

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-17-164646-05731A

05/09/2017

**Valeurs de référence du flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>  
d'origine naturelle biogénique des sols**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



# Valeurs de référence du flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> d'origine naturelle biogénique des sols

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

## Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Zbigniew POKRYSZKA, Francis ADELISE, Régis FARRET, Stéphane LAFORTUNE, Élodie MICHEL et Sanka RUPASINGHE.

## PREAMBULE

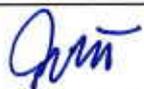
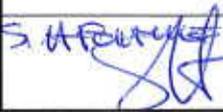
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification		Approbation
NOM	Z. POKRYSZKA	S. LAFORTUNE	R. FARRET	C. FRANCK
Qualité	Référent Technique Emission et Transfert Souterrain de Gaz Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz Direction des Risques du Sol et du sous-sol,	Responsable de l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz Direction des Risques du Sol et du sous-sol,	Délégué Appui Technique Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa				

## RESUME

Le méthane et le dioxyde de carbone sont naturellement émis par les sols comme produits de différents processus, principalement biologiques. Les émissions sont habituellement faibles, mais présentent des variations spatiales et temporelles importantes. Les données quantitatives concernant le flux naturel biogénique de gaz du sol en France sont encore très limitées.

Pourtant, il est important de connaître les niveaux des flux de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> observés habituellement sur les sites considérés comme naturels et non pollués, afin de distinguer ces émissions naturelles biogéniques de possibles anomalies. Ces dernières peuvent être d'origine anthropique (post-minières, induites par une pollution, un enfouissement de déchets, une fuite de gaz de ville, etc.), ou naturelles (origine principalement géologique).

A partir des données expérimentales, acquises par l'INERIS depuis plus de 20 ans, une analyse des émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> d'origine naturelle biogénique a été réalisée. Elle a confirmé, d'une part, l'absence d'un flux significatif de CH<sub>4</sub> sur les sols normalement drainés et, d'autre part, la présence généralisée d'un flux largement mesurable de CO<sub>2</sub> sur pratiquement tous les sols non-imperméabilisés.

Le flux naturel de CO<sub>2</sub> est soumis à des variations saisonnières généralisées et très prononcées. En moyenne, l'émission est franchement la plus importante en été et la plus faible en hiver. Elle est intermédiaire au printemps et en automne. Les variations saisonnières sont en moyenne beaucoup plus importantes que l'influence d'autres paramètres caractérisant les sites étudiés (zone climatique, usage du sol, géologie, pédologie...).

A partir d'un traitement statistique des données, les domaines des valeurs normales, des valeurs moyennes, des limites basses, des limites hautes et des valeurs les plus fréquentes ont été établis, pour des configurations caractéristiques. Par exemple, les domaines des flux de CO<sub>2</sub> les plus probables sur les sites naturels sont respectivement de 0 à 6 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> en hiver et de 3 à 20 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> en été. Les seuils supérieurs signalant un flux anormalement élevé et correspondant à une anomalie d'origine naturelle ou anthropique ont été évalués respectivement à 12 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, pour les conditions hivernales, et à 30 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, pour les conditions estivales.

Des recommandations pratiques ont également été émises pour mener une reconnaissance ou une évaluation des émissions gazeuses des sols d'un site.

Les résultats de l'étude peuvent servir des données de référence des émissions naturelles, nécessaires pour l'évaluation de l'aléa « gaz de mine ». Ils pourront également servir en dehors du contexte minier et post-minier : impact lié à la pollution industrielle des sols, impact d'un stockage souterrain, enfouissement des déchets, etc.

## MOTS-CLES

Mine, Après-Mine, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, Flux, Mesures *in situ*,

## TERRITOIRE

France métropolitaine



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
<b>2. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES ESSENTIELS .....</b>	<b>9</b>
2.1 Notions générales sur l'émission biogénique de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> .....	9
2.2 Flux de CO <sub>2</sub> .....	10
2.3 Flux de CH <sub>4</sub> .....	11
<b>3. TECHNIQUE DE MESURES EMPLOYÉE .....</b>	<b>13</b>
3.1 Principe .....	13
3.2 Validation métrologique de la méthode .....	14
3.3 Etendue et seuils de mesures .....	15
3.4 Précision et répétabilité .....	15
3.5 Caractéristiques pratiques de la méthode .....	15
<b>4. DONNEES ET SITES PRIS EN COMPTE.....</b>	<b>17</b>
4.1 Origine des données .....	17
4.2 Données retenues pour l'analyse et leur nature .....	18
<b>5. PARAMETRES CONSIDERES DANS L'ETUDE.....</b>	<b>21</b>
5.1 Facteurs d'influence potentiels .....	21
5.2 Facteurs pris en compte dans l'analyse de données.....	21
5.2.1 Saisons.....	22
5.2.2 Occupation du sol.....	22
5.2.3 Contexte climatique général du secteur.....	22
5.2.4 Contexte géologique général du sous-sol.....	23
5.2.5 Contexte pédologique.....	24
5.3 Facteurs non analysés .....	24
<b>6. RESULTATS : FLUX DE CH<sub>4</sub> .....</b>	<b>25</b>
<b>7. RESULTATS : FLUX DE CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>25</b>
7.1 Ensemble des données .....	25
7.2 Flux de CO <sub>2</sub> au regard du cycle climatique annuel.....	26
7.3 Flux de CO <sub>2</sub> au regard de l'occupation du sol .....	27
7.4 Flux de CO <sub>2</sub> au regard du contexte climatique général .....	30
7.5 Flux de CO <sub>2</sub> vs contextes géologique et pédologique .....	32

7.6	Fréquences et leur distribution .....	35
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>41</b>
8.1	Bilan général .....	41
8.2	Recommandations .....	42
<b>9.</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>47</b>

## **1. INTRODUCTION**

Le méthane et surtout le dioxyde de carbone sont naturellement émis par les sols comme produits de différents processus biologiques localisés dans la biosphère peu profonde. La quantité de gaz émise est globalement faible, mais elle présente des variations spatiales et temporelles importantes.

Dans ce domaine, les données quantitatives concernant le flux naturel biogénique de gaz du sol en France sont encore très limitées. D'après la recherche effectuée, il n'existe aucune base de données de référence formalisée en la matière.

Pourtant, il est important de connaître les niveaux des flux de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> observés habituellement sur les sites considérés comme naturels et non pollués (« bruit de fond »), afin d'être en mesure de distinguer ces émissions naturelles des possibles anomalies d'origine anthropiques, post-minières, induites par une pollution, liées à un enfouissement de déchets, une fuite de gaz de ville, des fuites de biogaz de fosses septiques, etc.

Il en est de même, en ce qui concerne l'identification et la délimitation des anomalies gazeuses naturelles, dont les origines peuvent aussi être multiples (géochimique peu profonde, volcanique, crustale...).

Dans le cadre de programmes de recherche (ANR, RFCS...), de travaux menés pour l'Administration et les agences d'Etat ainsi que de programmes internes, l'INERIS a acquis un nombre significatif de données expérimentales. A partir de ces données, l'INERIS a proposé d'établir un référentiel des émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> d'origine naturelle, afin d'aboutir à :

- une évaluation du domaine des valeurs habituelles considérées comme normales, avec l'établissement des valeurs moyennes, des limites basses, des limites hautes et des valeurs les plus fréquentes ;
- une définition des principales caractéristiques du flux gazeux selon les paramètres environnementaux identifiés comme les plus importants.

Les résultats obtenus peuvent avoir deux utilisations principales :

- Les valeurs de référence des émissions naturelles ainsi établies viennent compléter et mettre à jour le guide méthodologique « Evaluation de l'aléa Gaz de mine », établi par l'INERIS en 2015 (Pokryszka et al., 2015) ;
- La base de données constituée pourra également servir en dehors du contexte minier et post-minier, par exemple pour l'évaluation de l'impact lié à la pollution des sols ou encore de l'impact d'autres utilisations du sol et du sous-sol (stockage souterrain, enfouissement des déchets...).

La présente étude a été réalisée dans le cadre du programme DRS-03, programme d'appui technique au Bureau du Sol et du Sous-sol (B3S) du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, avec une contribution du projet européen RFCS (Research Fund for Coal and Steel) MERIDA.

Nota : Les données de l'INERIS prises en compte dans l'analyse correspondent uniquement aux flux locaux diurnes, mesurés directement à la surface du sol. Les flux sont exprimés en « cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> », dans les conditions normales de température et de pression (CNTP). Pour le CO<sub>2</sub> : 1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> = 0,033 mg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. Pour le CH<sub>4</sub> : 1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> = 0,012 mg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.



## **2. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES ESSENTIELS** <sup>1</sup>

### **2.1 NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉMISSION BIOGÉNIQUE DE CO<sub>2</sub> ET DE CH<sub>4</sub>**

La plupart des sols émettent naturellement une quantité plus ou moins importante de gaz d'origine biologique. Il s'agit principalement du CO<sub>2</sub> et, dans une moindre mesure, du CH<sub>4</sub>.

L'émission naturelle de dioxyde de carbone par un sol est communément appelée "respiration du sol". Le dioxyde de carbone émis a pour origine des processus biologiques et chimiques. La respiration des racines des plantes, de leurs composantes biologiques associées, ainsi que la décomposition de la matière organique par les microorganismes et la faune du sol, constituent les sources biogéniques de dioxyde de carbone d'un sol (Ryan et al., 2005).

L'intensité de la production du CO<sub>2</sub> dans les sols est donc très liée au contexte environnemental et biologique local. Elle est a priori beaucoup plus importante en zones végétalisées et riches en matière organique contenue dans le sol que dans des zones arides ou dans celles où le sol est pauvre.

Concernant le méthane, les mécanismes de sa production dans le sol sont très complexes. En effet, la biosphère peu profonde abrite en parallèle des populations bactériennes responsables de la production de méthane par la décomposition de la matière organique en absence d'oxygène (bactéries méthanogènes anaérobies) et des bactéries responsables de l'oxydation du méthane en dioxyde de carbone (bactéries méthanotrophes aérobies).

Ces deux activités microbiennes sont antagonistes et interdépendantes. A l'interface sol-atmosphère, le flux de méthane d'origine biologique est donc la résultante de la compétition entre les phénomènes de production et de consommation de ce gaz (Roger et al., 2003).

Les sols inondés ou submergés (rizières, zones marécageuses, sols d'estuaires, tourbières...) sont propices à l'émission de méthane. La production de méthane dans les couches anaérobies de ces sols est globalement supérieure à son oxydation dans les parties aérobie.

A l'inverse, les sols continuellement exondés consomment une grande majorité voire la totalité du méthane éventuellement produit dans des couches plus profondes, plus humides et peu oxygénées. Les sols de cette nature font donc globalement apparaître des flux de CH<sub>4</sub> faibles à nuls en direction de l'atmosphère.

Il est à souligner que, sur certains sites naturels, aux flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> d'origine biologique, il convient d'associer des flux d'origine géologique.

Toutefois, en ce qui concerne le flux de CO<sub>2</sub>, dans le climat tempéré, les flux d'origine biogénique sont largement majoritaires, en dehors des secteurs géologiques très particuliers. Il s'agit notamment des zones concernées par des émissions gazeuses à partir des failles géologiques majeures, par une activité hydrothermale, par une activité volcanique ou encore par une anomalie géochimique importante. En France, ces secteurs sont relativement bien connus.

---

<sup>1</sup> Ce chapitre est en partie issu de la synthèse bibliographique réalisée antérieurement par l'INERIS dans le cadre du programme ANR « Sentinelle » (Lafortune, 2009)

## 2.2 FLUX DE CO<sub>2</sub>

D'après les sources bibliographiques les plus probantes, dans les conditions climatiques tempérées en Europe, le flux annuel moyen de CO<sub>2</sub> observé dans un environnement classique normal (prairies, forêts, terres agricoles) se situerait dans une fourchette variant approximativement de 0,5 à 3 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (von Arnold et al., 2005). Ce flux peut être localement bien plus important, mais dépasserait rarement 5 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

En Amérique du Nord, dans des territoires bénéficiant du climat tempéré, les flux moyens annuels constatés à la surface des zones de types prairies, champs agricoles et forêts sont situés entre environ 1,5 et 2,5 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (Raich et Schlesinger, 1992). Toutefois, les mesures sur certains sites ont abouti à des moyennes mensuelles dépassant 5 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

Une forte influence du cycle climatique annuel sur l'intensité de l'émission de CO<sub>2</sub> du sol a été démontrée par cette dernière étude. Les flux maximaux ont systématiquement été observés en été et ceux minimaux en hiver. Un exemple de cette évolution saisonnière est montré sur la tableau 1.

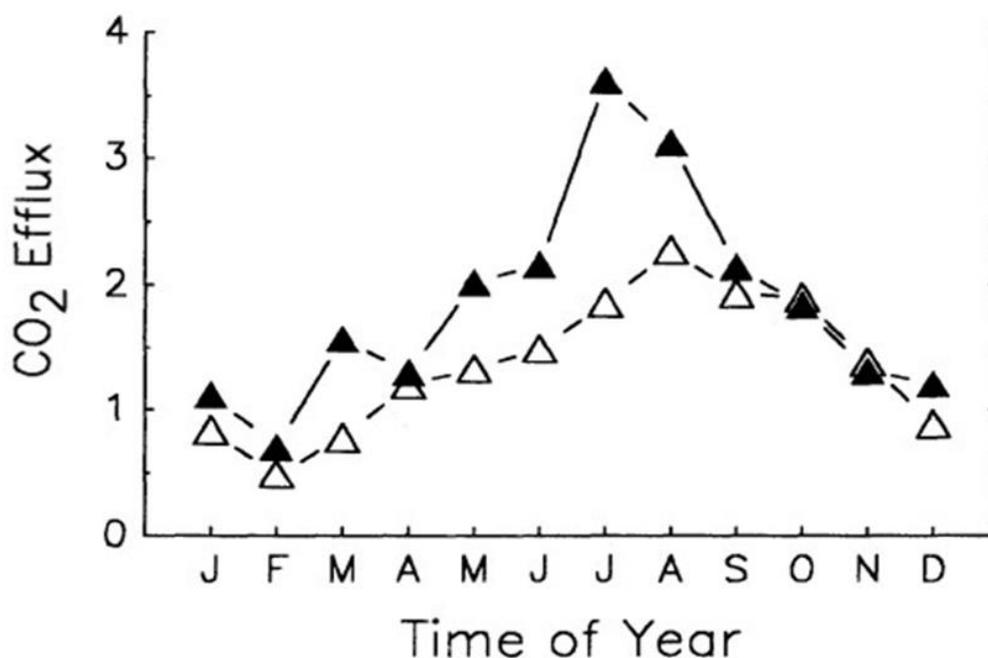


Figure 1. Flux moyen mensuel de CO<sub>2</sub> en gC jour<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> mesuré pendant deux ans sur le sol d'une forêt de conifères aux Etats Unis, (Raich and Schlesinger, 1992, modifié)<sup>2</sup>

Cette variation à l'échelle annuelle de l'activité biologique productrice du CO<sub>2</sub> dans le sol, liée aux conditions climatiques saisonnières, est mentionnée par d'autres sources bibliographiques (Kiefer et Amey, 1992 ; Bajracharya et al. 2000)

Il est à noter que les domaines de flux observés respectivement dans les conditions européennes (von Arnold et al., 2005) et nord-américaines (Raich et Schlesinger, 1992) sont très similaires.

<sup>2</sup> Pour le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> : 1 gC jour<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> vaut 1,3 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (CNTP)

### 2.3 FLUX DE CH<sub>4</sub>

Dans les conditions climatiques européennes, le flux de méthane d'origine biologique d'un **sol normalement drainé** est très faible, habituellement inférieur à  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , pour les valeurs ponctuelles maximales, et inférieur à  $0,04 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , pour les valeurs moyennes issues de plusieurs mesures réalisées sur des surfaces plus importantes (von Arnold et al. 2005).

En dehors des anomalies d'origine géologique (ex. migration de gaz profonds), le flux de CH<sub>4</sub> sur des sites naturels peut localement être supérieur à  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , mais seulement dans des environnements bien spécifiques, très humides et riches en matière organique de type tourbières, sols boueux ou marécageux, rizières, etc. (Ryan et al., 2005).



### 3. TECHNIQUE DE MESURES EMPLOYÉE

Toutes les mesures prises en compte dans la présente étude ont été réalisées au moyen de la méthode spécifique CARE (Chambre à Accumulation et à Recirculation Externe) mise au point et brevetée par l'INERIS (INERIS, 1998). Il s'agit d'une méthode utilisée par l'INERIS depuis presque 25 ans et éprouvée dans les conditions réelles sur de très nombreux sites présentant des caractéristiques très variées (sites naturels, décharges, mines, sites post-miniers, sols pollués, stockages souterrains, anomalies géologiques...).

La description exhaustive de la méthode et de ses applications est disponible dans plusieurs documents et publications spécifiques (Pokryszka 1996 ; INERIS, 1996 ; Pokryszka et Tauziède, 2000 ; Pokryszka et al., 2010). Ici, on présente quelques informations et caractéristiques essentielles.

#### 3.1 PRINCIPE

La méthode INERIS CARE peut être classée comme une technique intermédiaire entre le principe statique et le principe dynamique. Il s'agit d'une **méthode de mesure directe du flux gazeux émis localement à la surface du sol**. Ses principes sont présentés sur la figure 2.

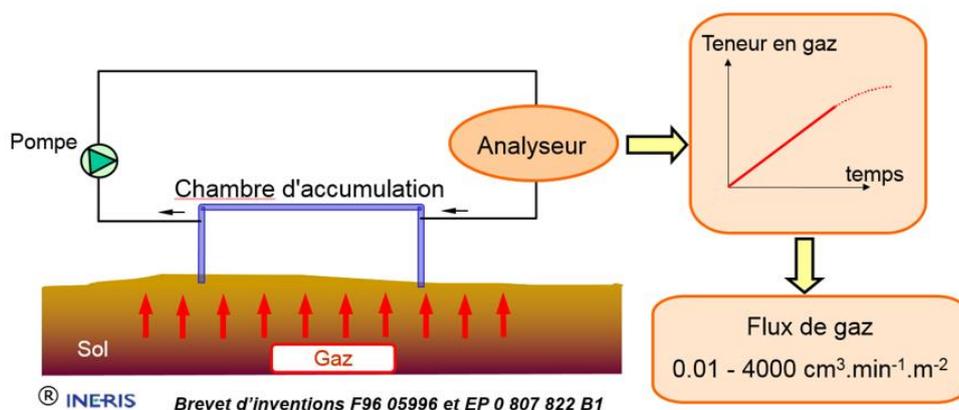


Figure 2. Chambre à accumulation et à recirculation externe de l'INERIS.  
Principe de la méthode.

La méthode consiste à couvrir au moyen d'une enceinte (chambre) une certaine surface de sol (dans le cas présent 0,25 m<sup>2</sup>) d'une manière quasi hermétique sans modifier significativement le milieu. Cette opération crée un « effet d'accumulation » qui constitue le mécanisme de base permettant de réaliser une mesure du flux local de gaz. En effet, les gaz émis par la surface recouverte s'accumulent alors dans l'atmosphère confinée de la chambre constituée initialement de l'air quasi exempt ou peu chargé en gaz à mesurer (CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> dans le cas présent).

On observe alors une croissance progressive de la teneur moyenne en gaz à l'intérieur de la chambre. Dans une première période après l'installation de la chambre, cette croissance est pratiquement proportionnelle au temps et peut être assimilée à une fonction linéaire de la teneur en fonction du temps (cf. figure 2).

Dans la méthode de l'INERIS, c'est cette partie du phénomène qui est observée et traitée pour en déduire le flux local de gaz. Dans les conditions standards, la durée de mesure proprement dite (hors installation et déplacement du dispositif) est de 3 minutes environ.

Les mesures fournissent, pour chaque emplacement de la chambre, les valeurs du flux local émis par la surface couverte. Elles sont exprimées en unité de volume (ou de masse) d'un gaz donné par unité de temps et par unité de surface du sol.

Les mesures du flux sont complétées par les enregistrements, pour chaque point de mesure, des conditions locales de pression atmosphérique et de température, afin de pouvoir exprimer les valeurs observées du flux gazeux dans les conditions normales de pression et de température ou encore de pouvoir les exprimer en unité de masse.

Ceci est nécessaire pour pouvoir prendre en compte l'évolution des conditions ambiantes d'un point à l'autre et notamment pour pouvoir comparer les résultats obtenus sur les différents points ou zones ou encore pour comparer ces résultats avec d'autres données (mesures antérieures, données bibliographiques, etc.).

### **3.2 VALIDATION MÉTROLOGIQUE DE LA MÉTHODE**

Dans la phase de développement de la méthode, ses caractéristiques métrologiques ont été vérifiées et validées sur un banc d'essai et *in situ*.

Pour le cas du méthane, la validité métrologique de la méthode de l'INERIS a été vérifiée et confirmée dans le cadre d'un programme d'inter-comparaison des différentes méthodes, réalisé sous la direction de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) sur un banc d'essais et sur un site réel (Pokryszka et Jodart, 1994 ; Savanne et al., 1995 ; ADEME, 1997 ; Savanne et al., 1997).

La validation métrologique du dispositif utilisé actuellement pour la mesure du flux de CO<sub>2</sub> a été finalisée dans le cadre du programme ANR CO<sub>2</sub> « GéoCarbone Monitoring » (Pokryszka et Charmoille, 2008 ; Pokryszka et al., 2010).

### 3.3 ETENDUE ET SEUILS DE MESURES

Pour les deux gaz concernés, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>, la méthode offre une possibilité de réaliser les mesures dans une large gamme de flux allant du niveau très faible (de l'ordre de 0,01 à 0,1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) jusqu'au domaine des émissions extrêmement fortes de 4000 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> environ. Une estimation convenable des flux encore plus importants est également possible.

Les seuils inférieurs de détection et de mesure sont très bas et adaptés à chaque gaz. Pour le CO<sub>2</sub>, le seuil de mesure est de 0,1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, soit une valeur largement inférieure au niveau habituel d'émission d'origine biogénique observé dans les conditions climatiques européennes (voir chapitre 2). Le dispositif permet aussi de détecter un flux (ou son évolution) à un niveau plus faible, de l'ordre de 0,05 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, avec cependant une incertitude plus importante.

Pour le méthane, le dispositif permet une observation encore plus fine, car le seuil inférieur de mesure est de 0,02 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> et le seuil de détection peut être estimé à 0,01 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> voire moins. Ces deux seuils sont adaptés au niveau habituel de l'émission naturelle de méthane d'origine biologique à la surface du sol qui est normalement bien plus faible que le flux de dioxyde de carbone.

### 3.4 PRÉCISION ET RÉPÉTABILITÉ

La précision des mesures du flux de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> a été vérifiée expérimentalement sur banc d'essais au laboratoire, durant la phase de la validation métrologique de la méthode.

Dans les domaines respectifs des flux les plus couramment rencontrés sur le terrain pour les deux gaz (0 à 400 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, pour le méthane et 0 à 3000 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, pour le dioxyde de carbone), les écarts entre le flux réel et le flux mesuré par le dispositif ne dépassent pas en moyenne  $\pm 5\%$  (Pokryszka et Jodart, 1994 ; Savanne et al. 1995 ; Pokryszka et Charmoille, 2008).

Les résultats obtenus en laboratoire ont été confirmés dans les conditions réelles sur le terrain (décharges d'ordures ménagères et sites naturellement émissifs de gaz), dans des conditions météorologiques variées.

Plusieurs essais réalisés *in situ* ont permis de constater que, indépendamment du niveau du flux mesuré pour les deux gaz, les écarts relatifs des mesures par rapport à la valeur moyenne d'une série de mesures sont assez limités et n'excèdent pas 10 %. Cette dispersion des valeurs mesurées intègre des évolutions naturelles possibles du flux gazeux lui-même entre les différentes mesures. Elle peut donc être considérée comme l'imprécision maximale de la méthode, dans le cas de son utilisation normale *in situ*.

### 3.5 CARACTÉRISTIQUES PRATIQUES DE LA MÉTHODE

Le dispositif CARE utilisé pour réaliser les mesures est relativement simple et facile à manœuvrer. Le temps nécessaire pour une mesure, y compris le temps d'installation de la chambre, est de l'ordre de 5 à 10 minutes.

Ceci permet de multiplier le nombre de mesures réalisées pendant un temps donné sur un espace délimité. Selon les difficultés liées au site et le temps nécessaire au déplacement entre les différents emplacements de mesure, il est possible de réaliser entre 20 à 60 mesures ponctuelles par jour.

Il existe aussi une version automatisée de la méthode (dispositif DAMEG) qui permet de suivre, en un point donné, l'évolution du flux gazeux dans le temps.

Après sa mise en place, le dispositif DAMEG réalise de manière autonome des mesures répétées avec une fréquence modulable, sans présence d'un opérateur, tout en disposant d'une autonomie énergétique suffisante pour plusieurs jours, voire plus d'une semaine.

## **4. DONNEES ET SITES PRIS EN COMPTE**

### **4.1 ORIGINE DES DONNÉES**

L'INERIS réalise les mesures du flux gazeux à l'interface sol/air depuis plus de 25 ans. Elles ont été réalisées pour la plupart au moyen de la méthode de CARE présentée ci-avant dans le chapitre 3.

Le plus souvent, les mesures sont faites pour diagnostiquer des sites affectés par des émissions gazeuses anormales, ou des sites potentiellement affectés, pour lesquels une reconnaissance s'impose, du fait d'une ancienne activité industrielle. Dans la plupart des cas, il s'agit de sites situés à la surface d'anciennes mines souterraines.

Dans le cadre de ces expertises, des mesures comparatives sont souvent réalisées sur des sites naturels, situés dans le voisinage, mais en dehors de secteurs pouvant être affectés par des émissions d'origine anthropique.

Le retour d'expérience des différents diagnostics réalisés au fil de temps a mis en évidence le besoin d'avoir des données de référence structurées qui concernent l'émission de gaz des sites naturels selon leurs caractéristiques, ainsi que les variations de cette émission dans le temps.

Pour cette raison, des mesures spécifiques ont été entreprises entre 2007 et 2014, dans le cadre d'une étude interne de l'INERIS et en partie dans le cadre d'un programme ANR (ANR Sentinelle, 2013). Une quinzaine de sites ont été choisis pour réaliser des mesures périodiques. Ils se situent dans des contextes géologiques variés. Le choix des emplacements a aussi tenu compte des principaux contextes biologiques et des principales zones climatiques.

Sur chacun de ces sites, l'INERIS a réalisé 8 à 10 campagnes de mesures exploratoires du flux naturel de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>. Leur objectif était d'amorcer une base de données de référence dans les conditions climatiques, géologiques et biologiques caractéristiques de la France.

Par ailleurs, certaines expérimentations réalisées *in situ* dans le cadre de programmes de recherche (ANR, RFCS...) nécessitaient également l'acquisition de données sur l'émission des gaz du sol, par exemple, pour établir l'état géochimique initial des sites et, ensuite, pour suivre leurs évolutions éventuelles (ANR Sentinelle, ANR CIPRES...).

Les résultats de tous ces différentes mesures, acquis entre 1995 et 2016, ont été regroupés et constituent une source initiale de données pour la présente étude.

Il est à noter que certains résultats obtenus antérieurement ont déjà fait l'objet de publications (de Donato et al., 2010 ; ANR Sentinelle, 2013 ; Lafortune et al., 2013 ; Pokryszka et al., 2014 ; Gombert et al., 2014 ; Gal et al., 2014 ; Total, 2015...). Ils ont été intégrés dans le cadre de la présente étude.

## 4.2 DONNÉES RETENUES POUR L'ANALYSE ET LEUR NATURE

La base de données constituée pour la présente étude contient les résultats sélectionnés de l'ensemble des mesures du flux gazeux des sols, réalisées par l'INERIS entre 1995 et 2016. Le choix des données a été fait selon leur représentativité et leur adéquation aux objectifs de l'étude.

En plus de chercher des configurations aussi variables que possible, les deux critères suivants ont été imposés pour la sélection des sites :

- l'absence ou une contribution négligeable des émissions anthropiques liées à une ancienne activité industrielle, une pollution des sols et des émissions naturelles d'origine géologique ;
- la disponibilité de données obtenues au cours d'au moins deux campagnes de mesure, réalisées sur les mêmes emplacements et à au moins deux périodes de l'année différentes. Ceci répond à une des pistes principales envisagées dans l'étude, à savoir : évaluer les variations saisonnières de la production de gaz dans les sols et des transferts gazeux à l'interface sol/atmosphère.

Les sites retenus, leur localisation et leurs caractéristiques principales sont présentés dans le tableau 1. La répartition des données disponibles entre les saisons, ainsi que le cadre de l'acquisition de ces données sont également précisés dans le tableau.

Le choix et la définition des caractéristiques des sites présentées dans le tableau sont expliqués et discutés dans le chapitre 5.

Les données sélectionnées proviennent, en proportions inégales, de toutes les origines suivantes, mentionnées précédemment (cf. tableau 1) :

- mesures spécifiques dédiées à l'acquisition des données de référence. Elles constituent une grande majorité des données sélectionnées (environ 75%) et ont été faites sur les sites A, C, D, E, F, H, J, K, L, M, N, Q, T, V, W et X ;
- mesures comparatives ponctuelles réalisées sur les sites naturels, dans le cadre du diagnostic de sites affectés ou potentiellement affectés par des émissions gazeuses anormales : sites G, I, N, O, R et S. Leur contribution à la base de données s'élève à 15% environ ;
- investigations réalisées dans le cadre de l'établissement de l'état géochimique initial et de surveillance de sites expérimentaux : sites P et U ;
- mesures ponctuelles effectuées dans le cadre de diagnostic ou de reconnaissance des sites potentiellement affectés par des émissions gazeuses anormales : sites B et G. Pour ces sites, les données prises en compte correspondent uniquement aux emplacements pour lesquels il n'y a aucune influence anthropique significative.

Dans la constitution de la base de données, les valeurs connues pour avoir été acquises dans des conditions météorologiques extrêmes pouvant perturber de manière évidente les flux gazeux des sols (vent très fort, pluie abondante, gel des sols, couverture neigeuse...) ont été éliminées. Il en est de même pour les mesures réalisées sur les surfaces anormalement humides ou saturées en eau.

Repère	Nom	Localisation (département)	Contexte biologique			Géologie	Climat	Répartition des mesures entre les saisons				Cadre de l'acquisition des données*
			prairies et pelouses	forêts et bois	champs et jardins potagers			Hiver	Printemps	Eté	Automne	
A	Villers-Cotterêts	2	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
B	Manosqe Nord	4	✓	✓		Sédimentaire : carbonates	Méditerranéen		✓		✓	1, 3
C	Reims La Veuve	15	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
D	Vierzon	18	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
E	Uzerche	19	✓	✓	✓	Métamorphique : schistes	Continental	✓	✓	✓	✓	1, 2
F	Poupry	28	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
G	Grand Combe	30	✓	✓	✓	Sédimentaire : Carbonifère	Méditerranéen	✓		✓		4
H	Brion	36	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
I	La Motte d'Aveillans	38	✓	✓		Sédimentaire : Carbonifère	Continental	✓	✓	✓	✓	4
J	La Ferté St Aubin	45	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
K	Montfaucon	46	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Continental	✓	✓	✓	✓	1, 2
L	Audun le Roman	54	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Continental	✓	✓	✓	✓	1, 2
M	Verdun	55	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Continental	✓	✓	✓	✓	1, 2
N	Etziing	57	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Continental	✓	✓	✓	✓	1, 2, 3
O	Freyming-Cocheren	57	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Continental	✓	✓	✓		1, 3
P	Catenoy	60	✓			Sédimentaire : carbonates	Océanique		✓	✓	✓	2
Q	Verneuil en Halatte	60	✓	✓	✓	Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
R	Brassac	63	✓		✓	Sédimentaire : Carbonifère	Continental	✓		✓	✓	4
S	Messeix	63	✓			Métamorphique Sédimentaire : Carbonifère	Continental	✓		✓		4
T	Gan Sud	64	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Océanique	✓	✓	✓	✓	1
U	Jurançon Sud	64	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique Sédimentaire : carbonates	Océanique	✓	✓	✓	✓	1, 2
V	Lacommande	64	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Océanique	✓	✓	✓	✓	1
W	Pau Nord	64	✓	✓	✓	Sédimentaire : détritique	Océanique	✓	✓	✓	✓	1
X	Le Fraisse	87	✓	✓	✓	Plutonique : granite	Continental	✓	✓	✓	✓	1, 2

Tableau 1. Caractéristiques des sites de mesure retenus

\* 1 : fonds propres de l'INERIS, 2 : programme de recherche ANR,  
3 : appui pour l'Administration, 4 : appui pour Géoderis

Il est à remarquer que, pour la plupart des sites, les mesures disponibles sont assez étoffées. Elles couvrent les 4 saisons du cycle annuel et ont été répétées durant 2 années de suite ou plus.

Compte tenu des caractéristiques des sites sélectionnés et des mesures retenues, on peut conclure que les données analysées respectent les deux principes suivants :

- elles correspondent uniquement aux flux gazeux diurnes, mesurés directement à la surface des sols,
- ces flux sont *a priori* d'origine naturelle biologique ou très majoritairement biologiques.



## **5. PARAMETRES CONSIDERES DANS L'ETUDE**

### **5.1 FACTEURS D'INFLUENCE POTENTIELS**

Les origines et les processus de production de gaz dans la biosphère peu profonde ainsi que les mécanismes d'échanges gazeux entre les sols et l'atmosphère sont nombreux et très complexes. Par conséquent, les facteurs influençant le flux gazeux des sols sont très nombreux.

Selon leur nature et l'horizon temporel de leur influence, ils peuvent être classés, de manière très simplifiée, en deux familles :

- les facteurs d'influence généralisée ou à long terme.  
Dans cette famille on retrouvera notamment tous les facteurs environnementaux, biologiques, climatiques, géologiques, pédologiques, etc., qui déterminent la nature des sols et conditionnent le développement et l'évolution de la vie biologique dans le sol et à la surface,
- les facteurs d'influence locale ou à court et moyen terme.  
On retrouvera ici principalement les facteurs météorologiques locaux qui influencent le transfert des gaz du sol. Pour certains, ils peuvent aussi modifier temporairement le cycle normal de l'activité biologique des sols. Ces facteurs sont notamment la variation de la pression barométrique, l'évolution de la température ambiante (dans le cycle diurne/nocturne et dans la journée), l'ensoleillement, la pluie, le vent, la neige, le gel... Tous ces facteurs peuvent interagir mutuellement. De plus, pour la plupart, ils peuvent agir dans les deux sens, c'est-à-dire qu'ils peuvent amplifier ou, au contraire, freiner les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, en fonction du sens et de l'ampleur de leur évolution.

La liste n'est bien évidemment pas exhaustive. En effet, certaines caractéristiques particulières locales sur un site donné peuvent aussi influencer le flux, aussi bien à long terme (par exemple un microclimat local ou un battement saisonnier important de la nappe phréatique) qu'à court terme (par exemple, présence d'un sol très perméable ou d'une fracturation importante du substratum rocheux favorisant les effets thermiques).

### **5.2 FACTEURS PRIS EN COMPTE DANS L'ANALYSE DE DONNÉES**

Les caractéristiques des sites et les données disponibles ont permis de prendre en compte les facteurs a priori les plus pertinents, qui peuvent influencer le flux de gaz de manière généralisée ou à long terme, à savoir :

- les saisons du cycle climatique annuel,
- le contexte climatique général (zones climatiques),
- l'occupation du sol qui conditionne le contexte biologique,
- le contexte géologique général du sous-sol,
- et, partiellement, le contexte pédologique des sites.

### 5.2.1 SAISONS

Les limites des saisons ont été prises selon leur définition climatologique proposée par Météo-France ([www.meteofrance.fr/publications/glossaire](http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire)) : « le printemps de l'hémisphère Nord rassemble traditionnellement les mois de mars, avril et mai, l'été : juin, juillet et août, l'automne : septembre, octobre et novembre, l'hiver : décembre, janvier et février. L'été et l'hiver deviennent alors respectivement, en zone tempérée, les quarts le plus chaud et le plus froid d'un cycle annuel »

Afin d'éviter toute décision arbitraire, les données disponibles ont été classées selon cette définition, en fonction de la date de la réalisation des mesures et indépendamment des conditions météorologiques constatées sur site.

### 5.2.2 OCCUPATION DU SOL

Les trois principaux types d'occupation du sol retenus pour l'analyse sont respectivement :

- les prairies et les pelouses,
- les forêts et les bois,
- les champs et les jardins potagers.

Ce choix suit les approches classiques répertoriées dans la littérature scientifique. De plus, il s'agit des contextes biologiques les plus présents dans la France métropolitaine, donc les plus fréquemment rencontrés *in situ* lors des campagnes de mesure.

### 5.2.3 CONTEXTE CLIMATIQUE GÉNÉRAL DU SECTEUR

Le contexte climatique général des sites de mesure a été défini en recoupant plusieurs données bibliographiques, car quelques disparités existent en ce qui concerne l'interprétation, le classement et l'étendue de différentes zones climatiques en France métropolitaine ([www.meteofrance.fr](http://www.meteofrance.fr) ; Joly et al., 2010 ; Houot, 2003 ; [www.meteonature.com](http://www.meteonature.com) ; [www.alertes-meteo.com](http://www.alertes-meteo.com)...)

La figure 3 présente, à titre d'exemple, deux versions de la répartition du territoire entre les différentes zones climatiques prises en compte dans l'analyse.

Pour simplifier l'interprétation des données, 3 grandes zones climatiques ont été retenues :

- zone océanique, incluant les climats océanique et océanique dégradé,
- zone continentale, incluant les climats continental, continental dégradé et les climats de montagne,
- zone méditerranéenne, incluant les climats méditerranéen et méditerranéen dégradé.

Les sites ont été classés en fonction de leurs positions géographiques respectives. In fine, 3 classes du climat sont représentées dans la base de données, mais de manière inégale. En effet, seulement 2 sites appartiennent à la zone du climat méditerranéen (cf. tableau 1).

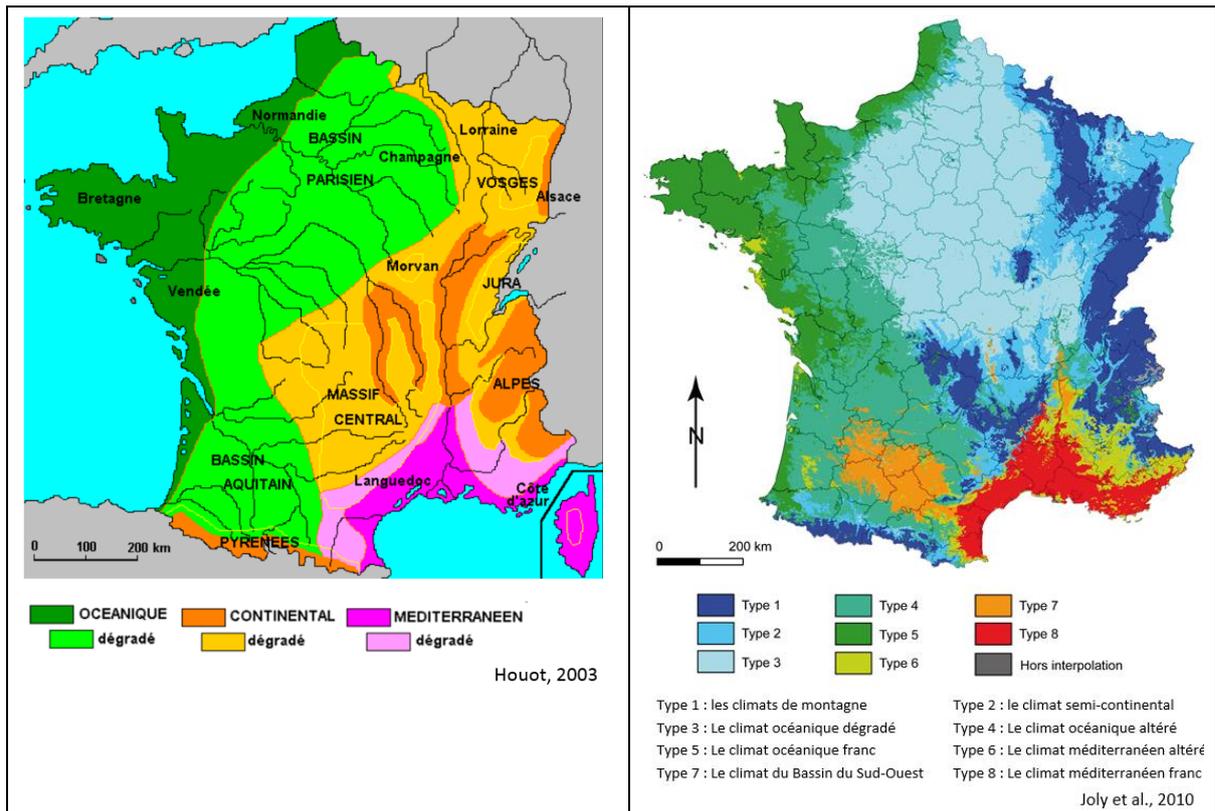


Figure 3. Zones climatiques en France

#### 5.2.4 CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL DU SOUS-SOL

L'analyse effectuée a porté sur le contexte géologique général du sous-sol peu profond au droit des sites étudiés. Ce contexte a été établi en utilisant les cartes géologiques disponibles ([infoterre.brgm.fr](http://infoterre.brgm.fr)). Selon leur position, les sites ont été classés selon les 3 grandes catégories du contexte géologique : sédimentaire, métamorphique et volcanique.

Comme il est possible de constater dans le tableau 1, une très large majorité des sites est située dans le contexte sédimentaire. Seuls 3 sites sur 24 disponibles se trouvent dans des contextes géologiques différents : 1 dans le contexte plutonique et 2 autres dans le contexte métamorphique (dont 1 partiellement).

Par conséquent, pour affiner l'analyse, la classe des sites positionnés dans le contexte sédimentaire a été divisée. Il a en effet été possible de répartir les données selon les trois sous-classes particulières relativement homogènes et contenant un nombre de sites par sous-classe suffisant pour réaliser une analyse statistique, à savoir :

- une sous-classe de la géologie sédimentaire détritique,
- une sous-classe de la géologie sédimentaire des roches carbonatées,
- une sous-classe des formations sédimentaires du Carbonifère.

Il est à remarquer que dans cette dernière sous-classe, on peut aussi rencontrer des roches détritiques et celles carbonatées. Toutefois, elle présente une particularité d'inclure des veines de charbon et d'autres roches contenant de la matière d'origine organique (schistes et grès charbonneux). Ces formations sont

connues comme pouvant contenir des gaz fossiles (CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> principalement) ou de pouvoir produire du CO<sub>2</sub> par oxydation de la matière carbonée.

Par conséquent, Il a été intéressant de traiter séparément les sites concernés, pour vérifier s'ils présentaient un niveau d'émission gazeuse différent (en l'occurrence supérieur) par rapport aux sites ne contenant pas de dépôts carbonés dans leur sous-sol.

Il est également à remarquer que, selon la position des points de mesure, les sites repérés S et U dans le tableau 1 sont concernés en parallèle par deux contextes géologiques différents. Cette particularité a été prise en compte dans l'analyse.

### **5.2.5 CONTEXTE PÉDOLOGIQUE**

Une tentative de préciser le contexte pédologique des sites étudiés a été entreprise en utilisant les cartes et les référentiels disponibles (INRA, 1998 ; AFES, 2009). Ce travail s'est montré assez fastidieux, car pour plusieurs sites, des sols de nature différente peuvent se trouver dans le secteur. Les résultats obtenus ont montré une grande dispersion des données, avec au moins 9 catégories des sols présentes.

Pour certaines catégories, les données disponibles sont très peu nombreuses ce qui rend l'analyse statistique difficile et peu probante à ce stade (cf. chapitre 7.5).

### **5.3 FACTEURS NON ANALYSÉS**

Les facteurs non analysés sont uniquement ceux agissant localement ou à court et moyen termes.

L'objectif principal de l'étude est de dégager les tendances à un niveau général et, de ce fait, la prise en compte de la variabilité des flux liée à des effets d'un ordre inférieur n'a pas été considérée comme prioritaire.

De plus, une telle analyse aurait été très fastidieuse et aurait nécessité une quantité très importante de données complémentaires, vraisemblablement difficiles à trouver, avec in fine très peu de probabilité d'aboutir à un résultat pertinent, du point de vue pratique. En effet, dans l'ensemble, les données concernant les flux gazeux sont très étoffées et les sites analysés sont nombreux. De même, les mesures qui constituent la source de ces données ont été réalisées dans des conditions climatiques et météorologiques très variables et, pour la plupart des sites, à plusieurs reprises.

On peut alors considérer qu'à l'échelle temporelle de l'analyse réalisée (de l'ordre du trimestre à plusieurs années), les influences locales à court terme s'atténuent ou se compensent mutuellement dans la masse de données traitées ou, en tout cas, que l'influence résultant de l'action des facteurs concernés est bien plus faible que celle des facteurs agissant à long terme.

On rappelle par ailleurs que les mesures réalisées dans les conditions météorologiques extrêmes pouvant perturber de manière évidente les flux gazeux des sols à court terme (pluie abondante, gel des sol, couverture neigeuse...) ont été exclues de l'analyse. Il en est de même pour les mesures réalisées sur les surfaces anormalement humides ou saturées en eau.

Ceci a sûrement conduit à réduire la variabilité des valeurs au sein de la base de données pouvant être éventuellement reliée à l'action des facteurs agissants localement et à court terme.

## 6. RESULTATS : FLUX DE CH<sub>4</sub>

Les très nombreuses campagnes de mesure réalisées sur l'ensemble des sites retenus pour la présente étude n'ont jamais permis d'observer, sur les sols normalement drainés, des flux naturels de méthane supérieurs à  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Ces résultats obtenus dans les environnements biologiques de types champs agricoles, prairies-pelouses ou forêt-bois corroborent les données bibliographiques citées dans le chapitre 2.

Sur un sol normalement drainé, les flux de CH<sub>4</sub> dépassant, le seuil de  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$  sont donc à considérer comme anormalement élevés.

## 7. RESULTATS : FLUX DE CO<sub>2</sub>

### 7.1 ENSEMBLE DES DONNÉES

Le tableau 2 ci-après présente les principaux paramètres statistiques de la population analysée de plus de 2650 flux locaux de CO<sub>2</sub> mesurés sur l'ensemble des 24 sites retenus pour l'étude.

Dans ce tableau figurent aussi les paramètres statistiques analogues obtenus en regroupant les valeurs selon les 4 saisons du cycle climatique annuel. Cette partie sera discutée en détail dans le chapitre suivant.

Paramètre	Unité	Ensemble des données	Hiver	Printemps	Été	Automne
nombre de sites	-	24	22	21	23	21
nombre d'observations	-	2674	744	532	684	714
minimum	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
maximum	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	26,4	10,4	21,5	26,4	25,6
médiane	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	4,8	2,3	4,3	9,0	5,9
moyenne	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	5,8	2,7	4,9	9,3	6,4
écart-type	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	4,1	1,8	3,2	4,3	3,6
coefficient de variation	%	71%	67%	64%	46%	56%
nombre de valeurs nulles	-	33	19	9	0	5
5 <sup>ème</sup> centile	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	0,8	0,3	1,0	3,3	1,2
3 <sup>ème</sup> quartile	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	8,3	3,7	6,8	11,7	8,4
95 <sup>ème</sup> centile	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	13,6	5,8	11,1	17,5	12,5
99 <sup>ème</sup> centile	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	19,4	8,7	15,9	21,5	17,8

Tableau 2. Principaux paramètres statistiques de la population analysée des flux locaux de CO<sub>2</sub> (CNTP : conditions normales de température et de pression)

L'analyse des données montre que la présence d'un flux largement mesurable et significatif voire très significatif de CO<sub>2</sub> a été observée sur l'ensemble des sites explorés, quels que soient leur contexte et la période de l'année. Le nombre des mesures montrant un flux non détectable (considéré nul) est très faible voire, dans l'ensemble des données, négligeable (1,2 % de la population).

Ainsi, pour l'ensemble de la population analysée, les valeurs du flux de CO<sub>2</sub> se trouvent dans un domaine variant de 0 à 26,4 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, avec une moyenne de 5,8 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. L'écart-type de la population est de 4,1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, ce qui donne un coefficient de variation assez élevé de 71%.

La médiane s'élève à 4,8 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> et est significativement inférieure à la moyenne (5,8 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>). Ceci laisse présumer une distribution franchement asymétrique de la fréquence des valeurs, avec une étendue plus importante orientée vers des valeurs fortes (cf. chapitre 7.6).

La position du 3<sup>ème</sup> quartile et du 95<sup>ème</sup> centile l'attestent. En effet, un quart des valeurs est supérieur à 8,3 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (3<sup>ème</sup> quartile) et 5% des valeurs sont supérieures à 13,6 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (95<sup>ème</sup> centile).

Une fraction de 1% des données se situe entre 19,4 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (99<sup>ème</sup> centile) et la valeur maximale de la population de 26,4 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

## 7.2 FLUX DE CO<sub>2</sub> AU REGARD DU CYCLE CLIMATIQUE ANNUEL

Malgré une variabilité importante du flux, mentionnée dans le chapitre précédent, une tendance globale est clairement observée selon les saisons du cycle climatique annuel.

Cette tendance est illustrée graphiquement sur la figure 4 et précisée numériquement par les paramètres statistiques donnés dans le tableau 2.

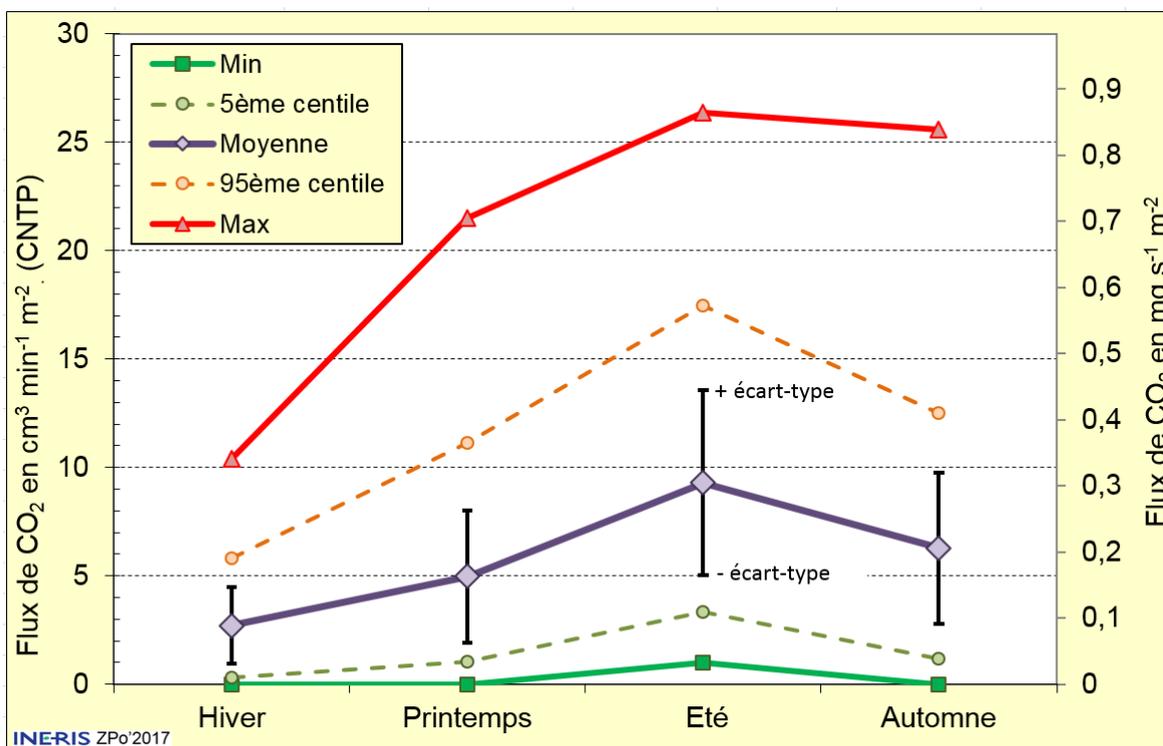


Figure 4. Evolution du flux de CO<sub>2</sub> entre les saisons du cycle climatique annuel.

En moyenne, l'émission de CO<sub>2</sub> est plus importante en été (valeur moyenne de 9,3 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) et plus faible en hiver (valeur moyenne de 2,7 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>). Elle est intermédiaire au printemps et en automne. Le ratio moyen entre l'été et l'hiver est de 3,5 environ. Il peut varier entre 2 et 5, principalement selon le

contexte d'usage des sols (contexte biologique) des sites étudiés. Les flux en automne sont en moyenne un peu plus importants que ceux observés au printemps.

Le test statistique de Student montre que, malgré une grande variabilité des valeurs au sein de chaque sous-population respective, les différences entre toutes les valeurs moyennes saisonnières sont largement significatives, avec un niveau de confiance supérieur à 99%.

Les flux maximaux suivent la même tendance que les valeurs moyennes respectives des 4 saisons. Les flux nuls ont été observés peu fréquemment, pour la plupart en hiver (2,5% des valeurs de la classe), mais aussi ponctuellement au printemps et en automne. Aucun flux nul n'a été observé en été, sur un sol normalement drainé.

Cette évolution prononcée de l'émission de CO<sub>2</sub> selon le cycle saisonnier annuel corrobore les résultats des études antérieures citées dans le chapitre 2. Par contre, le niveau général des flux de CO<sub>2</sub> découlant des données expérimentales de l'INERIS est significativement plus élevé, par rapport à ces données bibliographiques correspondant aux conditions environnementales et climatiques comparables. Pour la moyenne annuelle, le ratio est de 2 à 3, selon le cas.

Une étude bibliographique plus approfondie serait intéressante pour élucider cet écart. Il peut venir par exemple des différences entre les méthodes de mesure employées ou de la différence entre les horizons de la biosphère dans lesquels les mesures ont été réalisées<sup>3</sup>.

### **7.3 FLUX DE CO<sub>2</sub> AU REGARD DE L'OCCUPATION DU SOL**

Le tableau 3 montre les principaux paramètres statistiques des flux de CO<sub>2</sub> obtenus après la répartition des données, toutes saisons confondues, selon les trois principaux types d'occupation du sol retenus pour l'analyse : prairies et pelouses, forêts et bois, champs et jardins potagers.

Pour pouvoir les comparer, les valeurs analogues obtenues pour l'ensemble des mesures analysées y figurent également.

La figure 5 illustre graphiquement les valeurs moyennes, maximales et minimales des flux obtenues pour ces trois sous-populations de données.

Ces présentations des résultats montrent que les flux de CO<sub>2</sub> seraient en moyenne les plus importants dans les environnements de type prairies et pelouses, les moins importants dans les champs et intermédiaires dans les forêts et les terrains boisés. Les différences entre les valeurs moyennes issues des trois sous-populations analysées sont relativement limitées. Toutefois, le test statistique

---

<sup>3</sup> Les données de l'INERIS prises en compte correspondent uniquement aux flux locaux diurnes, mesurés directement à la surface du sol, sans influence de la photosynthèse. Pour mesurer les flux gazeux des sols, on utilise aussi fréquemment des méthodes dites « globales » qui fournissent des flux moyens d'une surface plus grande (plusieurs milliers de m<sup>2</sup> à plusieurs dizaines de km<sup>2</sup>) mesurés dans l'atmosphère au-dessus de la végétation. Les flux diurnes de CO<sub>2</sub> ainsi mesurés sont réduits par l'effet de photosynthèse.

Dans certains cas, les données citées dans la littérature englobent, sans que cela soit clairement mentionné, les flux gazeux diurnes et nocturnes, dont les niveaux respectifs peuvent être très différents.

de Student montre que ces différences sont clairement significatives, avec un niveau de confiance supérieur à 99%.

Paramètre	Unité	Ensemble des données	prairies et pelouses	forêts et bois	champs et jardins
nombre de sites	-	24	24	21	20
nombre d'observations	-	2674	1669	677	328
minimum	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	0,0	0,0	0,0	0,0
maximum	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	26,4	26,4	19,7	22,8
médiane	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	4,8	5,7	4,1	3,2
moyenne	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	5,8	6,4	5,1	3,9
écart-type	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	4,1	4,3	3,7	3,5
coefficient de variation	%	71%	66%	72%	89%
nombre de valeurs nulles	-	33	17	8	8
5 <sup>ème</sup> centile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	0,8	0,9	1,0	0,3
3 <sup>ème</sup> quartile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	8,3	9,1	6,9	5,2
95 <sup>ème</sup> centile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	13,6	14,1	12,8	11,8
99 <sup>ème</sup> centile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	19,4	20,7	17,3	16,3

Tableau 3. Principaux paramètres statistiques des flux locaux de CO<sub>2</sub>, selon le type d'occupation du sol des lieux des mesures

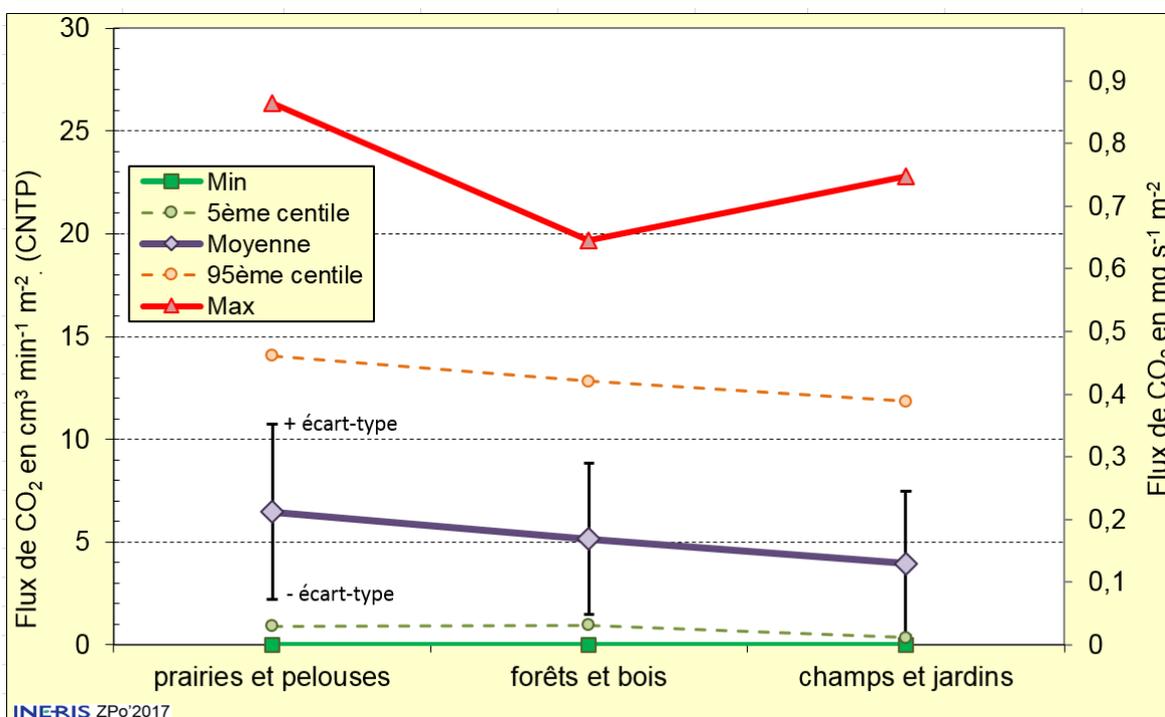


Figure 5. Valeurs moyennes, maximales et minimales des flux de CO<sub>2</sub> en fonction du type d'occupation du sol des lieux des mesures

On note que le 3<sup>ème</sup> quartile ainsi que les 95<sup>ème</sup> et 99<sup>ème</sup> centiles suivent de manière homogène la tendance constatée pour les valeurs moyennes.

Ce n'est pas entièrement le cas des valeurs maximales, sachant qu'il s'agit d'un indicateur beaucoup plus aléatoire et moins représentatif que les paramètres précédents. Elles restent tout de même dans un domaine assez homogène (19,7 à 26,4  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). On note aussi que les flux nuls ont été observés dans toutes les 3 classes du contexte biologique.

Pour prendre en compte en parallèle l'influence saisonnière et les facteurs biologiques, une analyse croisée a été réalisée, avec une répartition des valeurs entre les 3 types d'occupation du sol retenus et les 4 saisons du cycle climatique annuel.

La figure 6 illustre les résultats de cette analyse. On constate que, indépendamment du type d'occupation du sol, les flux moyens suivent tous l'évolution saisonnière très prononcée, déjà mise en évidence dans l'analyse de l'ensemble de la population (cf. chapitre 7.2). Cet effet saisonnier est très largement prépondérant, par rapport à l'influence des caractéristiques biologiques des sites de mesure.

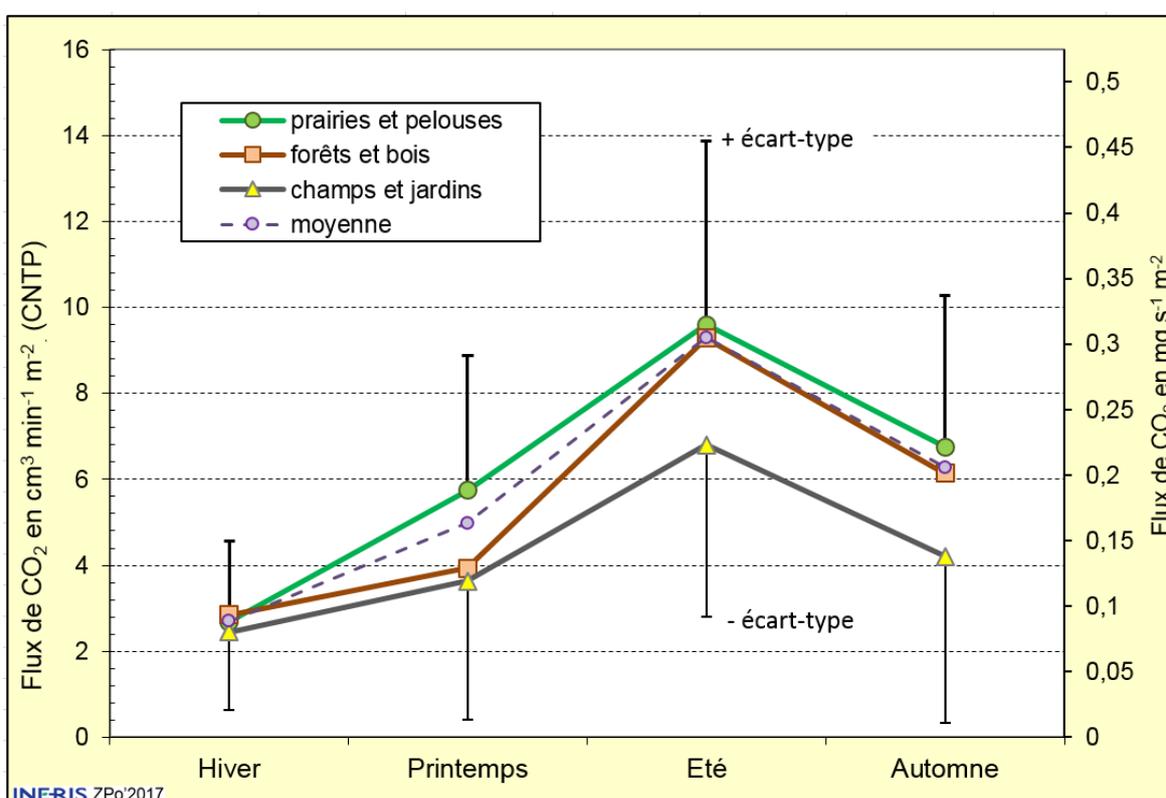


Figure 6. Evolution du flux de CO<sub>2</sub> selon le type d'occupation du sol et les saisons  
 Nota : Les écarts-types correspondent respectivement à des valeurs moyennes extrêmes obtenues pour chaque saison.

Toutefois, les relations démontrées ci-avant entre les flux moyens des 3 types d'occupation du sol sont bien visibles et globalement respectées, sauf pour les moyennes hivernales qui diffèrent très peu entre elles.

On note que, quelle que soit la saison, les flux moyens observés dans les champs et les jardins potagers sont toujours plus faibles comparativement aux deux autres classes analysées. La différence est particulièrement importante pour les mesures estivales et automnales.

On remarque également une grande dispersion des valeurs pour chaque type d'occupation du sol. Elle est exprimée dans le tableau 3 par des coefficients de variabilité assez élevés (66% à 89%) et illustrée sur la figure 6 par une étendue très significative des domaines déterminés par les écarts-types associés respectivement à des valeurs moyennes extrêmes obtenues pour chaque saison.

#### 7.4 FLUX DE CO<sub>2</sub> AU REGARD DU CONTEXTE CLIMATIQUE GÉNÉRAL

Les principaux paramètres statistiques des flux de CO<sub>2</sub> découlant d'une analyse des données réparties en sous-classes, selon le climat général des lieux de mesure, sont présentés dans le tableau 4.

Pour faciliter la comparaison, les valeurs analogues obtenues pour l'ensemble des mesures analysées y figurent également.

La figure 7 illustre graphiquement les valeurs moyennes, maximales et minimales des flux obtenues respectivement pour les trois zones climatiques considérées.

Paramètre	Unité	Ensemble des données	Climat océanique	Climat continental	Climat méditerranéen
nombre de sites	-	24	12	10	2
nombre d'observations	-	2674	1849	579	246
minimum	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	0,0	0,0	0,0	0,0
maximum	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	26,4	26,4	22,9	21,0
médiane	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	4,8	5,1	4,1	4,9
moyenne	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	5,8	6,0	5,2	5,7
écart-type	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	4,1	3,9	4,3	4,6
coefficient de variation	%	71%	64%	83%	80%
nombre de valeurs nulles	-	33	21	10	2
5 <sup>ème</sup> centile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	0,8	1,1	0,6	0,5
3 <sup>ème</sup> quartile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	8,3	8,4	7,1	8,0
95 <sup>ème</sup> centile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	13,6	13,1	13,6	15,0
99 <sup>ème</sup> centile	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	19,4	17,7	21,5	19,5

Tableau 4. Principaux paramètres statistiques des flux locaux de CO<sub>2</sub>, selon les zones climatiques

Contrairement à l'influence du contexte biologique, on constate ici que les flux moyens des 3 zones climatiques sont peu différentes entre eux. Les valeurs sont situées dans un intervalle restreint (5,2 à 6,0 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) et s'écartent peu de la moyenne générale de l'ensemble des données analysées (5,8 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>).

Le test statistique de Student montre que, selon le cas, les différences entre les moyennes ne sont pas significatives ou sont à la limite de la signification statistique.

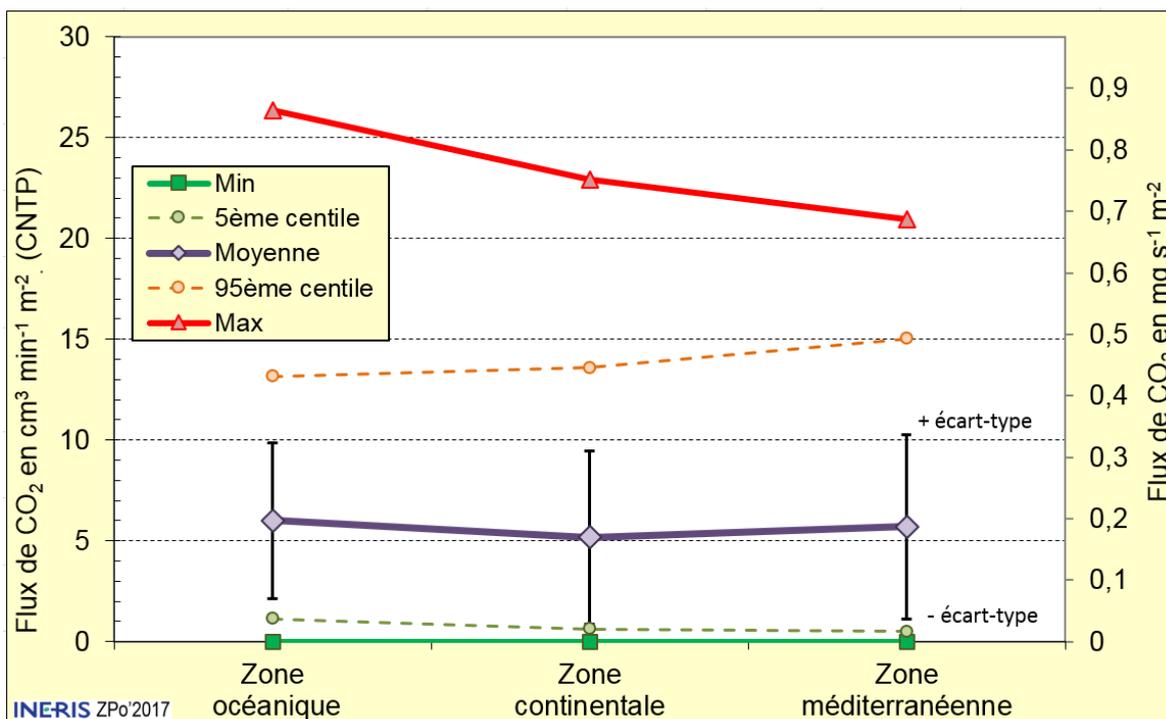


Figure 7. Valeurs moyennes, maximales et minimales des flux de CO<sub>2</sub> en fonction de la zone climatique des lieux des mesures

Il est à remarquer que cette homogénéité de valeurs moyennes par zone climatique est observée malgré une grande dispersion des valeurs au sein de chaque population respective.

Elle est en effet importante, comme l'attestent numériquement les valeurs élevées du coefficient de dispersion montrées dans le tableau 4 (valeurs de 65% à 84%). Cette variabilité est aussi illustrée graphiquement sur la figure 7, par une étendue importante des écarts types, par rapport aux valeurs moyennes respectives.

On note que les valeurs maximales ne suivent pas entièrement la tendance constatée pour les valeurs moyennes, mais elles restent dans un domaine assez homogène. Il en est de même en ce qui concerne le 3<sup>ème</sup> quartile ainsi que les 95<sup>ème</sup> et 99<sup>ème</sup> centiles. Les flux nuls ont été observés dans toutes les zones climatiques.

Pour prendre en compte en parallèle l'influence saisonnière et le rôle du climat général des sites étudiés, une analyse croisée a été réalisée, avec une répartition des valeurs entre les 3 contextes climatiques retenus et les 4 saisons du cycle climatique annuel. La figure 8 illustre les résultats de cette analyse.

On constate que, indépendamment de la zone climatique du lieu de mesures, les flux moyens suivent tous l'évolution saisonnière très prononcée observée pour l'ensemble de la population (cf. chapitre 7.2). Cette influence saisonnière est très largement prépondérante, par rapport à celle du climat général des sites étudiés.

Comme observé pour l'ensemble des données et quelle que soit la saison, les moyennes des sous-populations climatiques respectives établies pour une saison donnée restent peu excentrées par rapport à la valeur moyenne de cette saison.

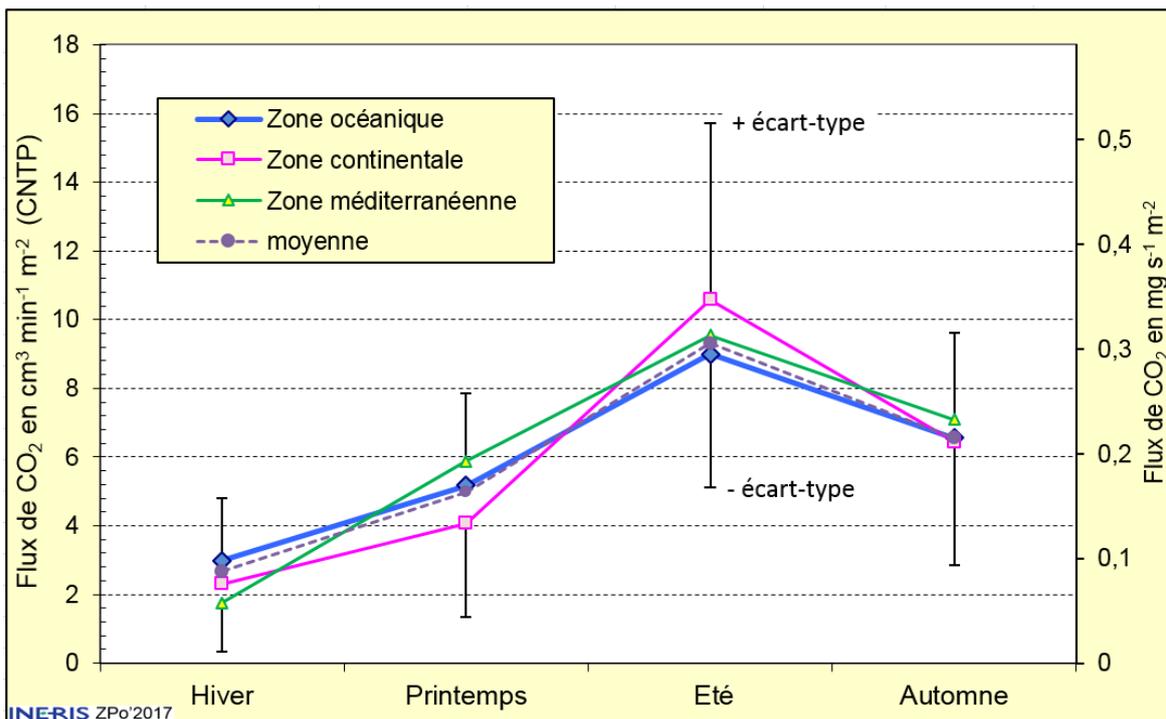


Figure 8. Evolution du flux de CO<sub>2</sub> selon les zones climatiques et les saisons

Nota : Les écarts-types correspondent respectivement à des valeurs moyennes extrêmes obtenues pour chaque saison.

De même, les relations entre les différentes moyennes climatiques et leur positions respectives par rapport à la moyenne saisonnière correspondante semblent être totalement aléatoires, sans aucune tendance particulière clairement identifiable autre que celle générale entre les saisons.

Ces résultats permettent de conclure que, pour les trois zones climatiques considérées, appartenant toutes à la famille des climats tempérés, leurs spécificités particulières ne semblent pas avoir d'une influence significative sur l'émission du CO<sub>2</sub> des sols.

En tout cas, une influence éventuelle du climat général dans le secteur des sites étudiés est bien plus faible que les évolutions du flux gazeux engendrées par le cycle saisonnier annuel.

## 7.5 FLUX DE CO<sub>2</sub> VS CONTEXTES GÉOLOGIQUE ET PÉDOLOGIQUE

Les principaux paramètres statistiques des flux de CO<sub>2</sub> obtenus après la répartition des données, toutes saisons confondues, selon le contexte géologique général du sous-sol des lieux de mesure sont présentés dans le tableau 5.

Les valeurs analogues relatives à l'ensemble des données disponibles y figurent également, pour faciliter la comparaison.

La figure 9 illustre graphiquement les valeurs moyennes, maximales et minimales des flux obtenues respectivement pour les cinq contextes géologiques considérés.

Paramètre	Unité	Ensemble des données	Sédimentaire			Métamorphique	Volcanique
			Carbonates	Détritique	Carbonifère		
nombre de sites	-	24	11	8	3	2	1
nombre d'observations	-	2674	1101	1045	405	77	46
minimum	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
maximum	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	26,4	25,6	26,4	22,8	22,9	11,7
médiane	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	4,8	5,6	4,2	4,5	3,1	3,7
moyenne	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	5,8	6,2	5,3	5,8	6,7	4,1
écart-type	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	4,1	3,7	3,7	4,8	6,7	3,0
coefficient de variation	%	71%	60%	71%	83%	100%	74%

Tableau 5. Principaux paramètres statistiques des flux locaux de CO<sub>2</sub>, selon les contextes géologiques des lieux des mesures

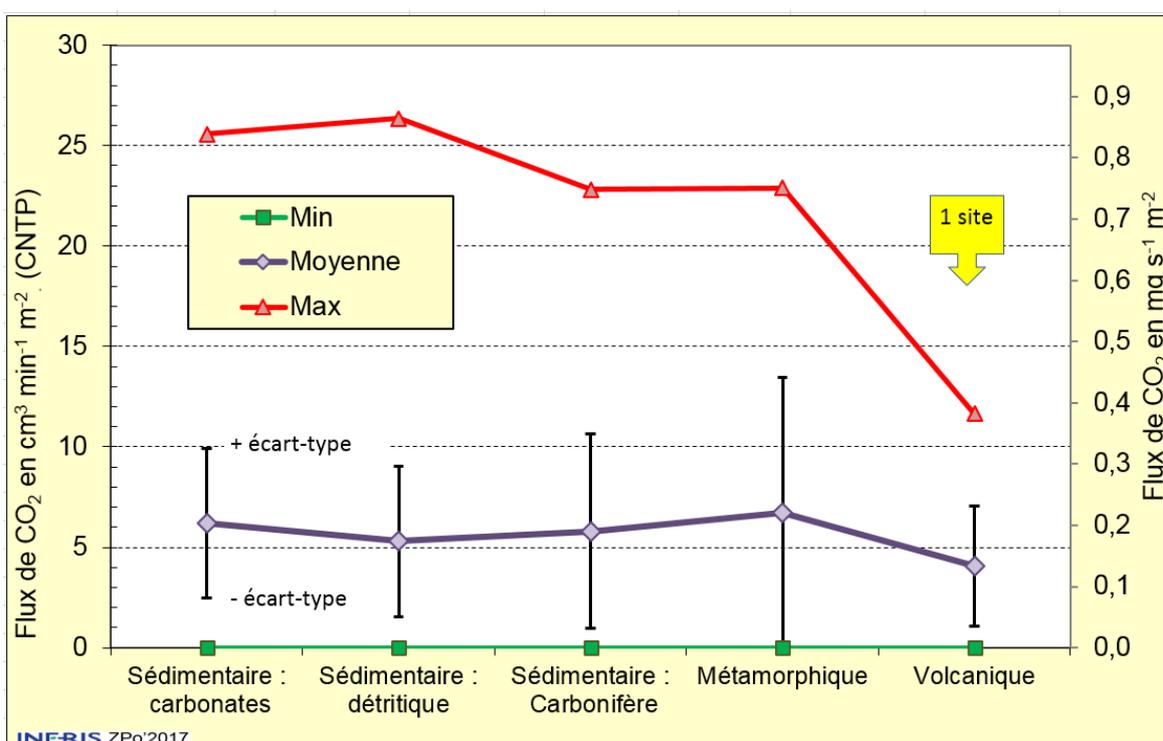


Figure 9. Evolution du flux de CO<sub>2</sub> selon le contexte géologique général du sous-sol peu profond au droit des sites étudiés

L'interprétation des résultats obtenus est délicate, car les contextes métamorphique et volcanique sont peu représentés comparativement aux trois sous-classes du contexte sédimentaire. Selon les cas, le nombre des valeurs disponibles au sein de ces deux classes est de 5 à 20 fois plus faible, comparativement aux 3 sous-contextes sédimentaires (tableau 5).

A cette importante réserve près, on peut constater que les flux moyens des 5 contextes géologiques ne sont pas trop différents entre eux. Les valeurs sont situées dans un intervalle variant de 4,1 à 6,7 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

Si l'on se focalise sur les trois sous-classes du contexte sédimentaire, les écarts entre les moyennes sont faibles (valeurs de 5,3 à 6,2  $\text{cm}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). Du point de vue statistique, les différences entre ces moyennes sont, selon le cas, non-significatives ou se situent à la limite de la signification statistique, avec un niveau de confiance de 99%.

Les différences entre les moyennes respectives des 3 populations bien représentées dans la base de données (3 sous-classes sédimentaires) et les 2 autres peu représentées (contextes volcanique et métamorphique) n'ont pas pu être testées, du fait de la représentativité statistique insuffisante de ces deux dernières populations.

On note que les flux nuls ont été observés dans toutes les classes géologiques. Concernant les valeurs maximales, elles sont élevées et assez homogènes entre les classes, à l'exception du contexte plutonique. Toutefois, le nombre de valeurs disponibles dans ce contexte est trop faible pour pouvoir en tirer des conclusions fiables.

L'analyse croisée prenant en compte en parallèle les contextes géologiques et les saisons a pu être faite uniquement pour les deux premières sous-classes du contexte sédimentaire, les données disponibles pour les 3 autres contextes n'étant pas assez nombreuses et représentatives pour les analyser en répartition par saisons.

Les résultats sont présentés sur la figure 10. On peut constater encore ici que l'influence saisonnière apparaît comme très largement prépondérante.

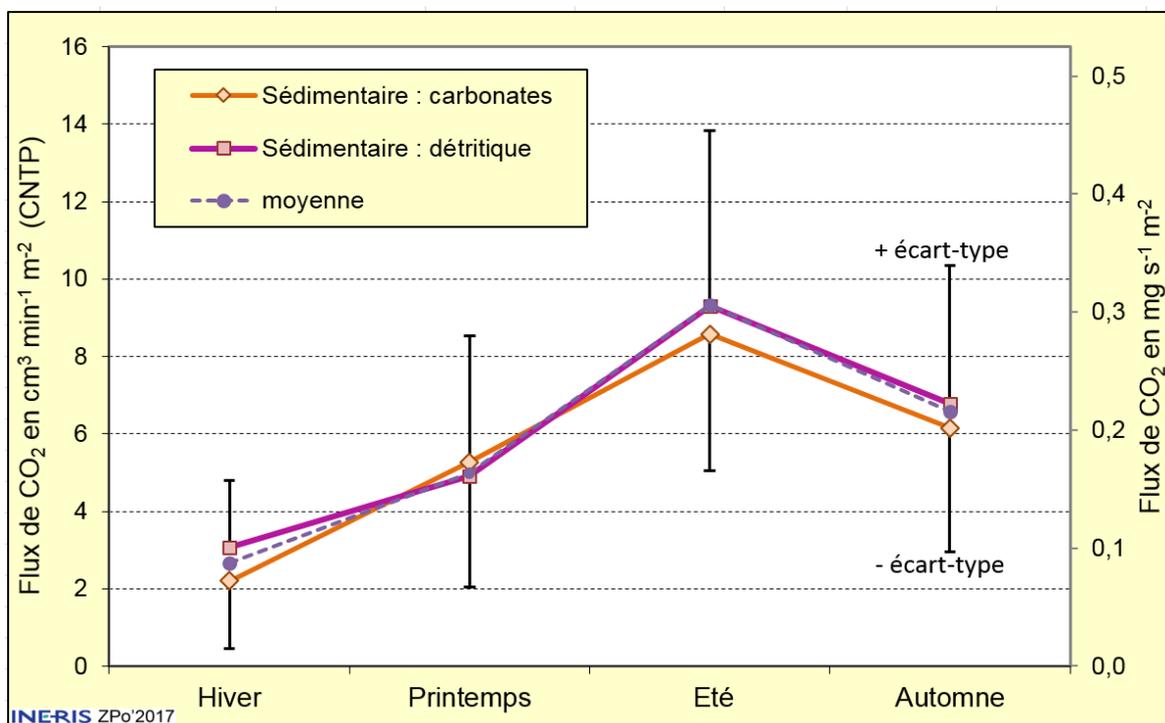


Figure 10. Evolution du flux de  $\text{CO}_2$  selon les contextes géologiques et les saisons

Nota : Les écarts-types correspondent respectivement à des valeurs moyennes extrêmes obtenues pour chaque saison.

Concernant l'influence du contexte pédologique, le nombre des cas possibles est très important et les données disponibles se montrent insuffisantes pour réaliser une analyse statistique correcte. En effet, les mesures ne sont pas assez nombreuses et trop dispersées entre les différentes classes de sols présents sur les sites analysés.

Par conséquent, aucune hypothèse générale statistiquement justifiée concernant les rapports entre les flux de CO<sub>2</sub> et la nature des sols n'est à proposer à ce stade. Ce point pourra être approfondi le jour où la base de données sera suffisamment complétée.

Il est à rappeler cependant que l'étude concerne le climat globalement modéré et est ciblée sur les 3 catégories spécifiques d'occupation du sol : prairies et pelouses, forêts et bois, champs et jardins potagers. Ceci implique a priori la présence, sur les sites sélectionnés, de sols suffisamment alimentés en eau météorique, actifs sur le plan biologique et caractérisés par une épaisseur et une fertilité suffisantes pour permettre les pratiques agricoles ou un développement non contraint de la végétation.

On peut alors supposer que, dans ces limites définies pour la présente l'étude, le contexte pédologique des sites sélectionnés ne devrait pas avoir d'influence globale majeure sur la production de dioxyde de carbone dans le sol, ni sur son émission à la surface.

Les résultats de l'analyse partielle, qui a pu être réalisée avec les données disponibles, semblent aller dans ce sens. En effet, pour les trois catégories des sols les mieux représentées, correspondant aux contextes de type sol brun à brun calcaire, sols lessivés et sols alluviaux, aucune différence majeure n'a été décelée en ce qui concerne les valeurs moyennes et l'étendue des valeurs au sein de chaque sous-population.

De plus, pour tous ces catégories des sols, les flux moyens de CO<sub>2</sub> suivent uniformément l'évolution saisonnière. Cette dernière est, encore ici, très largement prépondérante.

## **7.6 FRÉQUENCES ET LEUR DISTRIBUTION**

La figure 11 présente la distribution des fréquences pour l'ensemble de la population analysée des 2674 valeurs de flux de CO<sub>2</sub>. Elle est très asymétrique et bimodale.

L'asymétrie des fréquences, déjà signalée lors de l'analyse initiale des données (cf. chapitre 7.1) se manifeste par la présence d'un nombre significatif de mesures très excentrées vers des valeurs élevées, par rapport à la valeur médiane et aussi à la valeur moyenne.

En effet, même si les flux restent, dans une très grande majorité, inférieurs à 20 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (99% de la population), on note un nombre certes faible mais significatif de valeurs situées entre 20 et 25 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> (environ 0,8% de la population) et même quelques valeurs isolées entre 25 et 27 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. Aucune valeur ne dépasse le seuil de 27 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

La bimodalité de la distribution des fréquences se caractérise par la présence du mode principal  $m_1$  à environ  $3,5 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , situé dans le domaine des valeurs inférieures à la moyenne et un mode secondaire  $m_2$  à environ  $9,5 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , apparaissant dans le domaine des valeurs supérieures à la moyenne (figure 11).

Cette bimodalité est principalement liée à la superposition des mesures estivales (valeurs moyennes à élevées) avec celles hivernales (valeurs très majoritairement faibles).

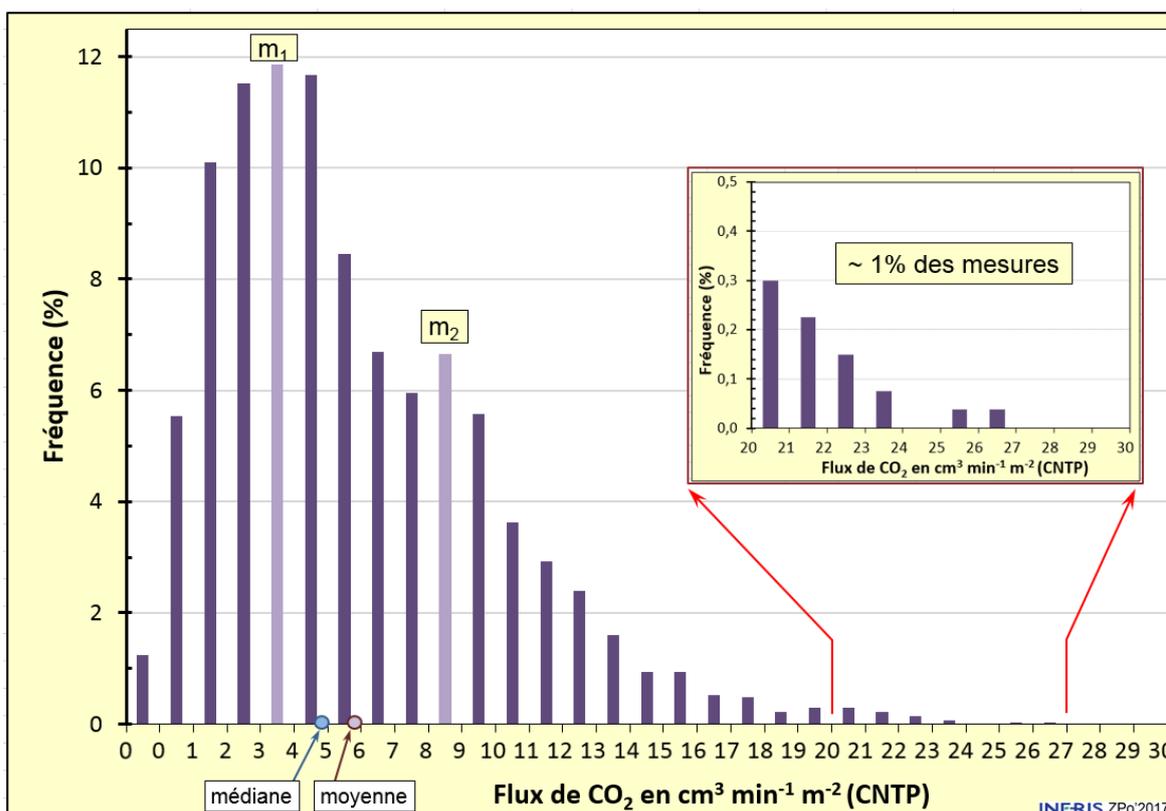


Figure 11. Distribution des fréquences pour l'ensemble de la population analysée des flux de  $\text{CO}_2$ .

Ceci conduit à réaliser la suite de l'analyse des fréquences en répartissant les données selon les 4 saisons du cycle climatique annuel. En effet, ce paramètre apparaît clairement comme le plus influant sur la variabilité du flux de  $\text{CO}_2$ .

Avec ce traitement, les distributions respectives deviennent alors monomodales (figure 12). Elles demeurent asymétriques, avec toujours une étendue plus importante vers des valeurs franchement plus élevées que les médianes et les moyennes respectives.

En assimilant ces distributions à un modèle de distribution normale asymétrique (Azzalini, 1985 ; Sicard, 2013), une tentative peut être faite pour identifier des valeurs seuils probabilistes pouvant être utiles sur le plan pratique.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 6. La partie la plus intéressante du point de vue d'une application pratique est l'estimation des intervalles des flux les plus probables selon les saisons.

Elle est faite pour deux niveaux de confiance utilisés habituellement dans le traitement statistique de données : 95% et 99%. Pour simplifier l'analyse, les seuils calculés ont été arrondis avec un pas de  $0,5 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

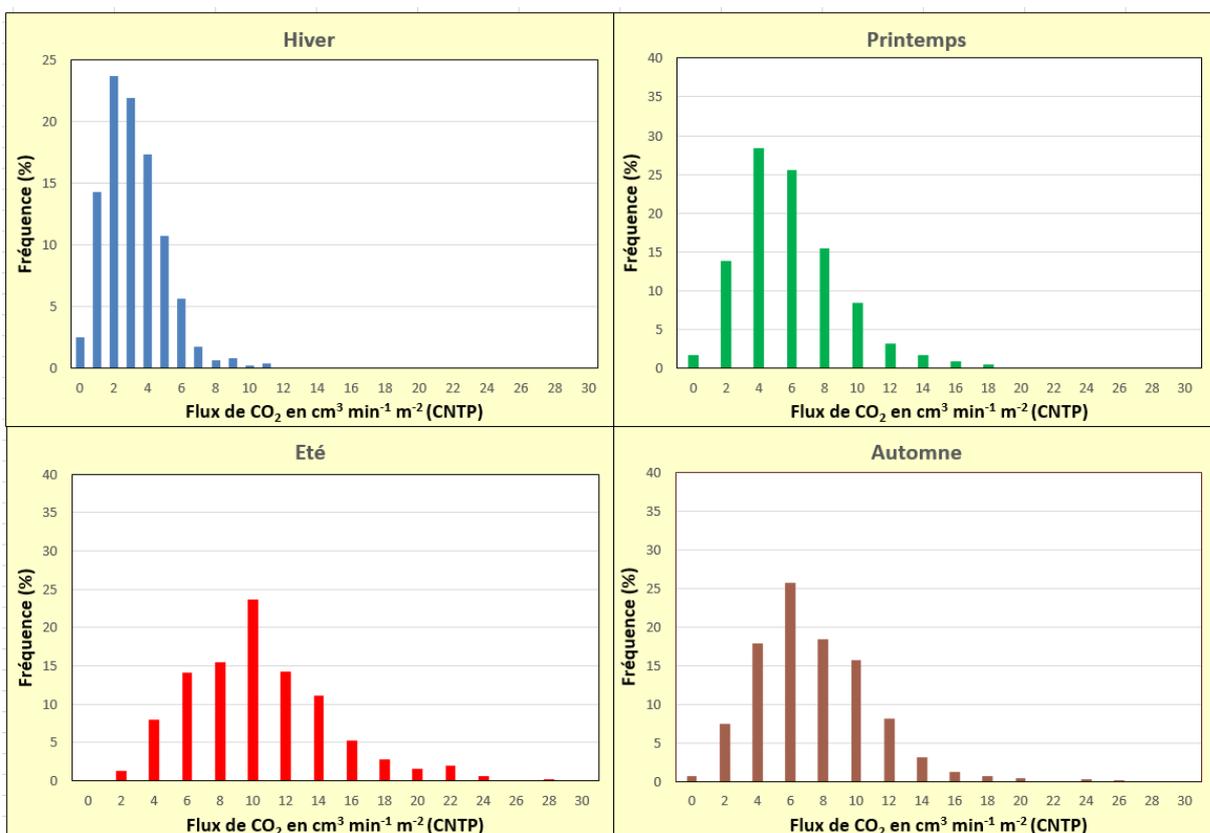


Figure 12. Distribution des fréquences des flux de  $\text{CO}_2$  avec la répartition des données selon les saisons du cycle climatique annuel

Paramètre	Unité	Hiver	Printemps	Été	Automne
mode = m	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	1,5	4	9,5	5
nombre de valeurs < m	-	216	234	336	281
nombre de valeurs > m	-	528	298	348	433
écart-type valeurs < m	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	0,5	1,1	2,0	1,4
écart-type valeurs > m	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	1,5	2,8	3,3	3,0
intervalle de confiance 95%	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	0,5 à 4,5	2 à 9,5	5 à 15,5	2,5 à 11
intervalle de confiance 99%	$\text{cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CNTP)	0 à 6	1 à 12,5	3 à 19,5	1 à 14

Tableau 6. Paramètres statistiques des flux locaux de  $\text{CO}_2$  selon les saisons, obtenus en appliquant un modèle de distribution normale asymétrique

La représentation graphique de ces résultats est faite sur la figure 13. On peut constater que les domaines des flux les plus probables se distinguent clairement entre l'hiver et l'été.

Pour ces deux saisons, leurs intervalles de confiance à 95% respectifs sont séparés totalement. Les intervalles de confiance à 99% se recouvrent très partiellement et uniquement dans le domaine des valeurs respectivement les plus élevées en hiver et les plus faibles en été.

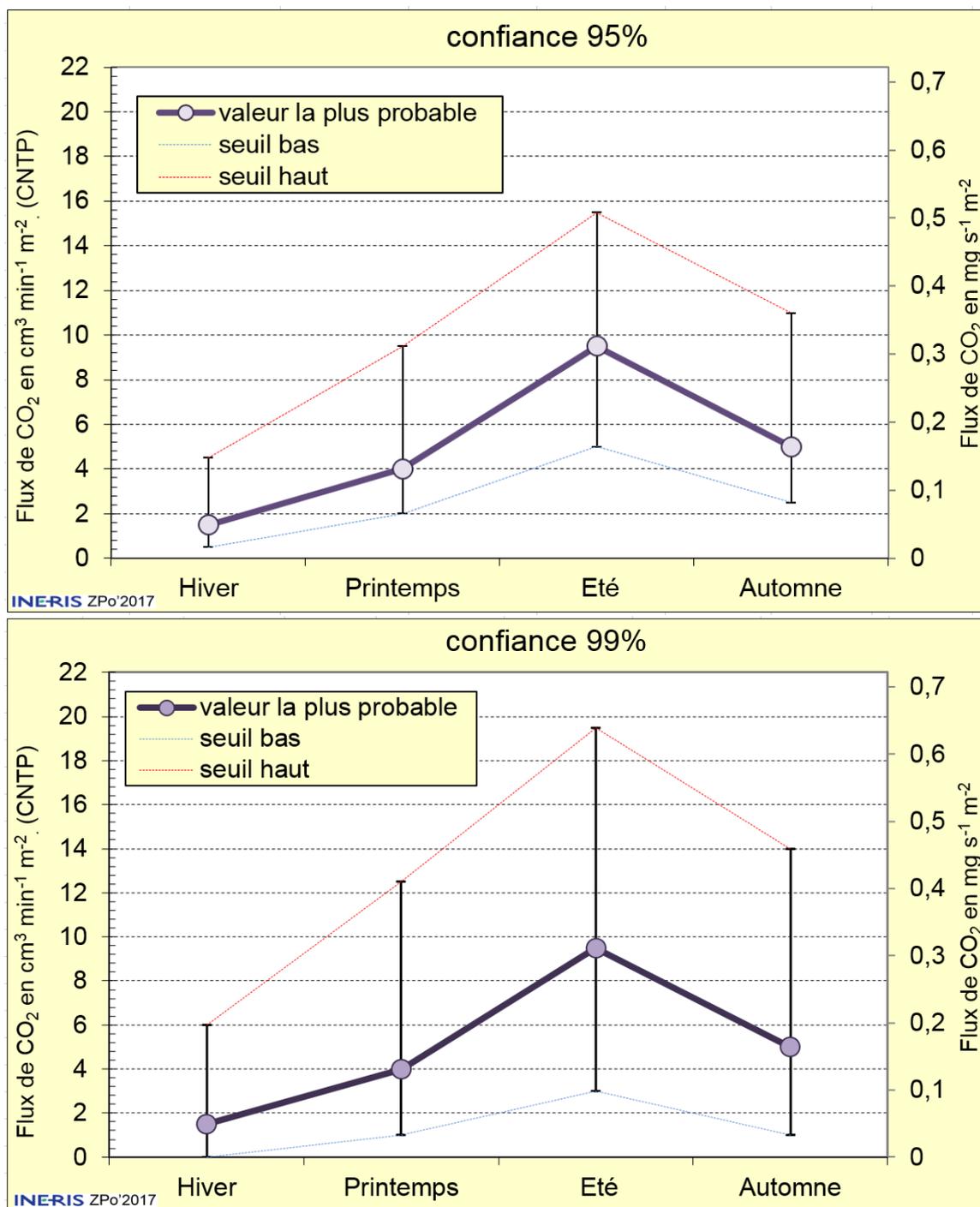


Figure 13. Intervalles des valeurs les plus probables des flux locaux de CO<sub>2</sub> selon les saisons, estimées avec deux niveaux de confiance : 95% et 99%

Les domaines des flux les plus probables obtenus respectivement pour le printemps et pour l'automne présentent logiquement des valeurs intermédiaires, avec des zones de recouvrement assez étendues, par rapport aux deux autres domaines : hivernal et estival. Pour ces deux saisons, les intervalles des valeurs les plus probables sont par ailleurs très similaires.

En synthétisant les valeurs extrêmes présentées dans le tableau 6, on peut déduire que le domaine des valeurs les plus probables à l'échelle annuelle se situe entre 0 et  $20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$  environ, avec un niveau de confiance de 99%.



## 8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 8.1 BILAN GÉNÉRAL

Les valeurs de flux naturels biogéniques sélectionnées pour l'étude ont été mesurées sur trois catégories d'occupation du sol les plus répandues en France métropolitaine : prairies et pelouses, forêts et bois, champs et jardins potagers. Elles proviennent de sites présentant a priori les caractéristiques géologiques et pédologiques « normales », sans aucune anomalie géochimique ou géologique avérée.

Concernant l'émission de CH<sub>4</sub> des sols, les mesures effectuées n'ont jamais permis d'observer des flux naturels supérieurs à 0,1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. L'émission naturelle de méthane est donc très faible. Ces résultats corroborent les données bibliographiques acquises par les mesures réalisées dans les conditions comparables.

Concernant l'émission de CO<sub>2</sub>, les informations caractéristiques suivantes ont pu être dégagées, pour l'ensemble des saisons du cycle climatique annuel :

- le flux se situe habituellement entre 0 et 20 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>,
- les flux situés entre 20 et 25 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> ne sont rencontrés que rarement,
- les flux situés entre 25 et 27 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> ont été observés exceptionnellement et uniquement dans des conditions estivales ou au début de l'automne,
- les flux supérieurs à 27 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> n'ont jamais été rencontrés.

Les variations saisonnières généralisées et très prononcées du flux de CO<sub>2</sub> ont été observées sur l'ensemble des sites étudiés. En moyenne, l'émission est franchement la plus importante en été et la plus faible en hiver. Elle est intermédiaire au printemps et en automne.

Globalement, les variations saisonnières se montrent très largement prépondérantes, comparativement à l'influence d'autres paramètres caractérisant les sites suivis : zone climatique, contexte biologique, géologie, pédologie...

Entre l'hiver et l'été, la distinction du niveau général de l'émission est très nette. Le tableau 7 suivant résume les différences entre ces deux saisons. Il indique des domaines des valeurs du flux mesurés, avec une graduation selon la fréquence avec laquelle ils ont été rencontrés *in situ*.

Domaine des valeurs	Unité	Hiver	Eté
valeurs habituelles	cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP)	0 à 6	3 à 20
valeurs élevées rares		6 à 9	20 à 25
valeurs exceptionnelles		9 à 11	25 à 27
valeurs jamais rencontrées		Pour le CO <sub>2</sub> : 1 cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (CNTP) = 0,033 mg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	> 11

Tableau 7. Synthèse des domaines caractéristiques du flux de CO<sub>2</sub> déterminés à partir des données hivernales et estivales

Les domaines des valeurs présentés dans le tableau 7 ont été déterminés de la manière suivante :

- les domaines des valeurs habituelles correspondent, à l'arrondi près, aux intervalles de confiance à 99% du tableau 6 ;
- les seuils séparant le domaine des valeurs élevées rares de celui des valeurs exceptionnelles sont inspirés des valeurs respectives du 99<sup>ème</sup> centile (tableau 2) et des résultats de l'analyse des fréquences faite dans le chapitre 7.6 ;
- les seuils des domaines des valeurs jamais rencontrées sont basés sur les valeurs maximales observés *in situ* respectivement en hiver et en été (cf. tableau 2), arrondies au nombre entier supérieur.

Concernant l'influence d'autres facteurs potentiellement importants, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- dans la mesure où l'on reste dans le domaine des caractéristiques climatiques tempérées, le contexte climatique général ne semble pas avoir une influence significative sur l'émission de CO<sub>2</sub> du sol ;
- les caractéristiques géologiques générales des sites étudiés ne semblent pas non plus avoir d'influence importante, à la réserve près que les données disponibles pour les contextes métamorphique et plutonique ne sont pas assez étoffées. En tout cas, l'influence éventuelle du contexte géologique est beaucoup plus faible que celle des variations saisonnières ;
- un certain rôle du type d'occupation du sol a été identifié, même si l'influence de ce facteur est globalement mineure par rapport à l'évolution saisonnière du flux gazeux des sols. Les données montrent en effet que les flux de CO<sub>2</sub> sont en moyenne moindres dans les champs et les jardins potagers, comparativement aux environnements de type forêts/bois et prairies/pelouses, surtout en été et en automne.

Reste à considérer l'influence du contexte pédologique qui n'a pas pu être suffisamment étudiée, du fait de données incomplètes au regard de la complexité du sujet. Toutefois, les résultats de l'analyse partielle, qui a pu être réalisée, suggèrent que, pour les trois catégories d'occupation du sol considérées dans l'étude, l'influence du facteur pédologique ne serait pas très importante. Elle est en tout cas bien plus faible que l'effet des variations saisonnières.

## 8.2 RECOMMANDATIONS

Dans le cas d'une reconnaissance des sites ou d'une évaluation des émissions gazeuses des sols d'un site, les facteurs suivants sont à considérer en priorité :

- la saison du cycle climatique annuel,
- le type d'occupation du sol qui conditionne le contexte biologique général du site,
- la nature et l'état hydrique du sol,

- l'évolution des conditions météorologiques locales à court terme, afin d'éviter les situations rendant non représentatives les mesures effectuées (saturation des sols en eau, couverture neigeuse ou gel des sols, forte évolution de la pression atmosphérique, vent violent...).

Il est préconisé de réaliser les investigations en hiver et/ou en été qui correspondent à des périodes caractéristiques de l'activité biologique des sols, respectivement basse et haute.

En effet, dans de nombreux cas, les mesures répétées sur les mêmes emplacements et réalisées durant ces deux saisons sont utiles, voire nécessaires, pour prendre en compte l'évolution saisonnière du flux et d'autres effets de température sur les transferts gazeux entre les sols et l'atmosphère libre (par exemple, le tirage thermique).

Concernant l'émission de CO<sub>2</sub> les **valeurs de référence** suivantes sont proposées, avec une distinction pour les mesures dans les conditions estivales et hivernales.

Pour les mesures **en été** :

- les flux compris entre **3 et 20 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme **habituels**,
- les flux compris entre **20 et 25 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme très élevés et constituent la **plage limite supérieure des émission normales**,
- les flux compris entre **25 et 30 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme **suspects et pouvant signaler une anomalie** d'origine naturelle<sup>4</sup> ou anthropique,
- les flux **supérieurs à 30 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme anormalement élevés et correspondent à une **anomalie** d'origine naturelle ou anthropique.

Pour les mesures **en hiver** :

- les flux compris entre **0 et 6 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme **habituels**,
- les flux compris entre **6 et 9 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme très élevés et constituent la **plage limite supérieure des émission normales**,
- les flux compris entre **9 et 12 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme **suspects et pouvant signaler une anomalie** d'origine naturelle<sup>4</sup> ou anthropique,
- les flux **supérieurs à 12 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>** sont à considérer comme anormalement élevés et correspondent à une **anomalie** d'origine naturelle ou anthropique.

La figure 14 illustre graphiquement les valeurs de référence ainsi proposées.

---

<sup>4</sup> Il s'agit le plus souvent des émissions d'origine géologique à partir des failles majeures ou celles liées à une activité hydrothermale, à une ancienne activité volcanique ou encore à une anomalie géochimique locale (cf. chapitre 2.1). On peut aussi imaginer une anomalie d'origine biologique, liée par exemple à la décomposition d'une accumulation importante de débris organiques naturels.

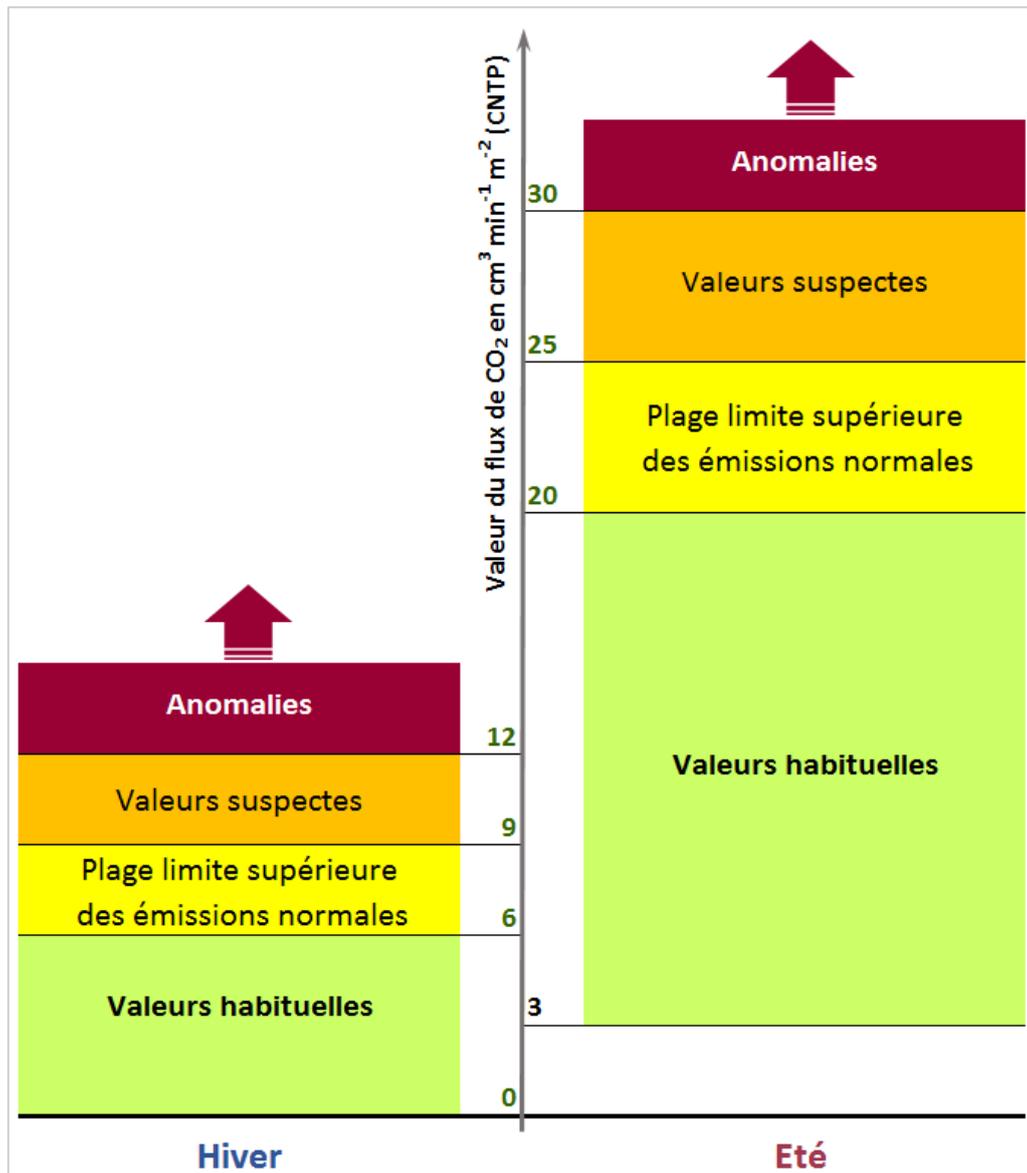


Figure 14. Représentation graphique des valeurs de référence du flux de CO<sub>2</sub> des sols

On note que les seuils déterminant les plages des valeurs habituelles et les plages supérieures des émissions considérées comme normales sont issus des domaines du tableau 7.

Les seuils d'anomalie de 30 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> en été et de 12 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> en hiver correspondent aux valeurs maximales de flux de CO<sub>2</sub> rencontrées respectivement en été et en hiver, auxquelles on ajoute 10% qui rendent compte de l'imprécision théorique maximale de la méthode de mesure, dans les conditions *in situ* (cf. chapitre 3.4).

Les critères proposés ci-avant pour les conditions estivales peuvent aussi être appliqués au printemps et en automne, surtout quand les conditions météorologiques sont proches de celles estivales.

Quant aux critères hivernaux, ils sont à appliquer en dehors des périodes d'anomalies météorologiques évidentes (par ex. températures excessivement élevées pendant plus d'une semaine) pouvant conduire à une amplification temporaire de l'activité biologique de la végétation et du sol superficiel.

De même, ces critères doivent être éventuellement révisés et adaptés dans le cas des mesures sur des sites particuliers, bénéficiant d'un microclimat local très clément et humide et donc favorable à une activité biologique soutenue tout au long de l'année.

En ce qui concerne l'émission de CH<sub>4</sub>, quels que soient le contexte du site étudié et la période des mesures, tout flux dépassant **0,1 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>**, sur un sol normalement drainé, est à considérer **comme suspect et signalant une anomalie gazeuse potentielle.**



## 9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, 1997 : Comparaison de méthodes de mesure des flux de méthane émis par les décharges d'ordures ménagères. Programme ECLAT. Rapport ADEME, Données et références. 1997
- AFES, 2009 : Référentiel pédologique 2008, Association Française pour l'Etude du Sol (AFES), éditions Quæ, 2009, ISBN: 978-2-7592-0186-0
- ANR Sentinelle, 2013 : Rapport de Synthèse. Période du : 1/12/2007 au 30/06/2012. Réf. : ANR-07-PCO2-007. Juillet 2013
- von Arnold, K., Weslien, P., Nilsson, M., Svensson, B.H., and Klemedtsson, L., 2005 : Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from drained coniferous forests on organic soils: Forest Ecology and Management, v. 210, p. 239-254
- Azzalini A., 1985 : A class of distributions which includes the normal ones. Scand. J. Statist., 12, 171-178
- Bajracharya, R. M., R. Lal, and J. M. Kimble. 2000. Diurnal and Seasonal CO<sub>2</sub>-C Flux from Soil as Related to Erosion Phases in Central Ohio. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:286-293
- de Donato Ph., Pironon J., Mouronval G., Hy-Billiot J., Lescanne M., Garcia B., Lucas H., Pokryszka Z., Lafortune S., Flamant P.H., Cellier P., Gal F., Michel – Le Pierrès K., Taquet N., Barrès O., 2010 : SENTINELLE: Research project on development of combined geochemical monitoring from geosphere to atmosphere – Experimentation on the site of Rouse (TOTAL SA company CCS Pilot), GHGT-10
- Gal F., Michel K., Pokryszka Z., Lafortune S. Garcia B., Rouchon V., de Donato P., Pironon J., Barrès O., Taquet N., Prinnet C., Hy-Billiot J., Lescanne M., Cellier P., Lucas H., Gibert F., 2014 : Study of the environmental variability of gaseous emanations over a CO<sub>2</sub> injection pilot - Application to the French Pyrenean foreland. International Journal of Greenhouse Gas Control 21 (2014), pp 177-190
- Gombert P., Pokryszka Z., Lafortune S., Lions J., Gal F., Joulain C., Grellier S., Prevot F., Darmould Y., Squarcioni P., 2014 : Selection, instrumentation and characterization of a pilot site for CO<sub>2</sub> leakage experimentation in a superficial aquifer GHGT-12 Energy Procedia 63 (2014) 3172 – 3181
- Houot A., 2003 : <http://eduscol.education.fr/siene/histoire-geographie/ressources-pour-enseigner/ressources-cartographiques-et-sig/des-atlas-et-collections-de-cartes>
- INERIS, 1996 : Tauziède C., Pokryszka Z., Jodart A., Brevet d'invention français et européen « Mesure de flux surfacique de gaz » n° F 96 05996 et EP 0 807 822 B1
- INRA, 1998 : Base de données géographique des sols en France à 1/1 000 000,1998, [www.gissol.fr](http://www.gissol.fr)
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., Wavresky P., 2010 : Les types de climats en France, une construction spatiale, *Cybergeo : European Journal of Geography* [en ligne], <http://cybergeo.revues.org/23155>
- Lafortune S., 2009 : Emission biologique de dioxyde de carbone et de méthane par les sols. Synthèse bibliographique de valeurs de flux à l'interface sol-atmosphère. Rapport INERIS DRS-09-88339-04798A du 03/07/2009
- Lafortune S., Pokryszka Z., Bentivegna G., Farret R., 2013 : From geochemical baseline studies to characterization and remediation of gas leaks: experiences and case studies of the French institute for risk management (INERIS) GHGT-1, Energy Procedia 37 ( 2013 ) 4391 – 4399

- Pokryszka Z. et Jodart A., 1994 : Compte rendu de l'intercomparaison des méthodes de mesure du flux surfacique par chambre du 16 au 20 mai 1994. Résultats des mesures effectuées par l'INERIS Rapport de l'INERIS pour l'ADEME réf. SSE-ZPo-AJo/CS 14FM95/R01 du 31 mai 1994
- Pokryszka Z. 1996 : Measurement of methane flux released by MSW landfill. Rapport INERIS–SSE-ZPo/CS-14EL42/R01 du 20 septembre 1996
- Pokryszka, Z., Tauziède, C., 2000 : Evaluation of gas emission from closed mines surface to atmosphere. in Environmental Issues and Management Waste in Energy and Mineral Production, Balkema eds., Rotterdam, ISBN 9789058090850, 327-329
- Pokryszka Z. et A. Charmoille A., 2008 : Programme ANR 2005 Capture et Stockage du CO<sub>2</sub> « Géocarbonate Monitoring ». Monitoring géochimique en phase gazeuse à la surface et dans la couverture intermédiaire des sites de stockage. Rapport INERIS référencé DRS-08-71082-09108B du 30/07/2008, disponible en ligne sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)
- Pokryszka Z., Charmoille A. et Bentivegna G., 2010 : Development of Methods for Gaseous Phase Geochemical Monitoring on the Surface and in the Intermediate Overburden Strata of Geological CO<sub>2</sub> Storage Sites, OGST, Vol. 65, No. 4, 653-666
- Pokryszka Z., Gal, F., Lafortune, S., Michel, K., Farret R., Labat N., 2014 : Geochemical gas monitoring on the surface and near surface of Total-Rousse pilot of CO<sub>2</sub> geological storage. 4ème colloque Franco-espagnol sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, mai 2014, Burgos
- Pokryszka Z. et al., 2015 : Evaluation de l'aléa « Gaz de mine ». Guide méthodologique. Rapport INERIS DRS-15-149493-10366B du 26/02/2016, en ligne : <http://www.ineris.fr/centredoc/alea-gaz-de-mine-guide-ineris-2016-1457701762.pdf>
- Raich J.,W. and Schlesinger W.,H., 1992 : The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, Tellus 44B, 81-99
- Roger P. and Le Mer J., 2003 : Les sols : sources et puits de méthane. Etude et Gestion des Sols 10(4): pp. 331-345.
- Ryan M. G. and Law B. E., 2005: Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. Biogeochemistry 73: pp. 3-27
- Savanne D., Cassini P., Pokryszka Z., Tauziède C., Tregourès A., Sabroux J.C., Cellier P., Laville P., 1995 : A comparison of methods for the measurement of methane emissions from municipal solid waste landfills for the purpose of evaluating their contribution to the greenhouse effect (5th International Landfills Symposium, Sardinia'95, Margherita di Pula, 2-6 octobre 1995, vol III, 475-479)
- Savanne D., Berne Ph., Cellier P., Laville P., Pokryszka Z., Sabroux J.C., Tauziède C., Tregourès A. et al., 1997 : Comparaison of different methods for measuring landfill methane emissions. 6th International Landfills Symposium - Sardinia'97, Cagliari, 13-17 octobre 1997, vol IV, 81-85
- Sicard O., 2013 : La loi normale asymétrique. Institut de recherche sur l'enseignement des mathématiques de la Réunion, mars 2013
- TOTAL, 2015, Carbon capture and storage: the Lacq pilot. Project and injection period 2006-2013, [www.globalccsinstitute.com/publications/carbon-capture-and-storage-lacq-pilot-project-and-injection-period-2006-2013](http://www.globalccsinstitute.com/publications/carbon-capture-and-storage-lacq-pilot-project-and-injection-period-2006-2013)