

## Recommandations pour l'introduction de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans la Réglementation Environnementale (RE) 2020 des bâtiments

A l'attention de	Ministère de la Transition écologique / Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature / Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages
Auteurs	Anne Ventura, directrice de recherche, Univ. Eiffel (MAST/GPEM) Adélaïde Feraille, Dr. ENPC (NAVIER)
Rellecteurs	Jean-Bernard Kovarik, Univ. Eiffel, vice-président en charge de l'appui aux politiques publiques Jean-Michel Torrenti, directeur de département Univ. Eiffel (MAST)
Date	22 mars 2021 (version 2)
Diffusion	<i>Libre</i>

La RE2020 doit intégrer une évaluation des impacts sur le changement climatique de la construction et de l'exploitation des bâtiments basée sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Elle recommande une méthode mixte pour le calcul de l'indicateur de changement climatique, combinant la méthode « statique » et la méthode « dynamique simplifiée », basées toutes les deux sur le facteur de Potentiel de Réchauffement Global (*prg*). Le facteur *prg* est lui-même basé sur le calcul du forçage radiatif cumulé qui représente la part d'énergie sous forme chaleur, réfléctée par un gaz à effet de serre, et qui atteint 1 m<sup>2</sup> de surface terrestre sur la totalité d'une période. Le principe général de la RE2020 consiste à fixer le temps zéro à la date de construction du bâtiment, d'utiliser une évaluation statique pour les émissions de gaz à effet de serre se produisant avant ce temps zéro, et une évaluation dynamique sur une période d'observation fixe de 100 ans pour les émissions de gaz à effet de serre se produisant après ce temps zéro.

La méthode dynamique simplifiée est basée sur une méthode dynamique plus complète issue des travaux du CIRAI<sup>1</sup> qui a mis un outil en ligne. Le principe général des méthodes dynamiques est de prendre en considération les moments des différentes émissions dans le calcul de l'indicateur de changement climatique : cela permet d'observer l'effet de l'étalement dans le temps de ces émissions, par rapport à une méthode statique - qui est plus classique en Analyse de Cycle de Vie - et qui considère que la totalité des émissions se produit au même moment.

La prise en compte de l'étalement dans le temps des émissions des gaz à effet de serre conduit à diminuer leurs effets sur le changement climatique. Cependant, deux points sont importants à souligner.

- Premièrement, **le coefficient correctif du *prg* retenu dans la RE2020 est surestimé.** Le calcul de ce coefficient est basé sur une durée d'observation fixe de 100 ans à compter de la construction du bâtiment – cf. figure 12 (dans les travaux du CIRAI<sup>1</sup> sur lesquels se base le calcul de ce coefficient correctif<sup>2</sup>, cette durée avait été choisie de manière arbitraire). **La durée d'observation devrait plutôt correspondre à la somme de la durée du cycle de vie et de la valeur de l'horizon temporel de l'impact (ce dernier étant un choix conventionnel, la valeur de 100 ans étant réaliste sur le plan de la physique), c'est-à-dire à 100 ans après la dernière émission du cycle de vie du bâtiment considéré – cf. Figure 14.** Dans la méthode corrigée (équation 9), l'horizon temporel pour le calcul d'une émission est toujours de HTI = 100 ans.. En effet choisir une durée d'observation plus courte aboutit à diminuer la valeur de l'indicateur dynamique simplifié par rapport à l'indicateur statique, certes du fait de l'étalement des émissions, mais également parce que l'effet des gaz émis peu avant la fin de la durée d'observation n'est pris en compte que de manière partielle (le calcul d'impact environnemental est « tronqué »). **Cette différence des durées d'observation entre les indicateurs statique et dynamique simplifiée ne permet plus de faire des comparaisons.** D'autre part, l'inhomogénéité temporelle rend incohérente l'addition des indicateurs statique avant le temps zéro et dynamique après le temps zéro.
- Deuxièmement, **d'un point de vue strictement physique, quand l'efficacité radiative du GES est constante dans le temps, différer des émissions de GES quelques dizaines d'années n'a pas d'effet significatif sur le forçage**

<sup>1</sup> <https://ciraig.org/index.php/fr/project/dynco2-calculateur-dempreinte-carbone-dynamique/>

<sup>2</sup> Levasseur, A., P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes, and R. Samson. 2010. Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. *Environmental Science & Technology* 44(8): 3169–3174

**radiatif cumulé de long terme.** En d'autres termes, l'étalement des émissions amoindrit la hauteur d'un pic d'émissions, mais n'atténue pas significativement leurs impacts sur le changement climatique si l'étalement est de l'ordre de quelques dizaines d'années. **L'efficacité d'un retard des émissions de GES pourrait avoir un effet bénéfique, qui reste à évaluer, si les émissions retardées se produisaient dans un contexte futur favorable où les émissions planétaires de GES auraient considérablement diminué. Pour le confirmer, l'échelle d'un bâtiment est inappropriée, mais cela pourrait être évalué à l'échelle du pays, c'est à dire pour l'ensemble des produits soumis à la réglementation.**

**Nous recommandons de corriger la méthode dynamique simplifiée dans la RE2020 de la manière suivante :**

- **Le coefficient correctif retenu par la méthode dynamique simplifiée de la RE 2020 devrait être modifié pour correspondre à la durée d'observation corrigée, celle-ci étant la somme de l'horizon temporel de l'impact et du délai écoulé entre l'émission et la construction du bâtiment.** En supposant que la durée du cycle de vie du bâtiment est de 50 ans et avec l'horizon temporel de l'impact de 100 ans, le facteur correctif devrait être calé pour correspondre à une durée d'observation allant de 100 à 150 ans selon le moment de l'émission (ce dernier étant entre 0 et 50 ans). Les valeurs corrigées sont calculées et fournies dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** de l'annexe ci-après. Par exemple, pour une émission à 50 ans, le facteur correctif est égal à 0,72 au lieu de 0,58 indiqué dans la RE2020 (on a donc une surestimation d'environ 35% avec les coefficients proposés dans la RE2020).
- Au-delà de ce qui précède, pour déterminer la durée d'observation, **il conviendrait de définir avec les professionnels du secteur une durée moyenne du cycle de vie d'un bâtiment qui englobe non seulement la durée de service du bâtiment, mais qui s'étende aussi au-delà en intégrant les durées liées au traitement et à la valorisation des déchets de sa démolition.**
- Le temps zéro devrait, en toute rigueur, démarrer à la première émission du cycle de vie du produit considéré, c'est-à-dire, dans le cas de la RE 2020, avant la construction du bâtiment (une valeur moyenne pourrait être définie pour chaque type de matériau, produit ou opération, en lien avec les professionnels du secteur). Néanmoins, **positionner le temps zéro à la construction du bâtiment reste une approximation acceptable dans la mesure où la production ou réalisation de ces matériaux, produits ou opérations se fait dans un délai court avant ce temps zéro (quelques années, au maximum).**
- Avec le positionnement du temps zéro à la construction, **l'utilisation d'une méthode statique avant le temps zéro et d'une méthode dynamique après le temps zéro reste une approximation acceptable dans la mesure où la durée d'observation est la même pour les deux indicateurs statique et dynamique, comme préconisé plus haut.**

**Le choix d'une méthode dynamique reste en premier lieu un choix politique, compte-tenu de l'effet peu significatif sur le changement climatique de l'étalement des émissions de quelques dizaines d'années.** Ce choix est destiné à inciter les acteurs économiques à retarder leurs émissions de GES. Il conviendrait d'en apprécier l'efficacité sur le long terme, à l'échelle du pays. **Nous pouvons recommander la mise en place d'un système de type plateforme numérique permettant de collecter et d'agréger l'ensemble des profils d'émissions de GES de l'ensemble des bâtiments construits selon la RE2020, afin d'avoir une estimation prédictive des émissions de GES du secteur à l'échelle du pays.** Cette collecte offrirait une vision globale permettant d'évaluer l'efficacité de la mesure à l'échelle du pays, et de prendre éventuellement des mesures pour réglementer d'autres secteurs, ou encore de revoir la réglementation s'il s'avère que les émissions retardées se produisent à un moment où les émissions de GES planétaires restent à un niveau trop élevé pour respecter les objectifs de l'Accord de Paris.

Comme retarder les émissions est un objectif de la politique climatique, une alternative à la justification par la physique du taux de décroissance temporel des émissions de la RE2020 serait de mettre en œuvre un calcul socio-économique. La comptabilisation des émissions réelles de GES avec un indicateur statique serait maintenue dans les évaluations menées à l'échelle du pays, afin de maintenir une distinction claire entre la réalité physique et l'instrument d'incitation au report des émissions. Ce signal à l'intention des filières de la construction serait comme une valeur tutélaire (à l'image de ce qu'est pour d'autres types de calcul le taux d'actualisation socio-économique, étant remarqué qu'ici il s'agit plutôt de marquer une préférence pour l'avenir que pour le présent), révisable périodiquement par l'autorité réglementaire en fonction des progrès de la politique climatique et de la réponse des acteurs économiques. Cette note n'a toutefois pas vocation à aborder le sujet sous l'angle des sciences économiques, qui ne sont pas dans le champ d'expertise de ses auteurs.

## Annexe

### 1. Précisions introductives

La présente annexe est rédigée sur la base des documents dont nous disposons concernant la méthode dynamique d'origine et sa version simplifiée pour la RE2020 :

- Un fichier Excel® donnant les facteurs correctifs de la méthode dynamique simplifiée fourni par le site internet de la RE2020<sup>3</sup>.
- Le rapport intitulé « GE3-Stockage temporaire du carbone (Rapport final) » fourni par le site internet de la RE2020<sup>4</sup>, qui mentionne (pages 21-22) que les coefficients sont calculés d'après un rapport écrit par Solinnen en 2018 (rapport non trouvé).
- Une communication privée de la DHUP, qui pilotait le groupe ayant travaillé sur cet aspect réglementaire, mentionnant que la méthode simplifiée est basée sur la méthode et l'outil en ligne<sup>1</sup> développés par le CIRAIG.

### 2. Facteur de caractérisation *prg*

En Analyse de Cycle de Vie, l'indicateur de changement climatique est calculé à partir du facteur de caractérisation appelé « Potentiel de Réchauffement Global (PRG) » (*Global Warming Potential GWP* en anglais), exprimé en kg équivalent CO<sub>2</sub> par kg de GES émis, qui est construit comme suit :

$$1 \quad prg_x = \frac{\int_0^{HTI} a_x(t) \cdot [x(t)] \cdot dt}{\int_0^{HTI} a_r(t) \cdot [r(t)] \cdot dt}$$

où :

- $x$  est le gaz à effet de serre (GES) considéré ;
- $HTI$  est l'Horizon Temporel de l'Impact auquel le calcul est effectué ;
- $t = 0$  est l'instant auquel le gaz en question est supposé être émis ;
- $a_x(t)$  est l'efficacité radiative unitaire de ce gaz au temps  $t$ , causée par l'augmentation à  $t = 0$  d'un kg supplémentaire de ce gaz dans l'atmosphère (en  $W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$  de  $x$ ) ;
- $[x(t)]$  est la concentration dans l'atmosphère au temps  $t$  ( $ppb \cdot kg^{-1}$ ) (en fait on l'exprime comme la masse résiduelle issue du kg supplémentaire émis à  $t = 0$ ) ; celle-ci diminue dans le temps en raison du processus naturel de dégradation physico-chimique ;
- $a_r(t)$  est l'efficacité radiative unitaire du CO<sub>2</sub> (pris comme référence) au temps  $t$ , causée par l'augmentation à  $t = 0$  d'un kg supplémentaire de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (en  $W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$  de CO<sub>2</sub>) ;
- $[r(t)]$  est la concentration dans l'atmosphère au temps  $t$  ( $ppb \cdot kg^{-1}$ ) (en fait on l'exprime comme la masse résiduelle issue du kg supplémentaire de CO<sub>2</sub> émis à  $t = 0$ ) ; celle-ci diminue dans le temps en raison du processus naturel de dégradation physico-chimique.

Les différents termes de l'expression du facteur *prg* sont détaillés ci-après.

#### a) Efficacité radiative

#### Fonctions $a_x(t)$ et $a_r(t)$

Les termes  $a_x(t)$  et  $a_r(t)$  appelés « efficacité radiative », reflètent la capacité d'un kg de GES et de CO<sub>2</sub> respectivement, à renvoyer la chaleur reçue du soleil vers la Terre. Ils sont déterminés par la combinaison :

- de mesures en laboratoire de comportement des GES soumis à des rayonnements simulant le spectre de l'irradiation solaire ;

<sup>3</sup> <http://www.batiment-energiecarbone.fr/projet-de-documents-methode-pour-la-reglementation-a126.html>

<sup>4</sup> <http://www.batiment-energiecarbone.fr/rapports-des-groupes-d-expertise-a105.html>

- de modèles simulant les conditions atmosphériques terrestres, pour prendre notamment en compte : la présence de nuages, l'angle du rayonnement solaire sur la molécule, la capacité de la surface terrestre recevant le rayonnement à renvoyer un part du rayonnement reçu vers l'espace (appelée « albedo »), et plus récemment l'effet de synergie entre différents GES selon leurs concentrations<sup>5</sup>.

Comme indiqué dans leur notation,  $a_x(t)$  et  $a_r(t)$ , ces termes varient en fonction du temps. De plus, ces grandeurs sont mises à jour régulièrement par le GIEC. Les valeurs futures sont difficilement anticipables, elles dépendent des concentrations relatives entre les différents GES. Leurs évolutions dépendent en particulier de l'efficacité des mesures de réduction qui seront prises au niveau planétaire. Ainsi, lorsque le GIEC met à jour ces valeurs, elles sont supposées constantes dans le temps jusqu'à la mise à jour suivante. Dans la suite on écrira donc les termes  $a_x$  et  $a_r$ .

A titre d'exemple, les efficacités radiatives du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont de  $1,4 \cdot 10^{-5}$ ,  $3,4 \cdot 10^{-4}$  et  $3,03 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ppb}^{-1}$  respectivement, selon les données du GIEC de 2007<sup>6</sup>.

#### b) Dégradation des GES dans l'atmosphère

##### Fonctions $[x(t)]$ et $[r(t)]$

Lorsqu'un gaz à effet de serre est émis dans l'atmosphère, il disparaît progressivement sur une durée qui dépend du gaz, ce qui est représenté par les fonctions  $[x(t)]$  et  $[r(t)]$  pour le GES et le CO<sub>2</sub> respectivement.

Concernant le CO<sub>2</sub>, le modèle physique de décroissance de l'émission d'un kg de gaz avec le temps est complexe : il dépend du cycle biogéochimique du carbone<sup>7</sup> à l'échelle de la planète représenté sur la Figure 1a. Plusieurs modèles coexistent et ont été comparés<sup>8</sup>. Le modèle IPCC AR4, servant de base à l'ACV dynamique de la RE2020, correspond à la courbe verte de la Figure 1b.

La dégradation du CO<sub>2</sub> est modélisée selon la méthode IPCC AR4 par l'équation<sup>6</sup> suivante :

$$2 \quad [r(t)] = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e(-t/\tau_i)$$

avec :  $a_0 = 0,217 \text{ kg}$ ,  $a_1 = 0,259 \text{ kg}$ ,  $a_2 = 0,338 \text{ kg}$ ,  $a_3 = 0,186 \text{ kg}$ ,  $\tau_1 = 1\,729 \text{ ans}$ ,  $\tau_2 = 18,51 \text{ ans}$ , et  $\tau_3 = 1\,186 \text{ ans}$ .  
Bien sûr  $a_0 + a_1 + a_2 + a_3 = 1 \text{ kg}$ .

Pour comprendre cette équation, il faut retenir que plus le temps  $t$  augmente, plus les termes concernant la somme des  $i$  sont petits. Ainsi pour des temps infinis, la concentration résiduelle en CO<sub>2</sub> (en fait la masse de CO<sub>2</sub> qui reste dans l'atmosphère à partir du kg émis à l'origine du temps) tend vers 0,217 kg comme on le voit sur la Figure 2 (courbe grise). On obtient en pratique cette stabilisation à 0,217 kg après une durée d'environ 1 000 ans.

<sup>5</sup> Etminan, M., G. Myhre, E.J. Highwood, and K.P. Shine. 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing: Greenhouse Gas Radiative Forcing. *Geophysical Research Letters* 43(24): 12,614-12,623.

<sup>6</sup> Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, et al. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. by S.D. Solomon, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller. Cambridge University Press. IPCC reports. Cambridge (UK) and New York (USA).

<sup>7</sup> Joos, F., I.C. Prentice, S. Sitch, R. Meyer, G. Hooss, G.-K. Plattner, S. Gerber, and K. Hasselmann. 2001. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Emission Scenarios. *Global Biogeochemical Cycles* 15(4): 891-907.

<sup>8</sup> Joos, F., R. Roth, J.S. Fuglestedt, G.P. Peters, I.G. Enting, W. von Bloh, V. Brovkin, et al. 2013. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(5): 2793-2825.

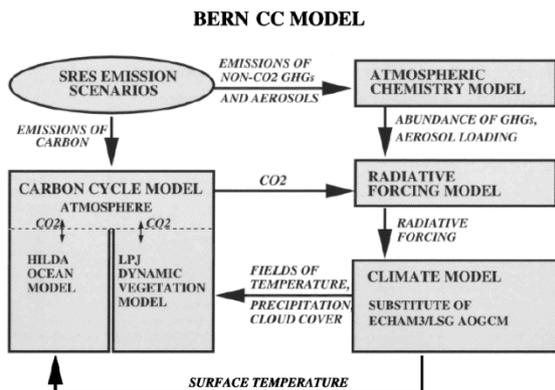
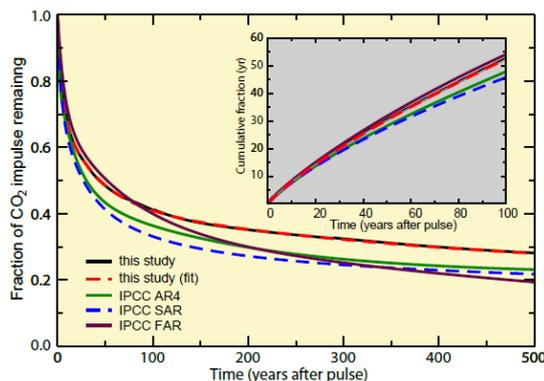


Figure 1. Simplified scheme of the Bern CC model. For scenario calculations, future abundances of greenhouse gases (GHGs) are projected from the emissions of CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> GHGs. Radiative forcing is calculated from the abundance of CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> GHGs and emissions of aerosol precursors. The IRF-EOF substitute of the ECHAM3/LSG AOGCM is driven by radiative forcing, and modeled surface fields of temperature, precipitation, and cloud cover are passed to the carbon cycle model. The carbon cycle model includes a well-mixed atmosphere, the HILDA ocean model, and the Lund-Potsdam-Jena (LPJ) Dynamic Global Vegetation Model. Atmospheric CO<sub>2</sub> is projected from carbon emissions by fossil fuel burning and land use changes and the carbon uptake (release) by the ocean and the land biosphere.

(a)



(b)

Fig. 8. The impulse response function for CO<sub>2</sub> (IRF<sub>CO<sub>2</sub></sub>) as used to compute GWP in the IPCC First (FAR), Second (SAR) and Fourth (AR4) Assessment Report and from this study. The red curve is a fit to the multi-model mean shown in black. The inset shows the time-integrated IRF<sub>CO<sub>2</sub></sub> for the first 100 yr after the emission pulse.

Figure 1. (a) Modèle IPCC AR4 copiée de l'article original<sup>7</sup> et (b) Evolution de la quantité de CO<sub>2</sub> restante dans l'atmosphère après l'émission d'un kg. Comparaison de modèles, copiée de l'article original<sup>8</sup>

La dégradation des autres GES émis dans l'atmosphère suit des lois comparables, avec des termes  $a_0$  nuls. Les cinétiques de dégradation du méthane et du protoxyde d'azote sont représentées et comparées à celle du CO<sub>2</sub> sur la Figure 2. On voit que le méthane (en bleu) se dégrade plus rapidement que le protoxyde d'azote (en orange). La vitesse de dégradation du CO<sub>2</sub> est intermédiaire entre ces deux gaz pour des temps courts, mais devient très lente aux temps longs.

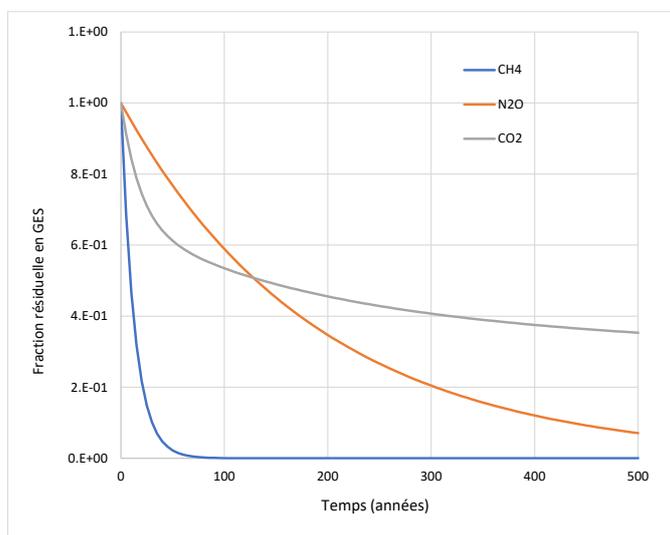


Figure 2. Cinétiques de dégradation d'un kg de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>) et protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) selon les modèles du GIEC<sup>6</sup>

c) Le forçage radiatif instantané

**Fonctions  $a_x \cdot [x(t)]$  et  $a_r \cdot [r(t)]$**

Les fonctions  $a_x(t)$  et  $a_r(t)$  (efficacité radiative) étant considérées constantes, le forçage radiatif instantané représenté par la fonction  $a_x \cdot [x(t)]$ , évolue de manière similaire à  $[x(t)]$  et diminue progressivement comme indiqué sur la courbe grise de la Figure 3.

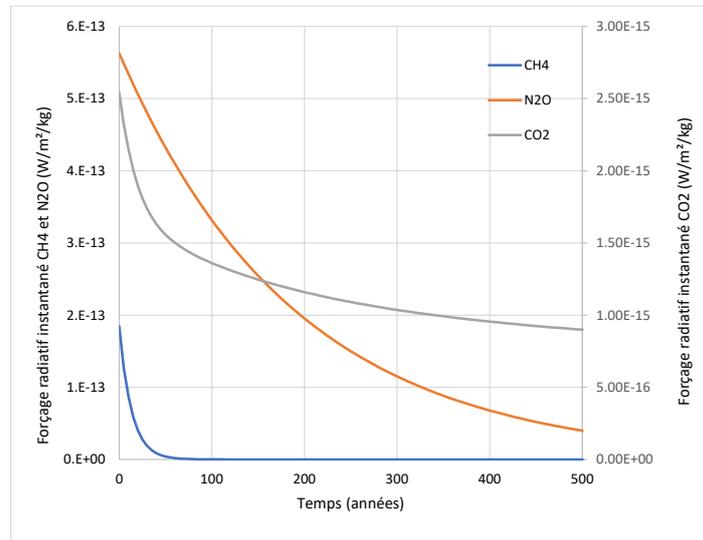


Figure 3. Forçage radiatif instantané pour un kg émis de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), méthane ( $CH_4$ ) et protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) selon les modèles du GIEC<sup>8</sup>

d) Le forçage radiatif cumulé sur une durée donnée

**Termes  $\int_0^{HTI} a_x \cdot [x(t)] \cdot dt$  et  $\int_0^{HTI} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt$**

Le forçage radiatif cumulé est exprimé en  $W \cdot an \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$  de GES. Comme la partie de l'unité exprimée en  $W \cdot an$  est une unité d'énergie (multiplication de Watts par un temps, comme le kW.h), on comprend que **le forçage radiatif cumulé représente l'énergie reçue par 1 m<sup>2</sup> de surface terrestre pendant la durée HTI, après l'émission d'un kg de GES.**

Graphiquement, le forçage radiatif cumulé n'est autre que l'aire sous la courbe de l'évolution avec le temps du forçage radiatif instantané, comme montré sur la Figure 4.

L'horizon temporel de l'impact *HTI* représente le temps jusqu'auquel on va calculer cette aire.

Pour  $HTI = 100$  ans, la valeur du forçage radiatif cumulé obtenue est l'aire de la zone hachurée en gris sur la Figure 4a.

En général, les fractions résiduelles liées à une émission décroissent en fonction du temps. Mais on voit que ce n'est pas le cas pour le dioxyde de carbone : sa fraction résiduelle tend vers une limite de 0,217 (voir Figure 2). Ainsi sur la Figure 3a, on constate que le forçage radiatif cumulé (l'aire sous la courbe) du  $CO_2$  augmente linéairement quand l'horizon temporel augmente, comme on le voit sur la courbe grise de la Figure 3b.

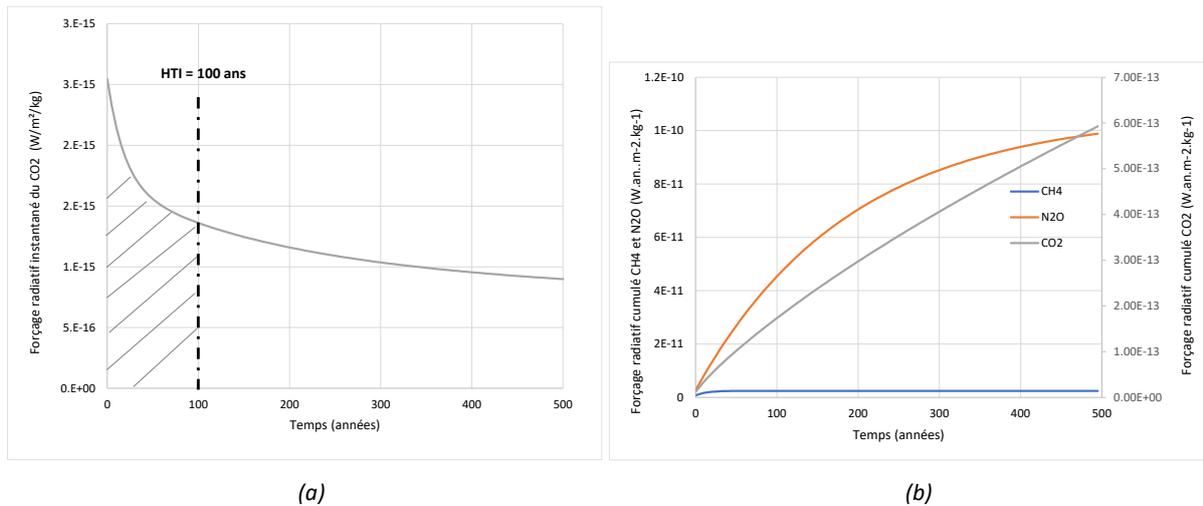


Figure 4. Forçage radiatif cumulé : (a) représentation du calcul pour le CO<sub>2</sub> et (b) résultats obtenus pour l'émission d'un kg de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>) et protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) selon les modèles du GIEC

e) Le potentiel de réchauffement climatique du gaz « x », facteur  $prg_x$

$$\text{Rapport } \frac{\int_0^{HTI} a_x \cdot [x(t)] \cdot dt}{\int_0^{HTI} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt}$$

Le facteur de caractérisation  $prg$  représente le ratio entre le forçage radiatif cumulé d'une émission d'un kg de GES et le forçage radiatif cumulé d'un kg de CO<sub>2</sub>, qui seraient émis au même moment et seraient calculés sur le même horizon temporel d'impact.

Ainsi la valeur du  $prg$  du CO<sub>2</sub> est égale à 1,00 par construction, quelle que soit la durée d'intégration (c'est-à-dire quelle que soit la valeur de  $HTI$ ). La raison principale qui sous-tend la construction de ce ratio est une conversion d'unité pour rendre le  $prg$  plus intelligible : on exprime le  $prg$  du GES en kg CO<sub>2</sub> eq., c'est-à-dire par rapport au réchauffement généré par 1 kg de CO<sub>2</sub>, plutôt qu'en W.an.m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup> de GES.

Comme expliqué au-dessus, le choix de l'horizon temporel  $HTI$  influence la valeur du  $prg$ . On parle de facteur  $prg_{100}$  pour l'indicateur à horizon temporel de 100 ans. Il existe également le  $prg_{25}$  pour l'horizon temporel de 25 ans, etc. Le choix de l'horizon temporel de l'impact est une convention et peut être librement choisi. Le choix de  $HTI = 100$  ans dans le calcul du  $prg$  (relativement au CO<sub>2</sub>) est justifié par la volonté de pouvoir prendre en compte tous les GES : on constate qu'en prenant un horizon temporel plus lointain, seul l'effet du CO<sub>2</sub> serait visible, et qu'en prenant un horizon temporel plus rapproché, l'effet des GES à courte durée de vie dans l'atmosphère serait surestimé. La valeur de  $HTI = 100$  ans apparaît donc comme un compromis acceptable. Lorsque l'on parle de facteur  $prg$  sans mentionner la durée, on fait implicitement référence au  $prg_{100}$ , l'horizon temporel  $HTI$  de 100 ans étant la convention la plus couramment choisie.

On peut voir sur la Figure 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** la dépendance forte du facteur  $prg$  à l'horizon temporel d'impact  $HTI$ . Un horizon temporel d'impact court favorise un  $prg$  élevé pour les GES à durée de vie courte comme le méthane (CH<sub>4</sub>) tandis qu'un horizon temporel long atténue l'ensemble des valeurs des  $prg$  de tous les GES car, alors que leur forçage radiatif au numérateur tend vers zéro aux temps longs (voir Figure 4b), celui du CO<sub>2</sub> tend vers une constante. Ainsi une valeur de  $HTI$  élevée (> 500 ans) a tendance à rendre moins visible les contributions des GES autres que le CO<sub>2</sub>.

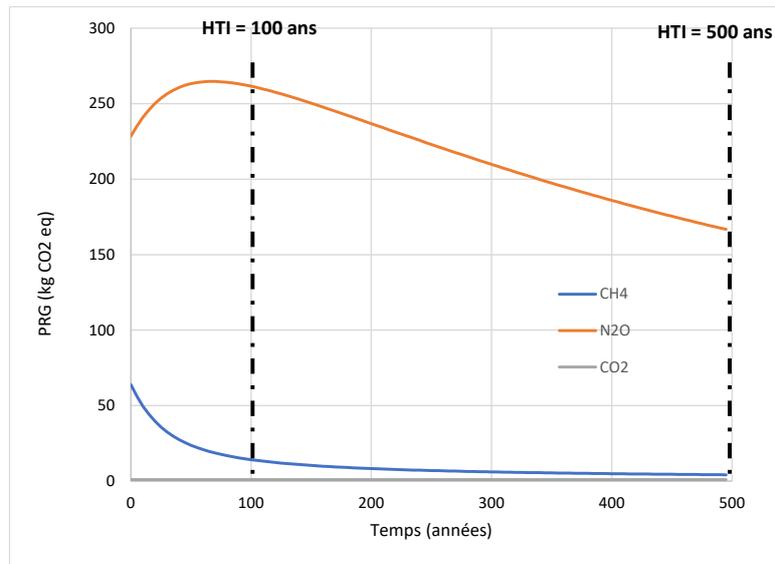


Figure 5. Valeurs des prg en fonction de l'horizon temporel d'impact (ou de la durée d'intégration, en abscisse) pour l'émission d'un kg de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) selon les modèles du GIEC<sup>6</sup>

L'horizon temporel de l'impact est rattaché à chaque émission de GES : il représente la durée pendant laquelle la contribution d'un GES au forçage radiatif cumulé va être prise en compte. Bien que le choix de l'horizon temporel de l'impact soit une convention librement choisie, **cette convention doit être appliquée de manière uniforme, pour l'ensemble des GES émis qui sont représentés par les termes au numérateur du facteur  $prg$ .**

- La première justification d'un choix uniforme d'horizon temporel d'impact pour tous les GES, est liée à la **prise en compte de l'effet de leurs vitesses de dégradation naturelle dans le calcul du forçage radiatif cumulé**. En effet, à même ordre de grandeur d'efficacité radiatives, plus un GES se dégrade rapidement, moins son forçage radiatif cumulé sera important. La Figure 6 montre l'exemple de trois GES différents : le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). On voit que le méthane qui se dégrade rapidement (Figure 6a) a logiquement un forçage radiatif cumulé inférieur (Figure 6b) à celui du protoxyde d'azote dont la durée de vie est beaucoup plus longue.

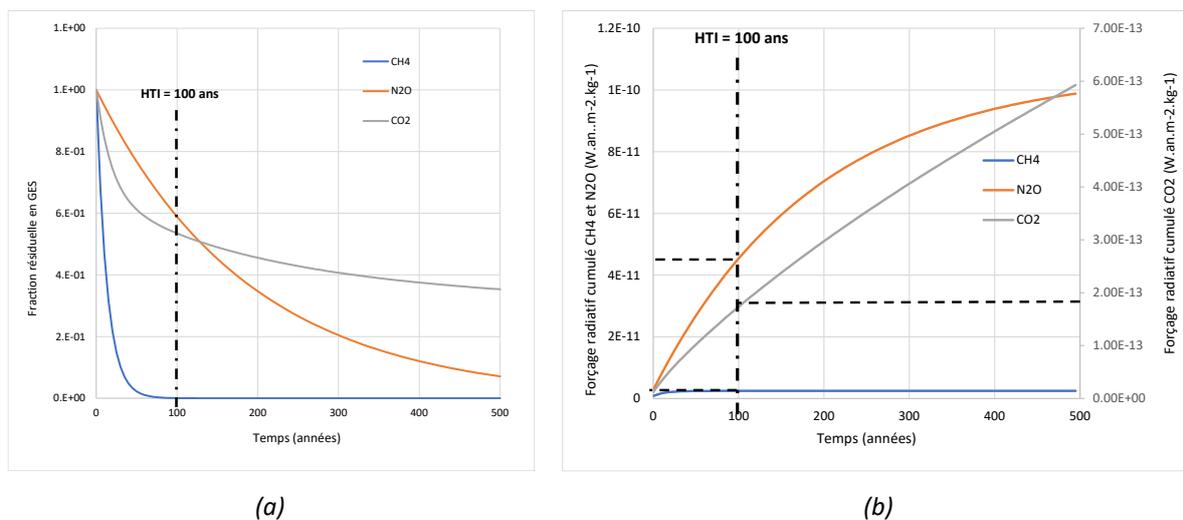


Figure 6. Lien entre horizon temporel d'impact, vitesse de dégradation et forçage radiatif cumulé

- La seconde raison de définir un horizon temporel d'impact identique pour toutes les émissions de GES, est liée au phénomène physico-chimique représenté : **chaque émission d'une même masse de GES, quel que soit le lieu et le moment de son émission, provoquera la même augmentation du forçage radiatif cumulé.** Il n'existe aujourd'hui aucune connaissance scientifique qui justifierait que la vitesse de dégradation ou l'efficacité radiative soient différentes selon qu'une émission se produise en un lieu ou à un moment différent.

### 3. Indicateurs de réchauffement climatique PRG

L'indicateur de réchauffement climatique d'un ensemble d'émissions de GES, basé sur les facteurs  $prg_x$ , se calcule de manière générale comme la somme de la masse  $m_x$  de chaque GES « x » émis multipliée par le facteur  $prg_x$  qui lui correspond

$$3 \quad PRG = \sum_x prg_x \cdot m_x = prg_{x_1} \cdot m_1 + prg_{x_2} \cdot m_2 + \dots$$

où :  $x_1, x_2 \dots$  sont les GES,  $m_1, m_2$  leurs masses émises (kg), et  $prg_x$  leurs facteurs de caractérisation.

**Les différences entre les méthodes qui vont maintenant être détaillées ci-dessous, vont résider dans la prise en compte des moments (temps) où se produisent les émissions dans les termes des facteurs  $prg$ , et dans les durées sur lesquelles les forçages radiatifs instantanés sont intégrés, au numérateur et au dénominateur. Pour bien les différencier nous leur avons donné chacun un nom et un symbole selon de ce qu'ils représentent.**

**La durée d'intégration est notée  $T$ .**

Les indicateurs qui suivent montrent différentes manières de calculer un indicateur : la méthode statique et trois méthodes dynamiques. Nous leur avons donné différents noms, qui sont propres à cette note, afin de les distinguer.

#### a) Indicateur PRG statique

Dans l'indicateur PRG statique, utilisé actuellement dans la plupart des ACV, on ne considère pas le moment où une émission se produit, ce qui revient à supposer que la totalité des émissions se produit à l'instant  $t = 0$ .

$$4 \quad PRG_{stat}^{HTI} = \frac{\int_0^{HTI} a_{x_1} \cdot [x(t)] \cdot dt}{\int_0^{HTI} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_0^{HTI} a_{x_2} \cdot [x(t)] \cdot dt}{\int_0^{HTI} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

où :  $x_1, x_2 \dots$  sont des GES différents et  $m_1, m_2$  leurs masses émises (kg) (pour les autres notations voir l'équation 1).

Quand on examine – dans l'exemple qui suit, scénario 1 – comment varie l'indicateur PRG statique avec l'horizon temporel d'impact (ou la durée d'observation, représentée par le temps  $T$ ), l'indicateur PRG statique est alors une fonction de  $T$  donnée par l'équation 4T :

$$4T \quad PRG_{stat}(T) = \frac{\int_0^T a_{x_1} \cdot [x(t)] \cdot dt}{\int_0^T a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_0^T a_{x_2} \cdot [x(t)] \cdot dt}{\int_0^T a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

#### b) Indicateur PRG dynamique

Pour calculer un indicateur PRG dynamique classique, quand on connaît le moment où chaque émission se produit, on pourrait utiliser se baser sur l'indicateur statique et utiliser un horizon temporel d'impact  $HTI$  « glissant » par rapport au temps « réel ». Cet indicateur, est présenté dans cette note pour des raisons pédagogiques, nous verrons qu'il n'est pas adapté pour représenter le phénomène dynamique, cependant, il sert dans cette note à comprendre la notion de durée d'observation. On rapporte le forçage radiatif cumulé du GES émis au temps  $t_i$  à celui d'1 kg de CO<sub>2</sub> qui aurait été émis au même temps  $t_i$ .

$$5 \quad PRG_{dyn}^{HTI} = \frac{\int_{t_1}^{t_1+HTI} a_{x_1} \cdot [x(t-t_1)] \cdot dt}{\int_{t_1}^{t_1+HTI} a_r \cdot [r(t-t_1)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_{t_2}^{t_2+HTI} a_{x_2} \cdot [x(t-t_2)] \cdot dt}{\int_{t_2}^{t_2+HTI} a_r \cdot [r(t-t_2)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

où :  $x_1, x_2 \dots$  sont des GES différents et  $m_1, m_2$  leurs masses émises (kg),  $t_1, t_2 \dots$  sont les temps auxquels chaque GES est émis (pour les autres notations voir l'équation 1).

Pour un même HTI, l'indicateur PRG dynamique est strictement égal à l'indicateur PRG statique, seule diffère l'écriture mathématique (il suffit de faire les changements de variable *ad hoc*).

Quand on examine – dans l'exemple qui suit, scénario 2 – comment varie l'indicateur PRG dynamique avec la durée d'observation (représentée par le temps  $T$ ), on prolonge les fonctions  $[x(t)]$  et  $[r(t)]$  en leur donnant la valeur zéro à la fois quand  $t < 0$  et quand  $T > t_i + HTI$  (les discontinuités à  $T = 0$  et  $T = t_i + HTI$  sont sans importance dans les intégrations).

L'indicateur PRG dynamique est alors une fonction de  $T$  donnée par l'équation 5T :

$$5T \quad PRG_{dyn}(T) = \frac{\int_0^T a_{x_1} \cdot [x(t-t_1)] \cdot dt}{\int_0^T a_r \cdot [r(t-t_1)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_0^T a_{x_2} \cdot [x(t-t_2)] \cdot dt}{\int_0^T a_r \cdot [r(t-t_2)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

Bien sûr l'équation 5T est équivalente à l'équation 5, elle-même équivalente à l'équation 4, quand on prend une durée d'observation  $T = t_{\text{dernière émission}} + HTI$ .

#### c) Indicateur $\Delta PRG$ dynamique

Dans l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique, sur lequel se base la méthode RE 2020<sup>1</sup> **Erreur ! Signet non défini.**, les moments  $t_i$  de chaque émission de GES sont pris en compte, mais au lieu que l'intégration des forçages radiatifs instantanés soit faite sur une durée fixe HTI à compter du moment de chaque émission, les forçages radiatifs sont intégrés depuis  $t = 0$  jusqu'à un temps fixe, indépendant de la chronique des émissions,  $DO$ , appelée « durée d'observation ».

De plus on rapporte le forçage radiatif cumulé du GES émis au temps  $t_i$  à celui d'1 kg de CO<sub>2</sub> qui aurait été émis au temps zéro.

$$6 \quad \Delta PRG_{dyn}^{DO} = \frac{\int_{t_1}^{DO} a_{x_1} \cdot [x(t-t_1)] \cdot dt}{\int_0^{DO} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_{t_2}^{DO} a_{x_2} \cdot [x(t-t_2)] \cdot dt}{\int_0^{DO} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

où :  $x_1, x_2 \dots$  sont des GES différents et  $m_1, m_2$  leurs masses émises (kg),  $t_1, t_2 \dots$  sont les temps auxquels chaque GES est émis et  $DO$  la durée d'observation (années) choisie (pour les autres notations voir l'équation 1).

La notation  $\Delta PRG$  est introduite pour symboliser la prise en compte des retards ( $\Delta$ ) d'émissions.

Les durées utilisées pour le calcul du forçage radiatif cumulé de l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique diffèrent de celles de l'indicateur PRG dynamique, puisqu'elles sont égales à la durée d'observation moins les délais entre le temps zéro et le moment de l'émission.

Quand on examine – dans l'exemple qui suit, scénario 3 – comment varie l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique avec la durée d'observation (représentée par le temps  $T$ ), cet indicateur est alors une fonction de  $T$  donnée par l'équation 6T :

$$6T \quad \Delta PRG_{dyn}(T) = \frac{\int_0^T a_{x_1} \cdot [x(t-t_1)] \cdot dt}{\int_0^T a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_0^T a_{x_2} \cdot [x(t-t_2)] \cdot dt}{\int_0^T a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

#### d) Indicateur $\Delta PRG$ dynamique simplifié de la RE 2020

Dans l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique simplifié de la RE 2020, la formule est adaptée pour pouvoir être appliquée facilement aux Fiches de Déclaration Environnementales (FDES) existantes qui calculent un PRG statique (équation 4) avec un horizon temporel HTI de 100 ans. Les facteurs *prg* (statiques) sont corrigés par un coefficient

multiplicateur fonction du temps (dont nous avons estimé la valeur (régression linéaire) à partir du fichier Excel® disponible sur le site de la RE2020<sup>3</sup> à environ  $-0,00842 \text{ kg eq CO}_2/\text{an}$  selon les moments (en années depuis  $t = 0$ ) où se produisent les émissions.

Les coefficients de la RE2020 sont basés sur ceux fournis dans les travaux de thèse d'Anthony Benoist<sup>9</sup> (tableau IV.7 page 168).

Dans cette approche, ni la durée d'observation  $DO$  ni  $HTI$  n'apparaissent dans l'équation 7.

Le coefficient multiplicateur a été calculé de manière à ce que la valeur de l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique simplifié soit égal à celle de l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique précédent pour une durée d'observation  $DO$  de 100 ans.

$$7 \quad \text{pour } 0 \leq t_i \leq DO, \Delta PRG_{dyn,simpl} = (1 - 0,00842 \cdot t_1) \cdot prg_{x_1} \cdot m_1 + (1 - 0,00842 \cdot t_2) \cdot prg_{x_2} \cdot m_2 + \dots$$

pour  $t_i \leq 0$ ,  $\Delta PRG_{dyn,simpl} = prg_{x_1} \cdot m_1 + prg_{x_2} \cdot m_2 + \dots$  comme si les émissions avant la construction du bâtiment étaient ramenées à la date  $t = 0$ .

pour  $50 \leq t_i$ ,  $\Delta PRG_{dyn,simpl} = (1 - 0,00842 \cdot 50) \cdot prg_{x_1} \cdot m_1 + (1 - 0,00842 \cdot 50) \cdot prg_{x_2} \cdot m_2 + \dots$  comme si les émissions après la durée de service du bâtiment (50 ans) étaient ramenées à la date  $t = 50$  ans.

où :  $x_1, x_2 \dots$  sont des GES différents et  $m_1, m_2$  leurs masses émises (kg),  $t_1, t_2 \dots$  sont les temps auxquels chaque GES est émis, les  $prg_{x_i}$  correspondent à l'équation 1.

Quand on examine – dans l'exemple qui suit, scénario 4 – comment varie l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique simplifié avec la durée d'observation (représentée par le temps  $T$ ), cet indicateur est alors une fonction de  $T$  donnée par l'équation 7T (pour  $T$  entre 0 et 50 ans) :

$$7T \quad \Delta PRG_{dyn,simpl}(T) = (1 - 0,00842 \cdot t_1) \cdot prg_{x_1} \cdot H(T - t_1) \cdot m_1 + (1 - 0,00842 \cdot t_2) \cdot prg_{x_2} \cdot H(T - t_2) \cdot m_2 + \dots$$

où  $H$  est la fonction de Heaviside ou « marche d'escalier ».

#### 4. Exemple

Pour comprendre les différences de résultat obtenus par ces différentes méthodes, on s'appuie sur un exemple.

Considérons que l'on répète 5 fois successivement, à 25 ans d'intervalle, l'émission d'un kg de  $\text{CO}_2$ . La première émission se produisant au temps zéro. A partir du même cas et d'une même réalité physico-chimique décrite en dans la partie a) nous comparons les résultats donnés par les indicateurs décrits ci-dessus, dans la partie b) :

- **Scénario 1 : indicateur PRG statique (équation 4)**, on ne considère pas les moments où les émissions se produisent, la totalité des émissions est regroupée au temps zéro (donc dans cet exemple, 5 kg de  $\text{CO}_2$  émis au temps zéro);
- **Scénario 2 : indicateur PRG dynamique (équation 5)**, on prend en compte les moments où les émissions se produisent, et on utilise un indicateur PRG avec un horizon temporel d'impact  $HTI$  de valeur fixée à 100 ans et glissant ;
- **Scénario 3 : indicateur  $\Delta PRG$  dynamique (équation 6)**, on prend en compte les moments où les émissions se produisent, et l'on utilise un indicateur  $\Delta PRG$  dynamique que l'on fait varier avec la durée d'observation  $DO$ .
- **Scénario 4 : indicateur  $\Delta PRG$  dynamique simplifié (équation 7)**, on prend en compte les moments où les émissions se produisent, et l'on utilise le coefficient multiplicateur de l'indicateur PRG statique suivant la loi affine décroissante avec le temps.

a) Dégradation des GES et forçage radiatif cumulé

La Figure 7Figure 8a montre la fonction de dégradation des masses de  $\text{CO}_2$  jusqu'à  $T = 200$  ans. En rouge, on représente la masse résiduelle de  $\text{CO}_2$  dans la méthode statique où tout est supposé émis au temps zéro (scénario

<sup>9</sup> Benoist A. (2009). Adapting Life-Cycle Assessment to biofuels: some elements from the first generation case [en ligne]. S.I. : Mines ParisTech. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005919>

1). Les autres courbes représentent les masses résiduelles de chacune des émissions individuelles, et la courbe noire leur cumul. A ce stade du calcul il n'existe pas de différence entre les méthodes dynamiques (scénarios 2, 3 et 4, qui se basent tous sur la prise en compte des moments où se produisent les émissions et leurs lois de décroissance de fraction résiduelle). Bien que les courbes rouge et noire soient très différentes dans leurs allures, on voit qu'au bout d'un temps suffisamment long (ici environ 400 années), elles se rejoignent, ce qui est parfaitement logique. Ainsi, l'approche statique revient à surestimer la concentration au début, mais la concentration statique repasse ensuite au-dessous de la concentration dynamique (ici après une durée d'observation d'environ 70 ans).

La Figure 7b montre comment varie le forçage radiatif cumulé des émissions de CO<sub>2</sub> quand la durée d'intégration (c'est l'abscisse  $T$ ) varie de 0 à 200 ans. On voit que le forçage radiatif cumulé calculé par les méthodes dynamiques (en noir) reste en-dessous de celui de la méthode statique (scénario 1 en rouge).

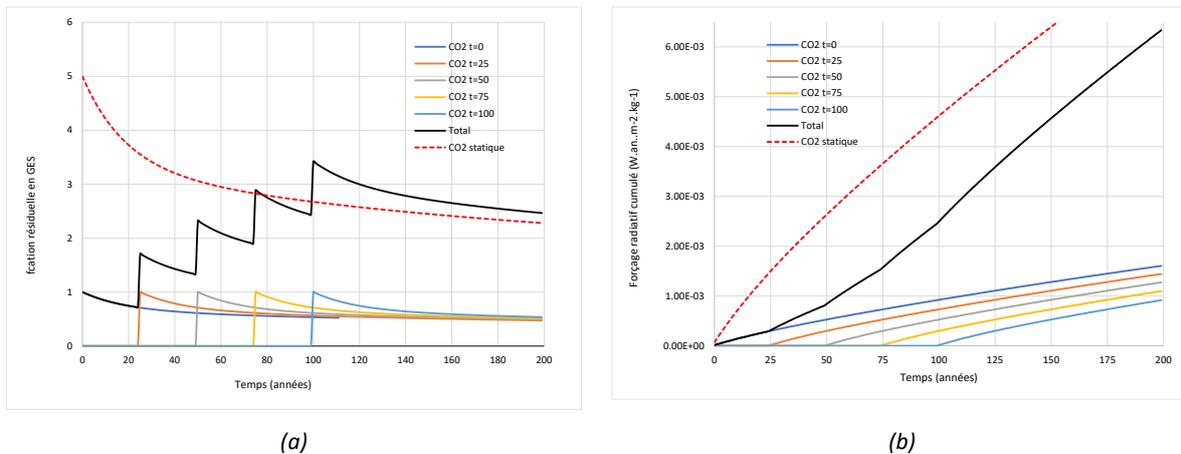


Figure 7. Comparaison (a) des fractions résiduelles en CO<sub>2</sub> scénarios 1 et (2 à 4) (b) des forçages radiatifs cumulés

On constate donc bien une différence de forçage radiatif cumulé dans le fait d'émettre des émissions plus tard : les courbes se suivent de manière à peu près parallèle dans cet exemple, et donc, à un temps  $T$  donné, le forçage radiatif cumulé obtenu avec l'étalement des émissions est toujours inférieur à la valeur supposant que toutes les émissions se produisent au même temps zéro. Les indicateurs dynamiques doivent donc refléter cette réalité physico-chimique.

#### b) Comparaison de résultats donnés par les différents indicateurs

La Figure 8a montre l'indicateur PRG dynamique (scénario 2, équation 5) comparé à l'indicateur PRG statique (scénario 1, équation 4). Comme précédemment l'abscisse  $T$  est la durée d'intégration, de 0 à 200 ans. Par construction la valeur de l'indicateur est égale à 1 dès que l'émission se produit, et on convient naturellement que l'indicateur est égal à 0 avant que l'émission se produise (sans considérer la fraction, qui donne 0/0). On obtient une évolution « en escalier » de l'indicateur dynamique, qui rejoint la valeur de l'indicateur PRG statique au moment de la dernière émission. Cet indicateur, qui est en fait une simple translation de l'indicateur statique, ne représente pas la diminution du forçage radiatif cumulé observé sur la Figure 7b.

La Figure 8b montre l'indicateur  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) comparé à l'indicateur PRG statique (scénario 1, équation 4). Pour le scénario 1, la durée d'intégration ( $HTI$  de l'équation 4) est fixée à 100 ans, il n'y a donc qu'une seule valeur de PRG statique. Pour le scénario 3, l'abscisse est la durée d'intégration ( $DO$  de l'équation 6) variant de 0 à 200 ans. La première émission de CO<sub>2</sub> au temps zéro a bien un facteur PRG égal à 1. Mais les autres voient leur indicateur PRG diminué parce que le dénominateur est plus élevé (au dénominateur on considère que l'émission de CO<sub>2</sub> a lieu à  $t=0$  alors qu'au numérateur on considère que l'émission du GES a lieu au temps  $t_i$ ). Pour une durée d'intégration ou un temps d'observation de 100 ans, la différence entre l'indicateur statique et l'indicateur dynamique est de 2,2 kg CO<sub>2</sub> eq.

La Figure 8c montre l'indicateur  $\Delta PRG$  dynamique simplifié de la RE 2020 (scénario 4, équation 7) comparé à l'indicateur PRG statique (scénario 1). Pour le scénario 4, l'abscisse étant le temps  $T$ , on prend en compte l'émission ( $i$ ) à la valeur  $(1 - 0,00845 \cdot t_i) \cdot prg_{x_i} \cdot m_i$  dès que  $T$  arrive à  $t_i$ . L'évolution se fait en escalier comme pour le scénario 2 (Figure 8a). La première émission de CO<sub>2</sub> au temps zéro a bien une valeur d'indicateur PRG égale à 1, mais les émissions plus tardives ont une valeur de PRG moindre à cause du coefficient réducteur. Pour une durée d'observation de 100 ans, la différence entre l'indicateur statique et l'indicateur dynamique est de 2,23 kg CO<sub>2</sub> eq, comme pour l'ACV dynamique de l'équation 6.

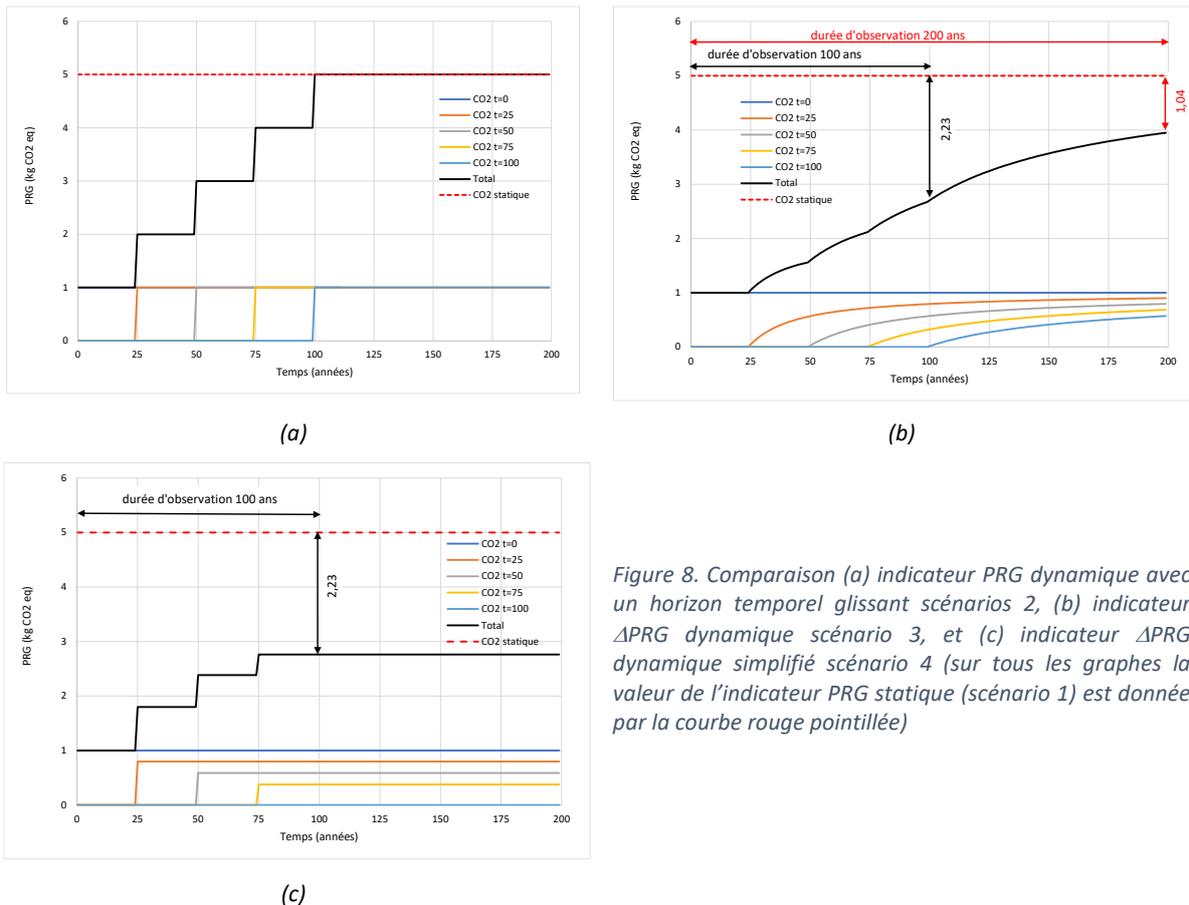


Figure 8. Comparaison (a) indicateur PRG dynamique avec un horizon temporel glissant scénarios 2, (b) indicateur  $\Delta PRG$  dynamique scénario 3, et (c) indicateur  $\Delta PRG$  dynamique simplifié scénario 4 (sur tous les graphes la valeur de l'indicateur PRG statique (scénario 1) est donnée par la courbe rouge pointillée)

Voici les observations sur les résultats de la Figure 8 :

- Les méthodes PRG statique et PRG dynamique sont équivalentes : par rapport à la méthode PRG statique, la méthode PRG dynamique apporte le détail temporel de la contribution au réchauffement climatique, mais ne permet pas de refléter la diminution du forçage radiatif cumulé lié à l'étalement des émissions.
- Les méthodes  $\Delta PRG$  dynamique et  $\Delta PRG$  dynamique simplifiée donnent le même résultat quand la durée d'observation est égale à 100 ans, à cause du calage du coefficient réducteur de la  $\Delta PRG$  dynamique simplifiée, mais elles ne sont pas équivalentes pour d'autres valeurs de la durée d'observation.
- Les méthodes PRG (statique, dynamique) et  $\Delta PRG$  (dynamique, dynamique simplifiée) ne sont pas équivalentes : le résultat des méthodes  $\Delta PRG$  (dynamique, dynamique simplifiée) est moins élevé que celui des méthodes PRG (statique, dynamique). Les méthodes  $\Delta PRG$  (dynamique, dynamique simplifiée) reflètent bien une baisse comme observé pour le forçage radiatif cumulé.

c) Comment comprendre ces résultats ?

Les méthodes PRG statique (scénario 1, équation 4) et dynamique (scénario 2, équation 5) représentent l'énergie cumulée envoyée à 1 m<sup>2</sup> de la surface de la Terre, des émissions de GES pendant une durée d'observation donnée. Pour une meilleure intelligibilité, cet effet cumulé a été ramené à celui d'un kg de CO<sub>2</sub> pendant la

**même durée.** La valeur de la durée d'observation de ce cumul est donc la même, quel que soit le moment de chaque émission. Si l'on reprend l'exemple détaillé précédemment (1 kg de CO<sub>2</sub> émis tous les 25 ans), les forçages radiatifs cumulés sont représentés par les courbes de la Figure 6b et le dénominateur par les aires sous les courbes représentées sur la Figure 6a. Quel que soit le moment de l'émission, la durée sur laquelle le forçage radiatif instantané est intégré est la même (*HTI*, pris égal à 100 ans). En résumé, on intègre sur une durée d'observation qui correspond à la durée entre le temps zéro et le moment de la dernière émission, augmentée de l'horizon temporel de l'impact (*HTI*) de la dernière émission.

Les méthodes  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) et  $\Delta$ PRG dynamique simplifiée de la RE 2020 (scénario 4, équation 7) ayant été montrées équivalentes, nous nous concentrons ici uniquement sur la méthode  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) sur laquelle se base la réglementation afin d'en comprendre le fondement théorique. Cette méthode  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) impose le moment d'émission au temps zéro pour le kg de référence de CO<sub>2</sub> émis au dénominateur, et les impacts des GES au numérateur sont calculés à partir de leurs propres moments d'émission, sur la durée d'observation globale choisie. Cette méthode représente **l'effet lié au retard d'une émission par rapport à un temps zéro, en référence à une durée d'observation donnée.** Les aires sous chaque courbe sont intégrées dans la fenêtre temporelle définie par la durée d'observation comme montré sur la Figure 9.

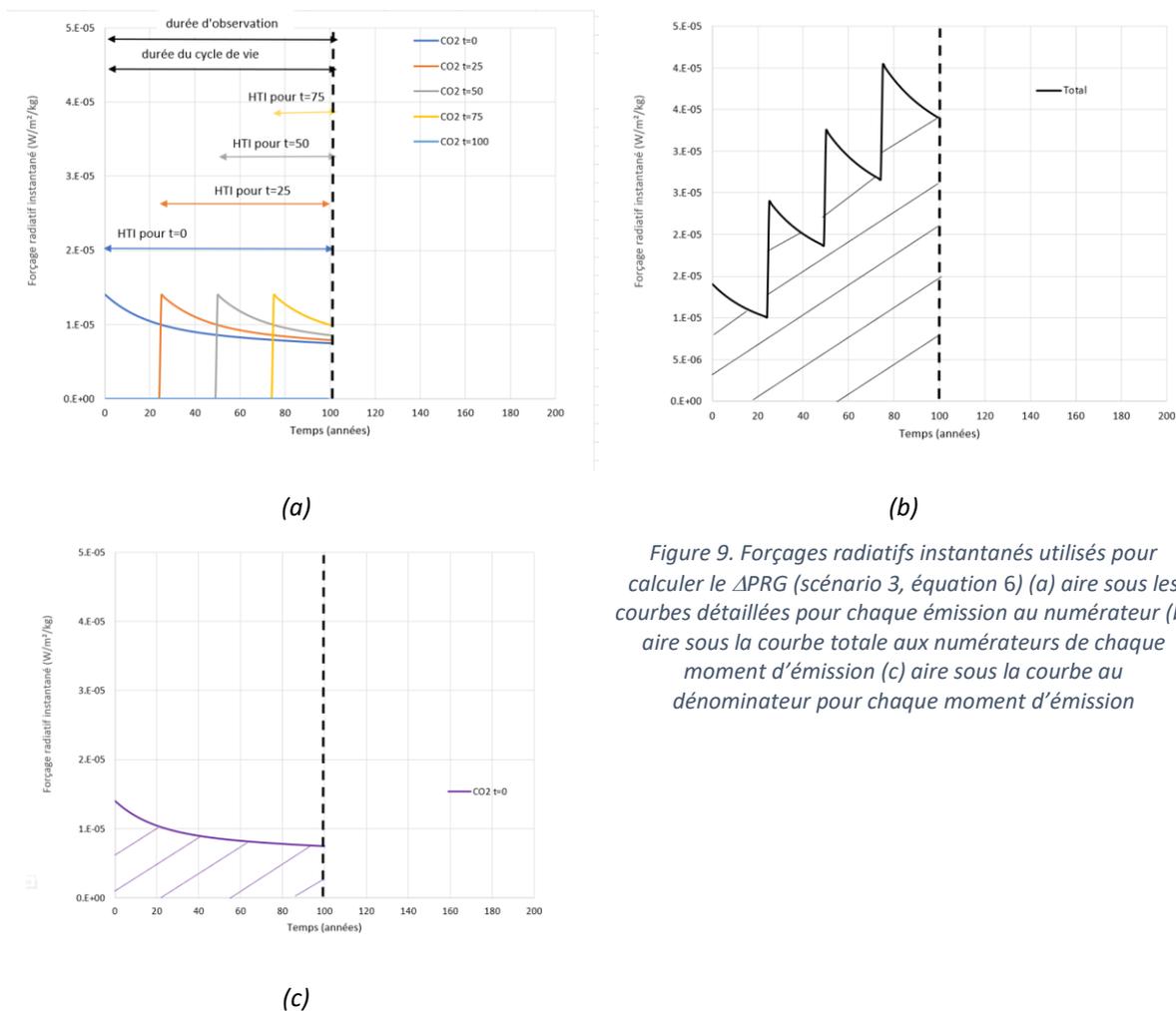


Figure 9. Forçages radiatifs instantanés utilisés pour calculer le  $\Delta$ PRG (scénario 3, équation 6) (a) aire sous les courbes détaillées pour chaque émission au numérateur (b) aire sous la courbe totale aux numérateurs de chaque moment d'émission (c) aire sous la courbe au dénominateur pour chaque moment d'émission

Pour l'exemple précédent, le numérateur est représenté sur la Figure 9a pour chaque émission et par la courbe en noir Figure 9b qui représente le total. Le dénominateur est représenté par la courbe en violet de la Figure 9c. Au total on intègre sur une durée d'observation qui correspond à l'horizon temporel de l'impact de la première émission. Les durées d'intégration pour les émissions retardées se produisant après le temps zéro, sont tronquées.

Le résultat du  $\Delta$ PRG dynamique est donc moins élevé de celui du PRG dynamique, pour trois raisons :

- Le choix de la durée d'observation fait que la durée de cumul des forçages radiatifs instantanés est différente selon le moment de l'émission : plus l'émission se rapproche de la fin de la durée d'observation, moins l'aire sous la courbe sera importante ;
- Le choix de la durée d'observation implique que l'impact de l'émission à  $t = 100$  ans (et a fortiori au-delà) n'est pas considérée dans le calcul de l'indicateur ;
- L'étalement des émissions provoque un étalement de leurs effets et cela réduit la valeur de la fraction : le numérateur considère les « temps réels » des émissions et de leurs impacts alors que le dénominateur considère comme référence 1 kg de  $\text{CO}_2$  émis au temps zéro.

Nous pouvons constater qu'en raison d'une durée d'observation fixée à 100 ans, la méthode ne respecte pas la réalité physico-chimique décrite et argumentée précédemment (voir partie 2e), en permettant des horizons temporels d'impacts (HTI) différents selon les moments d'émissions.

## 5. Analyse critique des méthodes

### a) Comment choisir la durée d'observation ?

La raison pour laquelle la méthode  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) ne respecte pas la condition d'horizons temporels d'impacts (HTI) identiques est due au choix d'une durée d'observation fixée à 100 ans. Nous présentons d'abord le raisonnement suivi par les auteurs de cette méthode dynamique, quant à ce choix, puis nous en effectuerons une analyse critique.

Selon ces divers auteurs<sup>2, 9, 10</sup>, la formule du  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) est justifiée par une incohérence temporelle représentée sur la Figure 10.

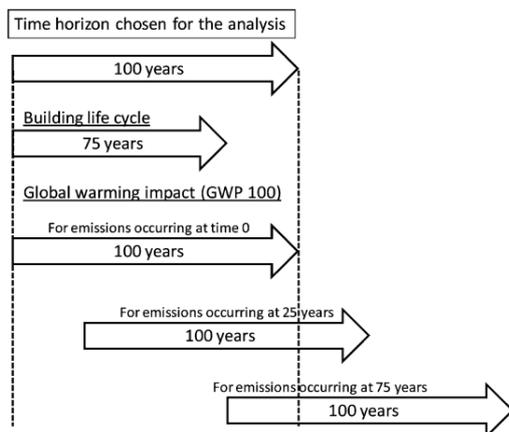


FIGURE 2. Illustration of the inconsistency in time frames for global warming LCIA with the example of a 75-year lifetime building.

Références n°2 et **Erreur ! Signet non défini.**

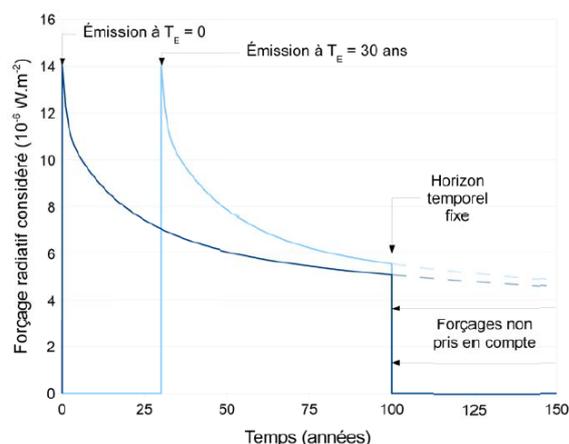


Figure IV.8 - Correction de la prise en compte temporelle du forçage radiatif d'émissions décalées dans le temps, cas des PRG définis à 100 ans

Référence n°9

Figure 10. Représentation de l'incohérence des fenêtres temporelles des émissions et de leurs impacts, selon les concepteurs du  $\Delta$ PRG dynamique **Erreur ! Signet non défini.**

Les auteurs rappellent qu'il existe plusieurs durées dans une étude ACV :

<sup>10</sup> Levasseur, A. 2011. Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique. École Polytechnique de Montréal. <http://publications.polymtl.ca/706/>. Accessed January 6, 2015.

- la durée du cycle de vie du produit étudié (ici le bâtiment), que nous pouvons nommer *DCV* ;
- l'horizon temporel de l'impact, que nous avons défini et noté *HTI* dans ce document ;
- l'horizon temporel choisi pour l'étude ACV, que nous avons défini et nommé « durée d'observation », notée *DO* dans ce document.

Les auteurs expliquent (Figure 10) que pour des émissions ayant lieu après le temps zéro, l'horizon temporel des impacts peut dépasser la durée d'observation.

Les auteurs justifient ainsi l'utilisation de la méthode  $\Delta$ PRG dynamique, qui permet d'éviter que les impacts dépassent la durée d'observation, ce qui selon eux, représente une incohérence temporelle. Cependant aucune justification ni argumentation n'est apportée sur la nature et le choix de ces différentes durées. Les auteurs estiment eux-mêmes que cette durée d'observation (ou horizon temporel choisi pour l'étude ACV) est arbitraire et n'a pas à être justifiée. Revenons sur chacune d'entre elles.

**L'horizon temporel de l'impact est choisi par convention, mais sa valeur est justifiée par une réalité physico-chimique.** Comme expliqué plus haut, l'horizon temporel de l'impact traduit la durée sur laquelle le forçage radiatif cumulé est calculé (voir plus haut : Facteur de caractérisation). Il traduit une réalité physico-chimique : quel que soit le moment où un GES est émis, son effet sur le réchauffement climatique est de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années. Fixer une valeur pour *HTI* permet de considérer l'effet sur le réchauffement climatique de manière équivalente pour chaque GES. Du fait de la stabilisation de la fraction résiduelle du CO<sub>2</sub> à 0,217, il n'existe pas de durée pour laquelle l'effet du CO<sub>2</sub> au-delà de *HTI* deviendrait nul ou très petit, et donc il n'est pas possible de choisir un horizon temporel qui représente la totalité de l'effet sur le réchauffement climatique (au contraire, cela serait sans doute possible pour d'autres impacts environnementaux). **Il convient qu'une fois la valeur de *HTI* définie, celle-ci soit conservée, quel que soit la nature du GES et le moment de son émission.** Cette règle est justifiée par la réalité physico-chimique de l'impact comme expliquée plus haut (voir partie 2e).

**La durée du cycle de vie du produit considéré *DCV*** est une valeur factuelle : elle peut être déterminée si l'on connaît la chronologie de fabrication des matériaux, produits intermédiaires et opérations liées au cycle de vie du produit. Il est à souligner que ***DCV* n'est pas la durée de vie du produit, que nous appellerons *DVP*, mais la durée de son cycle de vie.** Ainsi pour un bâtiment, il ne s'agit pas de la durée de vie du bâtiment, mais de la fenêtre temporelle qui va de la première émission de la première extraction des ressources naturelles nécessaire à la construction du bâtiment, jusqu'à la dernière émission de la dernière opération de traitement de matériau ou de déchet après la fin de vie du bâtiment. Par exemple, pour un bâtiment en bois, la *DCV* devrait intégrer la durée pendant laquelle l'arbre pousse, car cette période comprend l'absorption de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Bien qu'objective et factuelle, la valeur de *DCV* n'est pas toujours facile à connaître puisqu'il faudrait connaître la chronologie de chaque partie du système sur lequel l'ACV est menée. Cependant, elle peut raisonnablement être estimée à 50 ans avant la construction (en cas d'utilisation de matériau bois) et 50 ans après la démolition pour prendre en compte d'éventuelles émissions liées à l'enfouissement de déchets. Néanmoins, il s'agit là d'une première estimation et une évaluation plus juste serait nécessaire. On peut néanmoins affirmer avec certitude que la durée du cycle de vie du produit *DCV* englobe et est plus longue que la durée de vie du produit *DVP*.

**L'horizon temporel de l'impact *HTI* et la durée du cycle de vie *DCV* sont des valeurs indépendantes, leurs valeurs respectives n'ont pas de lien de cause à effet.**

**La durée de d'observation** (ou **horizon temporel choisi pour l'analyse** comme nommée par les auteurs de l'indicateur  $\Delta$ PRG dynamique<sup>Erreur ! Signet non défini.</sup>) *DO*, est, selon les auteurs<sup>Erreur ! Signet non défini.</sup>, de la méthode  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6), choisie de manière arbitraire par ceux qui réalisent l'ACV, et ils proposent une valeur de *DO* = 100 ans. Nous n'avons pas identifié de justification à cette valeur, si ce n'est de remarquer qu'elle est choisie à la même valeur que l'horizon temporel de l'impact (y aurait-il une confusion entre ces deux durées ?).

**Ainsi il apparaît une incohérence de raisonnement scientifique dans la démarche de définition du  $\Delta$ PRG dynamique<sup>Erreur ! Signet non défini.</sup> : les auteurs<sup>Erreur ! Signet non défini.</sup> acceptent que des valeurs justifiées ou factuelles (*HTI* et *DCV*) soient modifiées pour répondre à une contrainte imposée par une valeur subjective (la durée d'observation *DO*).**

Sur cette base de raisonnement (dont nous contestons la rigueur) :

- les émissions se produisant au-delà de la durée d'observation *DO*, sont exclues ;

- les aires sous la courbe de forçage radiatif sont uniquement calculées dans la fenêtre temporelle choisie, c'est-à-dire que la valeur de *HTI* est réduite par les auteurs pour les GES émis après le temps zéro.

**Dans une démarche scientifique plus rigoureuse, une valeur subjective devrait être soumise aux contraintes objectives et non l'inverse : la durée d'observation *DO* devrait être ajustée à celles du cycle de vie *DCV* et de l'horizon temporel de l'impact *HTI*.**

La Figure 11 représente notre proposition pour le choix de la durée d'observation *DO*. Ce choix, le seul rigoureux selon nous, devrait s'appliquer aux trois indicateurs dynamiques décrits plus haut : le PRG dynamique (scénario 2, équation 5), le  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6) et le  $\Delta$ PRG dynamique simplifié (scénario 4 équation 7).

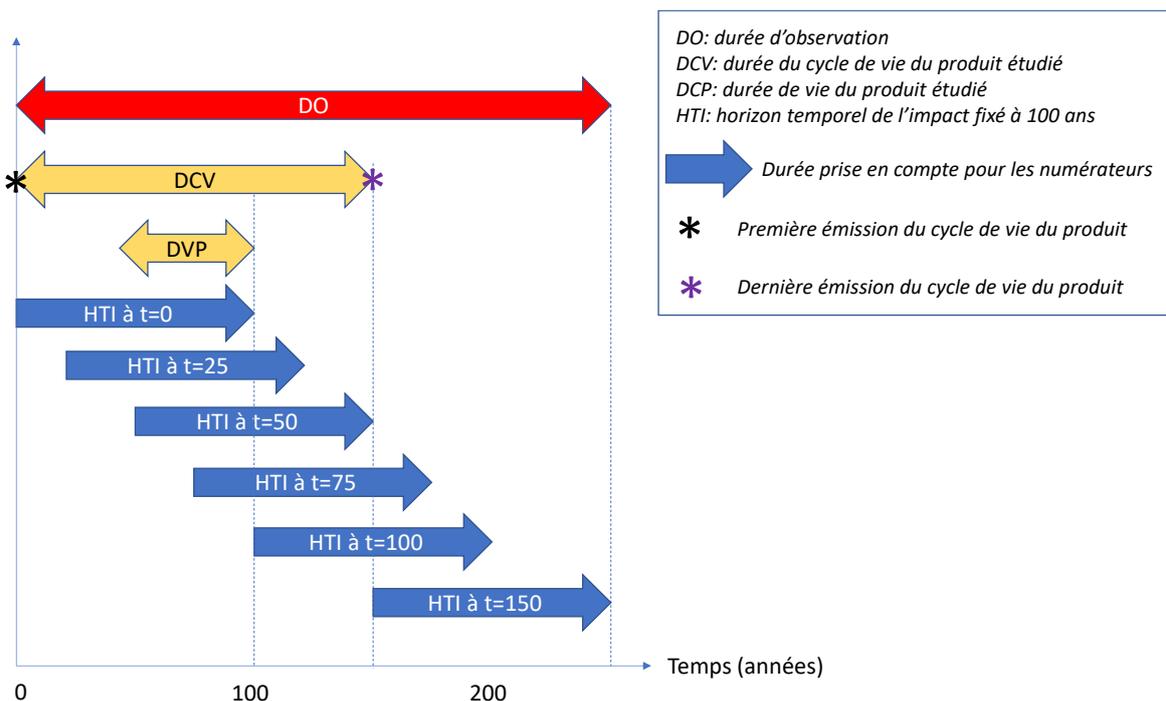


Figure 11. Choix de la durée d'observation pertinente en fonction de l'horizon temporel de l'impact (pour l'exemple détaillé précédemment avec *DCV* = 100 ans et *HTI* = 100 ans) et de la durée du cycle de vie *DCV* du produit étudié

Une méthode rigoureuse doit prendre en compte la durée du cycle de vie et l'horizon temporel de l'impact. Celui-ci s'étend au-delà de la dernière émission du cycle de vie et doit être intégré dans la durée d'observation.

Dans la méthode PRG dynamique (scénario 2, équation 5), la durée d'observation (même si elle n'est pas explicitée dans l'équation 5) est de fait bien déterminée à partir de la durée du cycle de vie et de l'horizon temporel de l'impact, comme montré sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.a**. La durée d'observation est de 200 ans, soit la valeur de l'horizon temporel ajoutée au moment de la dernière émission du cycle de vie.

Dans la méthode  $\Delta$ PRG dynamique (scénario 3, équation 6), la durée d'observation ne permet ni d'intégrer toutes les émissions liées au cycle de vie du produit, ni de calculer les indicateurs avec un horizon temporel d'impact fixe, comme montré sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.b**.

**Un tel raisonnement préserve un horizon temporel d'impact identique pour toutes les émissions de GES quel que soit le moment de leur émission, et respecte donc la réalité physico-chimique du forçage radiatif cumulé provoqué par ces émissions.**

b) Comment rendre la méthode  $\Delta$ PRG dynamique plus cohérente ?

Ainsi il apparaît que pour que les deux méthodes PRG dynamique et  $\Delta$ PRG soient cohérentes et comparables, la durée d'observation doit être la même pour les deux indicateurs et égale à l'horizon temporel de l'impact plus la durée de décalage de l'émission. Elle dépend donc du moment de l'émission (*t*) (équation 8).

8  $DO(t) = t + HTI$

La durée d'observation varie donc entre HTI (pour une émission à  $t = 0$ ) et DCV + HTI (pour une émission à  $t = DCV$ ).

La méthode dynamique corrigée est représentée par l'équation 9 :

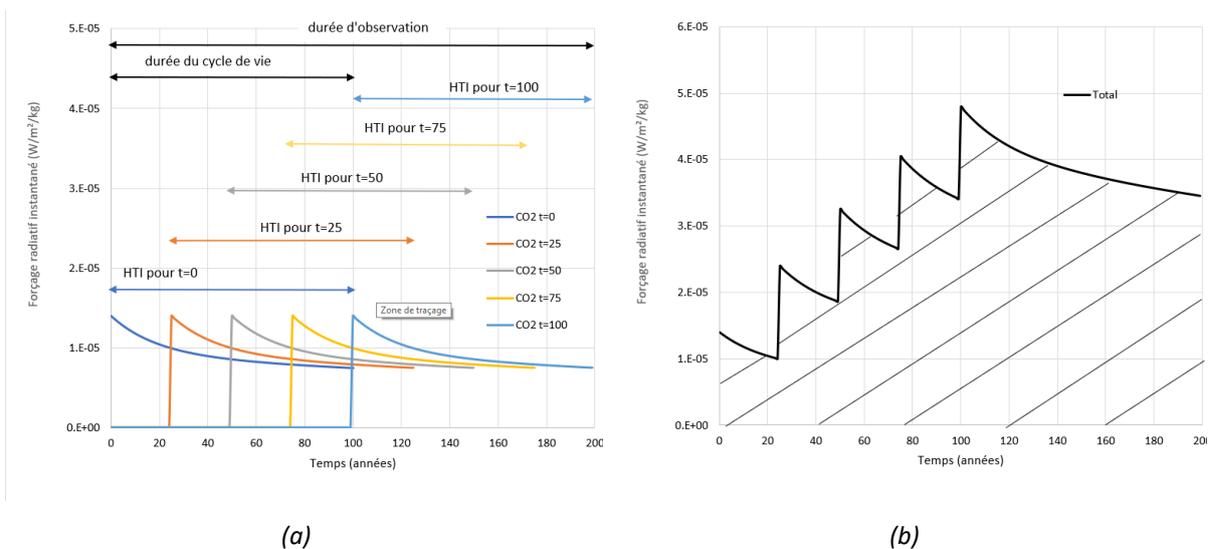
9 
$$\Delta PRG_{dyn,corr} = \frac{\int_{t_1}^{t_1+HTI} a_{x_1} \cdot [x(t-t_1)] \cdot dt}{\int_0^{t_1+HTI} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_1 + \frac{\int_{t_2}^{t_2+HTI} a_{x_2} \cdot [x(t-t_2)] \cdot dt}{\int_0^{t_2+HTI} a_r \cdot [r(t)] \cdot dt} \cdot m_2 + \dots$$

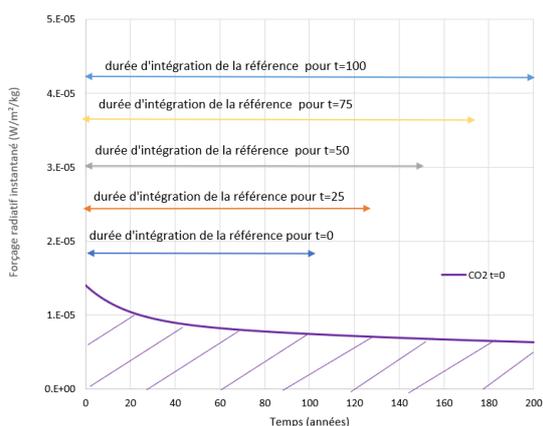
En outre, les notations symboliques généralement utilisées introduisent une certaine confusion. La notation du PRG fait référence à l'horizon temporel de l'impact (PRG100, PRG25...), alors que la notation du  $\Delta PRG$  fait référence à la période d'observation ( $\Delta PRG100$ ). Ces deux notations inhomogènes suggèrent que le PRG100 serait l'équivalent dynamique du  $\Delta PRG100$ , ce qui n'est pas le cas. Étant donné que la période d'observation est variable et dépend de la durée du cycle de vie (voir l'équation 8), il serait préférable d'utiliser la même notation pour le PRG, c'est-à-dire que le  $\Delta PRG100$  désigne l'indicateur dynamique correspondant à l'horizon de l'impact HTI de 100 ans et non à la durée d'observation.

Pour obtenir cette cohérence, avec  $DCV = 100$  ans, il faut étendre la durée d'observation maximale  $DO$  à 200 ans comme montré sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

En utilisant cette méthode  $\Delta PRG$  dynamique corrigée (équation 9), les deux indicateurs expriment la même grandeur et, bien que non similaires, ils peuvent être comparés. Le principe de calcul est représenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-après. Cette fois les durées d'intégration pour chaque GES émis sont toutes égales à HTI = 100 ans (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.a**), la durée totale d'observation est bien égale à  $DO = DCV + HTI$  (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.b**) et c'est la durée d'intégration de la référence du dénominateur qui s'ajuste (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.c**). Rappelons que le dénominateur n'est utilisé que comme une conversion d'unité, et il est donc normal qu'il s'ajuste aux effets réels qui sont représentés au numérateur. Ce ratio garde le même sens physico-chimique : on compare l'effet d'un GES émis à un instant donné, à celui d'un kilogramme de  $CO_2$  émis au temps zéro.

Le résultat du  $\Delta PRG$  dynamique corrigé est donc moins élevé de celui du PRG dynamique, pour une seule raison : l'étalement des émissions.





(c)

Figure 12. Forçages radiatifs instantanés utilisés pour calculer le  $\Delta PRG$  dynamique corrigée (équation 9) (a) aire sous les courbes détaillées pour chaque émission au numérateur (b) aire sous la courbe totale aux numérateurs de chaque moment d'émission (c) aire sous la courbe au dénominateur pour chaque moment d'émission

c) Comment rendre la méthode  $\Delta PRG$  dynamique simplifiée plus cohérente ?

Le facteur correctif utilisé par la RE 2020 (scénario 4 équation 7) est celui qui correspond à la durée d'observation fixe de 100 ans de la méthode  $\Delta PRG$  dynamique (scénario 3, équation 6). Il devrait correspondre à la durée d'observation variable allant jusqu'à 200 ans dans l'exemple traité. Sur la Figure 8d, la valeur envisagée pour la réglementation, basée sur une durée d'observation de 100 ans, donne une différence de 2,23 kg CO<sub>2</sub> eq entre le PRG et le  $\Delta PRG$  (soit une réduction d'environ 44,6% du  $\Delta PRG$  par rapport au PRG). Lorsque la durée d'observation est corrigée à 200 ans, on obtient une différence de 1,04 kg CO<sub>2</sub> eq (soit une réduction d'environ 20,8% du  $\Delta PRG$  par rapport au PRG).

Dans la RE2020, les conditions sont différentes de l'exemple utilisé jusqu'ici. Tout d'abord, la durée du cycle de vie et la durée de vie du bâtiment sont considérées identiques et égales à 50 ans. Ceci implique que toutes les émissions se produisant avant le temps zéro sont considérées comme se produisant au temps zéro, et toutes les émissions se produisant après 50 ans sont considérées comme se produisant à 50 ans.

L'effet de la proposition sur l'horizon temporel d'une émission à la date  $t_i$  est représenté sur la Figure 13 (état actuel de la réglementation) et la Figure 14 (la méthode corrigée) ci-après.

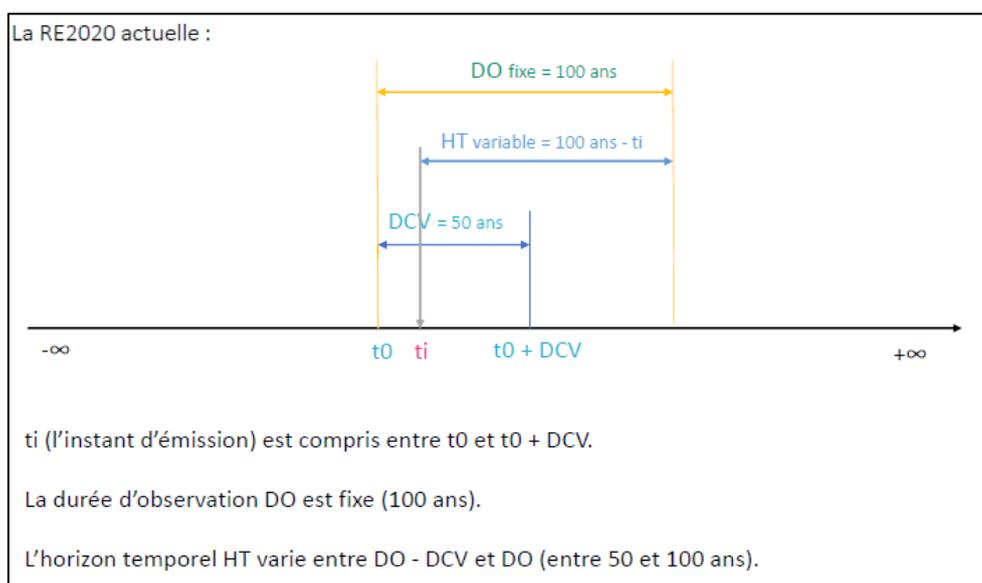


Figure 13. Dans la RE2020 actuelle (scénario 4 équation 7) l'horizon temporel d'une émission varie entre 50 ans (émission à  $t_i = t_0 + DCV$ ) et 100 ans (émission à  $t_i = t_0$ ).

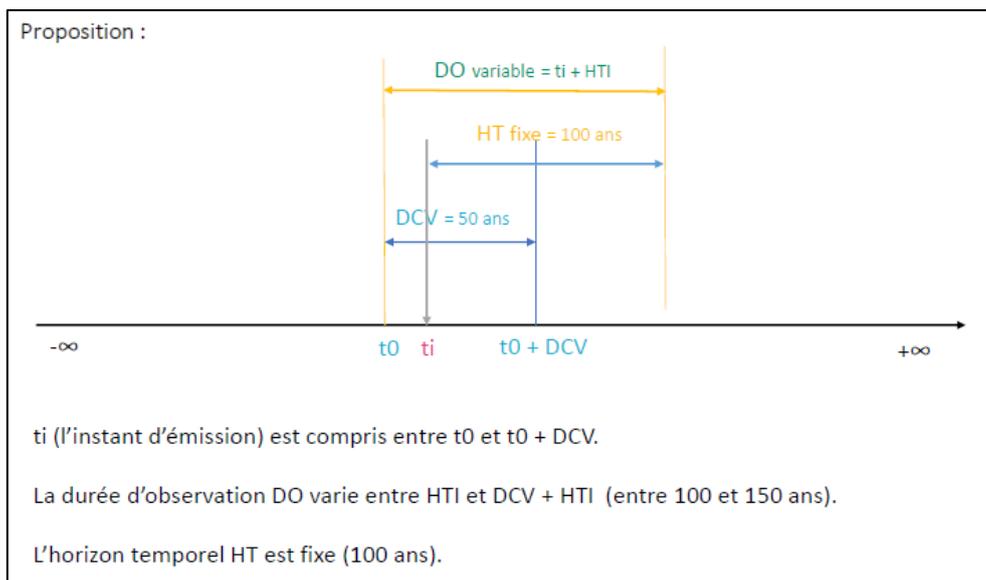


Figure 14. Dans la méthode corrigée (équation 9), l'horizon temporel pour le calcul d'une émission est toujours de  $HTI = 100$  ans.

Les coefficients de la RE2020 ont été corrigés pour correspondre à la durée d'observation de 150 ans (c'est-à-dire en tenant compte d'une durée  $DCV$  de 50 ans) sont donnés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Tableau 1. Coefficients corrigés de la méthode  $\Delta PRG$  dynamique simplifié, selon l'année d'émission du GES

Temps (années)	Coefficient $\Delta PRG$ corrigé	Temps (années)	Coefficient $\Delta PRG$ corrigé
0	1.0000	26	0.8297
1	0.9920	27	0.8244
2	0.9841	28	0.8192
3	0.9764	29	0.8141
4	0.9688	30	0.8091
5	0.9613	31	0.8041
6	0.9540	32	0.7992
7	0.9468	33	0.7943
8	0.9397	34	0.7896
9	0.9327	35	0.7848
10	0.9258	36	0.7802
11	0.9191	37	0.7756
12	0.9124	38	0.7711
13	0.9059	39	0.7666
14	0.8995	40	0.7622
15	0.8932	41	0.7579
16	0.8869	42	0.7536
17	0.8808	43	0.7493
18	0.8748	44	0.7452
19	0.8688	45	0.7410
20	0.8630	46	0.7370
21	0.8572	47	0.7329

22	0.8516	48	0.7290
23	0.8460	49	0.7250
24	0.8405	50	0.7211
25	0.8350		

Les coefficients actuels de la RE2020 et les coefficients corrigés sont représentés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ainsi que leurs approximations par régressions linéaires. Il apparaît que la RE2020 surestime la diminution de l'indicateur PRG d'environ 35% par rapport à notre méthode corrigée.

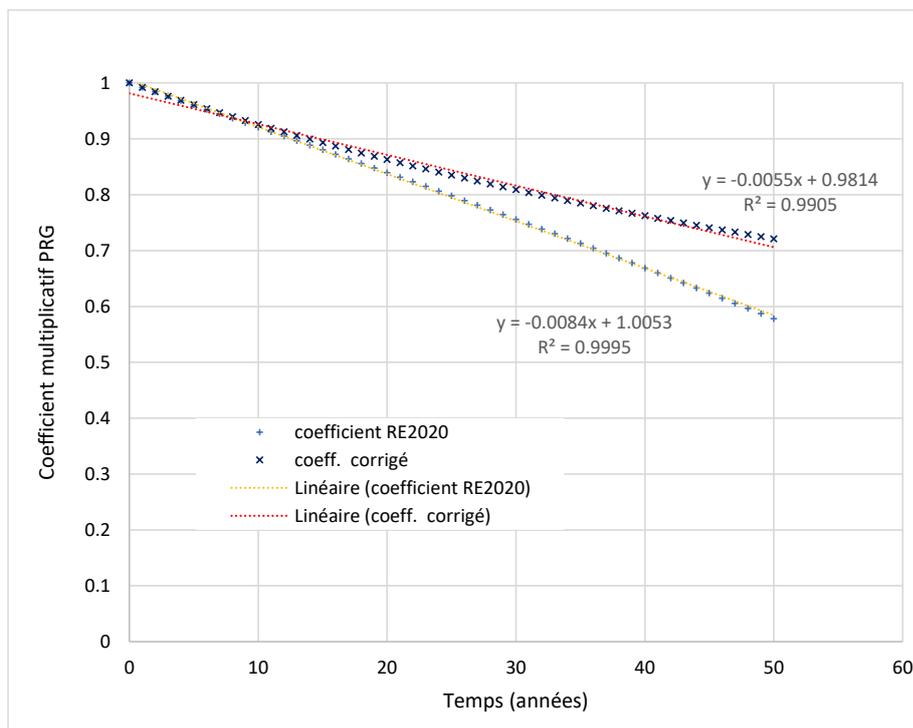


Figure 15. Coefficients appliqués par la méthode  $\Delta$ PRG dynamique simplifiée de la RE2020 (durée d'observation fixe de 100 ans) et coefficients corrigés avec la durée d'observation variable de 100 à 150 ans

**La diminution constatée entre les méthodes PRG et  $\Delta$ PRG corrigé représente uniquement l'effet lié à l'étalement (effet retard) des émissions par rapport au fait qu'elles auraient été toutes émises au même moment.**

d) Comment placer le « temps zéro » ?

Le RE2020 définit le temps zéro au moment de la construction du bâtiment, l'indicateur  $\Delta$ PRG dynamique simplifié est utilisé pour évaluer les impacts sur le changement climatique de tous les matériaux, produits et opérations survenant après ce temps zéro, c'est-à-dire pendant l'entretien du bâtiment et pour les traitements de fin de vie.

Étant donné que la production de certains matériaux ou produits, ainsi que d'autres opérations, ont lieu avant ce temps zéro, la RE2020 recommande l'utilisation de l'indicateur PRG statique. Cette approche revient à considérer que le délai entre les opérations se produisant avant le temps zéro et la construction du bâtiment est négligeable, et que toutes ces émissions de GES peuvent être considérées comme émises au point de départ. Cette hypothèse est probablement acceptable dans la plupart des cas, car les délais de fabrication ne dépassent

généralement pas quelques mois et que les stocks sont faibles. Toutefois, elle pourrait conduire à une inégalité de traitement entre les produits de part et d'autre du temps zéro. Dans le cas de longs délais entre la production et la construction du bâtiment, les matériaux, produits et opérations concernés seraient désavantagés. On peut notamment souligner le cas de la réutilisation d'éléments du bâtiment dans un nouveau bâtiment après la fin de vie : cette initiative rallonge considérablement la vie de l'élément et retarde donc également considérablement les émissions de fin de vie. Bien que très favorable à l'environnement, elle serait désavantagée par la réglementation et peu encouragée à se développer.

e) Que penser de l'évolution de l'efficacité radiative et des aspects de long terme ?

Quelle que soit la méthode dynamique proposée, aucune d'entre elles ne prend aujourd'hui en compte aujourd'hui la variation temporelle de l'efficacité radiative.

De fait, la prédiction de ce terme n'est pas possible, car il dépend notamment de l'évolution de la concentration des GES dans l'atmosphère, et de l'évolution de l'occupation des terres émergées (albedo), c'est-à-dire de l'efficacité des mesures prises par les gouvernements pour réduire leurs émissions. Ainsi, si les mesures nécessaires ne sont pas prises ou bien qu'elles s'avèrent inefficaces, et que les émissions de GES stagnent ou augmentent, les réductions prises en compte en utilisant la méthode  $\Delta$ PRG dynamique corrigée, risquent fort d'être annulées par l'augmentation de l'efficacité radiative. Une émission repoussée de 100 ans pourrait avoir des conséquences plus graves si dans ce laps de temps, les émissions de GES n'ont effectivement pas été réduites.

Les valeurs des efficacités radiatives ont évolué depuis les années 2000 dans les rapports du GIEC (voir Tableau 2). Malgré une augmentation de sa concentration dans l'atmosphère, l'efficacité radiative du CO<sub>2</sub> a diminué entre 2001 et 2013, en lien avec des ajustements de modèles, qui ont pris en compte de nouveaux phénomènes. Aujourd'hui, il est probable que les valeurs d'efficacité radiative soient revues à la hausse pour le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> et à la baisse pour le N<sub>2</sub>O, dans le prochain rapport du GIEC : du fait de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, et du fait d'ajustements de modèle pour le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O.

Tableau 2. Valeurs des efficacités radiatives établis par le GIEC pour les principaux gaz à effet de serre

Source bibliographique	Efficacité radiative (W.m <sup>-2</sup> .ppb <sup>-1</sup> )			
	11	6	12	5*
Année	2001	2007	2013	2016
CO <sub>2</sub>	1,55.10 <sup>-5</sup>	1,4.10 <sup>-5</sup>	1,37.10 <sup>-5</sup>	1,53.10 <sup>-5</sup>
CH <sub>4</sub>	3,7.10 <sup>-4</sup>	3,7.10 <sup>-4</sup>	3,63.10 <sup>-4</sup>	4,48.10 <sup>-4</sup>
N <sub>2</sub> O	3,1.10 <sup>-3</sup>	3,03.10 <sup>-3</sup>	3,03.10 <sup>-3</sup>	2,67.10 <sup>-3</sup>

\* Travaux publiés en amont du futur rapport du GIEC

D'autre part, quelle que soit la méthode de calcul de l'indicateur (PRG ou  $\Delta$ PRG, statique ou dynamique), celle-ci est basée sur la valeur du forçage radiatif cumulé (qui est la même quels que soient les indicateurs). Cette valeur représente la réalité du phénomène physique, à savoir le réchauffement de la Terre. La diminution du forçage radiatif du GES émis avec quelques dizaines d'années de retard est significative sur les premières centaines d'années, mais est tout à fait négligeable sur le long terme, comme on le voit sur la Figure 14.

Le recours à la méthode  $\Delta$ PRG dynamique corrigée à horizon temporel de l'impact court (100 ans) est un choix qui a une signification politique. Il s'agit d'exprimer une préférence pour le court terme (même si 200 ans peuvent paraître long à l'échelle de la vie humaine) : si les émissions totales de GES ne sont pas réduites considérablement et de façon durable (plusieurs centaines d'années), le fait de les avoir retardées d'une centaine d'année est négligeable à long terme sur le réchauffement de la Terre. Calculer ce différentiel pour une durée d'observation

<sup>11</sup> Ramaswamy, V., O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, et al. 2001. Radiative Forcing of Climate Change. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, ed. by F Joos and J Srinivasan, 68. IPCC.

<sup>12</sup> Stocker, T. F, G.K. Qin, M. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Naeuls, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, eds. 2013. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge (UK) and New-York (USA): Intergovernmental Panel on Climate Change.

de quelques centaines d'années donne l'impression d'une diminution car l'indicateur est calculé sur le moment où la différence est maximale, alors qu'elle ne l'est pas sur le long terme.

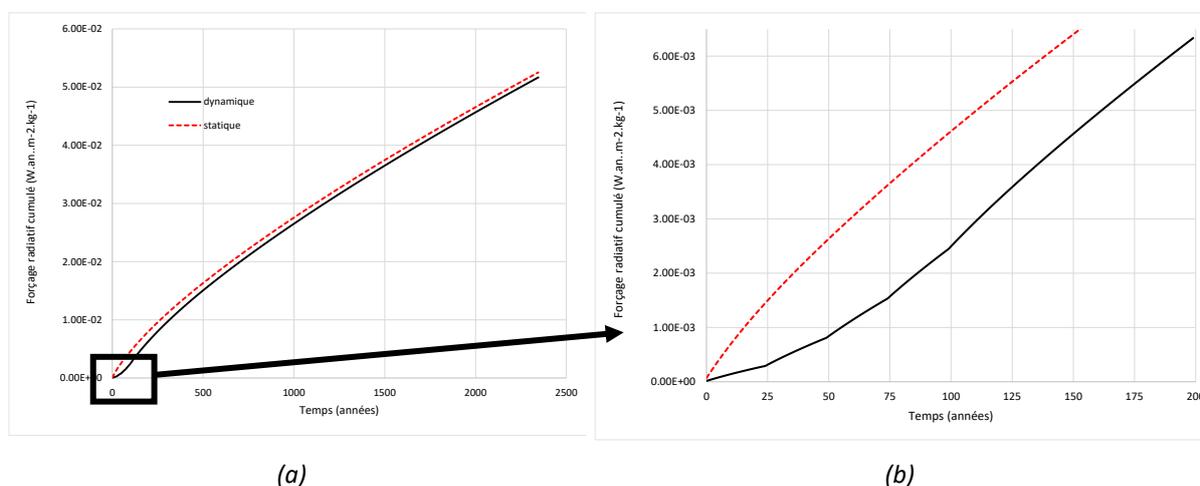


Figure 164. Importance de la prise en compte du retard d'émissions (quelques dizaines d'années) sur le forçage radiatif cumulé du CO<sub>2</sub> à long terme

Comme montré dans le Tableau 3, la différence observée liée à l'étalement des émissions est importante au début, mais devient négligeable sur le long terme. Ceci signifie que l'étalement des émissions sur quelques centaines d'années ne réduit pas significativement l'impact cumulé sur le changement climatique.

Tableau 3. Différentiel entre PRG et ΔPRG dynamique en fonction de la durée d'observation

Durée d'observation (années)	Différentiel entre PRG et ΔPRG dyn (en % de PRG)
200	20,9%
500	7,7%
1 000	2,5%
2 000	1,9%

f) Position récente de la communauté scientifique internationale

Un workshop<sup>13</sup> international a réuni en 2010 des experts internationaux sur la question du stockage temporaire de CO<sub>2</sub>. Nous reportons ici les principales conclusions de ce workshop, avec nos commentaires figurant en bleu entre crochets [*commentaires des auteures de la présente note*].

Les experts se sont penchés sur la question de comment – et si – l'effet du stockage temporaire de carbone devait être considéré en ACV [*Plutôt que stockage temporaire, il serait plus juste de parler d'effet du retard ou de l'étalement d'une émission de GES par rapport à l'équivalent d'une émission d'un kg de CO<sub>2</sub> à un temps zéro*]. [*Les méthodes examinées par les experts sont plus nombreuses que celles décrites dans cette note, qui s'est concentrée uniquement la méthode utilisée dans la RE 2020*].

Le workshop n'a au final recommandé aucune méthodologie car aucun consensus n'en est sorti. Les experts ont néanmoins identifié des verrous et des points d'entente :

<sup>13</sup> Brandão, M., A. Levasseur, European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability. 2011. Assessing temporary carbon storage in life cycle assessment and carbon footprint: outcomes of an expert workshop, 7th-8th October 2010, Ispra (Italy). JRC scientific and technical reports. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:LBNA24829:EN:HTML>.

- L'évaluation du carbone biogénique nécessite une meilleure compréhension des mécanismes globaux du cycle du carbone [il s'agit du terme  $a_x(t)$  qu'il n'est pas possible de prédire mais dont la valeur varie en fonction du temps];
- Bien que l'aspect dynamique soit important, la définition de l'horizon temporel [il faut en fait comprendre la durée d'observation car il semble que les deux grandeurs soient confondues] est un choix subjectif auquel les résultats sont extrêmement sensibles ;
- Pour toute évaluation du stockage temporaire de carbone, la transparence sur les hypothèses et la méthode est très importante et les deux horizons temporels de court et long terme doivent être considérés [ici le terme d'horizon temporel n'est pas clairement défini, il semble qu'il y ait confusion entre horizon temporel de l'impact et durée d'observation].
- L'utilisation d'un seul indicateur (notamment le PRG100) est insuffisante, car seule une combinaison d'indicateurs multiples est susceptible de représenter les impacts (cumulatifs et instantanés) du réchauffement global à l'échelle planétaire, cependant aucune préférence n'a encore été pointée sur le fait d'avoir plusieurs indicateurs, ou un indicateur agrégé en combinant plusieurs.

En 2018, le consensus n'a pas encore été construit<sup>14</sup>.

## 6. Conclusions et recommandations

La prise en compte de l'étalement dans le temps des émissions des gaz à effet de serre conduit à diminuer l'effet sur le changement climatique, évalué à un instant donné après le temps zéro. Cependant, deux points sont importants à souligner.

- Premièrement, **le coefficient correctif du PRG retenu dans la RE2020 semble surestimé de 35% environ**. Le calcul de ce coefficient est basé sur une durée d'observation fixe de 100 ans à compter de la construction du bâtiment (dans les travaux du CIRAIG sur lesquels se base le calcul de ce coefficient correctif<sup>15</sup>, cette durée avait été choisie de manière arbitraire). **La durée d'observation devrait plutôt correspondre à la somme de la durée du cycle de vie et de la valeur de l'horizon temporel de l'impact (ce dernier étant un choix conventionnel, la valeur de 100 ans étant réaliste sur le plan de la physique), c'est-à-dire à 100 ans après la dernière émission du cycle de vie du bâtiment considéré**. En effet choisir une durée d'observation plus courte aboutit à diminuer la valeur de l'indicateur dynamique simplifié par rapport à l'indicateur statique, certes du fait de l'étalement des émissions, mais également parce que l'effet des gaz émis peu avant la fin de la durée d'observation n'est pris en compte que de manière partielle (le calcul d'impact environnemental est « tronqué »). **Cette différence des durées d'observation entre les indicateurs statique et dynamique simplifiée ne permet plus de faire des comparaisons**. D'autre part, l'inhomogénéité temporelle rend incohérente l'addition des indicateurs statique avant le temps zéro et dynamique après le temps zéro.
- Deuxièmement, **d'un point de vue strictement physique, quand l'efficacité radiative du GES est constante dans le temps, différer des émissions de GES quelques dizaines d'années n'a pas d'effet significatif sur le forçage radiatif cumulé de long terme**. En d'autres termes, l'étalement des émissions amoindrit la hauteur d'un pic d'émissions, mais n'atténue pas significativement leurs impacts sur le changement climatique si l'étalement est de l'ordre de quelques dizaines d'années. **L'efficacité d'un retard des émissions de GES pourrait avoir un effet bénéfique, qui reste à évaluer, si les émissions retardées se produisaient dans un contexte futur favorable où les émissions planétaires de GES auraient considérablement diminué**. Pour le confirmer, l'échelle d'un bâtiment est inappropriée, mais cela pourrait être évalué à l'échelle du pays, c'est à dire pour l'ensemble des produits soumis à la réglementation.

**Nous recommandons de corriger la méthode dynamique simplifiée dans la RE2020 de la manière suivante :**

- **Le coefficient correctif retenu par la méthode dynamique simplifiée de la RE 2020 devrait être modifié pour correspondre à la durée d'observation corrigée, celle-ci étant la somme de l'horizon temporel de l'impact et du délai écoulé entre l'émission et la construction du bâtiment**. En supposant que la durée du

<sup>14</sup> Breton, C., P. Blanchet, B. Amor, R. Beaugard, and W.-S. Chang. 2018. Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches. Sustainability 10(6): 2020.

<sup>15</sup> Levasseur, A., P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes, and R. Samson. 2010. Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. Environmental Science & Technology 44(8): 3169–3174

cycle de vie du bâtiment est de 50 ans et avec l'horizon temporel de l'impact de 100 ans, le facteur correctif devrait être calé pour correspondre à une durée d'observation allant de 100 à 150 ans selon le moment de l'émission (ce dernier étant entre 0 et 50 ans). Les valeurs corrigées sont calculées et fournies dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** de l'annexe ci-après. Par exemple, pour une émission à 50 ans, le facteur correctif est égal à 0,72 au lieu de 0,58 indiqué dans la RE2020.

- Au-delà de ce qui précède, pour déterminer la durée d'observation, **il conviendrait de définir avec les professionnels du secteur une durée moyenne du cycle de vie d'un bâtiment qui englobe non seulement la durée de service du bâtiment, mais qui s'étende aussi au-delà en intégrant les durées liées au traitement et à la valorisation des déchets de sa démolition.**
- Le temps zéro devrait, en toute rigueur, démarrer à la première émission du cycle de vie du produit considéré, c'est-à-dire, dans le cas de la RE 2020, avant la construction du bâtiment (une valeur moyenne pourrait être définie pour chaque type de matériau, produit ou opération, en lien avec les professionnels du secteur). Néanmoins, **positionner le temps zéro à la construction du bâtiment reste une approximation acceptable dans la mesure où la production ou réalisation de ces matériaux, produits ou opérations se fait dans un délai court avant ce temps zéro (quelques années, au maximum).**
- Avec le positionnement du temps zéro à la construction, **l'utilisation d'une méthode statique avant le temps zéro et d'une méthode dynamique après le temps zéro reste une approximation acceptable dans la mesure où la durée d'observation est la même pour les deux indicateurs statique et dynamique**, comme préconisé plus haut.

**Le choix d'une méthode dynamique reste en premier lieu un choix politique, compte-tenu de l'effet peu significatif sur le changement climatique de l'étalement des émissions de quelques dizaines d'années.** Ce choix est destiné à inciter les acteurs économiques à retarder leurs émissions de GES. Il conviendrait d'en apprécier l'efficacité sur le long terme, à l'échelle du pays. **Nous pouvons recommander la mise en place d'un système de type plateforme numérique permettant de collecter et d'agréger l'ensemble des profils d'émissions de GES de l'ensemble des bâtiments construits selon la RE2020, afin d'avoir une estimation prédictive des émissions de GES du secteur à l'échelle du pays.** Cette collecte offrirait une vision globale permettant d'évaluer l'efficacité de la mesure à l'échelle du pays, et de prendre éventuellement des mesures pour réglementer d'autres secteurs, ou encore de revoir la réglementation s'il s'avère que les émissions retardées se produisent à un moment où les émissions de GES planétaires restent à un niveau trop élevé pour respecter les objectifs de l'Accord de Paris.

Comme retarder les émissions est un objectif de la politique climatique, une alternative à la justification par la physique du taux de décroissance temporel des émissions de la RE2020 serait de mettre en œuvre un calcul socio-économique. La comptabilisation des émissions réelles de GES avec un indicateur statique serait maintenue dans les évaluations menées à l'échelle du pays, afin de maintenir une distinction claire entre la réalité physique et l'instrument d'incitation au report des émissions. Ce signal à l'intention des filières de la construction serait comme une valeur tutélaire (à l'image de ce qu'est pour d'autres types de calcul le taux d'actualisation socio-économique, étant remarqué qu'ici il s'agit plutôt de marquer une préférence pour l'avenir que pour le présent), révisable périodiquement par l'autorité réglementaire en fonction des progrès de la politique climatique et de la réponse des acteurs économiques. Cette note n'a toutefois pas vocation à aborder le sujet sous l'angle des sciences économiques, qui ne sont pas dans le champ d'expertise de ses auteurs.