



HAL
open science

Bilan effet de serre du traitement des déchets - Intégration du carbone biogénique et aspects temporels

Nelly N. Bataillé

► **To cite this version:**

Nelly N. Bataillé. Bilan effet de serre du traitement des déchets - Intégration du carbone biogénique et aspects temporels. Sciences de l'environnement. 2009. hal-02593134

HAL Id: hal-02593134

<https://hal.inrae.fr/hal-02593134>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Bilans Gaz à Effet de Serre dans le Traitement des Déchets

Intégration du carbone biogénique et aspect temporel



Nicolas BATAILLE
Etudiant 2^e année ENSE³ (Grenoble-INP)
Ecole Nationale Supérieure de l'Energie, l'Eau et l'Environnement

Stage du 2 juin au 14 août 2009

Maître de stage : Pascal MALLARD
Cemagref Rennes – GERE – SOWASTE



Sommaire

Sommaire	2
Introduction.....	2
I – Aspects temporels, carbone biogénique et bilan GES.....	3
a) Cycle du carbone : émissions gazeuses et séquestration	3
b) Conventions et hypothèses actuelles	4
c) Temporalité du PRG : application au méthane	7
II – Application au traitement des déchets	12
a) Secteur des déchets et choix des données de base	12
b) Scénario I : incinération	14
c) Scénario S : installations de stockage des déchets (ISD)	15
d) Scénario C : compostage	16
e) Comparaison des résultats des 3 scénarios	21
Conclusion.....	25
Annexe 1 : Erreur sur la prise en compte des émissions de méthane due au non-comptage du carbone biogénique	26
Annexe 2 : Choix des paramètres et du modèle d'émission pour l'ISD.....	27
Annexe 3 : Choix des paramètres et du modèle d'émission pour l'épandage	30
Annexe 4 : Analyse de la sensibilité	32
Bibliographie	33

Introduction

Les bilans d'émission de gaz à effet de serre constituent une part importante dans les processus d'évaluation environnementale, notamment les analyses du cycle de vie (ACV). Et ce d'autant plus qu'un engagement national de réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre (GES) a été pris lors du Grenelle de l'Environnement.

Résultats de méticuleux inventaires et d'indispensables approximations, ces bilans ne prennent généralement pas en compte explicitement l'aspect temporel lié aux émissions et leurs effets sur le climat. Ces approximations sur la dynamique d'émission et d'impact sur le réchauffement de la planète peuvent amener à un résultat biaisé ou trompeur.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'importance de la dynamique temporelle dans les bilans GES, dans le cas du traitement des déchets. La question sous-jacente de la prise en compte ou non du carbone biogénique dans les bilans sera aussi abordée.

Le secteur des déchets, où des phénomènes de séquestration et de relargage progressif du carbone interviennent, est en effet particulièrement concerné par ces questions de dynamique temporelle des émissions. Cette étude s'appuiera donc sur le bilan comparé des émissions GES de trois modes de traitement des déchets : le stockage des déchets, l'incinération et le compostage.

I – Aspects temporels, carbone biogénique et bilan GES

a) Cycle du carbone : émissions gazeuses et séquestration

Dans les filières de traitement des déchets, les émissions de gaz à effet de serre font suite à des réactions chimiques ou biologiques menant à une décomposition de la matière organique. Ces réactions ne sont pas toujours instantanées et sont caractérisées par une cinétique qui leur est propre, ce qui engendre un étalement dans le temps des émissions. En particulier, les réactions biologiques se déroulant sous l'action de bactéries dans des conditions particulières peuvent être très lente : de l'ordre de la journée, de l'année voire même du siècle.

La lenteur de certains de ces processus induit la notion de séquestration : c'est le fait de piéger durablement du carbone hors de l'atmosphère. Le carbone sous forme gazeuse dans l'atmosphère (principalement du dioxyde de carbone CO₂) ayant un effet de serre, ce phénomène contribue à l'atténuation du réchauffement climatique.

Dans le traitement des déchets (hors déchets dangereux), les principaux gaz produits ayant un effet sur le climat sont le méthane et le dioxyde de carbone*. C'est donc l'influence de leurs émissions sur le bilan GES qui sera étudiée ici.

Pour le CO₂, en général, on distingue deux parties dans le cycle du carbone : un cycle court et un cycle long. Ce dernier implique des phénomènes de fossilisation qui sont un moyen de stocker du carbone (séquestration). Le cycle court quant à lui est dû à la fixation du carbone dans les plantes lors de la photosynthèse (ce qui est à nouveau de la séquestration).

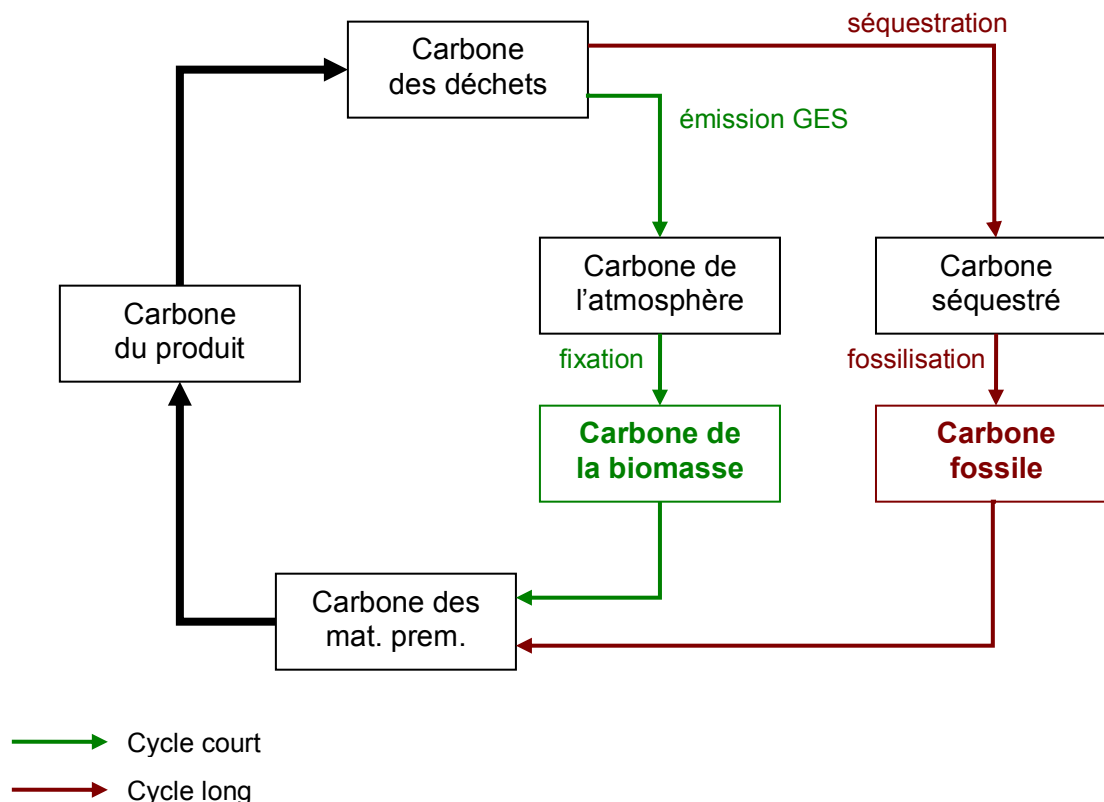


Figure 1 : Le carbone : cycle court et cycle long (adapté de [1])

* Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) jouent également pour certains procédés, mais ne seront pas prises en compte ici car sans rapport avec les cycles du carbone.

b) Conventions et hypothèses actuelles

En accord avec le protocole de Kyoto et les directives du GIEC [2], les effets des gaz sur le climat sont estimés de façon cumulée à un horizon temporel de 100 ans. L'effet sur le climat est exprimé par le concept du potentiel de réchauffement global (PRG) qui sera vu dans la partie suivante.

Une convention largement répandue dans la comptabilisation des émissions de CO₂ consiste à distinguer le carbone biogénique du carbone fossile. Le terme carbone biogénique désigne tout le carbone issu de la biomasse (bois, plantes, etc.), par opposition au carbone fossile (plastiques). Ce carbone biogénique est en fait le fruit des mécanismes de photosynthèse des végétaux et est donc considéré comme appartenant au cycle court du carbone. C'est-à-dire, quand on émet du CO₂, on considère qu'il est issu d'une séquestration récente par la plante et qu'il sera très rapidement absorbé à nouveau par des végétaux qui viendront remplacer ceux utilisés. Ainsi, son bilan vis-à-vis de l'effet de serre est nul : tout gaz émis est tout de suite réabsorbé ou provient de la même quantité de gaz qui vient d'être séquestrée. Ainsi la création d'une planche de bois a enlevé une quantité égale de carbone à l'atmosphère lors de sa création que l'incinération de celle-ci va en produire. Les bilans GES décident donc le plus souvent de l'exclure du bilan final, comme le recommande le GIEC. Au contraire, lorsque que l'on émet du carbone fossile dans l'atmosphère, on le retire d'un cycle long, la quantité de GES dans l'atmosphère est donc augmentée durablement : le bilan n'est pas neutre.

Séquestration du carbone

La séquestration du carbone est le pendant des émissions de GES : son impact sur le climat est bénéfique. Il s'agit du fait de retirer à plus ou moins long terme une certaine quantité de carbone gazeux de l'atmosphère (et donc du cycle court). Ces gaz ayant un effet de serre, cette action est bénéfique puisque le forçage radiatif de l'atmosphère est diminué. Il existe plusieurs voies pour piéger du carbone hors de l'atmosphère. Par exemple, l'immobilisation du carbone organique dans une planche de bois. Si l'on adopte la convention de non-comptabilisation du carbone biogénique, il faut donc retirer ce carbone (biogénique) séquestré du bilan GES.

En revanche, dans le secteur des déchets, on considère usuellement comme séquestration le fait « d'enterrer » à long terme (typiquement 100 ans) du carbone organique (provenant des déchets et non du carbone atmosphérique) dans les sols, au lieu de l'émettre sous forme de gaz. En réalité, le carbone gazeux a été vraiment séquestré (retiré de l'atmosphère) lors de la fabrication du produit (ou de sa matière première, par exemple la planche de bois) mais il est comme « séquestré » s'il reste piégé à suffisamment long terme dans les sols (ou dans une installation de stockage). C'est parce que le bilan dans le traitement des déchets ne s'intéresse qu'à la fin de vie du produit et que le carbone entre sous forme de déchet qu'on appelle séquestration le fait de stocker ce déchet organique à long terme dans le sol (on ne retire pas effectivement du carbone de l'atmosphère, mais plutôt indirectement : on « continue » le phénomène de séquestration entamé lors du début du cycle de vie du produit).

A l'inverse, on ne doit pas considérer comme « séquestré » le carbone fossile. En adéquation avec la définition donnée ci-dessus, le carbone fossile ne provient pas de l'atmosphère : si on enterre du plastique, on n'enlève aucune quantité de carbone de l'atmosphère. Par exemple, le carbone d'un cadre de fenêtre en plastique « immobilisé » dans une maison ne sera simplement pas émis et donc non compté dans le bilan GES (il reste fossile, en quelque sorte). En revanche, si de la matière organique (i.e. du carbone biogénique) est piégée et ne se dégrade plus, c'est autant de carbone qui est retiré de l'atmosphère et donc qui sort du cycle court.

Lorsqu'elle est prise en compte dans les bilans GES, la séquestration, calculée à partir d'un bilan de matière du carbone, donne droit à des crédits d'émissions. En fait, elle est comptée comme une émission négative (quantité de carbone négative). Habituellement, on compte

comme émission négative, la quantité de carbone biogénique stockée au bout de 100 ans. On lui attribue généralement un PRG de 1 et un facteur stœchiométrique valant 44/12 pour l'avoir en équivalent CO₂.

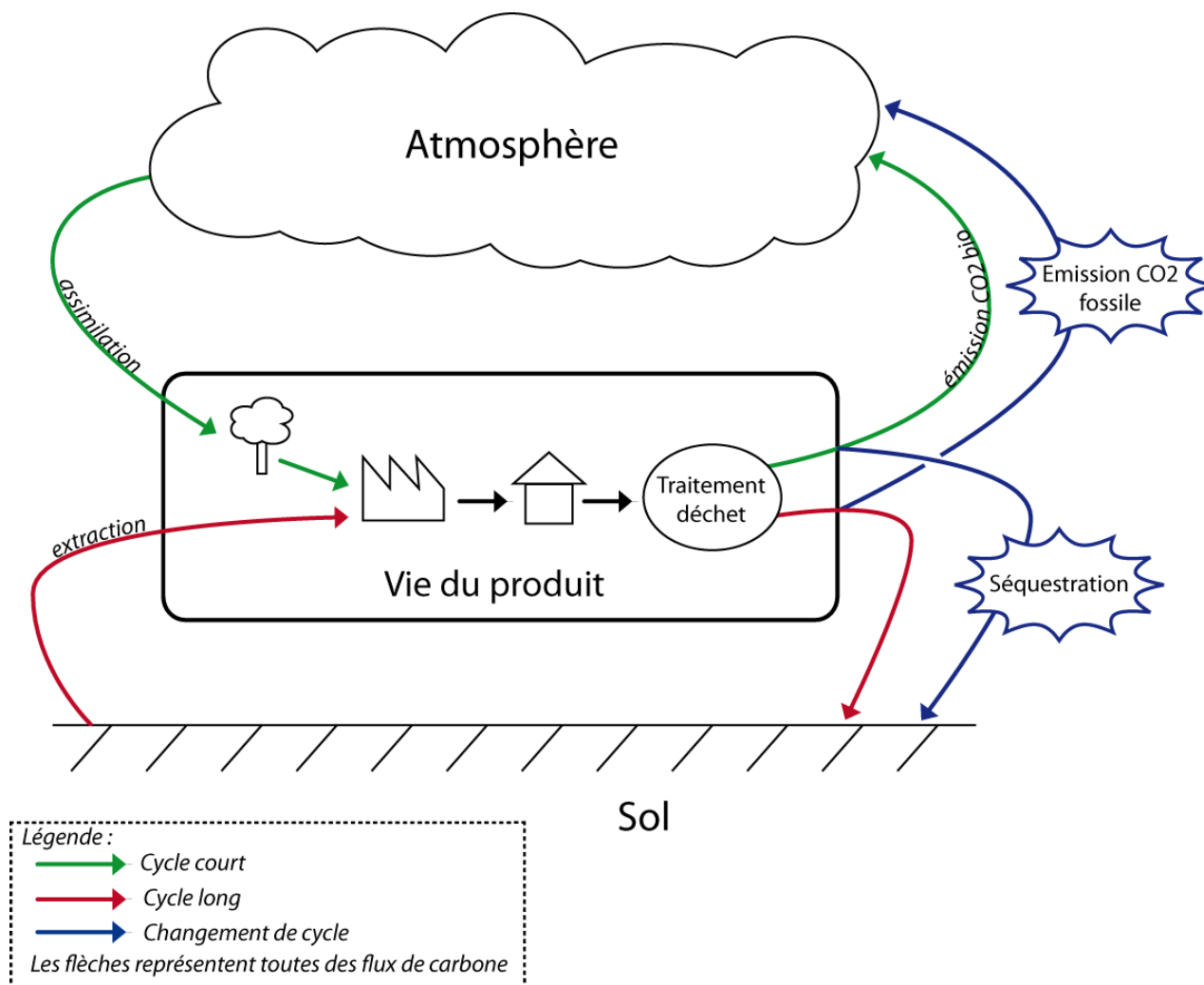


Figure 2 : Schéma du bilan des flux de carbone

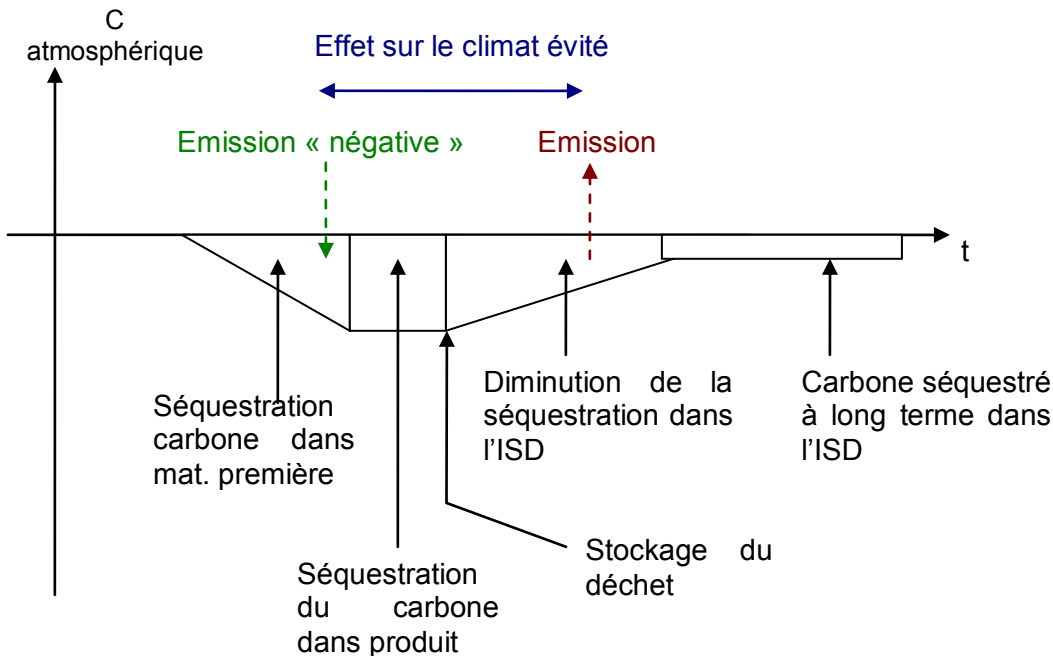
D'après le schéma précédent, on voit bien que, d'une part, la « séquestration » est une émission de CO₂ biogénique en moins et d'autre part que seule l'émission de CO₂ fossile correspond à un déséquilibre des cycles naturels. Quant à la « séquestration » du carbone fossile, son impact est bien nul puisque le carbone est issu du sol et y revient (on reste dans le cycle long).

Omission du carbone biogénique et erreur de comptage sur le méthane

Dans le traitement des déchets, si on choisit de prendre en compte le carbone biogénique dans la comparaison de deux bilans GES avec émission de méthane, on évite une surestimation d'environ 12% de l'effet de serre lié aux émissions de méthane exprimées en équivalent CO₂ (pour le détail du calcul, cf. Annexe 1 : Erreur sur la prise en compte des émissions de méthane due au non-comptage du carbone biogénique. Elle vient du fait que lorsque l'on omet les émissions de CO₂ biogénique, on ne prend pas en considération le fait que l'émission de CH₄ se fait à la place d'une certaine quantité de CO₂.

Influence des cinétiques de séquestration et d'émission sur le climat

Le cycle du carbone biogénique peut être plus ou moins long. La durée de ce cycle, à savoir la durée d'immobilisation du carbone biogénique, n'est pas sans influence sur le bilan GES. Le schéma suivant décrit le phénomène dans le cas du cycle de vie d'un produit contenant une certaine quantité de carbone biogénique, finissant dans une installation de stockage des déchets (ISD).



Pendant toute la durée de son immobilisation, le carbone séquestré ne contribue pas à l'effet de serre. Ici, cette séquestration se poursuit sur le long terme au sein de l'ISD, comme on le verra par la suite.

Si on prend en compte tout le cycle de vie du produit, l'ISD peut comporter au final un impact positif sur le climat (mais une valeur d'émission négative !), puisqu'une certaine quantité de carbone biogénique reste stockée à très long terme. En revanche, l'impact est neutre vis-à-vis du carbone fossile puisque celui-ci reste stocké. Si on ne prend pas en compte toute la durée de vie du produit, il a un forçage radiatif (i.e. un effet sur le climat) dû à l'ISD, même si une partie du carbone reste stockée dans la décharge.

Dans son éditorial du International Journal of Life Cycle Assessment [3], Ari Rabl met en évidence les problèmes soulevés par cette convention de non prise en compte du carbone biogénique dans les bilans. Par exemple, le fait de brûler une forêt serait aussi neutre que brûler une forêt tout en la renouvelant. C'est pour cette raison que la notion de séquestration fait son apparition. En fait, Rabl préconise de compter la séquestration et les émissions de carbone à chaque stade afin d'avoir un bilan approprié. Pour le cas de la forêt le bilan sera évidemment nul, mais pour le secteur des déchets où le mode de production des déchets ne rentre pas en considération, le comptage du carbone biogénique explicitement permettrait de comparer de manière plus juste les différentes filières de traitement. En réalité, lors d'un bilan du traitement des déchets on ne s'intéresse qu'à la fin de vie du produit. On a un déchet entrant et on calcule les émissions. La problématique de Rabl ne fait son apparition que dans le cas d'une analyse de tout le cycle de vie.

c) Temporalité du PRG : application au méthane

Le PRG et l'effet sur le climat

Les différents gaz ne contribuent pas tous à la même hauteur à l'effet de serre. De fait, certains ont un effet sur le rayonnement plus important que d'autres et/ou une durée de vie plus longue dans l'atmosphère. La contribution à l'effet de serre de chaque gaz se mesure grâce au pouvoir de réchauffement global (PRG) ou Global Warming Potential (GWP). Le pouvoir de réchauffement global d'un gaz se définit comme le forçage radiatif (c'est à dire la puissance radiative que le gaz renvoie vers le sol), cumulé sur la durée. Cette valeur se mesure relativement au CO₂, qui a ainsi un PRG égal à 1.

Du fait des différentes durées de vie des gaz, le PRG dépend de l'horizon temporel considéré. Bien qu'il le calcule pour plusieurs horizons temporels différents, le GIEC recommande l'horizon 100 ans pour pouvoir comparer différents rejets dans l'atmosphère. C'est en fait la même durée qui est considérée dans le protocole de Kyoto. Cette valeur est également reprise par les différentes méthodes de calcul de bilan effet de serre (Bilan Carbone® de l'ADEME, protocole EpE pour les déchets, etc.).

Cette valeur de PRG permet d'exprimer les émissions totales de gaz à effet de serre en éqCO₂ ou éqC quels que soient les gaz considérés.

PRG du méthane en fonction du temps

Pour obtenir la valeur du PRG d'un gaz en fonction du temps, il est avant tout nécessaire de connaître la décroissance de la concentration d'un gaz dans l'atmosphère après émission puisque le PRG en dépend. Dans le cas du PRG du méthane, il faut calculer celle du dioxyde de carbone (CO₂) qui est la référence et celle du méthane (CH₄).

Cas du CO₂

On se sert l'équation de décroissance utilisée par le GIEC (issu du modèle du cycle du carbone de Bern) [2] :

$$\frac{\text{masse}(\text{CO}_2)}{\text{masse}(\text{CO}_2)_{\text{initiale}}} = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-t/\tau_i}$$

Avec :

$a_0 = 0,217$, $a_1 = 0,259$, $a_2 = 0,338$, $a_3 = 0,186$, $\tau_1 = 172,9$ années, $\tau_2 = 18,51$ années, $\tau_3 = 1,186$ années

Cas du CH₄

Le CH₄ a un cycle beaucoup plus simple, qui peut-être modélisé par une décroissance en $\exp(-t/12)$ (préconisé par le GIEC [2]).

On obtient donc avec ces deux équations les courbes suivantes pour une concentration initiale de gaz de 1 :

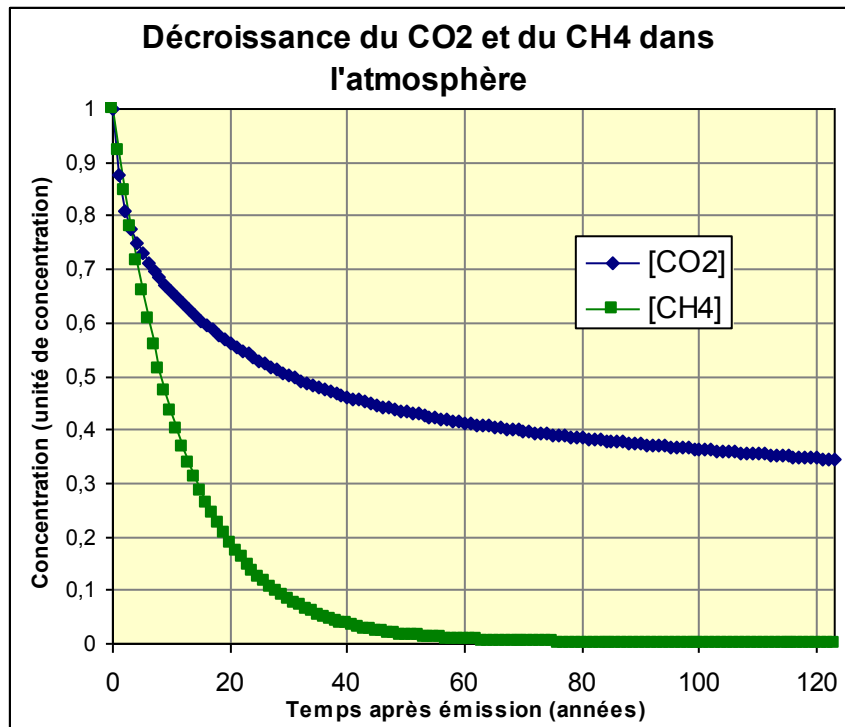


Figure 3 : Décroissance atmosphérique du CO₂ et du CH₄

Calcul des PRG absolus du CO₂ et du CH₄

La formule pour le calcul du PRG est la suivante :

$$GWP_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_r(t)] dt}$$

Où :

GWP_i est le PRG du gaz i, TH l'horizon temporel

RF_i (ou RF_r) est le forçage radiatif (radiative forcing) du gaz i (ou r)

a_i (ou a_r) est l'efficacité radiative (radiative efficiency) du gaz i (ou r)

Le numérateur de ce quotient désigne alors le « PRG absolu » de i et le dénominateur le « PRG absolu » de r. Dans notre cas, i est le CH₄ et r le CO₂, qui est toujours pris comme référence. Ainsi, le PRG du méthane n'est autre que le rapport de son PRG absolu sur celui du CO₂.

Les valeurs des efficacités radiatives utilisées par le GIEC sont les suivantes [2] :

$$a(\text{CO}_2) = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ppb}^{-1}$$

$$a(\text{CH}_4) = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ppb}^{-1}$$

En effectuant l'intégrale du produit de la concentration (décroissante) du gaz par son efficacité radiative, on obtient donc son PRG absolu. Un calcul discrétisé sur un pas de temps de 1 an réalisé avec Excel donne les courbes suivantes :

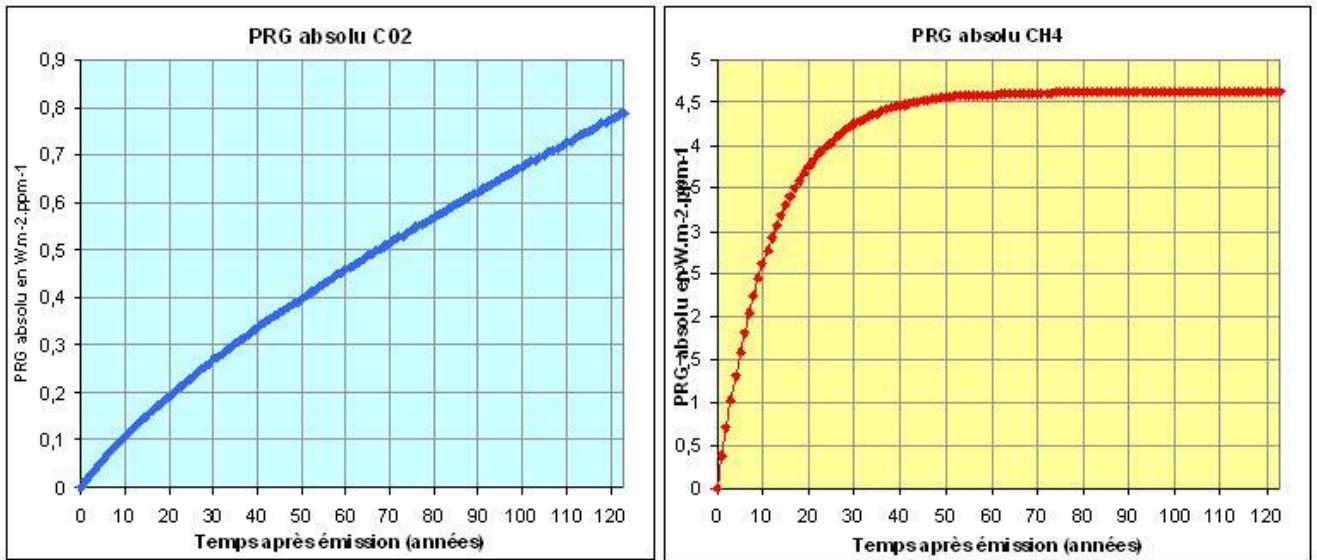


Figure 4 : PRG absolus du CH₄ et du CO₂

Calcul du PRG du méthane en fonction du temps

Il suffit de diviser le PRG absolu du méthane par celui du dioxyde de carbone pour avoir le PRG (relatif) du méthane. On multiplie en plus par 44/12 pour tenir compte des masses molaires des deux gaz et passer ainsi des ppm aux kg.

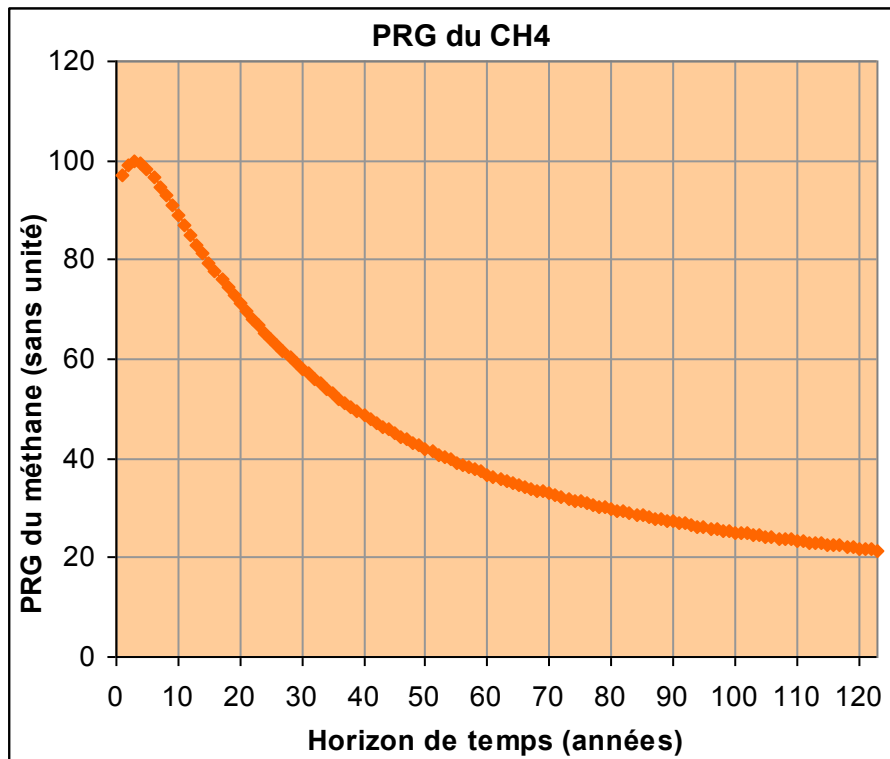


Figure 5 : PRG du méthane en fonction du temps

On vérifie qu'on obtient bien les mêmes valeurs que le GIEC aux horizons 20, 50 et 100 ans : 72, 42 et 25.

Il faut bien garder à l'esprit que la notion de PRG « à 100 ans » désigne l'effet sur le climat cumulé sur 100 ans d'une émission gazeuse ponctuelle rapporté à l'effet d'une même quantité de

CO₂ émise. Elle prend donc en compte l'effet sur le climat de l'année de l'émission (année 0) jusqu'à l'année 100, au regard de l'effet du CO₂.

On constate donc que pour les espèces ayant un temps de décroissance assez court (comme le méthane), leur effet sur le climat peut sembler minimisé en voyant son PRG à 100 ans : le méthane a un PRG de 25 à 100 ans mais de 89 à 10 ans !

Comme le soulignent Dessus et Le Treut [4], l'objectif de réduction fixé par l'Union Européenne, à savoir limiter le réchauffement à deux degrés (ou 450 ppmv d'éqCO₂ dans l'atmosphère) ne pourra être atteint si l'effort est concentré uniquement sur le CO₂. En effet le méthane, entre autres, a un impact très important sur le climat au début de sa vie dans l'atmosphère. Et ce n'est pas l'utilisation du PRG et de son équivalent CO₂ qui contribue à sensibiliser à un tel enjeu.

Le concept du PRG, au vu de ce qui a été dit précédemment, a deux inconvénients majeurs. D'une part, il minimise fortement l'impact des gaz à courte durée de vie dans l'atmosphère et en particulier celui du méthane. Il détourne donc l'attention des décideurs vers le CO₂ qui n'est pas toujours l'objectif de réduction le plus pertinent. D'autre part, le PRG se borne à un horizon temporel fixé. Généralement 100 ans. Ce qui occulte toute une partie de l'effet sur le climat des gaz et empêche son application pour une émission non pas ponctuelle mais répartie sur une période plus ou moins longue. Dans ce cas, il serait beaucoup plus judicieux d'utiliser un indicateur de l'effet instantané sur le climat. C'est pourquoi dans les parties suivantes, à la manière de Eschenroeder [5], nous comparerons les cinétiques d'émission en utilisant le forçage radiatif qui représente réellement l'effet instantané d'une émission sur le climat, après un certain temps suivant cette émission (le PRG est un simple cumul de cette valeur). Toutefois, le forçage radiatif s'exprimant en W/m², il peut paraître un peu abscons pour des décideurs non-spécialistes. De plus, le fait de se passer du cumul sur un horizon temporel donné, tout en rendant le résultat plus explicite, complique la comparaison entre différents procédés (on compare deux courbes plutôt que deux valeurs).

NB : Il serait peu pertinent de multiplier une courbe de cinétique d'émission de CH₄ (i.e. : poids de gaz émis à chaque instant t) par le PRG de 25, puisque cela ne donnerait que l'effet cumulé sur 100 ans de l'émission de chaque année. Sur la courbe obtenue, à l'année 1 on aurait l'effet cumulé de l'année 1 jusqu'à l'année 101 de l'émission de l'année 1, à l'année 2 le cumul de l'année 2 à l'année 102 de l'effet de l'émission de l'année 2, etc..

$$RF = a \cdot C(t)$$

Où RF est le forçage radiatif (radiative forcing) en W/m²

a est l'efficacité radiative du gaz en W/m²/ppm

C(t) est la concentration du gaz dans l'atmosphère au cours du temps, en ppm.

Pour passer des émissions en kg aux ppm (puis au forçage radiatif), il faut utiliser un facteur dépendant du volume total de l'atmosphère. Dans les calculs qui suivent il n'a pas été pris en compte, d'où les unités en α.W/m² où α est la constante induite par ce facteur.

Quand on a une cinétique d'émission, on obtient le forçage radiatif à un instant donné en cumulant l'effet des émissions de chacune des années antérieures.

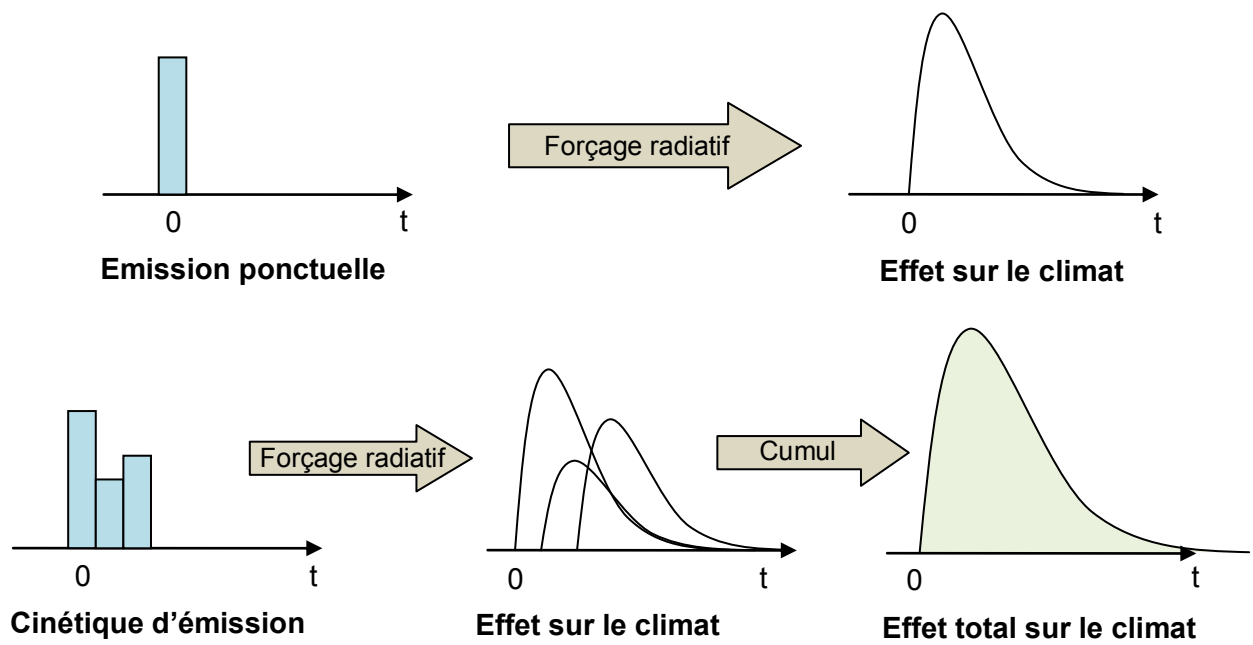


Figure 6 : Méthodologie de calcul de l'effet instantané sur le climat pour une émission ponctuelle de GES et pour une cinétique d'émission

II – Application au traitement des déchets

a) Secteur des déchets et choix des données de base

Dans le secteur du traitement des déchets, le carbone biogénique est rejeté à l'atmosphère à des échelles de temps très variables. Cette cinétique d'émission est liée à de nombreux facteurs : type de matériaux, mode de traitement, conditions physico-chimiques, etc.

Ces multiples échelles temporelles impliquent un phénomène de séquestration et une cinétique d'émission, qui sont donc à considérer dans le cadre de l'étude de la dynamique temporelle du système.

Cette étude se focalise spécifiquement sur trois scénarios correspondant à trois modes de traitement : le stockage des déchets (en ISD), l'incinération et le compostage. Ces trois scénarios correspondent à trois cinétiques d'émissions bien contrastées, dont la comparaison sera pertinente au vu de la problématique. Le but n'est pas de calculer un bilan GES complet de ces trois filières mais plutôt de faire un bilan simplifié de l'effet de leurs émissions gazeuses sur le climat afin d'évaluer qualitativement l'importance de l'aspect temporel et de la prise en compte du carbone biogénique.

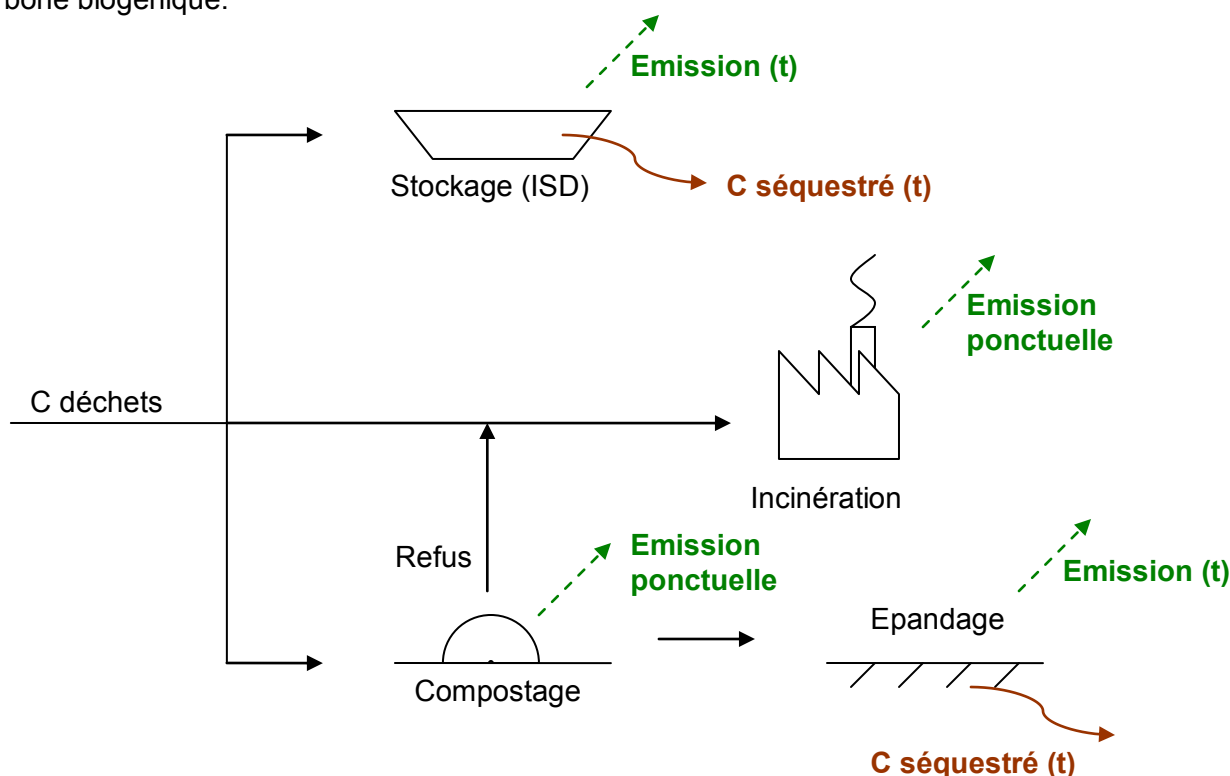


Figure 7 : Scénarios simplifiés étudiés

La figure ci-dessus indique les phénomènes d'émission et de séquestration (de non-émission du carbone biogénique, plus exactement) qui dépendent du temps. En plus, se rajoute l'évolution temporelle du PRG décrite précédemment, même pour les émissions ponctuelles.

Même si cette étude s'inscrit dans ce cadre, il ne s'agit pas ici d'un véritable bilan GES et encore moins d'une analyse du cycle de vie : on ne calcule pas les émissions évitées (valorisation énergétique, substitution aux engrais...), ni les émissions indirectes (type transport). On prend en compte seulement les émissions de méthane et de gaz carbonique et la quantité de carbone biogénique séquestrée liées au traitement proprement dit et au devenir des déchets.

Le but étant de comparer l'impact sur le changement climatique des émissions brutes liées à ces trois scénarios, il convient de fixer des données de base qui leur soient communes.

Tout d'abord, les seuls gaz à effet de serre considérés seront le méthane et le gaz carbonique, sachant qu'une attention toute particulière sera portée sur l'influence du carbone biogénique et sa séquestration. Les émissions de N_2O , ne seront pas prises en compte. Ce gaz intervient dans le bilan GES du traitement des déchets (notamment pour les filières biologiques), mais globalement de façon marginale. Surtout, le N_2O appartient au cycle de l'azote, et non du carbone, et n'est donc pas soumis aux mêmes soucis méthodologiques que le méthane ou le dioxyde de carbone.

Il faut également fixer une composition commune pour le déchet entrant. On prendra une tonne de déchets d'ordures ménagères (OM) selon la moyenne française donnée par la campagne MODECOM de l'ADEME [6], [7]. Dans la mesure du possible, les données les plus récentes (2008) seront utilisées, à défaut on prendra celle de la campagne de caractérisation précédente (1993). Les données retenues sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Composition des déchets en % et contenu en carbone (source : [6], [7])

	% sur masse sèche (MODECOM08)	% sur masse humide (MODECOM08)	Contenu en C en % sur MS déchets (MODECOM 93)
Déchets putrescibles	8,4%	30,1%	4,55%
Papiers	13,0%	10,4%	7,85%
Cartons	6,7%	5,4%	4,21%
Composites	1,9%	1,8%	0,98%
Textiles	3,6%	2,6%	1,59%
Textiles sanitaires	7,1%	10,2%	1,01%
Plastiques	13,6%	11,7%	8,67%
Combustibles NC	3,1%	2,3%	1,87%
Verre	10,0%	6,2%	0,04%
Métaux	4,2%	3,0%	0%
Incombustibles NC	3,2%	2,5%	0,04%
Déchets dangereux	1,2%	0,8%	0%
Éléments fins < 20 mm	24,0%	13,0%	4,18%
Total	100%	100%	35%

Pour avoir une estimation sur toute la durée de vie d'une installation, on étudiera le scénario d'une tonne de déchet en entrée chaque année pendant 20 ans (et rien ensuite), ce qui correspond à l'ordre de grandeur de la durée de vie d'une usine de traitement.

Dans un premier temps, nous calculerons le forçage radiatif induit par les émissions de chaque scénario et nous évaluerons l'importance relative du carbone biogénique (qui sera effectivement compté). Enfin, après avoir comparés les trois scénarios entre eux, on comparera les résultats obtenus avec ceux calculés classiquement (i.e. : sans le carbone biogénique et avec PRG = 25, émissions cumulées sur 100 ans).

Récapitulatif des hypothèses pour la réalisation du bilan GES des trois scénarios

Unité fonctionnelle	Traitement de 1 tonne/an d'ordures ménagères, durant 20 ans
Termes du bilan pris en compte	Émissions directes de CO_2 (biogénique compris) et de CH_4
Critère d'évaluation	Forçage radiatif instantané à l'année n suivant la 1 ^{ère} année d'émission

b) Scénario I : incinération

Par souci de simplification, on fait l'hypothèse que tout le carbone contenu dans les déchets incinérés est émis sous forme de gaz et uniquement sous forme de CO₂. On néglige donc les émissions de carbone sous une autre forme gazeuse ou le carbone restant piégé dans les résidus (imbrûlés, notamment). Cette émission est considérée comme ponctuelle et a lieu à l'instant où le déchet entre dans l'installation (i.e. : émission du déchet à l'année 0 imputée à l'année 0).

Il reste alors à distinguer le CO₂ issu du carbone biogénique de celui issu du carbone fossile (matière synthétique : plastique). En fait, cela dépend de la composition du déchet entrant. Nous prendrons bien sûr la composition choisie pour les trois scénarios (cf. chapitre précédent). Les valeurs des teneurs en carbone pour chaque catégorie de déchet nous permettent de distinguer le carbone biogénique du carbone fossile et donc leurs émissions associées.

Quantités de carbone émises

Parmi les catégories de déchets spécifiées par MODECOM, on distingue celles contenant du carbone biogénique : déchets putrescibles, papiers, cartons, textiles, textiles sanitaires. Et celles contenant du carbone fossile : plastiques et combustibles non-classés. Les autres catégories contiennent très peu de carbone, qu'on négligera [7]. Au final, l'addition des différentes teneurs en carbone donne : 24% de carbone biogénique et 11% de carbone fossile par tonne de déchets secs soit environ, par tonne de déchets humides (à 35% d'humidité), 160 kg de carbone biogénique et 70 kg de carbone fossile. Avec les hypothèses prises, tout ce carbone est émis sous forme de CO₂ : en multipliant par 44/12 (coefficient stœchiométrique pour passer du C au CO₂) on obtient la quantité de CO₂ émise en kg.

Résultats

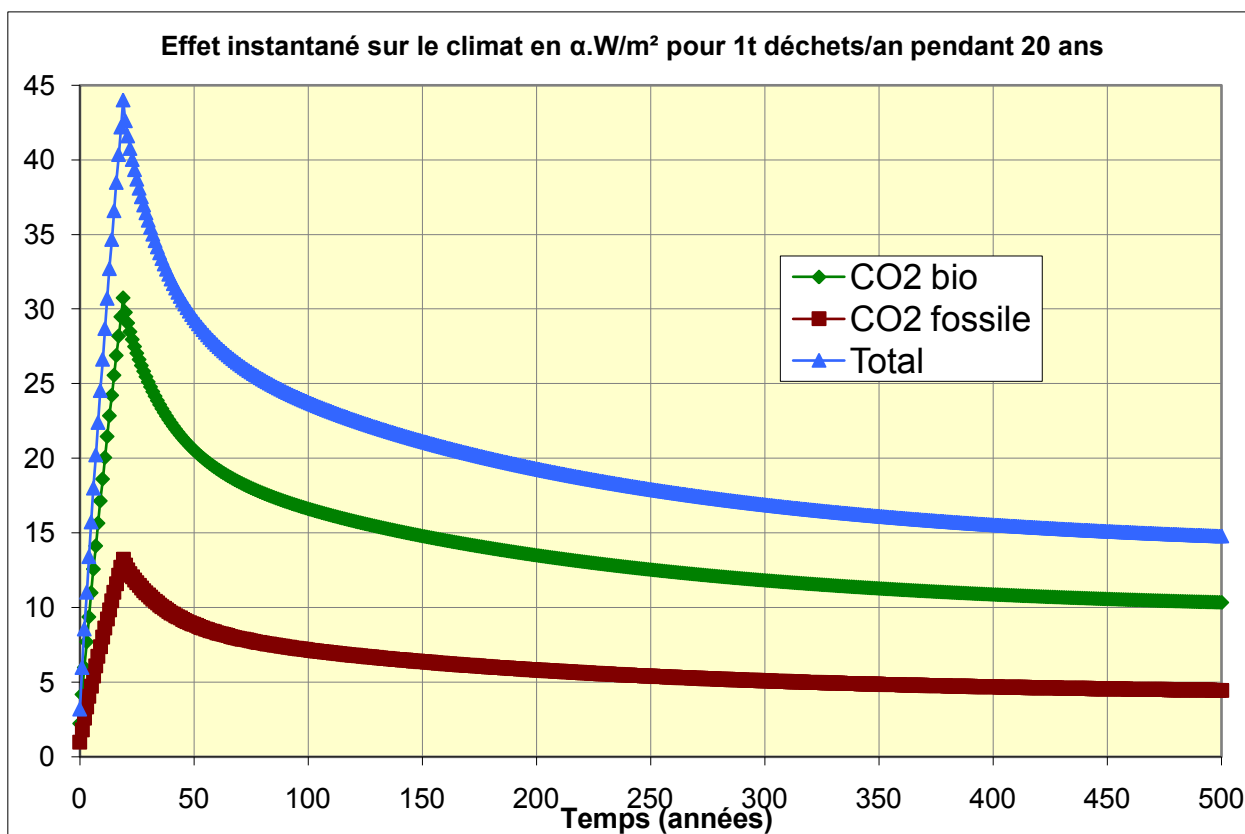


Figure 8 : Effet sur le climat des émissions gazeuses du scénario I

Dans ce scénario d'incinération et avec nos hypothèses, la contribution au forçage radiatif du CO₂ biogénique émis est bien plus importante que celle du CO₂ fossile. Ceci est complètement lié à la composition initiale des déchets qui contient plus de carbone venant de la biomasse que de carbone fossile.

c) Scénario S : installations de stockage des déchets (ISD)

Dans les ISD, c'est à partir du carbone biogénique que des réactions de biodégradation vont entraîner la formation d'une certaine quantité de gaz à effet de serre.

Calcul de la quantité de carbone biogénique restant séquestré

Vu qu'on néglige les émissions de carbone autres que sous forme de CO₂ ou CH₄ (i.e. : on omet COV et lixiviate), on peut écrire un bilan de matière vis-à-vis du carbone :

$$\Delta S(t) = \text{EmissionsC-CO}_2(t) + \text{EmissionsC-CH}_4(t)$$

Avec S le stock de carbone biogénique et $\Delta S(t)$ sa variation au cours du temps.

Les émissions sont comptées en cumul depuis $t = 0$.

Ainsi en connaissant la cinétique d'émission de CO₂ et de CH₄ et le stock initial de carbone biogénique, on peut connaître la quantité de carbone biogénique entrant restant séquestré au cours du temps (= Stock C).

En fait, une fois le modèle construit (à partir du modèle d'émission de biogaz SWANA), on a calé les paramètres (le potentiel de production de biogaz) afin d'obtenir une quantité séquestrée de 63 kg de carbone résiduel, en accord avec l'étude RECORD [8], compte tenu de notre hypothèse de composition de déchet.

Résultats

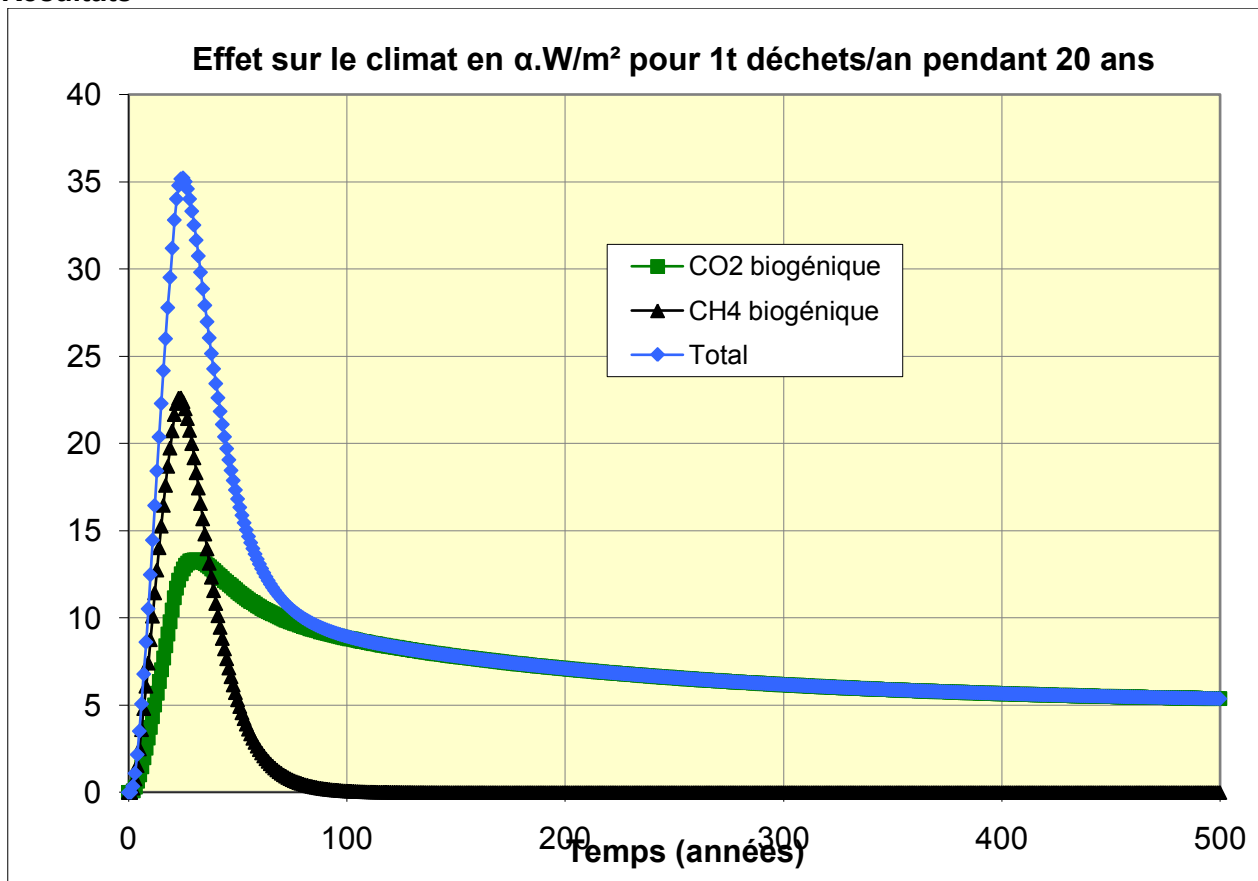


Figure 9 : Effet sur le climat des émissions gazeuses du scénario S

Dans le cas du scénario de l'ISD, les émissions gazeuses (dioxyde de carbone et méthane) sont exclusivement issues de la dégradation du carbone biogénique. Une partie de ce carbone biogénique reste séquestré. Quant à lui, le carbone fossile est entièrement conservé. On constate que l'effet sur le climat du méthane se borne aux horizons temporels de relativement court terme (< 90 ans) alors que le CO₂ biogénique continue à avoir un forçage radiatif à long terme puisqu'il se dégrade lentement dans l'atmosphère.

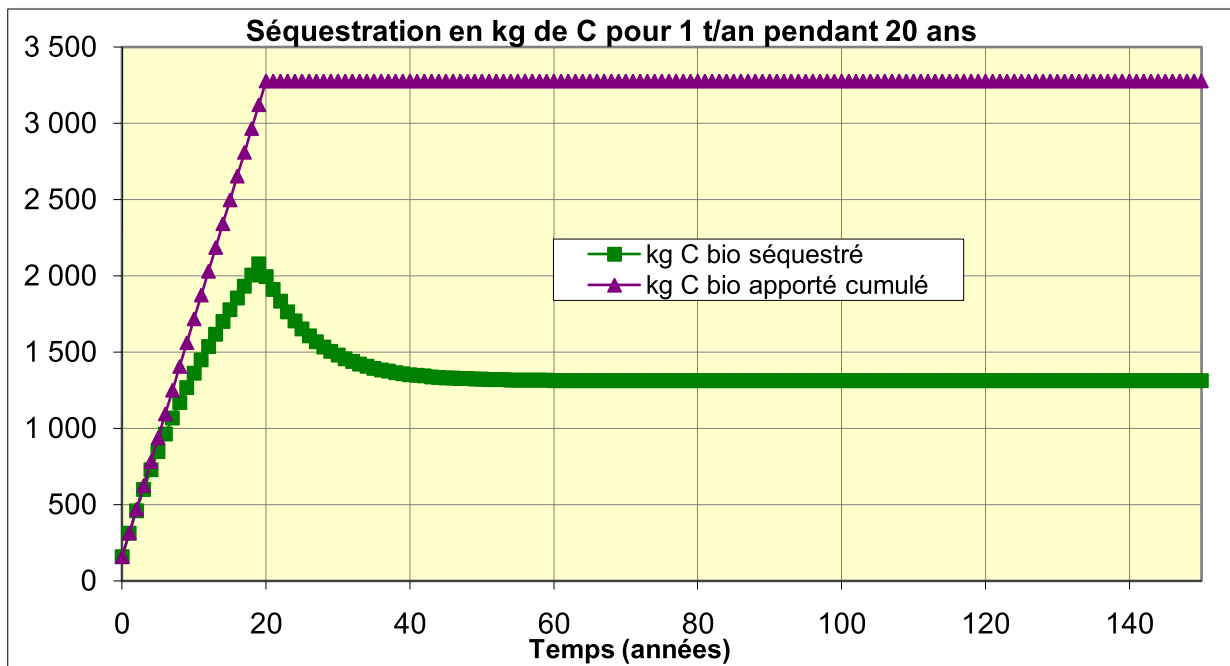


Figure 10 : Stock de carbone séquestré dans le scénario I au cours du temps

Dans ce scénario, on constate que le carbone séquestré au bout de 20 ans après l'arrêt du fonctionnement de l'installation (i.e. : $t = 40$ ans) le sera à long terme. Néanmoins, le nombre d'année nécessaire pour atteindre une quantité de carbone séquestré stable dépend énormément de la constante de temps choisie pour la cinétique d'émission du biogaz (cf. Annexe 2 : Choix des paramètres et du modèle d'émission pour l'ISD).

d) Scénario C : compostage

Il s'agit ici de tri-compostage des ordures ménagères. Celles-ci sont triées à l'aide de procédés mécano-biologiques qui permettent de séparer la partie organique de la fraction inerte (plastiques, métaux, verre...) qui constitue les refus. Le carbone des déchets se retrouve donc soit dans ces refus qui contiennent une part de matière organique du fait des imperfections du tri, soit dans le compost qui est le produit final issu du compostage de la partie organique, soit dans les émissions gazeuses inhérentes à la confection du compost (les pertes par biodégradation). Ensuite, ce compost est épandu et le carbone est alors réémis sous forme gazeuse (du CO₂ essentiellement), ou reste séquestré dans les sols. Les émissions dues à la confection du compost sont considérées comme ponctuelles et imputées à l'année 0. On fait l'hypothèse que le refus est incinéré et il reste alors à étudier la cinétique d'émission (et de séquestration) due à l'épandage du compost.

Évaluation des flux de carbone

Pour déterminer les flux de carbone, on utilise un bilan de matière du tri-compostage réalisé expérimentalement sur une installation récente, qui produit un compost de qualité normée. On

considère que les pertes carbonées sont uniquement composées de méthane et de dioxyde de carbone et que la composition du déchet entrant suit bien celle de MODECOM présentée précédemment. Les hypothèses utilisées sont récapitulées (tout est exprimé en matière sèche) dans le

Tableau 2 : Hypothèse de calcul du bilan de matière du tri-compostage et la Figure 11 : Schéma détaillé des processus de tri-compostage et hypothèses associées.

Tableau 2 : Hypothèse de calcul du bilan de matière du tri-compostage, en masse sèche

Objet	Valeur	Source
Données d'entrée		
% MS des OM	65%	Hyp.
Contenu en C bio par tonne d'OM	160 kg	Hyp.
Contenu en C fossile par tonne d'OM		
Devenir du carbone des déchets, en % de l'entrant, au cours des phases de pré-compostage et d'affinage*		
Pertes	25%	[9]
Refus	32%	[9]
Compost frais	43%	[9]
Devenir de la masse sèche des déchets, en % de l'entrant, au cours des phases de pré-compostage et d'affinage		
Pertes	15%	[9]
Refus	55%	[9]
Compost frais	30%	[9]
Pertes en matière sèche liée à la phase de compostage et maturation		
Facteur de réduction de la MS	1,6	[6]
% massique du carbone dans les pertes en compostage et maturation	50%	[10]
% C émis sous forme de CH ₄ lors du pré-compostage	15%	[10]
% C émis sous forme de CH ₄ durant le compostage et la maturation	5%	[10]

* Pour un temps de séjour dans le tube rotatif intermédiaire (entre 2,5 et 5 jours) et avec l'hypothèse d'un rapport de masse entre carbone biogénique et matière organique non synthétique (MONS) constant et égal à 2.

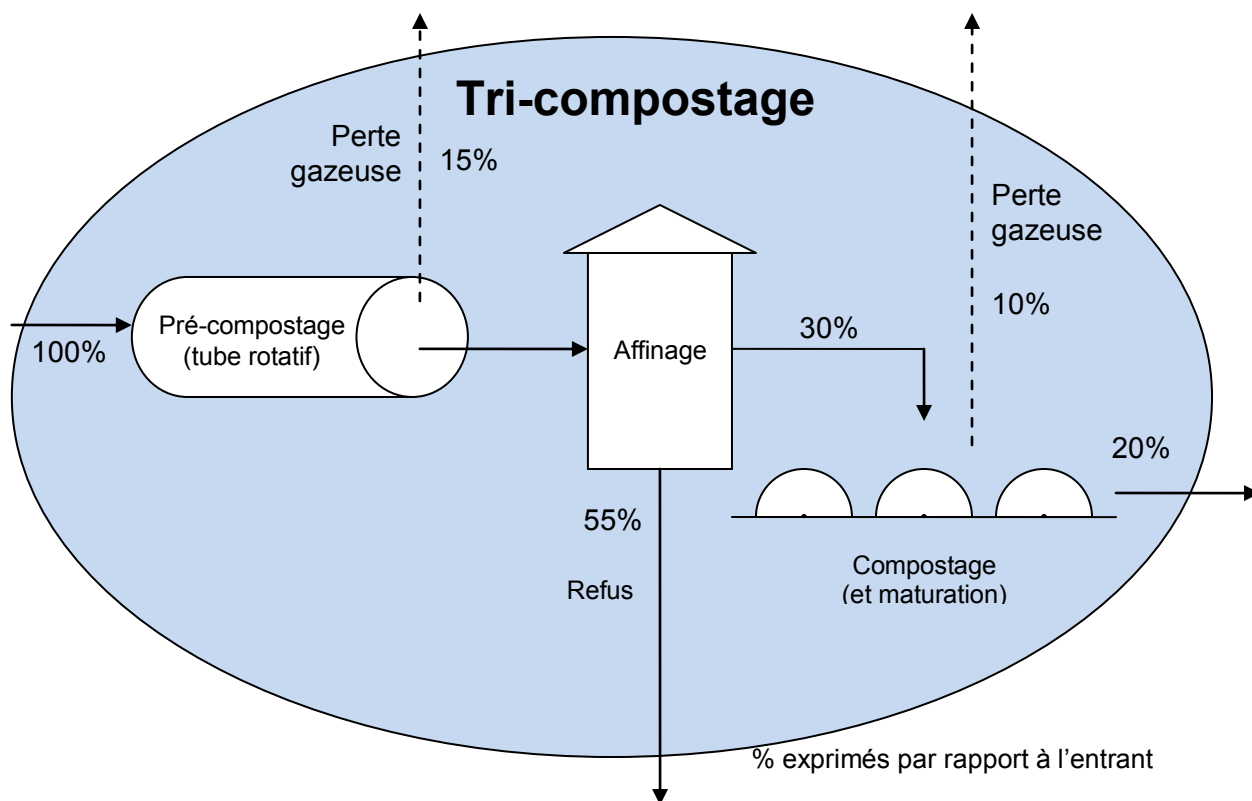


Figure 11 : Schéma détaillé des processus de tri-compostage et hypothèses associées sur le bilan de masse (en matière sèche)

La Figure 12 : Bilan massique du carbone pour la globalité du scénario tri-compostage (OM = Ordures Ménagères) donne le résultat du bilan de matière compte-tenu des hypothèses.

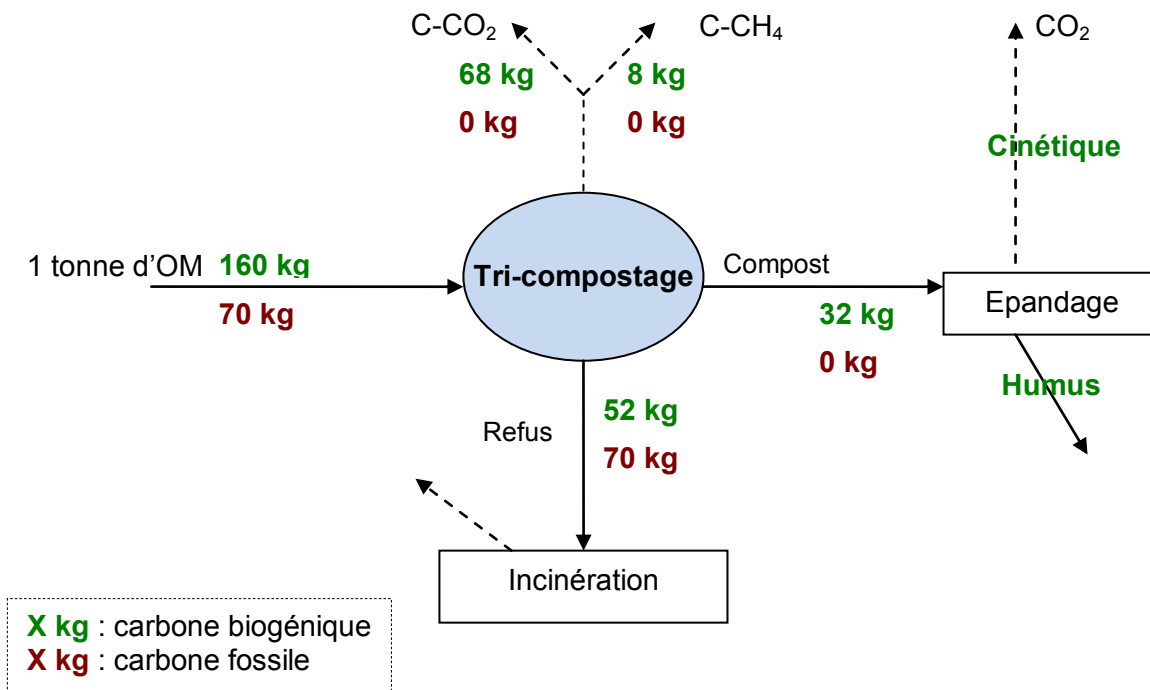


Figure 12 : Bilan massique du carbone pour la globalité du scénario tri-compostage (OM = Ordures Ménagères)

L'aspect temporel des émissions de gaz à effet de serre (ou de la séquestration du carbone) du tri-compostage intervient essentiellement lors de l'épandage du compost à maturation sur les sols agricoles. Sa décomposition s'effectuant au cours du temps, ce sont ces processus qui régissent la dynamique d'émission. Comme pour l'ISD, on a recours à un modèle d'émission dont le choix est justifié en « Annexe 3 : Choix des paramètres et du modèle d'émission pour l'épandage ».

Résultats

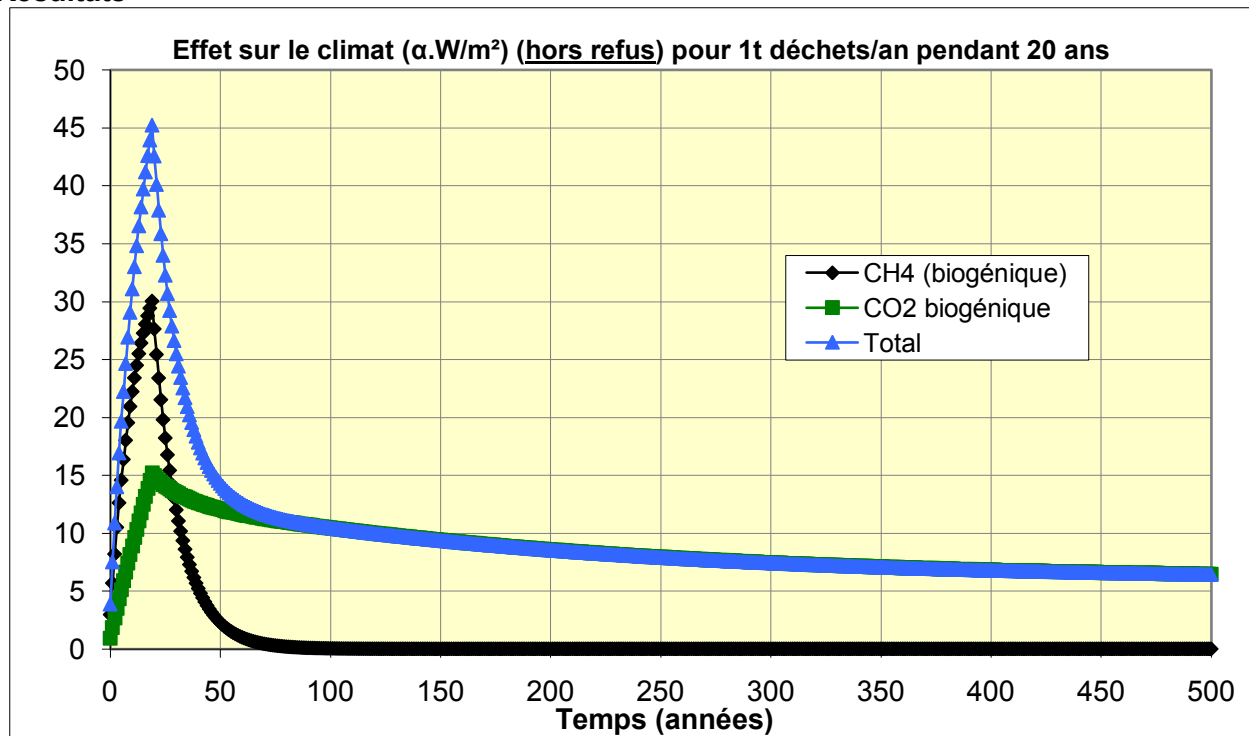


Figure 13 : Effet sur le climat du scénario C (hors traitements des refus)

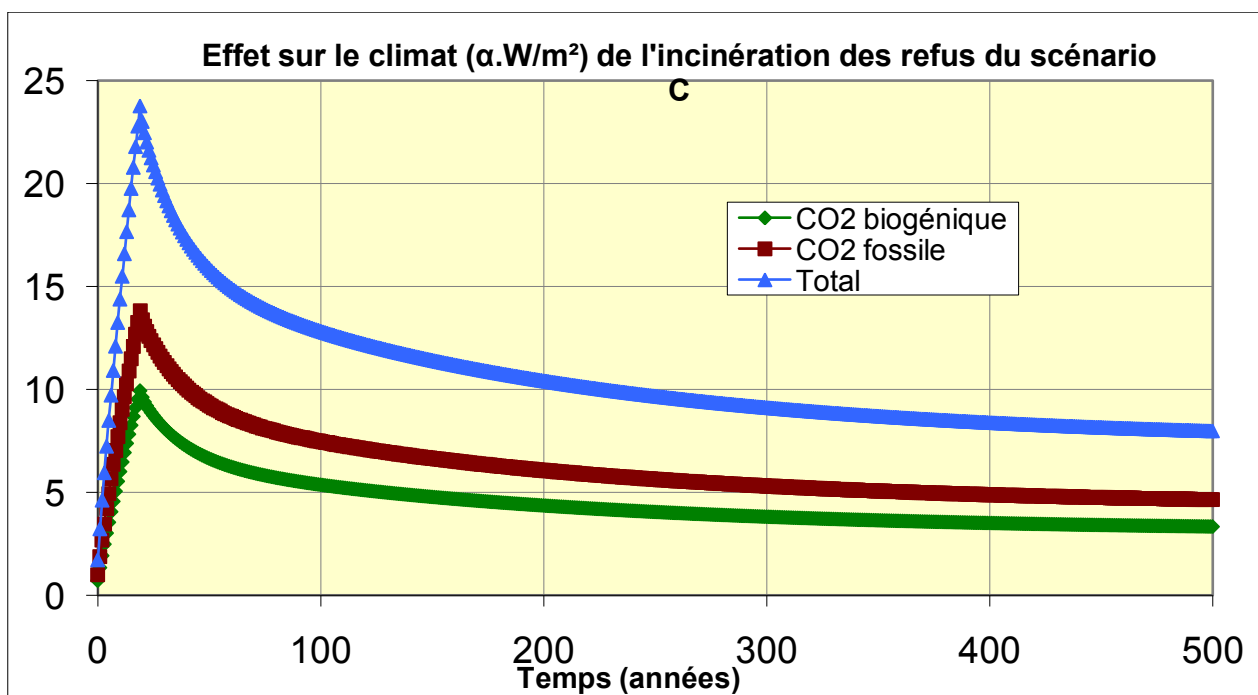


Figure 14 : Effet sur le climat de l'incinération des refus du scénario de compostage

Comme le montre la Figure 15, dans notre scénario de tri-compostage, le traitement des refus et le tri-compostage proprement dit ont un effet sur le climat du même ordre..

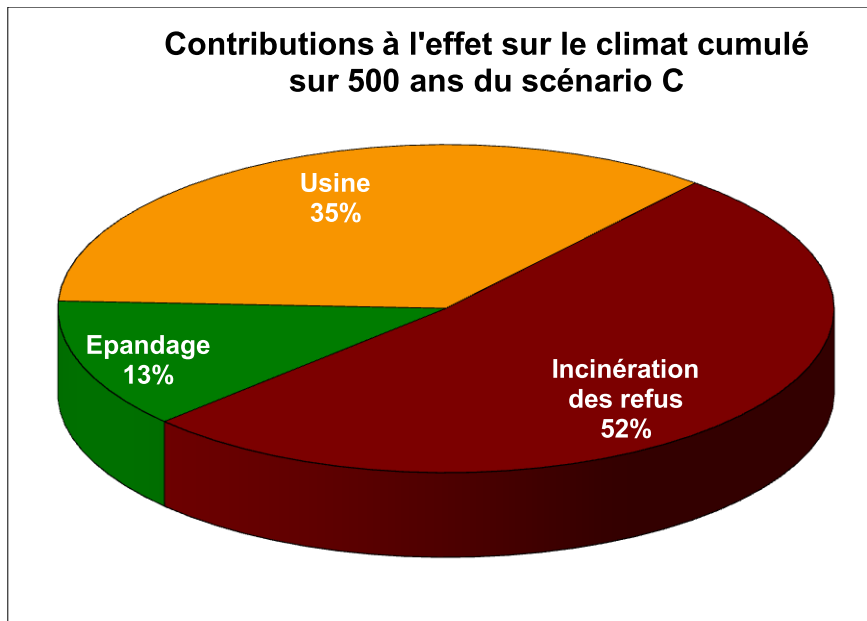


Figure 15 : Comparaison des contributions à l'effet sur le climat du scénario C

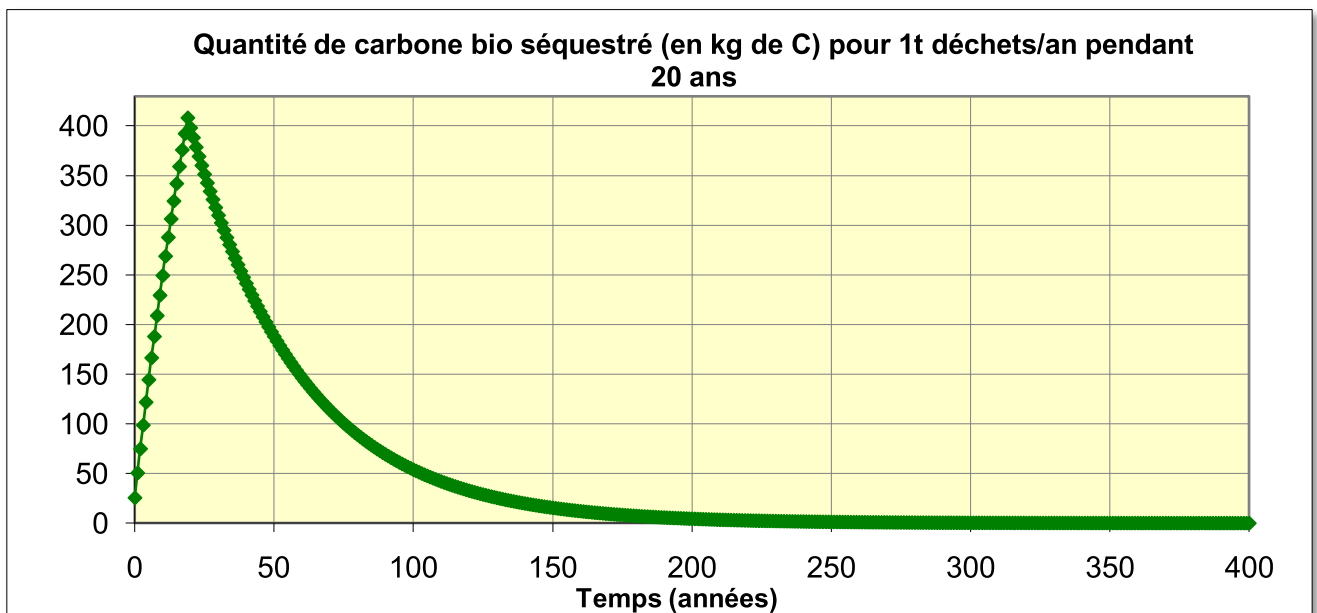


Figure 16 : Evolution du carbone séquestré après épandage pour le scénario C (d'après Hénin et Dupuis)

Contrairement à la séquestration dans les ISD, suite à l'épandage du compost, il n'y a pas de carbone séquestré à long terme. Cependant une petite quantité de carbone (de l'ordre de 10% du carbone initial dans le compost) est encore séquestrée à t = 100 ans.

e) Comparaison des résultats des 3 scénarios

Comparaison des scénarios

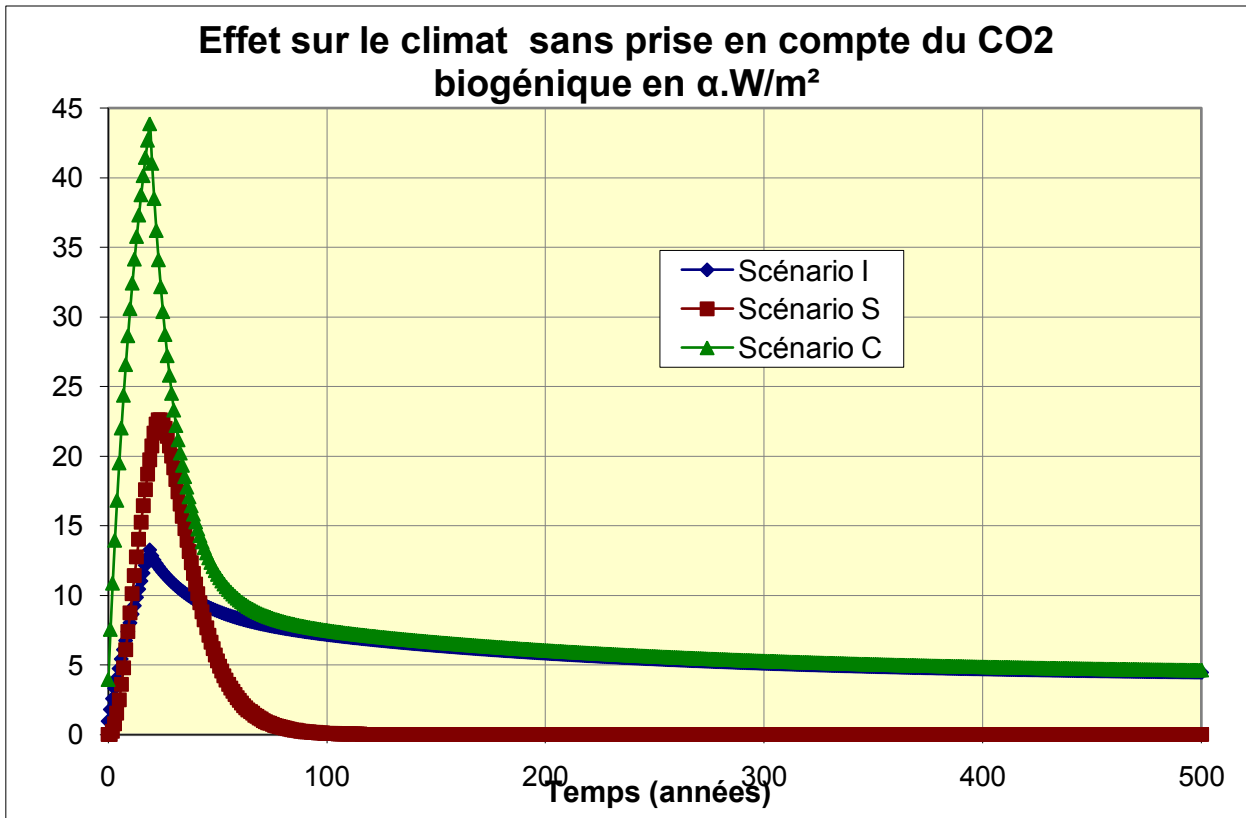


Figure 17 : Effet sur le climat comparé des émissions des 3 scénarios, sans le CO_2 biogénique

Hors carbone biogénique, l'effet sur le climat du scénario de stockage des déchets se réduit à un impact à court terme : ce sont les émissions de méthane. Son impact à long terme est nul étant donné qu'il n'y a aucune émission de CO_2 non-biogénique. Par ailleurs, en omettant ainsi le CO_2 biogénique, les émissions liées au scénario C ont un impact plus fort sur le climat que le scénario I : cela provient du fait qu'il y a les émissions de CH_4 du compostage en plus du CO_2 d'origine fossile.

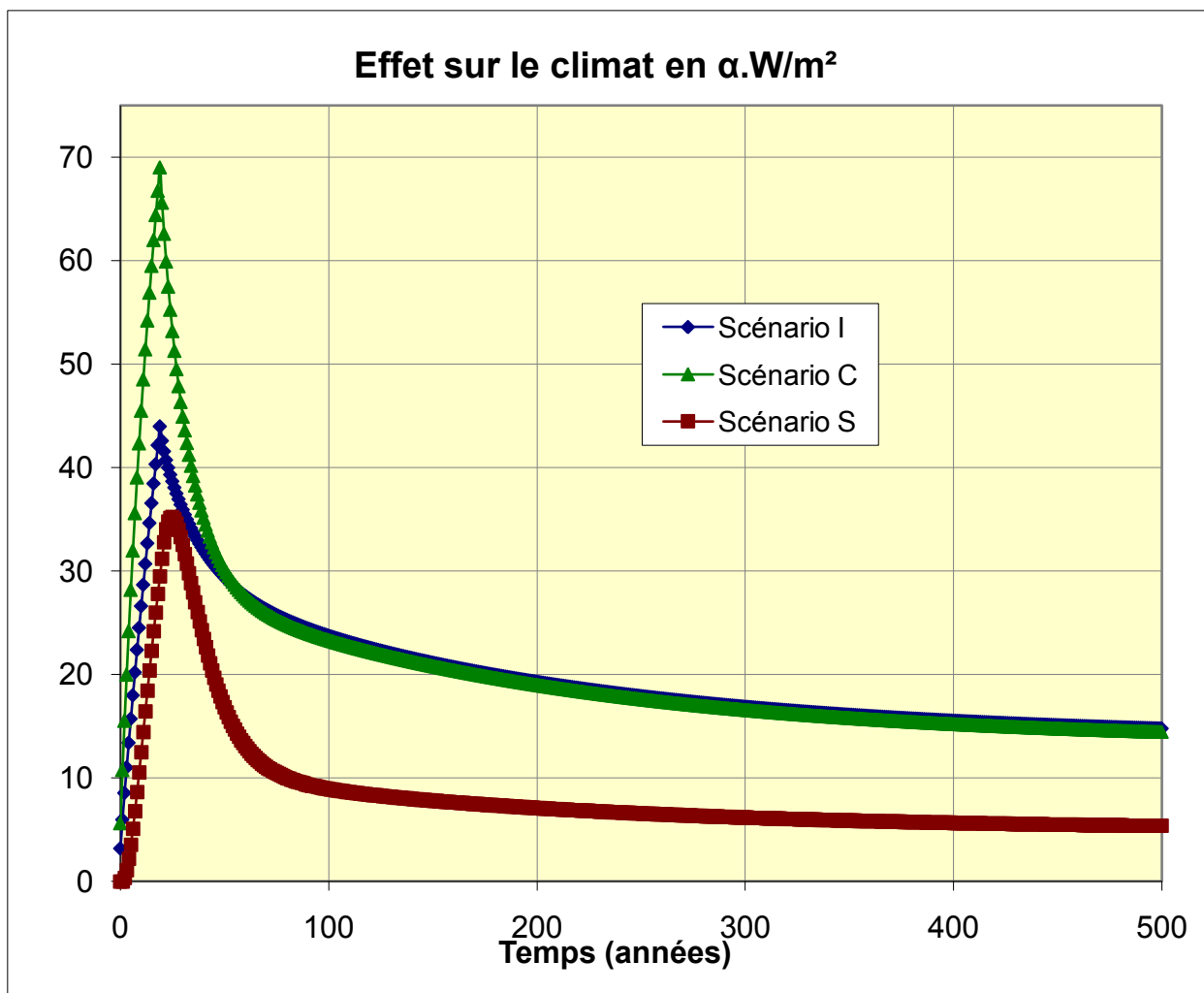


Figure 18 : Effet sur le climat comparé des émissions des 3 scénarios, incluant le CO₂ biogénique

Tableau 3 : Effets cumulés sur le climat sur 500 ans des 3 scénarios des déchets pour une tonne d'OM par an pendant 20 ans avec CO₂ biogénique

Filière	Incineration	ISD	Compostage
Effet cumulé sur le climat (W/m ²)	9915	4233	10343

Dans l'hypothèse de composition de déchets que nous avons adoptée, c'est le mode de traitement des refus qui importe le plus sur l'effet sur le climat des émissions du scénario compostage. En effet, les déchets fermentescibles ne représentant que 36% de la masse totale, c'est surtout le choix du mode de traitement des 55% refus qui va influencer. Ici la courbe scénario C est relativement proche de celle du scénario I puisque c'est cette filière qui a été choisie pour le traitement des refus.

En revanche, avec les hypothèses retenues, les émissions liées au scénario S ont un impact bien moindre sur le climat à court et long terme par rapport à l'incinération. Ceci est dû à la séquestration d'une quantité relativement importante du carbone biogénique (environ 40%) et au fait que le carbone fossile ne se décompose pas sous forme gazeuse, contrairement à l'incinération où un grande part du carbone fossile est émis sous forme de CO₂ et où la séquestration est nulle.

Le choix de l'horizon temporel pour comparer l'effet sur le climat a une influence faible dans notre cas. La hiérarchie des scénarios reste invariable en fonction du temps, on observe

néanmoins que l'écart entre le scénario S et les deux autres se creuse au cours du temps. Ce phénomène se retrouve sur la Figure 19. Celui-ci s'explique par la relativement faible quantité de CO₂ émise dans un centre de stockage des déchets par rapport aux deux autres scénarios. Concernant, les deux scénarios les plus néfastes, il est difficile de conclure compte tenu du manque de significativité de ces écarts.

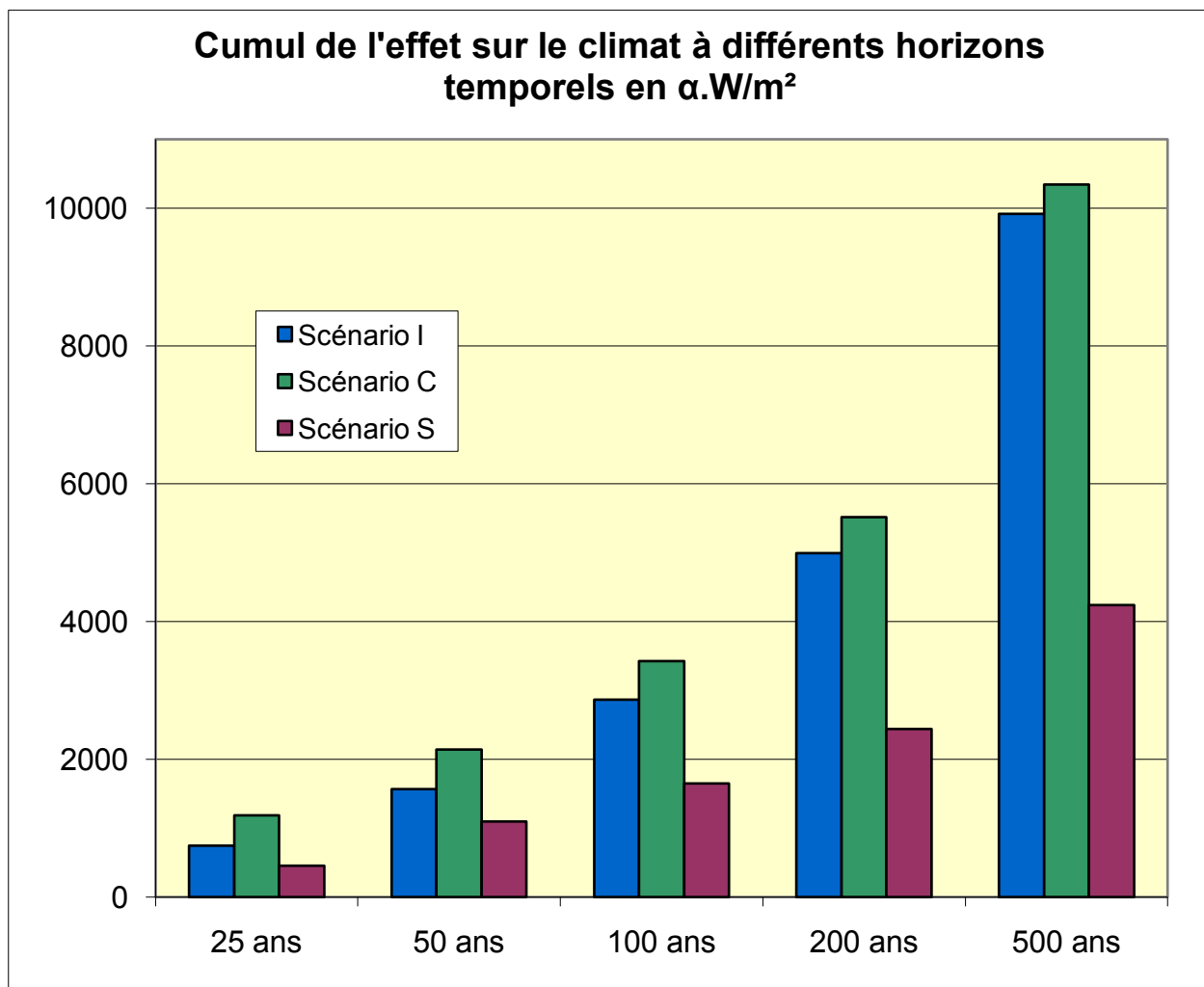


Figure 19 : Effet cumulé sur le climat des 3 scénarios au bout de différents horizons temporels

Comparaison des méthodes de comptabilisation de l'effet de serre

Comparons les résultats obtenus avec un comptage « classique », c'est-à-dire :

- en comptant comme émissions le cumul de celles-ci sur 100 ans ;
- en utilisant le PRG de 25 pour le méthane et de 1 pour le CO₂ ;
- en omettant le CO₂ biogénique mais en comptant la séquestration (valeur à 100 ans) comme une émission négative (avec un PRG égal à 1).

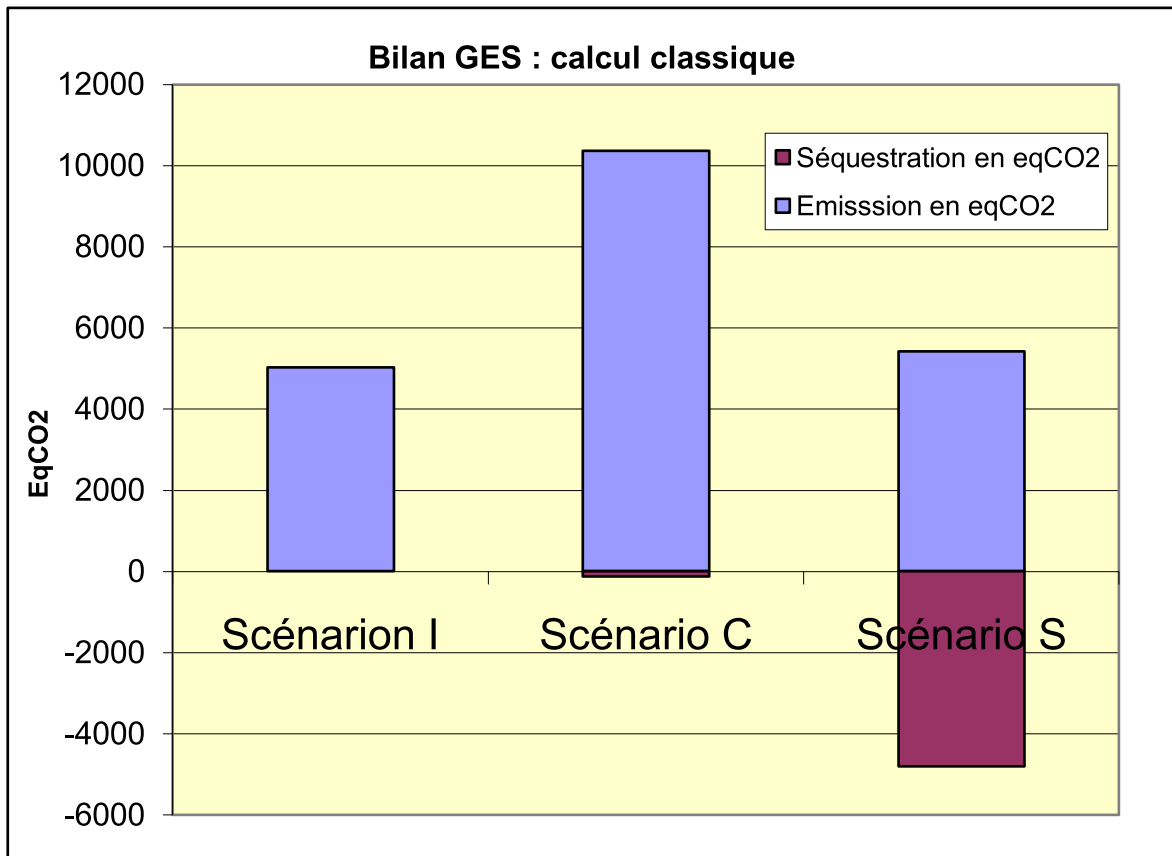


Figure 20 : Comparaison des 3 scénarios avec le calcul classique des bilans GES

On observe que la séquestration du scénario de compostage est complètement gommée vis-à-vis des émissions (surtout dues à l'incinération des refus), à tel point que le scénario C apparaît comme pire que le scénario I. En revanche, le scénario S est avantageux sur tous les points : ses émissions de GES sont limitées au regard des deux autres émissions et part de carbone séquestrée est relativement importante. Donc la hiérarchie entre ces trois scénarios, compte tenu de nos hypothèses, est inchangée entre un comptage classique et le comptage que nous avons effectué précédemment selon l'horizon temporel considéré. De plus, l'écart entre le scénario I et C est assez important dans cette méthode classique alors qu'ils étaient faibles dans le calcul précédent. Il faut rappeler que ces conclusions ne valent que dans le cadre des hypothèses retenues (émissions de CH₄ lors du compostage, mode de traitement des refus, taux de fuite de biogaz...).

Conclusion

Dans cette étude, nous avons mis en regard deux méthodes de calcul des effets des émissions de GES dans le traitement des déchets. Nous avons en fait comparé une méthode prenant en compte le carbone biogénique et la temporalité des émissions et des effets sur le climat avec la méthode classique. On rappelle qu'il ne s'agissait pas d'un bilan GES puisque nous n'avons ni considérés les émissions évitées (valorisation énergétique, etc.) ni les émissions indirectes (construction, transport, etc.).

Au vu des hypothèses prises dans nos scénarios, la méthode que nous avons choisie donne des résultats similaires à la méthode classique. On observe la même hiérarchie entre les scénarios quelque-soit l'horizon temporel, mais avec des écarts pouvant se creuser entre certains scénarios. Il est probable que les différences soient beaucoup plus sensibles avec des hypothèses et des paramètres différents. Par exemple, si le déchet entrant contient une grande part de fermentescibles, on peut supposer que les différences vont se creuser et que les cinétiques de séquestration et d'émission auront une influence plus importante.

On constate également qu'en termes de forçage radiatif induit par les émissions gazeuses, le CO₂ biogénique occupe une part importante, aussi bien à court terme qu'à long terme. D'ailleurs à long terme, seul le CO₂ (biogénique et fossile) continue à avoir un impact sur le climat (même après 500 ans). En outre, le comptage de ce CO₂ biogénique permet une meilleure compréhension dans l'étude des systèmes de fin de vie. En effet, il évite une approche biaisée et le flou introduit par l'artifice de calcul qu'est la comptabilisation du carbone « séquestré » en émission négative, celle-ci restant une méthode simplifiant le problème en vue d'un calcul plus rapide pour les décideurs.

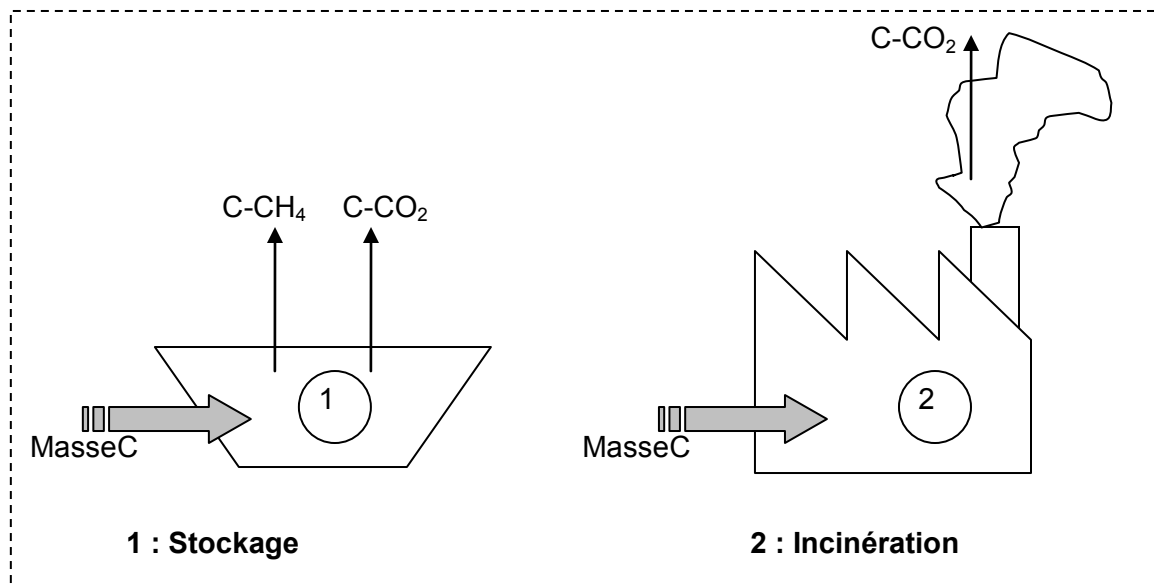
Toutefois, on a pu mettre en évidence que les émissions de méthane ont un effet fort sur le climat à court terme (horizon temporel inférieur à 50 ans). Ceci est une donnée intéressante à considérer dans la mesure où une forte augmentation du forçage radiatif dans un futur proche est nécessaire au vu de l'augmentation rapide du forçage radiatif ces dernières années. C'est ainsi que Dessus et Laponche soulignent qu'un effort rapide de réduction des émissions de méthane est loin d'être marginal quant au réchauffement climatique [12].

Dans cette étude, seule la fin de vie du produit (le traitement d'un déchet entrant) a été appréciée. Dans le cadre d'une analyse (type ACV) portant sur toute la durée de vie des produits et concernant le carbone biogénique, il serait également pertinent de prendre en compte la cinétique de séquestration (ex. : lors de la plantation d'un arbre pour du bois, puis durant sa phase d'utilisation). Autrement dit, de tenir compte de la durée des différents cycles du carbone, en fonction des matériaux et des produits, plutôt que la négliger.

Il faut également souligner que les émissions de GES ne sont pas les seules pollutions provoquées par les filières de traitement des déchets. Tous les autres impacts (eau, odeur, sol) doivent également entrer en ligne de compte des décideurs.

Annexe 1 : Erreur sur la prise en compte des émissions de méthane due au non-comptage du carbone biogénique

Cette partie vise à mettre en évidence le biais induit par l'omission du carbone biogénique dans les bilans GES quand ceux-ci incluent des émissions de CH₄ issues de carbone biogénique. Celui-ci apparaît lorsqu'on compare deux filières de traitement deux à deux. Considérons par exemple, une ISD et une usine d'incinération avec la même quantité de carbone biogénique en entrée dans les déchets. Les valeurs des émissions ci-dessous sont données en équivalent CO₂ (avec un PRG₁₀₀ de 25), S est le stock de carbone séquestré.



Calcul classique : CO₂ biogénique négligé

$$\begin{aligned} \text{Emission}_{\text{GES1}} &= \text{MasseC-CH}_4 \times 16/12 \times \text{PRG}_{100} - S \times 44/12 \\ &= \text{MasseC-CH}_4 \times 16/12 \times 25 - S \times 44/12 \end{aligned}$$

$$\text{Emission}_{\text{GES2}} = 0$$

Donc, la comparaison des deux :

$$\begin{aligned} \text{Emission}_{\text{GES1}} - \text{Emission}_{\text{GES2}} &= \text{MasseC-CH}_4 \times 16/12 \times 25 - S \times 44/12 \\ &= \text{MasseCH}_4 \times 25 - S \times 44/12 \end{aligned}$$

Calcul complet : CO₂ biogénique pris en compte

Pour l'enfouissement, une partie est émise sous forme de méthane (utilisation du PRG pour passer en équivalent CO₂) et le reste sous forme de dioxyde de carbone (PRG égal à 1) :

$$\begin{aligned} \text{Emission}_{\text{GES1}} &= \text{MasseC-CH}_4 \times 16/12 \times \text{PRG}_{100} + \text{MasseC-CO}_2 \times 44/12 \\ &= \text{MasseC-CH}_4 \times 16/12 \times 25 + (\text{MasseC} - S - \text{MasseC-CH}_4) \times 44/12 \end{aligned}$$

Pour l'incinérateur, tout le carbone est émis sous forme de CO₂ :

$$\text{Emission}_{\text{GES2}} = \text{MasseC} \times 44/12$$

Donc, la comparaison des deux filières donne :

$$\begin{aligned} \text{Emission}_{\text{GES1}} - \text{Emission}_{\text{GES2}} &= \text{MasseC-CH}_4 \times (25 \times 16/12 - 44/12) \\ &= \text{MasseCH}_4 \times (25 - 44/16) \\ &= \text{MasseCH}_4 \times 22,25 \end{aligned}$$

Biais induit

L'erreur entre les deux comptages est d'environ 12%. Elle vient du fait que lorsque l'on omet le CO₂ biogénique, on ne prend pas en considération le fait que l'émission de CH₄ se fait à la place d'une certaine quantité de CO₂. Pour corriger ce biais, il faudrait, en toute rigueur, utiliser un pseudo-PRG de 22,25 au lieu de 25.

Annexe 2 : Choix des paramètres et du modèle d'émission pour l'ISD

Choix des modèles

Pour modéliser les émissions de biogaz des ISD, on a recours à des modèles cinétiques basés sur des équations mathématiques. Vu la multitude de modèles existants (TABASARAN, LOCM, FODM, MUNTONI, WARM, WPM, SWANA, Coops et al.), il est impossible de tous les comparer dans cette étude et cela n'en est pas l'objet. On choisira quelques modèles qui apparaissent régulièrement dans la littérature et dans les calculs de bilans GES :

- Tier II du GIEC [13]
- Le modèle de l'ADEME (France) [14]
- GasSim (GB) [15]
- LandGEM (US EPA)*
- SWANA (USA) [16]

En réalité, le modèle de l'ADEME est issu du modèle Tier II et amène donc aux mêmes résultats. Tier II sera donc exclu de cette comparaison. GasSim est un modèle commercial et n'étant pas disponible librement, ne pourra être étudié.

Paramètres utilisés

Tous ces modèles sont basés sur des équations exponentielles du premier ordre. Elles mettent en jeu deux paramètres : le pouvoir méthanogène Lo (en m^3 de CH_4 /tonne déchet)[†] et une constante de dégradation k (en année⁻¹).

L'analyse de la composition des déchets qui précède révèle qu'un échantillon moyen d'une tonne de déchets français contient 240 kg de C biogénique sur une tonne humide et 110 kg de C fossile. Le carbone apte à se dégrader et à se transformer en méthane est le carbone biogénique. Cette aptitude est caractérisée par le potentiel méthanogène et s'exprime en m^3 de méthane par tonne de déchet (humide).

Le GIEC donne une formule permettant de calculer ce potentiel méthanogène :

$$Lo = MCF * DOCf * DOC * F * 16/12 * (1000/0,72)$$

- avec
- Lo : pouvoir méthanogène (en m^3 de CH_4 /tonne déchet)
 - MCF : facteur correctif du méthane
 - DOCf : fraction réellement transformée en gaz
 - DOC : fraction de carbone dégradable sur masse totale
 - F : part de méthane dans le biogaz, en volume (F=50%)

Le facteur 1000/0,72 permet de passer des tonnes de CH_4 /tonne de déchets à des m^3 /tonne de déchets.

Pour le calcul de DOCf, on prend $0.014T + 0.28$, avec T température prise constante = 35°C dans la zone anaérobie, pour toute température ambiante. Donc : DOCf = 0,77. Expérimentalement la valeur 0,5 donnerait de meilleurs résultats [17]. Alors que le GIEC préconisait 0,77 en 1996 [13] avec une incertitude de $\pm 10\%$, en 2006 il recommande 0,5 avec une incertitude de $\pm 20\%$ [18].

La valeur du MCF dépend du type de décharge. Dans notre scénario qui correspond à la plupart des décharges françaises, ce sont des sites contrôlés : MCF = 1.

* Disponible sur : <http://www.epa.gov/ttnca1/products.html#software>

† Pour le modèle SWANA Lo désigne le potentiel de production de biogaz (méthane et dioxyde de carbone)

Tableau 4 : Valeurs du facteur correctif du méthane selon le type de site d'enfouissement (source : [19])

Type de site	Valeurs par défaut pour le facteur de correction du méthane (FCM ou MCF)
Contrôlé	1,0
Non contrôlé – profond (≥ 5 m de déchets)	0,8
Non contrôlé – peu profond (≤ 5 m de déchets)	0,4
Site entrant dans aucune catégorie	0,6

Comme calculé précédemment, $DOC = 0,16$ (fraction de carbone dégradable sur masse totale). Cette valeur est bien dans la fourchette 15–25% kg/tonne de déchets [20].

Le résultat du calcul donne $Lo = 114$ m³/t avec $DOC_f = 0,77$. Cette valeur correspond à ce qui est observé habituellement [6] et est proche de la valeur préconisée par l'ADEME pour les OM : 100 m³ de CH₄/tonne [14]. Cette valeur serait également la plus appropriée pour la plupart des ISD selon l'US EPA [21]. Avec $DOC_f = 0,5$, on obtient $Lo = 111$ m³/t.

Tableau 5 : Valeur des différents potentiels méthanogènes et répartition des constantes de dégradation correspondantes ([14])

		0,5	0,1	0,04	k moyen
FEO 1 (m ³ /t)	100	15%	55%	30%	0,142
FEO 2 (m ³ /t)	50	15%	55%	30%	0,142
FEO 3 (m ³ /t)	0	0	0	0	0

(FEO1 : OM, FEO2 : déchets industriels, FEO3 : inertes))

Finalement, on choisit de prendre une valeur du même ordre que celle proposée par l'ADEME, en l'ajustant légèrement de sorte à obtenir une quantité séquestrée de 63 kg de carbone résiduel, en accord avec l'étude RECORD [8] qui se base sur une composition des déchets similaire : on prend donc 90 m³/t. On garde la répartition recommandée par l'ADEME pour le k des OM, c'est-à-dire : 0,142 en moyenne pondérée (cf. Tableau 5 : Valeur des différents potentiels méthanogènes et répartition des constantes de dégradation correspondantes ([14])). Sachant toutefois que cette valeur dépend en partie des précipitations de la région considérée [17].

Répartition du biogaz

La cinétique donne en général les émissions de CH₄ en volume. On en déduit les émissions de CO₂, en considérant l'hypothèse d'un biogaz constitué à 50% de méthane et à 50% de gaz carbonique en volume [8], [22]. On considère également que 10 % du CH₄ diffus est oxydé en CO₂ au travers de la couverture [8]. L'installation étudiée possède un captage de biogaz qui brûle le CH₄ en CO₂ avec un rendement de 100% et avec $\tau = 80$ % du biogaz capté.

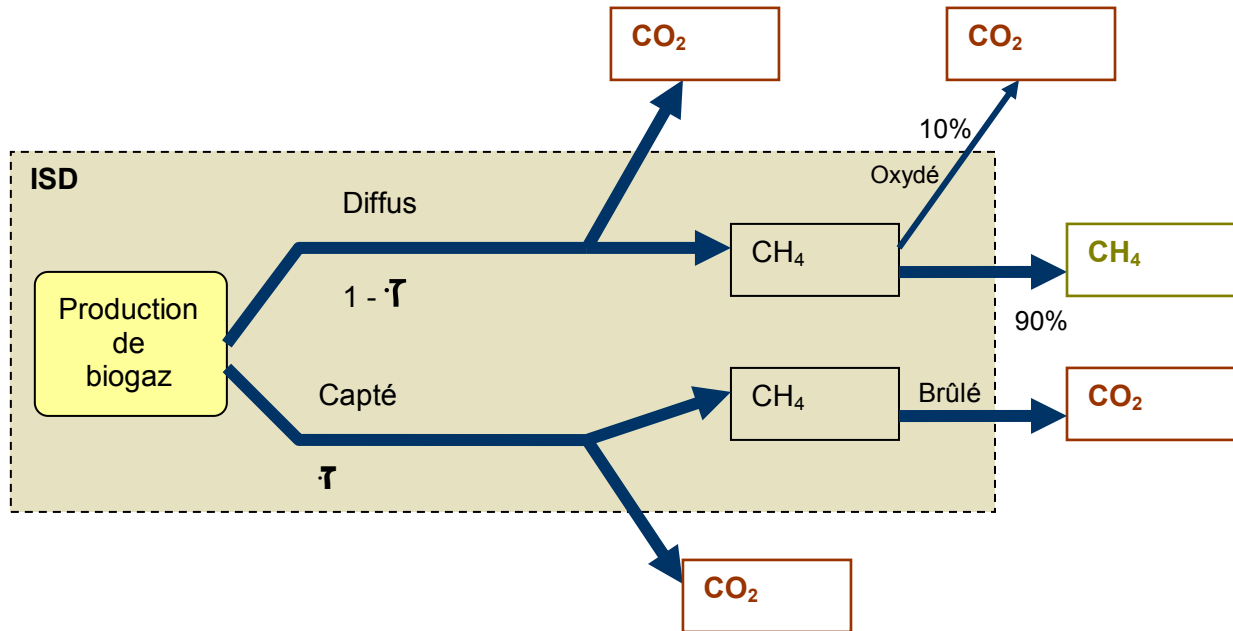


Figure 21 : Devenir du biogaz dans une ISD (Installation de Stockage des Déchets)

Modèle choisi

Au final, on obtient pour LandGEM et le modèle ADEME quasiment les valeurs, ce qui paraît logique du fait de la ressemblance de leur équation. SWANA donne une courbe légèrement différente qui paraît plus adéquate aux phénomènes naturels (retard de la phase anaérobie, courbe moins rude), c'est pourquoi nous l'utiliserons pour nos d. Ici, ce ne sont que les cinétiques qui varient, les cumuls des émissions sur une longue période étant égaux (même pouvoir méthanogène, même caractéristique du site).

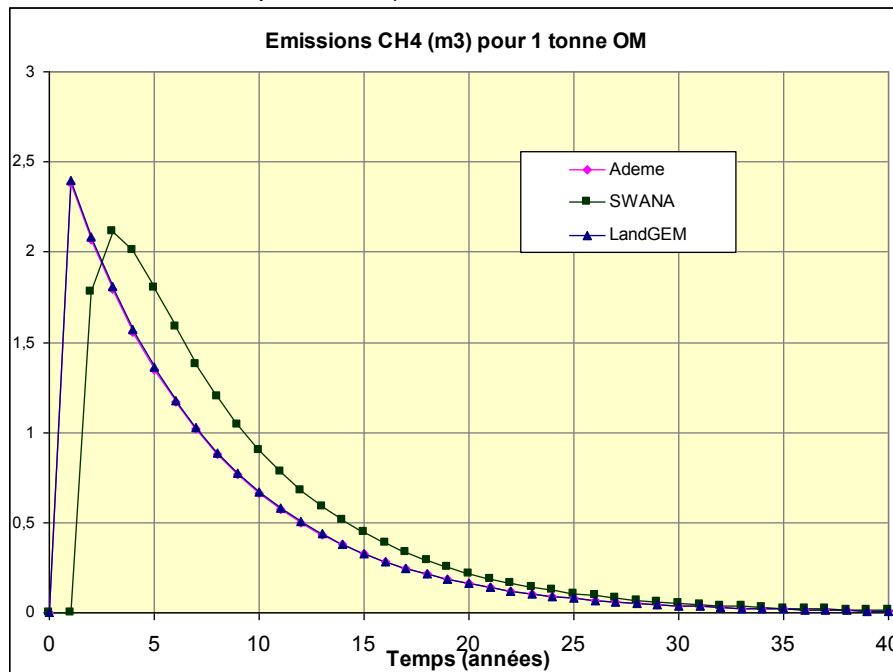


Figure 22 : Emissions de CH_4 selon trois modèles différents

Annexe 3 : Choix des paramètres et du modèle d'émission pour l'épandage

L'épandage, de même que les résidus de culture, est un apport de matière organique au sol dans le but de le fertiliser en apportant les nutriments nécessaires à la croissance de la plante cultivée. Cette matière organique (MO) suit un cycle de décomposition dans lequel intervient pléthore de réactions chimiques et biologiques complexes. Parmi toutes ces transformations, plusieurs d'entre elles entraînent la formation de CO₂. Le bilan humique (de Hénin et Dupuis 1945) permet de définir le système tout en évaluant les entrées et les sorties, y compris de CO₂.

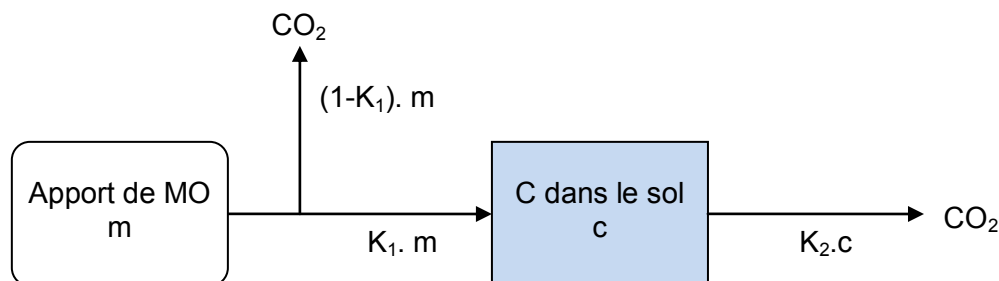


Figure 23 : Bilan humique

Ce bilan humique, complété par une équation de cinétique, permet de calculer les émissions de dioxyde de carbone liées à l'épandage au cours du temps. Le paramètre le plus important est K_1 (coefficient iso-humique) que l'on prend égal à 0,3 [23]. L'évolution du stock de carbone dans le sol provenant de l'épandage du compost est supposée suivre une loi exponentielle du premier ordre. Une proportion $(1-K_1)$ rejoint tout de suite l'atmosphère après épandage alors que le reste (K_1) est dégradé lentement dans le sol avec un temps de résidence moyen de 40 ans ($k=0,025 \text{ an}^{-1}$) [23], [11].

Soit S la quantité de C séquestré (tC/ tC apportée) à la T ème année d'épandage :

$$S = \frac{m.K_1}{k} \cdot (1 - e^{-k.t})$$

Avec m quantité de carbone apporté chaque année.

Après la fin de la période d'épandage, en accord avec le modèle d'Hénin et Dupuis, le stock de carbone décroît exponentiellement avec la même constante de temps.

Pour le calcul des émissions de CO₂ :

- on impute l'émission de $(1-K_1)$ à l'année 0
- les autres émissions sont égale chaque année à la variation (diminution) de carbone stocké : $E(t) = S(t) - S(t-1)$

On aurait pu choisir un modèle moins simplificateur mais plus complexe du type RothC* ou Century† (voir [24] et [11]) pour modéliser cette cinétique. Cependant étant donné que l'épandage représente une très petite part des émissions liés au compostage des OM (cf. partie résultats) et que ces modèles requièrent de nombreuses valeurs de paramètres pour fonctionner (très variables d'un endroit à l'autre et difficiles à mesurer), leur utilisation dans le cadre de cette étude paraît moins judicieux. De plus, on constate que ces modèles sont qualitativement équivalents et assez représentatif de la réalité (cf. : Figure 24, Figure 25 et Figure 16) : ils ont tous approximativement une forme d'exponentielle décroissante.

* <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/carbon/rothc.htm>

† <http://www.nrel.colostate.edu/projects/blue/>

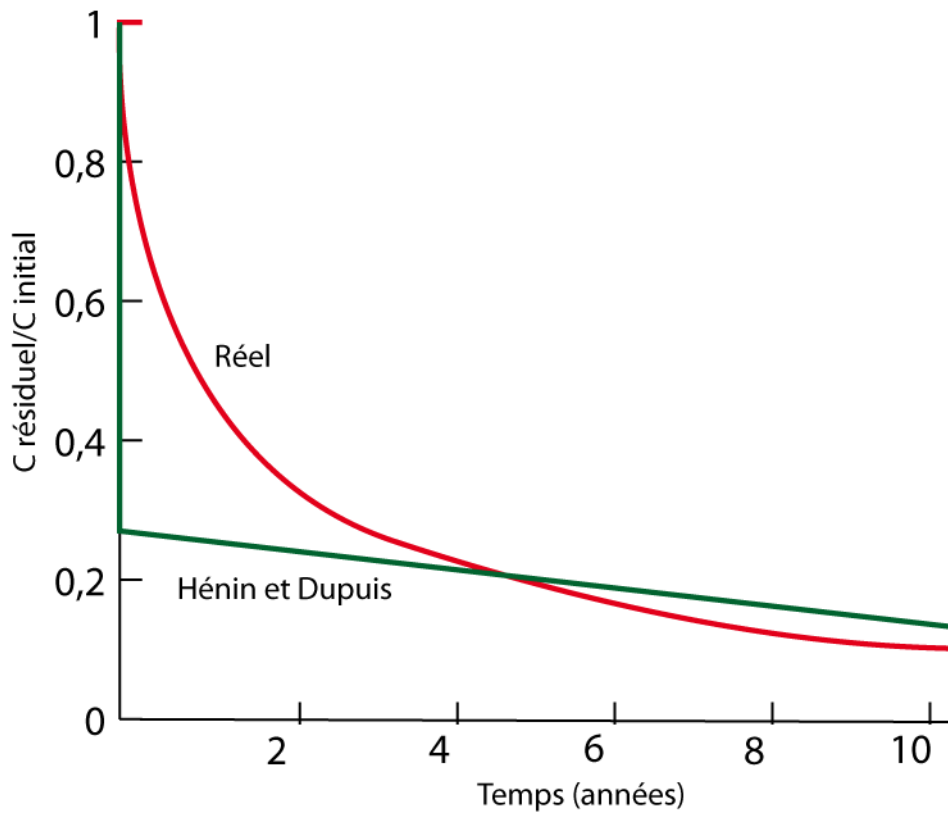


Figure 24 : Evolution du carbone résiduel (source : [25])

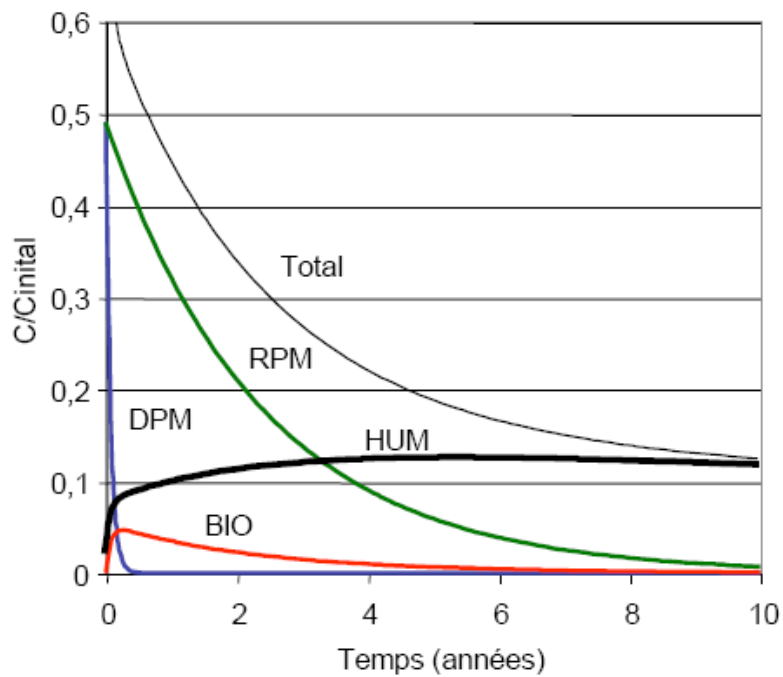


Figure 25 : Evolution du carbone résiduel modélisé par RothC (source : [25])

Annexe 4 : Analyse de la sensibilité

Concernant la question générale de la gestion des incertitudes dans les bilans GES du traitement des déchets, voir notamment l'étude EpE [15] p. 24.

Afin d'apprécier la significativité de cette étude, il faut étudier la sensibilité des résultats par rapport aux paramètres choisis.

Composition des déchets

La composition des déchets entrant est sans doute la donnée à laquelle les résultats sont le plus sensibles. Il convient donc d'en analyser la sensibilité. Celle-ci révèle effectivement une grande sensibilité, notamment vis-à-vis de la part de fermentescible (résultats sur fichier Excel).

Autres paramètres

D'autres paramètres influents mériteraient une analyse de sensibilité détaillée. Ceux vis-à-vis desquels les résultats semblent le plus sensibles sont :

- k la constante de dégradation utilisée pour le modèle d'émission des ISD, qui possède une influence forte sur la durée du régime transitoire de la séquestration ;
- le potentiel méthanogène du même modèle qui influe de manière importante sur la part de CH₄ émise sur le carbone total et donc sur la quantité totale de carbone séquestrée ;
- les coefficients du modèle de Henin-Dupuis pour l'épandage qui conditionnent la quantité et la durée de séquestration du carbone ;
- dans le compostage, comme il a déjà été souligné dans le corps du rapport, c'est le devenir des refus qui influe beaucoup sur le bilan final. Ici le choix de l'incinération paraît peu réaliste par rapport à la réalité constatée et est largement défavorable à ce scénario quant à ses émissions de GES.

Bibliographie

1. Staub, M. and J.-P. Gourc, *Possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au stockage des déchets*. Déchets, sciences et techniques, 2008: p. 9.
2. IPCC, *Climate Change 2007 : Working Group I: The scientific Basis : Chapter 4 : Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. 2007.
3. Rabl, A., et al., *How to account for CO2 emissions from biomass in an LCA*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007. **12**(5): p. 281-281.
4. Dessus, B., B. Laponche, and H. Le Treut, *Réchauffement climatique : importance du méthane*, in *La Recherche*. 2008. p. 46-49.
5. Eschenroeder, A., *Greenhouse gas dynamics of municipal solid waste alternatives*. Journal of the Air and Waste Management Association, 2001. **51**(10): p. 1423-1427.
6. Morvan, B., *Communications personnelles*. 2009.
7. Naquin, P., L. Volatier, and E. Vernus, *Les ordures ménagères en France : données de référence*. 1996, ADEME / POLDEN INSAVALOR. p. 215.
8. Labouze, E., et al., *Application de la méthode « Bilan Carbone® » aux activités de gestion des déchets*. 2008, RECORD / Bio Intelligence Service.
9. Morvan, B. and M. Briand, *Le compostage des ordures ménagères résiduelles : de la problématique aux choix techniques de l'usine de Launay Lantic*. Techniques Sciences et Méthodes, 2007. **5**: p. 18-27.
10. Mallard, P., et al., *Évaluation sur site de différentes méthodes de mesure des émissions gazeuses d'une installation de compostage*. 2008. p. 134.
11. Smith, A., et al., *Waste Management Options and Climate Change*. 2001, AEA Technology / European Commission. p. 224.
12. Dessus, B. and B. Laponche, *Développement et changement climatique : l'importance d'une politique de réduction du méthane pour le vingt et unième siècle*. 2008: p. 6.
13. IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Reference Manual - CHAPTER 6 WASTE*. 1996. **3**: p. 32.
14. ADEME, *Outil de calcul des émissions dans l'air de CH4, CO2, SOx, NOx issues des centres de stockage de déchets ménagers et assimilés*. 2003: p. 29.
15. EpE, *Protocole de quantification des émissions de gaz à effet de serre liés à la gestion des déchets*. 2007, Entreprises pour l'Environnement / Ernst & Young. p. 58.
16. Samson, R., et al., *Lifecycle assessment of the bioreactor concept and engineered landfill for municipal waste*. 2003.
17. Thompson, S., et al., *Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills*. Waste Management, 2009. **29**(7): p. 2085-2091.
18. IPCC, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 5 (Chapters 2 and 3)*. 2006.

19. GIEC, *Recommendations du GIEC en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux. Chapitre 5 : Déchets*. 2000: p. 33.
20. Bingemer, H.G. and P.J. Crutzen, *The production of methane from solid wastes*. Journal of Geophysical Research, 1987. **92**: p. pp. 2181–2187.
21. EPA, *AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2.4 Municipal Solid Waste Landfills* 1995.
22. Talyan, V., et al., *Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi*. Resources Conservation and Recycling, 2007. **50**(3): p. 240-259.
23. Arrouays, D., et al., *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* 2002: p. 334.
24. Coleman, K., et al., *The potential use of the Rothamsted Carbon model, RothC, in GHG inventories*. 2006: p. 24.
25. Balesdent, J., B. Leclerc, and S. Houot, *Quels modèles pour suivre ou prévoir le devenir du carbone organique apporté aux sols ?* 2005: p. 22.