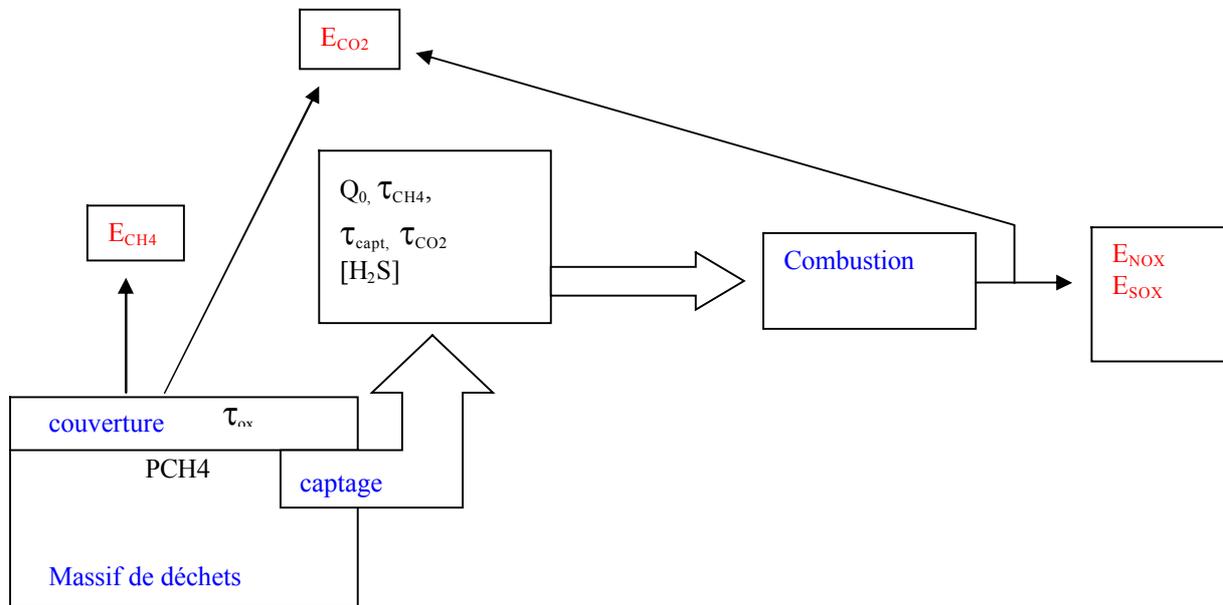
Afin d'obtenir plus de précisions sur les formules présentées dans les fiches de calcul, les exploitants peuvent se reporter à cette annexe.

4) L'annexe 2 explique le choix du modèle retenu.

5) l'annexe 3 présente les incertitudes liés aux estimations des émissions de chacun des polluants visés par ce document.

2. EMISSIONS DANS L'AIR DES POLLUANTS CONSIDERES : PARAMETRES DE CALCUL

Les émissions des quatre polluants considérés peuvent être schématisées comme suit :



E_{CH_4} : émission de méthane à l'atmosphère en t/an

E_{CO_2} : émission de dioxyde de carbone à l'atmosphère en t/an

E_{NOx} : émissions d'oxydes d'azote en t/an

E_{SOx} : émissions d'oxydes de soufre en t/an assimilées aux émissions de dioxyde soufre

Q_0 : débit de biogaz mesuré à la sortie du réseau de captage en m^3/h . Lorsque les données sont disponibles, il est souhaitable d'utiliser des Nm^3/h

τ_{capt} : taux de captage du réseau (compris entre 0 et 1)

τ_{ox} : proportion entre le débit de méthane oxydé après passage dans la couverture/ débit méthane non capté

$[H_2S]$: Concentration en H_2S dans le gaz capté (en ppmV)

τ_{CH_4} , τ_{CO_2} : Taux de CH_4 ou de CO_2 dans le gaz capté (en %)

P_{CH_4} : production annuelle de méthane (P_{CH_4} calculé à partir d'une formule d'ordre 1 ou estimé à partir Q_0 de mesuré)

3. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE UTILISEE

Il paraît intéressant d'utiliser les données sur site lorsque celles-ci existent (Q_0 , τ_{CH_4} , τ_{CO_2} , $[H_2S]$) plutôt que d'utiliser systématiquement un modèle mathématique de prédiction de formation de biogaz.

Sur de nombreux sites, seuls certains casiers sont équipés d'un réseau de captage du biogaz. Dans ce cas, même si les données existent, elles ne concernent qu'une partie du site.

La distinction a donc été faite entre les casiers pour lesquels on dispose de données (mesures) de débit de biogaz et de concentration en CH_4 , CO_2 et H_2S et les casiers pour lesquels ce type de données n'est pas disponible.

C'est pourquoi la suite du guide fait mention d'estimations par type de casiers. Les émissions d'un site sont la somme des émissions des différents types de casiers le constituant.

Deux phases sont à distinguer dans la méthodologie :

- 1) Détermination par l'exploitant s'il est soumis à déclaration annuelle pour chacun des quatre polluants considérés : comparaison des émissions du site par rapport aux seuils de déclaration.
- 2) Estimation des émissions pour les sites soumis à déclaration annuelle pour les émissions de ces polluants

L'exploitant doit dans un premier temps déterminer s'il est soumis à déclaration pour les émissions de NO_x et de SO_x (fiches 1 et 2), dans la mesure où seuls les sites les plus importants sont concernés.

Dans un deuxième temps, l'exploitant calcule la production de méthane du site afin d'estimer les émissions de méthane à l'atmosphère (fiche3).

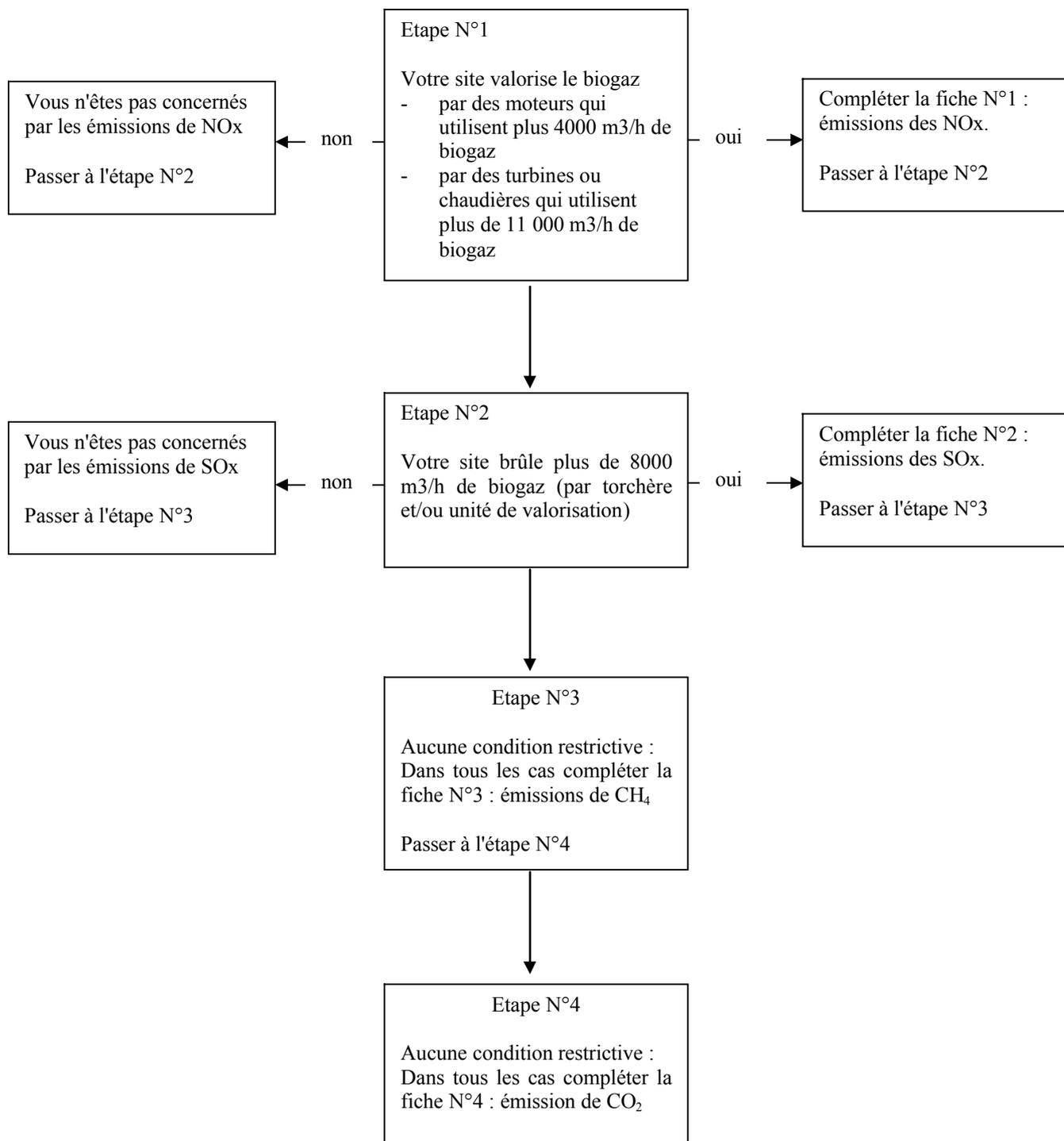
Enfin, à partir des calculs de production de méthane, l'exploitant réalise une estimation des émissions de CO_2 à l'atmosphère (fiche 4).

La description du chemin à suivre pour le calcul des émissions de chaque polluant est détaillée dans les fiches qui suivent.

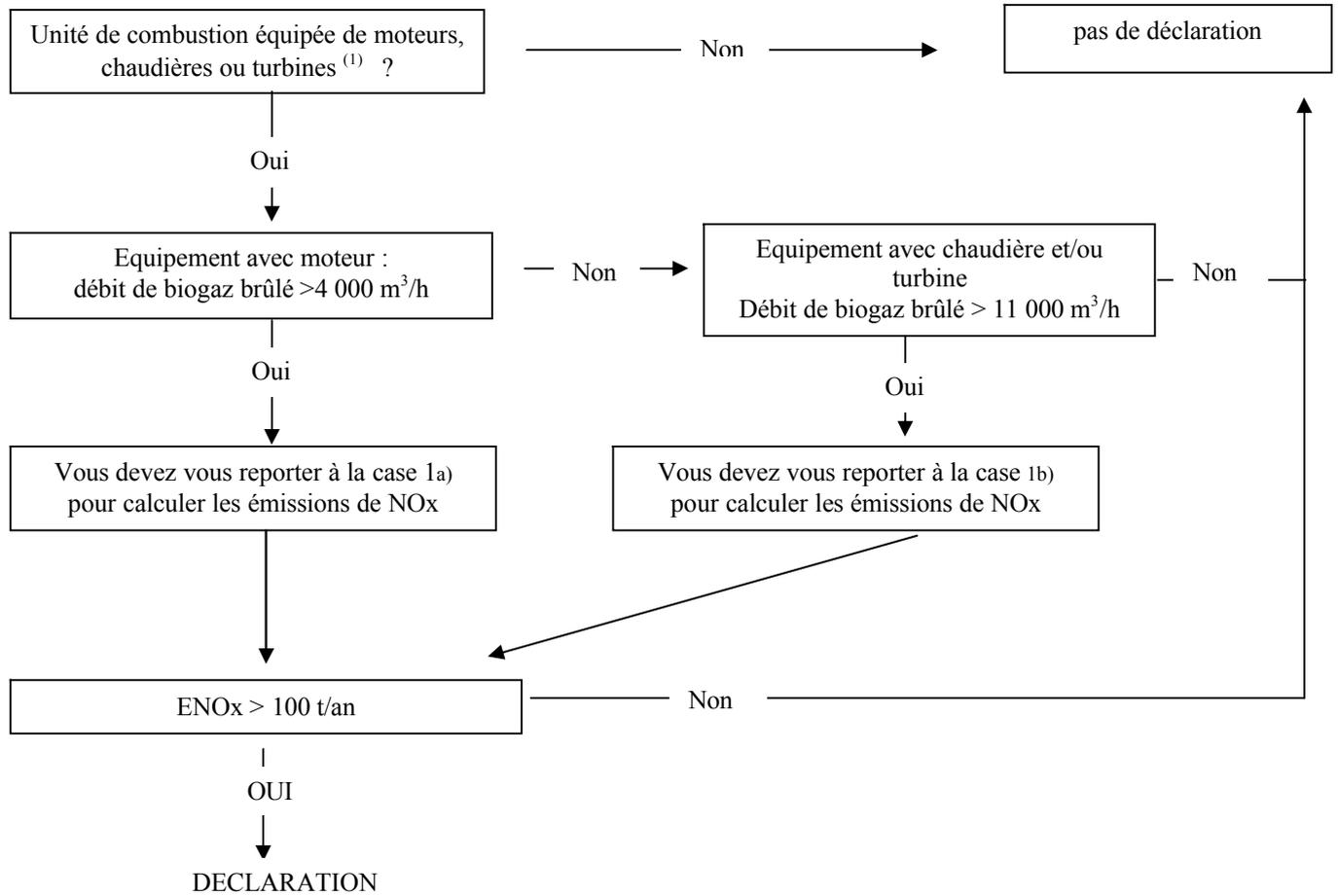
Les détails des calculs d'estimation des seuils de production de biogaz ou de production de méthane pour atteindre les seuils de déclaration annuelle sont présentés dans l'annexe N°1.

Le schéma ci-dessous résume brièvement le cheminement à suivre par l'exploitant lors de sa déclaration.

Quelles fiches vous concernent ?



Fiche N°1 : Calcul des émissions de NOx



(1) : Exclusion des torchères car le débit nécessaire pour atteindre le seuil d'émission en NOx est supérieur à 20 000 m³/h (cas non réaliste des sites français)

Case 1a

calcul des émissions de NOx pour des sites équipés d'un moteur alimenté par un débit de biogaz > 4000 m³/h

Taux de CH₄ du biogaz (moyenne annuelle)
(par exemple pour un taux de 70% noter 0,70)

(entre 0 et 1)

X

Débit de biogaz en entrée de l'unité de valorisation
(moyenne annuelle : moyenne des débits mesurés dans l'année)

m³/h

X

4.10⁻⁶

Nombre d'heures de fonctionnement du moteur
dans l'année de déclaration (prendre 8760 heures par défaut)

X

h

⇒ ENox

=

t/an

Calcul des émissions de NOx pour des sites équipés de turbines ou chaudières

Case 1b

Taux de CH₄ du biogaz (moyenne annuelle)

X

Débit de biogaz en entrée de l'unité de valorisation
 (moyenne annuelle : moyenne des débits mesurés dans l'année)

X

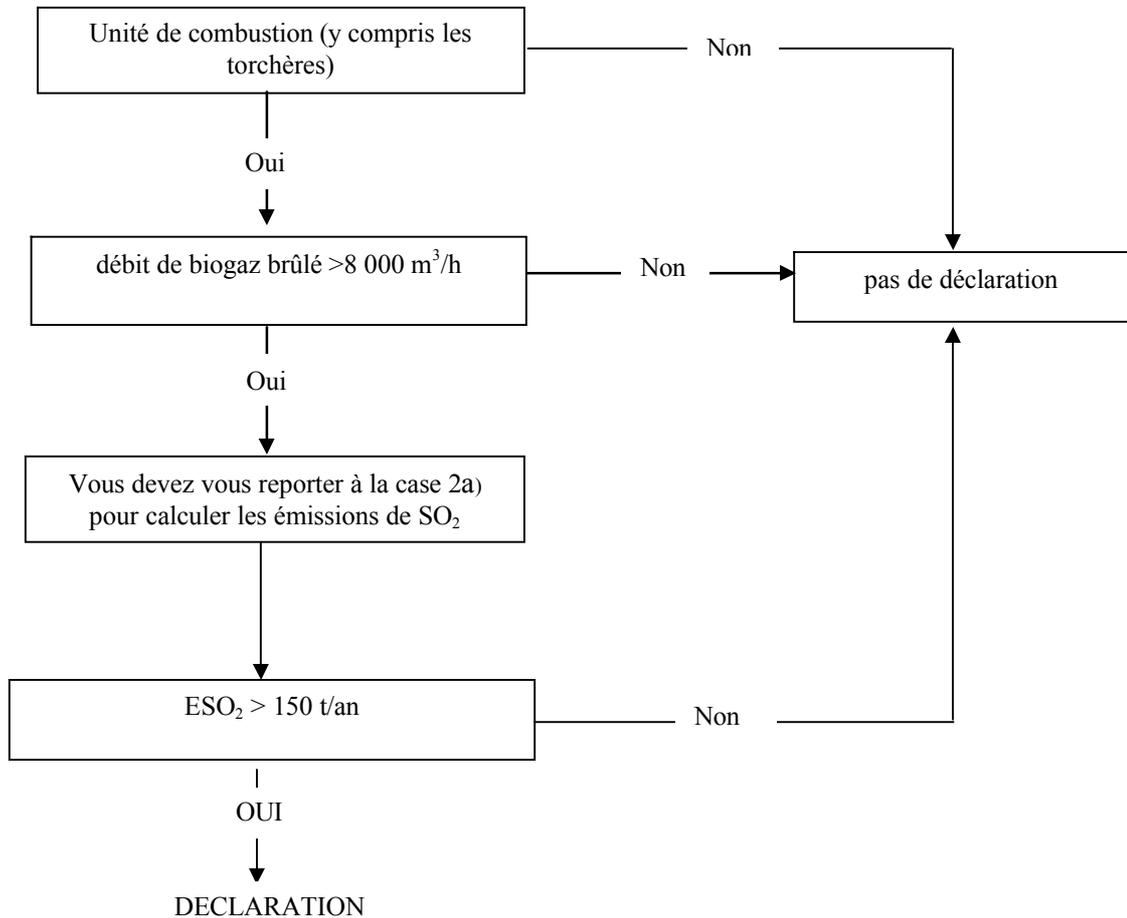
X

Nombre d'heures de fonctionnement dans l'année de déclaration
 (prendre 8760 heures par défaut)

=

⇒ ENO_x

Fiche N°2 : Calcul des émissions de SOx (assimilées aux émissions des SO₂)



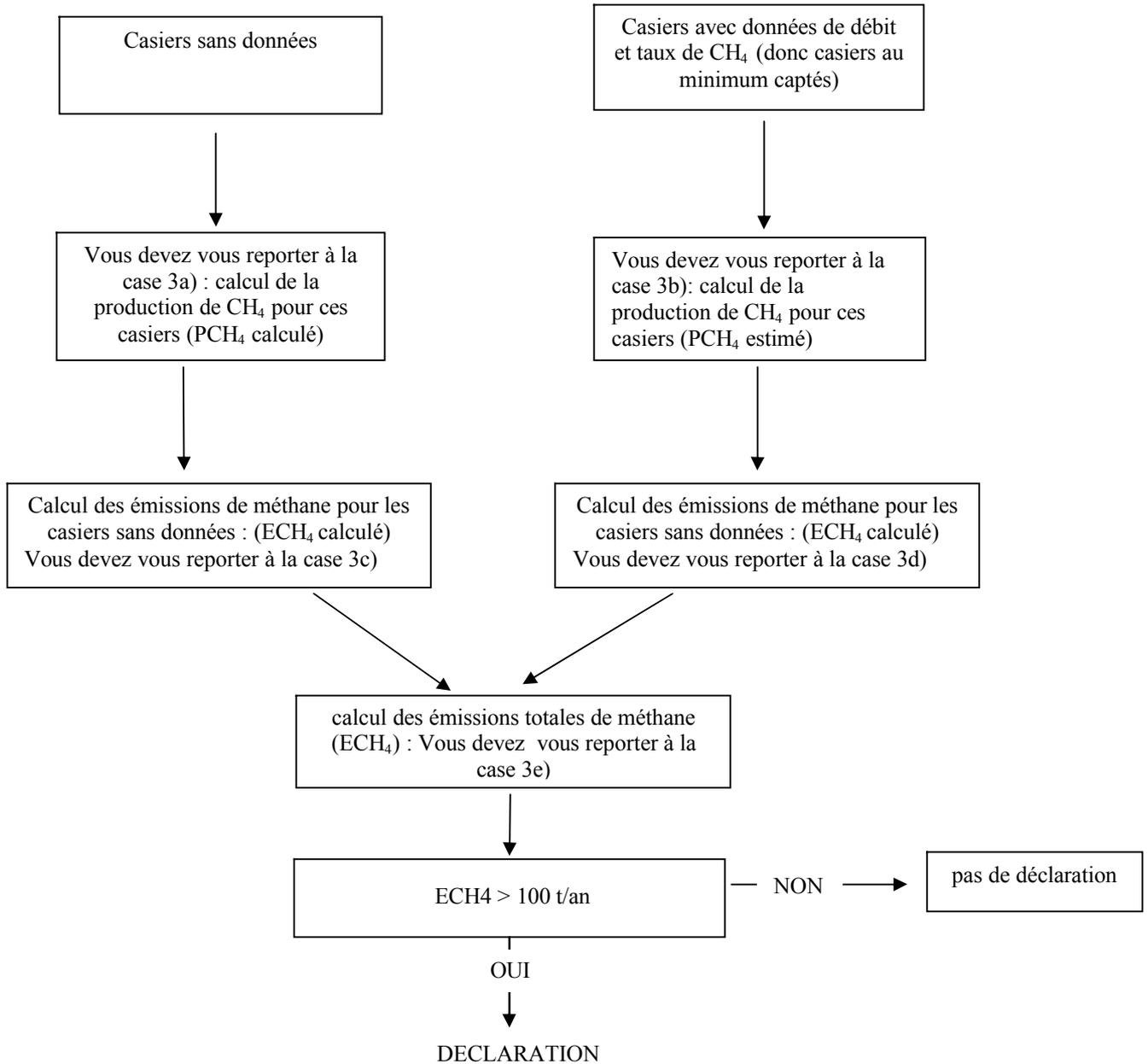
Case 2a

calcul des émissions de SO₂

Concentration en H ₂ S du biogaz (moyenne annuelle ⁽¹⁾)	[] ppmV
	X
Débit de biogaz en entrée de l'unité de combustion (moyenne annuelle ⁽¹⁾)	[] m ³ /h
	X
	[2,95.10 ⁻⁹]
	X
Nombre d'heures de fonctionnement de l'unité de combustion dans l'année de déclaration	[] h
	=
⇒ ESO ₂	[] t/an

(1) : Les moyennes annuelles sont calculées à partir des moyennes des débits mesurés sur le site pendant l'année.

Fiche N°3 : Calcul des émissions de CH₄



Calcul de la production de CH₄ pour les casiers sans données (reliés ou non à un réseau de captage) : PCH₄ calculé

Case 3a

- utilisation du tableau suivant : Calcul de PCH₄ à partir d'un fractionnement des déchets en catégorie et tranche d'âge

Classe d'âge	Catégorie 1 : déchets fortement évolutifs			Catégorie 2 : déchets moyennement évolutifs			TOTAL
	Tonnage stocké	Production (m ³ /t)	Débit méthane (m ³ /an)	Tonnage stocké	Production (m ³ /t)	Débit méthane (m ³ /an)	Débit méthane (m ³ /an)
1 à 5 ans	À compléter : X	6,6	X x 6,6	À compléter : Y	3,3	Y x 3,3	
6 à 10 ans	...	3,4			1,7		
11 à 20 ans		1,8			0,9		
21 à 30 ans		0,8			0,4		
TOTAL (m3/an)							
TOTAL (m3/h) : débit (en m3/an)/8760							PCH₄calculé

Ne compléter que les colonnes en grisé

- catégorie 1 : déchets fortement évolutifs : ordures ménagères et assimilées, boues et déchets verts
- catégorie 2 : déchets moyennement évolutifs : DIB et déchets ménagers ayant subi un traitement par broyage ou compostage
- catégorie 3 : déchets non fermentescibles : inertes, encombrants, mâchefers (potentiel méthanogène considéré comme nul et donc cette catégorie n'est pas mentionnée dans le tableau de calcul des émissions de méthane)

Pour les bennes arrivées en mélange, (par exemple : DIB + déchets verts + encombrants), l'exploitant estime la proportion de chaque catégorie.

Pour les casiers anciens sans historique (méconnaissance des déchets enfouis et des volumes des casiers), les estimations restent du ressort de l'exploitant qui pourra à titre d'exemple utiliser les moyens suivants afin d'avoir plus de précisions :

- fouilles pour estimer la nature et la proportion des différentes catégories de déchets,
- cartographie aérienne pour estimer le volume de déchets enfouis,
- techniques de détermination de la hauteur et de la surface des casiers,
- autres....

Calcul de la production de CH₄ pour les casiers reliés à un réseau de captage et pour lesquels on dispose de données de débit : PCH₄estimé.

Case 3b

- débit de biogaz en sortie de réseau de captage (moyenne annuelle ¹)	<input type="text" value=""/>	m ³ /h
		÷
- Taux de captage (calcul à partir de la case 3f) (par exemple pour un taux de 70% noter 0,70)	<input type="text" value=""/>	(compris entre 0 et 1)
		=
	<input type="text" value=""/>	m ³ /h
		X
- Taux de méthane du biogaz (moyenne annuelle ¹)	<input type="text" value=""/>	(compris entre 0 et 1)
		=
⇒ PCH ₄ estimé	<input type="text" value=""/>	m ³ /h

Case 3c

Calcul des émissions de méthane pour les casiers sans données: ECH₄calculé

- Production de CH ₄ calculée (conférer case 3a: PCH ₄ calculé)	<input type="text" value=""/>	m ³ /h
		X
- Débit de méthane émis à l'atmosphère (m ³ /h)	<input type="text" value=""/>	(1-τ _{capt}) x 0,9
Pour le calcul de τ_{capt} (taux de captage) se reporter à la case 3g		X
	<input type="text" value=""/>	6,3
		=
⇒ ECH ₄ calculé	<input type="text" value=""/>	t/an

¹ : Les moyennes annuelles sont calculées à partir des moyennes des débits mesurés sur le site pendant l'année.

Case 3d

**Calcul des émissions de méthane pour les casiers avec données:
ECH₄estimé**

- Production de CH₄ estimée (conférer case 3b)

	m ³ /h
--	-------------------

X

- Débit de méthane émis à l'atmosphère (m³/h)

Pour le calcul de τ_{capt} (taux de captage) se reporter à la case 3f

(1- τ_{capt}) x 0,9

X

6,3

=

⇒ ECH₄ estimé

t/an

Calcul des émissions totales de méthane pour le site

Case 3e

- Reprendre le ECH₄ calculé de la case 3c

t/an

+

- Reprendre le ECH₄ estimé de la case 3d

t/an

=

⇒ ECH₄ site

t/an

Calcul du taux de captage pour les cases 3b et 3d)**Case 3f**

Le taux de captage moyen des casiers pour lesquels on dispose de données ne concerne que les zones captées.

Ce taux peut être calculé à partir du tableau suivant :

type de zone captée	zone en exploitation reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture semi-perméable ¹ , reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture imperméable ² naturelle, reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture comprenant une géomembrane, reliée à une unité de combustion
taux de captage	35%	65%	85%	90%
surface développée concernée³	W m²	X m²	Y m²	Z m²
$\tau_{\text{capt moyen}} = [(0.35 W + 0.65 X + 0.85 Y + 0.90 Z) \div (W+X+Y+Z)]$				

Calcul du taux de captage pour la case 3c)**Case 3g**

Il s'agit de calculer un taux de captage moyen pour tous les casiers du site:

- casiers sans captage ou avec captage mais non reliés à une unité de combustion.
- Casiers captés et reliés à une unité de combustion

Ce taux peut être calculé à partir du tableau suivant :

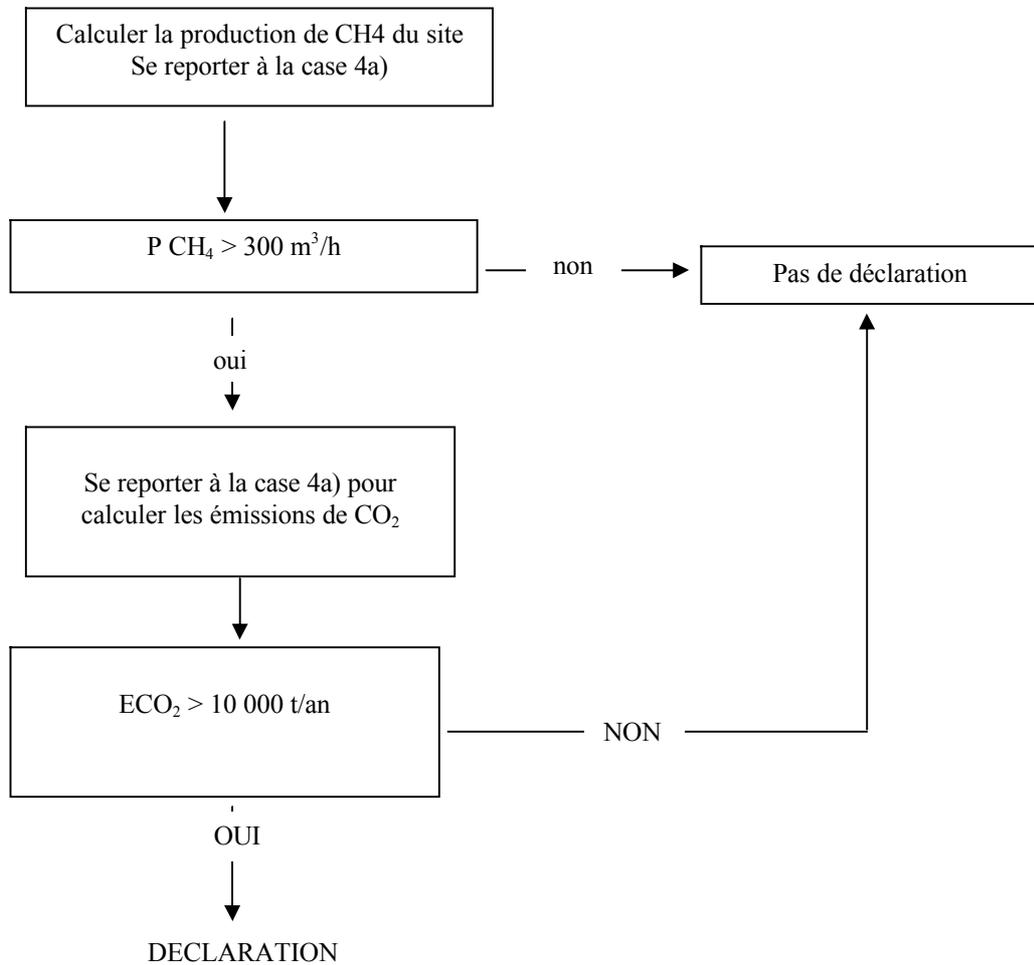
type de zone	zone sans captage ou non reliée à une unité de combustion	zone en exploitation reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture semi-perméable ¹ reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture imperméable ² naturelle reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture comprenant un géosynthétique imperméable (type géomembrane) relié à une unité de combustion
taux de captage	0%	35%	65%	85%	90%
surface développée³ concernée	V m²	W m²	X m²	Y m²	Z m²
$\tau_{\text{capt moyen}} = [(0V + 0.35 W + 0.65 X + 0.85 Y + 0.90 Z) \div (V + W + X + Y + Z)]$					

¹ Une couverture semi-perméable est constituée de matériaux naturels de faible imperméabilité, mis en œuvre sans précautions particulières pour limiter les infiltrations d'eau ou d'un géosynthétique dit "semi-perméable"

² Une couverture imperméable naturelle comprend des matériaux argileux d'épaisseur d'au moins 1 m avec un coefficient de perméabilité $\leq 10^{-9}$ m/s.

³ Pour les sites avec des merlons, la surface de couverture concernée doit être calculée à partir de la surface développée et non de la surface projetée.

Fiche N°4 : Calcul des émissions de CO₂ (considéré comme CO₂ biomasse)



Case 4a

Calcul de la production totale de CH₄ du site

- Reprendre le PCH₄ calculé de la case 3a)

 m³/h

+

- Reprendre le PCH₄ estimé de la case 3b)

 m³/h

=

⇒ P CH₄

 m³/h

Calcul des émissions de CO₂ pour les casiers non captés: ECO₂.

Case 4b

Taux de CO₂ / taux CH₄
(si ce rapport n'est pas connu, prendre 0,8 comme valeur par défaut)

+

Le taux de captage (τ_{capt}) est repris
de la case 3g du calcul des émissions de CH₄

+

=

X

Production de CH₄
(reprendre le résultat de la case 4a)

X

=

⇒ ECO₂

4. INCERTITUDES SUR LES EMISSIONS

Les chiffres des émissions sont issus de calculs comportant de nombreuses sources d'incertitudes et notamment :

- incertitudes sur les concentrations et débits liées aux appareils de mesure ;
- incertitudes liées aux calculs et aux hypothèses choisies : taux de captage du biogaz, taux d'oxydation, estimation de la production de méthane (coefficients de dégradation, potentiel méthanogène...).

Il apparaît que les chiffres d'émissions déterminés à partir de l'outil développé dans ce document comportent une incertitude supérieure ou égale à 50%. L'annexe 3 présente plus en détail l'estimation de l'incertitude pour chacun des paramètres nécessaires aux calculs des émissions des 4 polluants visés par le présent document.

ANNEXE N°1 DETAIL DES CALCULS

1. PRESENTATION DES PARAMETRES DE CALCULS

a) Débit de biogaz en sortie de réseau de captage : Q0

Q0 est un débit mesuré en sortie de réseau de captage (entrée d'unité de combustion). L'unité est le m³/h. Lorsque qu'il est possible d'obtenir le débit corrigé en pression et température, il est conseillé alors d'utiliser des Nm³/h.

b) Taux de captage : τ_{capt}

Le taux de captage dépend essentiellement des équipements (et de leur mise en œuvre) et de la nature de la couverture. Etant donné la diversité des équipements et la difficulté à leur attribuer une efficacité de captage, seule la nature de la couverture a été prise en compte pour déterminer le taux de captage.

type de zone	zone sans captage ou non reliée à une unité de combustion	zone en exploitation reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture semi-perméable ¹ reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture imperméable ² naturelle reliée à une unité de combustion	Zone avec une couverture comprenant une géomembrane reliée à une unité de combustion
taux de captage	0%	35%	65%	85%	90%
surface développée⁴ concernée	V m²	W m²	X m²	Y m²	Z m²
$\tau_{\text{capt moyen}} = [(0V + 0.35 W + 0.65 X + 0.85 Y + 0.90 Z) / (V + W + X + Y + Z)]$					

c) Taux d'oxydation : τ_{ox}

L'oxydation n'est à prendre en compte que sur les casiers avec couverture (casiers équipés d'un réseau de captage ou non). Cependant, il est très rare que l'exploitant connaisse le taux d'oxydation du méthane dans la couverture. D'après une analyse bibliographique, nous proposons de prendre comme taux de référence 10% (taux recommandé par l'IPCC)¹ quelle que soit la couverture.

d) Concentration en H₂S : [H₂S], Taux de CO₂ et CH₄ : τ_{CO_2} , τ_{CH_4}

Les concentrations ou les taux sont mesurés en sortie de réseau à l'aide d'appareils portatifs ou à partir d'échantillons analysés par chromatographie au laboratoire.

¹ Une couverture semi-perméable est constituée de matériaux naturels de faible imperméabilité, mis en œuvre sans précautions particulières pour limiter les infiltrations d'eau, ou d'un géosynthétique dit "semi-perméable".

² Une couverture imperméable naturelle comprend des matériaux argileux d'épaisseur d'au moins 50 cm avec un coefficient de perméabilité < 10⁻⁹ m/s.

³ Pour les sites avec des merlons, la surface de couverture concernée doit être calculée à partir de la surface développée et non de la surface projetée.

¹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

2. EMISSIONS DE NO_x

Les émissions de NO_x sont issues de la combinaison d'azote moléculaire et d'oxygène lors de la combustion. L'azote est un gaz inerte qui brûle plus ou moins bien selon les conditions de la combustion. C'est pourquoi les émissions sont différentes selon les unités de combustion.

a) Détermination des sites soumis à déclaration annuelle pour les émissions de NO_x

Seuls les sites munis d'un système de combustion du biogaz sont concernés

On suppose que les **émissions d'oxydes d'azote sont proportionnelles au débit de méthane**

Il faut distinguer des taux de NO_x différents selon les unités de combustion (source EPA):

- torchères : 0,650 g NO_x / Nm³ CH₄ (τ_{NO_x})
- moteurs : 4 g NO_x / Nm³ CH₄ (τ_{NO_x})
- turbines et /ou chaudières : 1,4 g NO_x / Nm³ CH₄ (τ_{NO_x})

$$E_{NO_x} = Q_0 \times \tau_{CH_4} \times \tau_{NO_x} \text{ (en t/Nm}^3\text{)} \times 8.760 \text{ h/an}$$

$$E_{NO_x} = 0,006 \times Q_0 \times \tau_{CH_4} \text{ pour les sites équipés de torchères}$$

$$E_{NO_x} = 0,035 \times Q_0 \times \tau_{CH_4} \text{ pour les sites équipés de moteurs}$$

$$E_{NO_x} = 0,012 \times Q_0 \times \tau_{CH_4} \text{ pour les sites équipés de turbines et /ou chaudières}$$

Si on considère une hypothèse très défavorable¹: τ_{CH₄} = 70%

Alors pour atteindre le seuil de déclaration en NO_x de 100 t/an , il faut :

$$Q_0 = E_{NO_x} / (0,006 \times 0,7) \approx 24000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ pour les sites équipés de torchères}$$

$$Q_0 = E_{NO_x} / (0,035 \times 0,7) \approx 4000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ pour les sites équipés de moteurs}$$

$$Q_0 = E_{NO_x} / (0,012 \times 0,7) \approx 11000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ pour les sites équipés de turbines et /ou chaudières}$$

Le débit minimal en biogaz à partir duquel les sites seront soumis à l'obligation de déclaration annuelle pour les NO_x est tel qu'il est raisonnable de considérer que ces sites font l'objet de mesures de débit et de concentrations régulièrement. Le cas des sites pour lesquels les données ne sont pas disponibles n'est donc pas pris en compte

Ainsi, en France, seuls les sites équipés de moteurs, turbines et/ou chaudières peuvent être soumis à déclaration des émissions de NO_x. En effet, les débits minimaux de biogaz à atteindre pour les torchères ne sont pas réalistes (24 000 m³/h).

b) Calculs des émissions de NO_x

Le calcul des émissions de NO_x pour les sites équipés de moteurs, turbines et/ou chaudières et pour lesquels le débit de biogaz est respectivement supérieur à 4000 m³/h et 11 000 m³/h est le suivant :

$$E_{NO_x} = 0,035 \times Q_0 \times \tau_{CH_4} \text{ pour les sites équipés de moteurs}$$

$$E_{NO_x} = 0,012 \times Q_0 \times \tau_{CH_4} \text{ pour les sites équipés de turbines et /ou chaudières}$$

¹ L'hypothèse très défavorable est définie comme l'hypothèse qui induit un Q₀ le plus faible possible dans des conditions réalistes de site. Cela implique de retenir un taux de méthane élevé. En effet, l'objectif de cette hypothèse est d'établir un seuil de débit en dessous duquel, les exploitants n'ont pas à compléter une déclaration annuelle.

3. EMISSIONS DE SO_x

Les SO_x regroupent le mélange de SO₂ et SO₃ et sont formés lors de la combustion des composés soufrés. Le SO₂ est produit en quantité plus importante que le SO₃ (respectivement de l'ordre de 90% contre 10%). On suppose ci-dessous que le principal composé soufré dans le biogaz est l'H₂S.

a) Détermination des sites soumis à déclaration au titre de la décision EPER pour les émissions de SO_x

Seuls les sites munis d'une unité de combustion du biogaz sont concernés.

On suppose que 1 mol H₂S → 1 mol SO₂, en négligeant les autres composés soufrés et en admettant que la totalité des composés soufrés sont convertis en SO₂ lors de la combustion.

1ppm(v) H₂S → 1 ppm(v) SO₂

Masse volumique SO₂ : 2,86 kg/m³ → soit 2,86 (· 10⁻⁹ t SO₂ / ppm

$E_{SO_x} = \text{débit mesuré} \times [\text{H}_2\text{S (ppmv)}] \times 2,86 \cdot 10^{-9} \text{ t/ppm} \times 8.760 \text{ h/an}$

$$E_{SO_x} = 25 \cdot 10^{-6} \times Q_0 \times [\text{H}_2\text{S (ppmv)}]$$

Si on considère une hypothèse très défavorable (taux de H₂S élevé) : [H₂S] = 700 ppmV

Alors pour atteindre le seuil de déclaration de 150 t/an, il faut :

$$Q_0 = E_{SO_x} / (25 \cdot 10^{-6} \times [\text{H}_2\text{S ppmV}]) = 150 / (25 \cdot 10^{-6} \times 700) \approx 8000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le débit minimal en biogaz à partir duquel les sites seront soumis à l'obligation de déclaration annuelle pour les SO_x est tel qu'il est raisonnable de considérer que ces sites font l'objet de mesures de débit et de concentrations régulièrement. Le cas des sites pour lesquels les données ne sont pas disponibles n'est donc pas pris en compte. **Ainsi, les sites dépassant 8000 m³/h de débit de biogaz mesuré en sortie de réseau de captage sont soumis à déclaration des émissions de SO₂ dans le cadre de la déclaration annuelle.**

b) Calcul des émissions de SO_x

La déclaration des émissions est basée sur le calcul suivant :

$$E_{SO_x} = 26 \cdot 10^{-6} \times Q_0 \times [\text{H}_2\text{S (ppmV)}]$$

4. EMISSIONS DE CH₄

Les émissions de CH₄ proviennent:

- du CH₄ non capté par le réseau de captage du biogaz et non oxydé dans la couverture
- du CH₄ capté par un réseau de captage non relié à une unité de combustion

a) Détermination des sites soumis à déclaration pour les émissions de CH₄

Il faut distinguer les casiers pour lesquels il est possible d'obtenir des données de production de biogaz et de concentration de biogaz et les autres.

Pour les premiers, le débit de biogaz sera utilisé comme paramètre de calcul de la production de méthane.

Pour le deuxième cas, une formule d'ordre 1 sera la base des calculs de production de méthane.
Les émissions d'un site représentent la somme des émissions de l'ensemble de ces casiers.

Production de méthane des casiers pour lesquels des données (mesures) de débit de gaz et de concentration en CH₄ sont disponibles : P_{CH₄} estimé

$$P_{CH_4 \text{ estimé}} = (Q_0 / \tau_{\text{capt}}) \times \tau_{CH_4}$$

Avec

$$Q_0 = m^3/h$$

$$\tau_{CH_4} = \%$$

τ_{capt} = dépendant de la couverture

Production de méthane pour les autres casiers : P_{CH₄} calculé

A partir d'une formule d'ordre 1 présentée ci-dessous, il a été élaboré un tableau de production du méthane en fonction de différentes catégories de déchets et différentes tranches d'âge.

La formule présentée est utilisée par l'IPCC¹ dans le cadre de leurs travaux sur les émissions de gaz à effet de serre. Le choix d'utilisation de cette formule a été réalisé à partir d'une comparaison de différents modèles. Cette comparaison est présentée en annexe 2.

$$P_{CH_4} = \sum FE_0 * (\sum A_i * p_i * k_i * e^{-k_i * (t-x)}) \text{ en } m^3/t \text{ de déchets}$$

Avec FE₀ : potentiel de CH₄ émissile par une tonne de déchet correspondant à une dégradation totale de celui-ci,

$$FE_0 = 0,934 * C_0 * (0,014 * T + 0,28) \text{ en } m^3/t \text{ de déchets}$$

Avec Co = carbone organique biodégradable

T : température lors de la dégradation, T= 30°C

Ai : facteur de normalisation assurant que la somme des valeurs discrètes sur chaque année équivaut au potentiel de CH₄ émissile par un déchet pour une dégradation complète, Ai = (1 - e^{-k})/k

Pi = fraction des déchets ayant une constante de dégradation ki

Ki : constante de dégradation

x : année de mise en décharge du déchet

Trois constantes de dégradation peuvent être retenues selon la biodégradabilité des déchets:

-k1 = 0,5 pour 15% des déchets (fraction facilement biodégradable)

-k2 = 0.10 pour 55% des déchets (fraction moyennement biodégradable)

-k3 = 0.04 pour 30% des déchets (fraction faiblement biodégradable)

On considère que la cinétique de dégradation est la même quelque soit la composition des déchets.

Les constantes de dégradation et les fractions correspondantes ont été déterminées parmi les références bibliographiques en accord avec les membres du comité de pilotage afin d'être représentatives de la situation française

Les exploitants ont la possibilité d'employer directement cette formule. L'utilisation d'un outil informatique est alors nécessaire.

¹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

Il leur est aussi possible d'utiliser la méthodologie suivante qui fractionne les déchets en 3 catégories selon leur nature et en 4 tranches d'âge. Il suffit alors de compléter le tableau N°1 pour déterminer P_{CH4} calculé.

3 catégories de déchets ont été retenues :

- catégorie 1 : déchets fortement évolutifs : ordures ménagères et assimilées, boues et déchets verts
potentiel méthanogène (FE_0) = 100 m³/t
- catégorie 2 : déchets moyennement évolutifs : DIB et déchets ménagers ayant subi un traitement par broyage ou compostage
potentiel méthanogène (FE_0) = 50 m³/t
- catégorie 3 : déchets non fermentescibles : inertes, encombrants et mâchefers
potentiel méthanogène = 0 m³/t

les tranches d'âge sont définies comme suit :

- 1 à 5 ans
- 6 à 10 ans
- 10 à 20 ans
- 20 à 30 ans

Le tableau suivant donne la production de méthane pour chaque tranche d'âge et catégorie

Age	Cat 1 : $FE_0 = 100$	Cat 2 : $FE_0 = 50$	Cat 3 : $FE_0 = 0$
Inférieur à 5 ans	6,6	3,3	0
6 à 10 ans	3,4	1,7	0
11 à 20 ans	1,8	0,9	0
21 à 30 ans	0,8	0,4	0

Pour une année donnée, la production totale de méthane issue de l'ensemble des déchets enfouis dans les casiers pour lesquels on ne dispose pas de données est donc calculée comme suit :

Tableau N°1 : Calcul de P_{CH4} calculé en fonction de la catégorie des déchets et de tranches d'âge

Classe d'âge	Catégorie 1 : déchets fortement évolutifs			Catégorie 2 : déchets moyennement évolutifs			TOTAL
	Tonnage stocké	Production (m ³ /t)	Débit méthane (m ³ /an)	Tonnage stocké	Production (m ³ /t)	Débit méthane (m ³ /an)	Débit méthane (m ³ /an)
1 à 5 ans	À compléter : X	6,6	X x 6,6	À compléter : Y	3,3	Y x 3,3	
6 à 10 ans	...	3,4			1,7		
10 à 20 ans		1,8			0,9		
20 à 30 ans		0,8			0,4		
TOTAL (m3/an)							
TOTAL (m3/h) : débit (en m3/an)/8760							P_{CH4}calculé

Calcul du seuil de production de méthane pour atteindre le seuil de déclaration

Dans les calculs qui suivent, les quantités d'imbrûlés, directement proportionnelles aux quantités de gaz mesurées et brûlées ne sont pas prises en compte étant donné leur proportion de l'ordre de 1%.

$$Q_{emisCH_4} = Q_{CH_4 \text{ non capt}} \times (1 - \tau_{ox})$$

$$\text{Avec } Q_{CH_4 \text{ non capt}} = Q_0 \left(\frac{1}{\tau_{capt}} - 1 \right) \tau_{CH_4}$$

$$\Rightarrow Q_{emisCH_4} \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_0 \left[\left(\frac{1}{\tau_{capt}} - 1 \right) \times (1 - \tau_{ox}) \right] \times \tau_{CH_4}$$

$$\text{Masse volumique } CH_4 : 0,72 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \text{soit } 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ t } CH_4 / \text{m}^3$$

$$E_{CH_4} = Q_0 \times [(1/\tau_{capt}) - 1] \times (1 - \tau_{ox}) \times \tau_{CH_4} \times 0,72 \times 10^{-3} \times 8.760 \text{ h/an}$$

$$E_{CH_4} = 6,3 \times [(1/\tau_{capt}) - 1] \times (1 - \tau_{ox}) \times Q_0 \times \tau_{CH_4}$$

$$P_{CH_4} = (Q_0 \times \tau_{CH_4}) / \tau_{capt}$$

$$E_{CH_4} = 6,3 \times P_{CH_4} \times [(1 - \tau_{capt}) (1 - \tau_{ox})]$$

$$P_{CH_4} = P_{CH_4 \text{calculé}} + P_{CH_4 \text{estimé}}$$

Si on considère une hypothèse très défavorable (c'est-à-dire majorant l'émission de méthane) : aucun captage de biogaz, et un $\tau_{ox} = 10\%$

Alors, pour atteindre le seuil de 100 t/an de déclaration, il faut :

$$P_{CH_4} = E_{CH_4} / 5,7 \approx 17 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ainsi, étant donné le seuil très faible de production de CH₄, une grande majorité des sites de stockage de déchets ménagers et assimilés sont concernés par une déclaration annuelle de leurs émissions de CH₄.

b) Calculs des émissions de CH₄

$$E_{CH_4} = 6,3 \times P_{CH_4} \times [(1 - \tau_{capt}) (1 - \tau_{ox})]$$

Le taux d'oxydation est fixé à 10% par défaut

D'où :

$$E_{CH_4} = 5,7 \times P_{CH_4} \times (1 - \tau_{capt})$$

Avec $P_{CH_4} = P_{CH_4 \text{estimé}} + P_{CH_4 \text{calculé}}$

5. EMISSIONS DE CO₂

a) Détermination des sites soumis à déclaration pour les émissions de CO₂

On considère qu'il s'agit de CO₂ issu de biomasse.

Les émissions de CO₂ d'un site sont issues de plusieurs sources :

1) de l'unité de combustion :

- CO₂ contenu dans le biogaz capté
- combustion du méthane. On suppose que 1 mol CH₄ -> 1 mol CO₂

2) des émissions à travers la couverture :

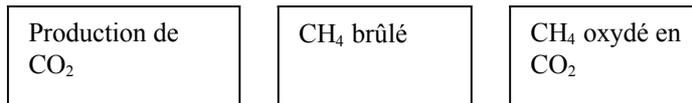
- CO₂ contenu dans le biogaz non capté
- CO₂ provenant de l'oxydation du méthane à travers la couverture :

Ces émissions peuvent donc provenir de zones équipées de captage mais aussi des zones non captées et des unités de combustion. Les émissions totales seront donc la somme de toutes ces sources.

Il faut donc estimer les émissions des casiers pour lesquels on dispose des données et celles des casiers pour lesquels les données ne sont pas disponibles.

Afin de simplifier les calculs la porte d'entrée choisie est la production de CH₄ (PCH₄)

$$E_{CO_2} = 17,3 \times \left[\underbrace{(P_{CH_4} / \tau_{CH_4}) \times \tau_{CO_2}} + \underbrace{(P_{CH_4} \times \tau_{capt})} + \underbrace{(P_{CH_4} \times (1 - \tau_{capt}) \times \tau_{ox})} \right]$$



Le PCH₄ est repris du point c ci-dessus (calcul des émissions de méthane)

Le taux d'oxydation est par défaut de 10%

Si on considère une hypothèse défavorable (émissions fortes de CO₂):

$$\tau_{\text{CH}_4} / \tau_{\text{CO}_2} = 1$$

$$\tau_{\text{capt}} = 0.9$$

Alors, pour atteindre le seuil de 10 000 t/an de déclaration, il faut :

$$P_{\text{CH}_4} = E_{\text{CO}_2} / 33 \approx 300 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ainsi, les sites dont le PCH₄ est supérieur à 300 m³/h peuvent être soumis à déclaration annuelle des émissions de CO₂.

b) Calculs des émissions de CO₂

$$E_{\text{CO}_2} = 17,3 \times [(P_{\text{CH}_4} / \tau_{\text{CH}_4}) \times \tau_{\text{CO}_2}] + (P_{\text{CH}_4} \times \tau_{\text{capt}}) + (P_{\text{CH}_4} \times (1 - \tau_{\text{Capt}}) \times \tau_{\text{ox}})]$$

$$E_{\text{CO}_2} = 17,3 \times P_{\text{CH}_4} [(\tau_{\text{CO}_2} / \tau_{\text{CH}_4}) + 0,9\tau_{\text{Capt}} + 0,1]$$

ANNEXE N°2

CHOIX DU MODELE D'ESTIMATION DE LA PRODUCTION DE METHANE

1. CHOIX DES MODELES

La littérature fait part de nombreux modèles élaborés pour estimer la production de biogaz ou de méthane issue de la dégradation des déchets enfouis en centre de stockage. Parmi ceux-ci on peut citer les modèles de TABASARAN, LOCM, FODM, MUNTONI, WARM, WPM, SWANA, Coops et al.

Etant donné le nombre et la diversité des modèles, il n'était pas possible de comparer l'ensemble des formules. Nous proposons donc de comparer 2 modèles les plus couramment cités dans la littérature :

- Le modèle appelé "IPCC" : formule conforme aux lignes directrices du GIEC¹ et qui s'appuie sur la méthode Tier 2 des "Good Practices Guidance"². Cette formule d'ordre 1 est utilisée jusqu'à présent par L'ADEME et le CITEPA pour estimer les émissions de CH₄ issues des centres de stockage.
- Le modèle SWANA, pris comme référence par l'EPA³

2. PRESENTATION DES MODELES RETENUS

2.1 Le modèle IPCC

L'équation retenue est la suivante :

$$PCH_4 = \sum FE_0 * (\sum A_i * p_i * k_i * e^{-k_i * (t-x)}) \text{ en m}^3/\text{t de déchets}$$

Avec FE_0 : potentiel de CH₄ émissile par une tonne de déchet correspondant à une dégradation totale de celui-ci,

$$FE_0 = 0,934 * C_0 * (0,014 * T + 0,28) \text{ en m}^3/\text{t de déchets}$$

Avec C_0 = carbone organique biodégradable

T : température lors de la dégradation, T= 30°C

A_i : facteur de normalisation assurant que la somme des valeurs discrètes sur chaque année équivaut au potentiel de CH₄ émissile par un déchet pour une dégradation complète, $A_i = (1 - e^{-k_i})/k_i$

P_i = fraction des déchets ayant une constante de dégradation k_i

K_i : constante de dégradation

x : année de mise en décharge du déchet

Trois constantes de dégradation peuvent être retenues selon la biodégradabilité des déchets:

- k_1 = 0,5 pour 15% des déchets (fraction facilement biodégradable)

- k_2 = 0.10 pour 55% des déchets (fraction moyennement biodégradable)

- k_3 = 0.04 pour 30% des déchets (fraction faiblement biodégradable)

Le choix des constantes et des fractions s'y rapportant ont été définies par les membres du groupe de travail afin de se rapprocher au plus près des moyennes de 160 mesures réalisées sur une cinquantaine de sites français.

¹ GIEC : Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat.

² GPG : Good practice Guidance and Uncertainty Management in Greenhouse Gas Inventories"

³ EPA : Environmental Protection Agency, USA

2.2 Le modèle SWANA

La formule proposée est la suivante :

$$G = WL_0 \frac{k+s}{s} (1 - e^{-s(t-t_i)}) (ke^{-k(t-t_i)})$$

- G = production totale de gaz à un temps donné (m3/an)
- W = déchets en place (tonnes)
- L0 = potentiel de gaz émissible par tonne de déchets (m3/t)
- t = temps écoulé depuis l'enfouissement des déchets (an)
- ti = temps de latence avant la production de biogaz (an) = 1 ans
- k = constante de dégradation d'ordre 1 (1/an) = 0,03 ans⁻¹
- s = constante de production d'ordre 1 (1/an) = 1 an⁻¹

3. COMPARAISONS DES MODELES

Une simulation a été effectuée afin de comparer les deux formules retenues avec des modèles utilisés par 2 bureaux d'étude français spécialisés dans le biogaz.

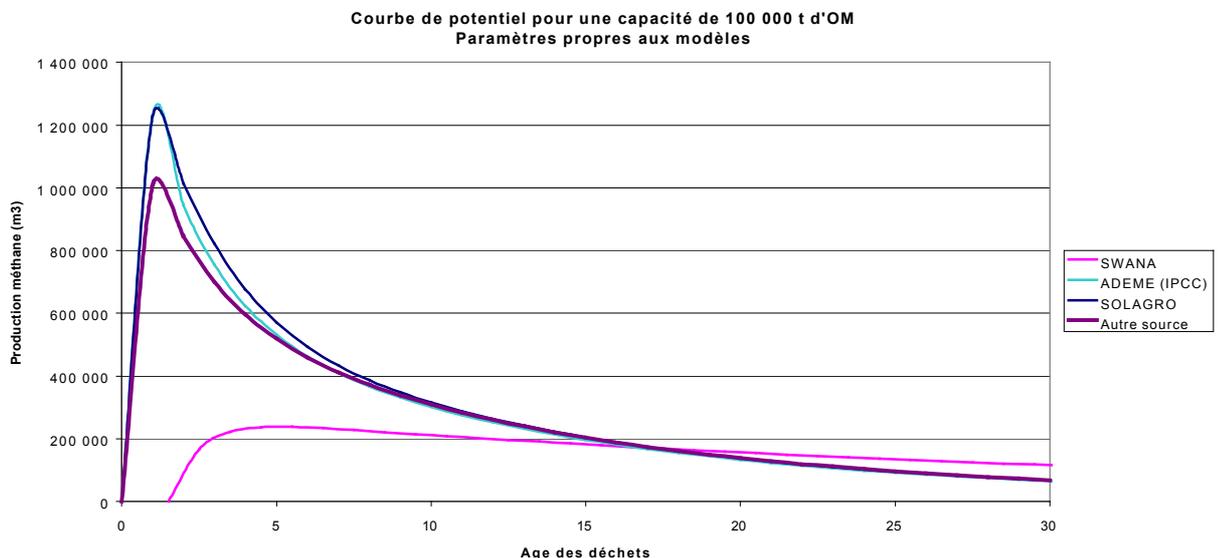
La comparaison est effectuée à partir des hypothèses suivantes :

- centre de stockage qui a reçu 100 000 t de déchets déposés à l'année 0,
- les déchets sont constitués de 100 % de déchets ménagers ce qui implique :
 - pour le modèle "IPCC" un FE₀ = 100 m3 CH4/t
 - pour le modèle "SWANA", un L₀ = 161 m3 biogaz/t (à 55% de CH4)

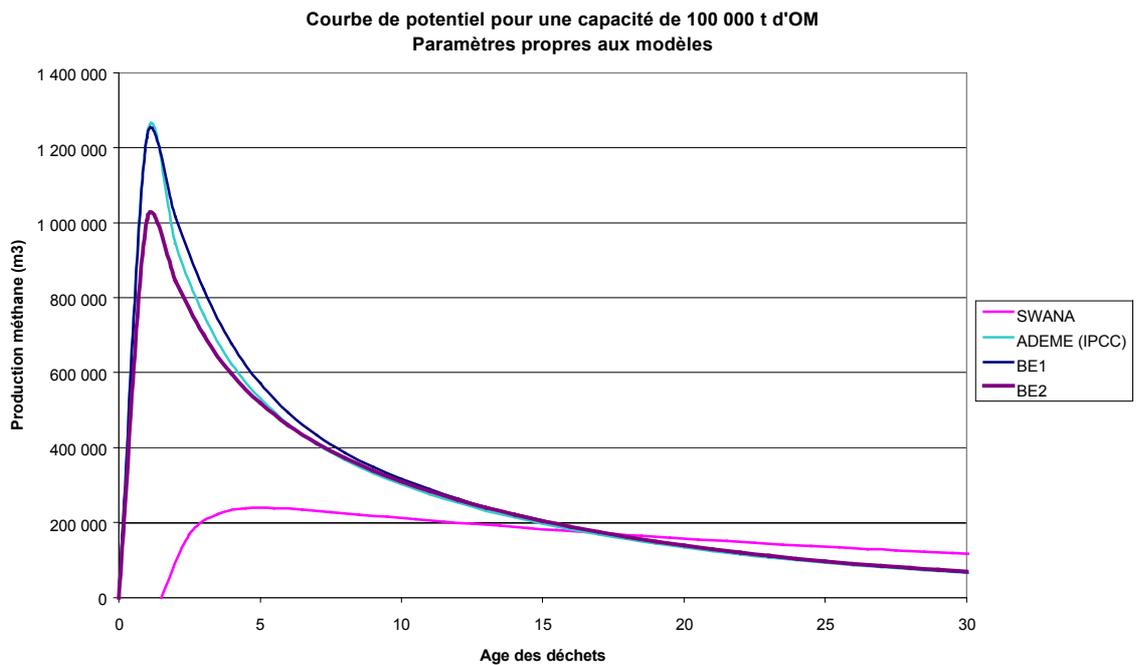
La comparaison est effectuée en traitant les données de 2 manières :

- courbe de production d'un massif de 100 000 t d'ordures ménagères sur 30 ans
- production de méthane à 10, 20 et 30 ans d'un site recevant 100 000 t/an de déchets pendant 20 ans

La figure n°1 ci-dessous donne les courbes d'estimation de production de CH4 en fonction du temps par les 2 modèles retenus et par les outils utilisés par les bureaux d'études dénommés BE1 et BE2. Les modèles utilisés par les 2 bureaux d'études sont issus de leur expérience du terrain et sont donc calés sur de nombreuses mesures réalisées sur des sites français. Ainsi, les données de ces deux bureaux d'études ont été considérées comme représentatives des sites français.



La figure n°2 ci-dessous présente un comparatif des productions pour un site recevant 100 000 t d'ordures ménagères par an pendant 20 ans.



D'après ces courbes, il apparaît que le modèle "IPCC" associé aux constantes de dégradation définies en 2.1. donne les valeurs les plus proches des courbes proposées par les 2 bureaux d'études.

ANNEXE N°3 (RESTE A VALIDER)

INCERTITUDES RELATIVES AUX CALCULS DES EMISSIONS DE NO_x, SO_x, CH₄, CO₂

Les incertitudes sont liées :

- aux hypothèses de calcul, en particulier aux paramètres définis par défaut
- aux données issues des mesures

Les incertitudes ont été calculées selon la méthodologie utilisée par l'IPCC dans le Good Practice Guidance.

Les estimations de ces incertitudes sont calculées à partir des valeurs de la bibliographie, des jugements d'experts ou des données de terrain.

1. INCERTITUDES SUR LE CALCUL DES EMISSIONS DE NO_x

Paramètres	Niveau d'incertitudes
Hypothèses de calcul	
Taux NO _x	±50%
Nombre d'heures de fonctionnement	- 40%, + 0 %
Mesures	
Taux CH ₄	± 20 %
Débit de biogaz	± 20%

2. INCERTITUDES SUR LE CALCUL DES EMISSIONS DE SO_x

Paramètres	Niveau d'incertitudes
Hypothèses de calcul	
Les SO _x sont issus de la combustion de H ₂ S uniquement	- 0%; + 10%
Nombre d'heures de fonctionnements	- 40%, + 0 %
Mesures	
Concentration en H ₂ S	± 20 %
Débit de biogaz	± 20%

3. INCERTITUDES SUR LE CALCUL DES EMISSIONS DE CH₄

3.1 Incertitudes sur la production de CH₄

La distinction est faite entre

- les casiers pour lesquels on dispose de mesures de débit de biogaz et de concentration en CH₄
- les autres casiers

Casiers avec débit de biogaz et concentration en CH₄ connus

Paramètres	Niveau d'incertitudes
Données par défaut	

Taux de captage	
Zone sans captage	± 0%
Zone en exploitation reliée à une unité de combustion	- 50%, + 30%
Zone avec couverture semi-perméable	- 20%, + 15%
Zone avec couverture imperméable minérale	- 10%, + 10%
Zone avec couverture de type géomembrane	- 0%, + 10%
Mesures	
Taux de CH ₄	± 20 %
Débit de biogaz	± 20%

Autres casiers : estimation de la production à partir de la formule d'ordre 1 décrite dans l'annexe 1 paragraphe 4

Paramètres	Niveau d'incertitudes
Données par défaut	
FE0	> ± 50%
Constantes de dégradation (Ki)	
K1	- 60%, + 40%
K2	- 30%, + 40%
K3	- 50%, + 25%
Fraction de déchets de constante Ki (Pi)	
P1	- 40%, + 50 %
P2	- 60%, + 0 %
P3	- 50%, + 20 %

3.2 Incertitudes sur les émissions de CH₄

Paramètres	Niveau d'incertitudes
Données par défaut	
Taux de captage	
Zone sans captage	± 0%
Zone en exploitation reliée à une unité de combustion	-50%, + 30%
Zone avec couverture semi-perméable	- 20%, + 15%
Zone avec couverture imperméable minérale	- 10%, + 10%
Zone avec couverture de type géomembrane	- 0%, + 10%
Taux d'oxydation dans la couverture	- 100%, + 100%

4. INCERTITUDES SUR LE CALCUL DES EMISSIONS DE CO₂

Paramètres	Niveau d'incertitudes
Hypothèses de calcul	

PCH ₄	> ±50%
Taux de captage	
Zone sans captage	± 0%
Zone en exploitation reliée à une unité de combustion	-50%, + 30%
Zone avec couverture semi-perméable	- 20%, + 15%
Zone avec couverture imperméable minérale	- 10%, + 10%
Zone avec couverture de type géomembrane	- 0%, + 10%
CO ₂ /CH ₄	- 100%, + 50%