

Benjamin Dessus, Bernard Laponche (1ère édition 14 décembre 2017) revu 18 novembre 2018

## 1. Le « Budget carbone »

L'accord de Paris sur le climat s'est fixé comme objectif de ne pas dépasser 2 degrés (voire 1,5) d'augmentation de la température de la surface terrestre depuis le début de l'ère industrielle. Cette température a déjà augmenté de l'ordre de 0,9 degré entre 1880 et 2010. L'objectif est donc de limiter l'augmentation future à 1,1 degré, (voire 0,6 degré).

Cette limitation induit la nécessité d'une réduction importante et rapide des émissions des principaux gaz à effet de serre, avec dans l'ordre d'importance, le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et plus marginalement l'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O).

Depuis quelques années s'est développée dans les media, chez les économistes et les décideurs la notion de « budget carbone » pour traduire et synthétiser les exigences de réduction d'émission. La courbe noire quasi linéaire que l'on observe sous les courbes de couleur associées aux différents scénarios de la figure 1 issue des travaux du GIEC<sup>1</sup> montre en effet une relation quasi linéaire entre « cumul des émissions de CO<sub>2</sub> » et « augmentation de la température ».

Figure 1

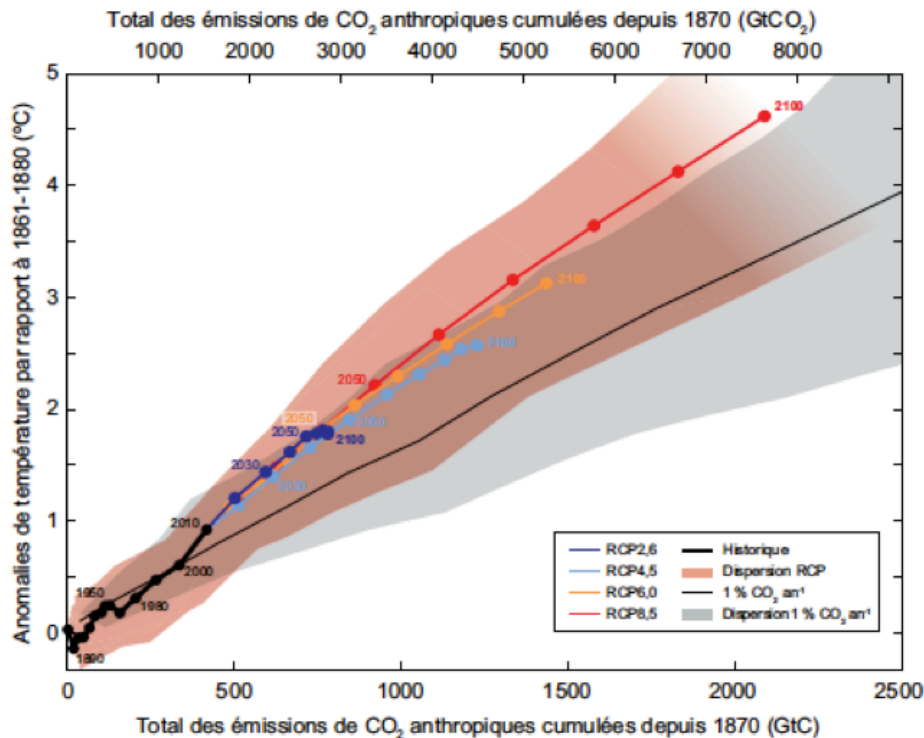


Figure RID.10 | Augmentation de la température moyenne à la surface du globe en fonction du total des émissions de CO<sub>2</sub> cumulées dans le monde à partir de plusieurs sources de données. Les résultats de différents modèles de climat et cycle du carbone pour chaque scénario RCP jusqu'en 2100 sont représentés par des lignes de couleur et des moyennes décennales (points). Certaines moyennes décennales sont identifiées par souci de clarté (ex.: 2050 indiquant la décennie 2040-2049). Les résultats de modèles sur la période historique (1860-2010) sont indiqués en noir. La zone en couleur représente la dispersion des différents modèles pour les quatre scénarios RCP et s'estompe à mesure que le nombre de modèles disponibles diminue pour RCP8,5. La moyenne et la plage multimodèles simulées par les modèles CMIP5, forcés par une augmentation du CO<sub>2</sub> de 1 % par an (simulations pour 1 % CO<sub>2</sub> an<sup>-1</sup>), sont indiquées par la fine ligne noire et la zone en gris. Pour un niveau spécifique d'émissions cumulées, les simulations d'augmentation du CO<sub>2</sub> de 1 % par an suggèrent un réchauffement inférieur à celles forcées par les scénarios RCP, car ces dernières incluent des forçages additionnels autres que le CO<sub>2</sub>. Les valeurs de la température sont données par rapport à la période de référence 1861-1880 et les émissions, par rapport à 1870. Les moyennes décennales sont reliées par des lignes droites. Pour obtenir davantage de détails techniques, voir les annexes du Résumé technique. (figure 12.45; Résumé technique, Composante thématique 8, figure 1)

<sup>1</sup> « Changements climatiques 2013, les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs ». WG1AR5\_SPM\_brochure\_fr.pdf – Page 26

La même figure montre aussi que les trajectoires de température associées aux différents scénarios se situent systématiquement au dessus de la courbe « écart de température » en fonction de « cumul des émissions de CO2 seul » ou « droite CO2 ». C'est logique puisque les scénarios en question cumulent à la fois un historique d'émissions de CO2 et des historiques d'émission des autres gaz à effet de serre, en particulier de CH4 et de N2O.

De nombreux économistes se sont approprié cette notion de « budget carbone » comme base de leurs propositions d'efforts nationaux ou globaux de réduction d'émission. C'est ainsi que Gaël Giraud, économiste en chef de l'AFD, écrit dans un entretien récent « Réduire le train de vie des plus riches est la véritable priorité<sup>2</sup> » : « *Pour rester aussi proche que possible du seuil des deux degrés avec une probabilité raisonnable (environ 60%), le cumul des émissions de CO2 ne doit pas excéder environ 1000 Gigatonnes de carbone, soit une trentaine d'années d'émission au rythme actuel* ».

La notion de budget carbone employée ne fait pas l'objet d'une définition bien figée parmi les auteurs. S'agit-il de carbone ou de CO2, de CO2 issu des combustions d'énergies fossiles, d'équivalent CO2 à un horizon donné (par exemple 100 ans après l'émission) ou à une date donnée (2050 par exemple), d'un gaz autre que le CO2 (CH4, N2O) ? S'agit-il comme en France d'un budget annuel ou d'un budget global à ne pas dépasser pour éviter un réchauffement supérieur à n degrés ?

Indépendamment de la valeur retenue par l'auteur de la citation ci-dessus qui fait l'objet de nombreux débats<sup>3</sup>, et de la confusion entre carbone et CO2<sup>4</sup>, on remarquera qu'aucune condition complémentaire n'est indiquée sur le cumul des émissions du méthane et de l'oxyde d'azote.

La figure 1 montre pourtant que les augmentations de température des différents scénarios dépendent non seulement du cumul des émissions de CO2 mais aussi du cumul de celles de CH4 et N2O.

Dans un article récent<sup>5</sup>, nous avons calculé les contributions du CH4 et du N2O à l'augmentation de température à un horizon donné en utilisant la même loi de proportionnalité du cumul des émissions de ces gaz, à condition de calculer leurs émissions et les cumuls de celles-ci en **teqCO2** obtenus grâce au **pouvoir de réchauffement global (PRG) à l'horizon envisagé**.

A titre d'exemple, si l'horizon choisi pour mesurer les conséquences des émissions du gaz i est 2100, les émissions en tonnes équivalent CO2 associées aux émissions de 2020 tiendront compte du pouvoir de réchauffement (PRG) du gaz i à 80 ans, (2100-2020), celles de 2030 du PRG à 70 ans 2100-2030, celles de 2050 du PRG à 50 ans (2100- 2050), etc.

La relation entre cette augmentation de température et le cumul en GteqCO2 sur l'ensemble de la période s'écrit :  $y = 0,444 \sum x_i / 1000$ , où xi représente le cumul en GteqCO2 sur la période considérée du gaz i.

La figure 1 montre enfin que le cumul des émissions mondiales de GES depuis l'époque préindustrielle a déjà provoqué en 2010 une augmentation de la température terrestre de l'ordre de 0,9 degré.

Dans ces conditions l'augmentation admissible de la température terrestre est limitée à 1,1 degré environ pour un seuil de 2 degrés (0,6 pour un seuil de 1,5 degré), soit à  $x = 1,1 / 0,444 / 1000$  GteqCO2 = 2030 GteqCO2 (1350 GteqCO2 pour 0,6 degré). Autrement dit, pour respecter le seuil de deux degrés

---

<sup>2</sup> Alternatives économiques : <https://www.alternatives-economiques.fr/cop23-reduction-train-de-vie-plus-riches-veritable-pri/00081530>

<sup>3</sup> Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5°C

Richard J. Millar, Jan S. Fuglestedt, Pierre Friedlingstein, Joeri Rogelj, Michael J. Grubb, H. Damon Matthews, Ragnhild B. Skeie, Piers M. Forster, David J. Frame & Myles R. Allen. *Nature Geoscience* 10, 741–747 (2017)

<sup>4</sup> En effet les émissions annuelles mondiales de CO2 sont de l'ordre de 36 Gtonnes. 1000 Gtonnes de CO2 et non de carbone représentent donc une trentaine d'années d'émission de CO2.

<sup>5</sup> Le méthane, un gaz qui pèse lourd sur le climat, Benjamin Dessus, Bernard Laponche, Hervé Le Treut, La Recherche n° 29, novembre 2017.

de réchauffement depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le cumul des émissions des trois GES ne doit jamais dépasser 2030 GteqCO<sub>2</sub>.

## 2. Etude de cas

La comparaison de plusieurs scénarios permet de mettre en relief l'importance généralement négligée des émissions de méthane dans le budget carbone mondial.

A ce titre on envisage trois scénarios :

**Scénario 1** : les émissions de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O restent constantes à leur valeur de 2010 tout au long de la période.

**Scénario 2** : les émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O restent constantes à leur valeur de 2010, celles de CO<sub>2</sub> décroissent linéairement à partir de 2015 pour tomber à zéro en 2050.

**Scénario 3** : les émissions de CH<sub>4</sub> décroissent linéairement pour tomber à la moitié de leur valeur de 2010 en 2050 et celles de CO<sub>2</sub> décroissent linéairement à partir de 2015 pour tomber à zéro en 2050. Les émissions de N<sub>2</sub>O restent constantes sur toute la période.

Le calcul de la contribution de chacun des gaz à effet de serre au cumul des émissions à une date donnée, par exemple 2030 est illustré par le tableau ci- dessous qui concerne le scénario 1.

**Tableau 1 - Valeurs des contributions à 2030 des trois gaz à effet de serre de 2010 à 2030 du scénario 1 (émissions constantes de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub>)**

	CO <sub>2</sub> Gt	Cumul CO <sub>2</sub> année n Gt et GteqCO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> Mt	PRG à horizon 2030	Cumul CH <sub>4</sub> année n GteqCO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O Mt	PRG à horizon 2100	Cumul N <sub>2</sub> O année n GteqCO <sub>2</sub>	cumul total GES GteqCO <sub>2</sub>
2015	36	180	348	94	165	11	296	16	361
2020	36	360	348	104	337	11	296	33	730
2025	36	540	348	114	527	11	296	49	1116
2030	36	720	348	119,6	730,5	11	296	65	1516

Comment lire ce tableau 1 ?

**Ligne 2015** : La première colonne indique l'émission de CO<sub>2</sub> de l'année 2015 (36 GtCO<sub>2</sub>), la deuxième le cumul des émissions de CO<sub>2</sub> depuis 2010 jusqu'à 2015 (180 Gt CO<sub>2</sub>). Les colonnes suivantes consacrées au méthane et à l'oxyde d'azote suivent la même démarche, mais tiennent compte de la valeur d'émission équivalente en 2030 des émissions à travers la prise en compte de leur PRG à l'horizon 2030. Pour le CH<sub>4</sub>, le nombre 165 GteqCO<sub>2</sub> représente donc la valeur de la contribution du CH<sub>4</sub> entre 2010 et 2015 au cumul des émissions à l'horizon 2030. De même le nombre 16 GteqCO<sub>2</sub> représente la contribution du N<sub>2</sub>O entre 2010 et 2015 au cumul des émissions à l'horizon 2030. Enfin le dernier nombre de la ligne (361 GteqCO<sub>2</sub>) représente la somme des contributions à horizon 2030 des trois gaz à effet de serre au cumul en GteqCO<sub>2</sub> pour la période 2010-2015.

Chacune des lignes suivantes est construite sur le même modèle. Le nombre figurant à la dernière colonne de la ligne n représente le cumul des contributions horizon 2030 des trois gaz à effet de serre au cumul en équivalent CO<sub>2</sub> pour la période 2010-n.

**Ligne 2030** : la valeur 1516 GteqCO<sub>2</sub> (dernière colonne) représente la somme des contributions à horizon 2030 des trois gaz à effet de serre au cumul en équivalent CO<sub>2</sub> pour la période 2010-2030.

En reproduisant ce type de calcul pour chaque date horizon de 5 en 5 ans on obtient, toujours pour le scénario 1 et des dates horizon de 2015 à 2060 le tableau 2 suivant :

**Tableau 2 : Valeurs des contributions de 5 ans en 5 ans depuis 2015 à 2060 des trois gaz à effet de serre du scénario 1 (émissions constantes de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub>).**

Scénario 1	Cumul courant N CH <sub>4</sub>	Cumul courant année CO <sub>2</sub>	Cumul courant année nN <sub>2</sub> O	Cumul Total	Δt par rapport à 2010
2015	165	180	16	<b>361</b>	0,16
2020	403	360	33	<b>796</b>	<b>0,35</b>
2025	573	540	49	<b>1162</b>	<b>0,52</b>
2030	731	720	65	<b>1516</b>	<b>0,67</b>
2035	865	900	81	<b>1846</b>	<b>0,82</b>
2040	989	1080	98	<b>2166</b>	<b>0,96</b>
2045	1103	1260	114	<b>2477</b>	<b>1,10</b>
2050	1204	1440	130	<b>2774</b>	<b>1,23</b>
2055	1300	1620	147	<b>3066</b>	<b>1,36</b>
2060	1384	1800	163	<b>3347</b>	<b>1,49</b>

Ce tableau indique pour chacune des dates horizon la contribution de chaque gaz à effet de serre au cumul des émissions de GES. L'avant dernière colonne (en gras, somme des trois précédentes) indique pour chaque date le cumul du CH<sub>4</sub>, du CO<sub>2</sub> et du N<sub>2</sub>O en GteqCO<sub>2</sub>.

La dernière colonne indique les écarts de température par rapport à 2010 engendrés à chaque date par l'ensemble des émissions des trois GES en utilisant la relation  $\Delta t$  (°c) = 0,444 cumul total/1000.

On voit sur ce tableau que le cumul de 2030 GteqCO<sub>2</sub> permettant de limiter le réchauffement depuis 2010 à moins de 1,1 degré est atteint vers 2038 et le cumul de 1350 GteqCO<sub>2</sub> permettant de limiter le réchauffement depuis 2010 à moins de 0,6 degré est atteint vers 2028.

Voyons ce qu'il en est dans les deux autres scénarios. C'est l'objet des tableaux 3 et 4.

**Tableau 3 - Valeurs des contributions par pas de cinq ans des trois gaz à effet de serre de 2015 à 2080 du scénario 2 (décroissance linéaire du CO<sub>2</sub> à zéro en 2050, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O constants sur la période).**

Scénario 2	Cumul CH <sub>4</sub> GteqCO <sub>2</sub>	Cumul CO <sub>2</sub> GteqCO <sub>2</sub>	Cumul N <sub>2</sub> O GteqCO <sub>2</sub>	Cumul total GteqCO <sub>2</sub>	ΔT par rapport à 2010
2015	165	180	16	361	0,16
2020	403	330	33	<b>766</b>	<b>0,34</b>
2025	573	455	49	<b>1077</b>	<b>0,48</b>
2030	730	555	65	<b>1351</b>	<b>0,60</b>
2035	865	630	81	<b>1576</b>	<b>0,70</b>
2040	989	680	98	<b>1766</b>	<b>0,78</b>
2045	1103	705	114	<b>1922</b>	<b>0,85</b>
2050	1204	705	130	<b>2039</b>	<b>0,91</b>
2055	1300	705	147	<b>2151</b>	<b>0,96</b>
2060	1384	705	163	<b>2252</b>	<b>1,00</b>
2065	1467	705	179	<b>2351</b>	<b>1,04</b>
2070	1543	705	195	<b>2443</b>	<b>1,08</b>
2075	1614	705	211	<b>2530</b>	<b>1,12</b>
2080	1681	705	227	<b>2613</b>	<b>1,16</b>

On voit que, pour ce scénario, la limite de 2030 GteqCO<sub>2</sub> qui permet de respecter le seuil de 2 degrés est repoussée un peu avant 2075. C'est dire que toute émission de CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub>O au delà de 2075 contribue au dépassement du seuil de deux degrés. La limite de 1350 GteqCO<sub>2</sub> pour respecter le seuil de 1,5 degrés reste atteinte très rapidement, vers 2030.

**Tableau 4 - Valeurs des contributions par pas de cinq ans des trois gaz à effet de serre de 2015 à 2100 du scénario 3 (décroissance linéaire du CO2 à zéro de 2015 à 2050, décroissance linéaire de moitié de 2015 à 2050 de CH4 puis valeur constante sur la période 2050- 2100 CH4. N2O constant sur la période.**

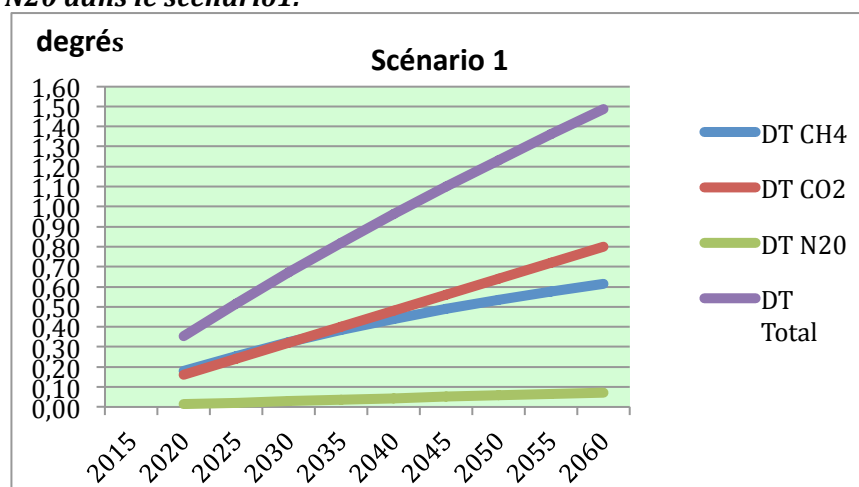
Scénario 3	Cumul CH4 GteqCO2	Cumul CO2 GteqCO2	Cumul N2O GteqCO2	Cumul total GteqCO2	ΔT par rapport à 2010 (°C)
2015	165	180	16	361	0,16
2020	396	330	33	759	0,34
2025	544	455	49	1048	0,47
2030	667	555	65	1287	0,57
2035	754	630	81	1465	0,65
2040	821	680	98	1599	0,71
2045	870	705	114	1688	0,75
2050	896	705	130	1731	0,77
2055	917	705	147	1768	0,79
2060	934	705	163	1802	0,8
2065	955	705	179	1840	0,82
2070	976	705	195	1876	0,83
2075	997	705	211	1913	0,85
2080	1017	705	227	1949	0,87
2085	1037	705	243	1985	0,88
2090	1056	705	259	2020	0,9
2095	1075	705	275	2055	0,91
2100	1093	705	291	2089	0,93

Dans ce scénario 3, grâce à la limitation du cumul des émissions de CH4, la limite de 2030 GteqCO2 nécessaire au respect d'un seuil de 2 degrés de réchauffement depuis la fin du 19ème siècle n'est jamais atteinte sur la période 2015-2100.

Par contre le seuil de 1,5 degré reste toujours atteint avant 2035. Seule une chute encore plus rapide des émissions de CO2 permettrait de repousser ce seuil à un horizon plus lointain.

La figure 2, tirée du tableau 3, met en évidence la façon selon laquelle se constituent les cumuls des différents gaz à effet de serre.

**Figure 2 : Evolution des écarts de température engendrés par les émissions de CO2, CH4 et N2O dans le scénario1.**



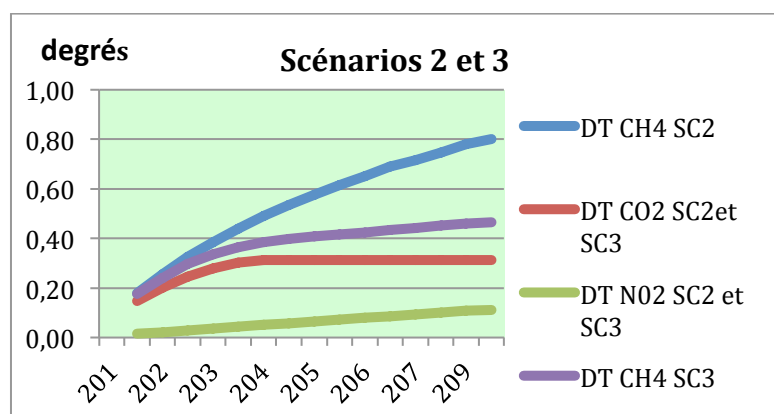
Dans ce scénario les contributions de CO2 et de CH4 font jeu égal jusqu'à 2040. En 2080 la contribution du CO2 devient prépondérante avec 0,81 degré contre 0,60 pour le méthane et 0,07 pour le N2O.

La figure 3 tirée des tableaux 3 et 4 montre l'importance stratégique de la trajectoire prospective du CH4 sur le respect du « budget carbone ».

Dans le scénario 2 où le CH4 reste constant sur toute la période, sa contribution croît constamment, dépasse rapidement celle du CO2 et atteint 0,8 degré en 2100 contre 0,3 degré seulement pour le CO2.

Dans le scénario 3 où le CH4 se stabilise à la valeur moitié de 2015 en 2050, la contribution du méthane, encore prépondérante, montre un effet de saturation en fin de période en dessous de 0,5 degré, ce qui permet de rester au delà de 2100 au dessous du seuil fixé pour respecter les deux degrés.

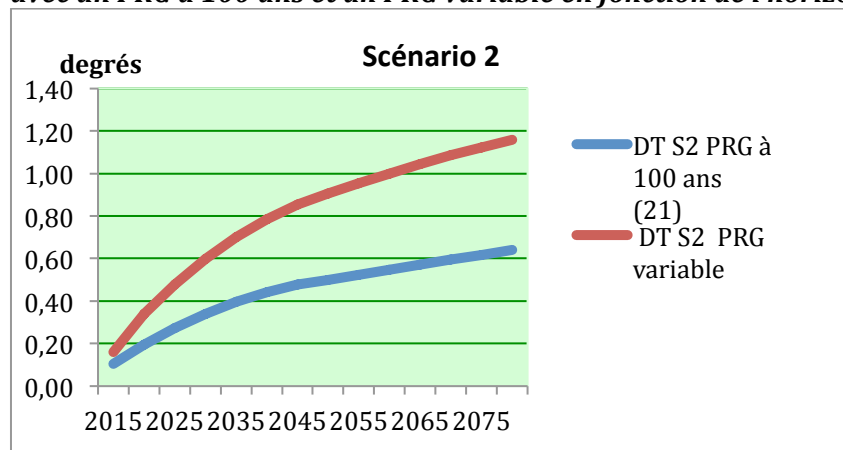
**Figure 3 : Evolution des écarts de température engendrés par les émissions de CO2, CH4 et N2O dans les scénarios 2 et 3.**



Globalement, il ressort des études de cas que le concept de « budget carbone » abondamment utilisé aujourd'hui doit être utilisé avec précaution. En particulier et contrairement à sa dénomination, ce n'est pas un budget carbone mais un « **budget équivalent CO2** » qu'il est pertinent d'utiliser, en prenant la précaution de mesurer les gaz à effet de serre autres que le CO2 en utilisant la notion de PRG à un horizon temporel déterminé, 2100 par exemple, et non pas à 100 ans comme le font la plupart des économistes.

La figure 4 illustre ce dernier point. On y fait la comparaison des écarts de température calculés pour le scénario 2 selon notre méthode (PRG variable en fonction de l'horizon temporel) et avec un PRG à 100 ans (21) qui reste à tort la règle pour la plupart des décideurs.

**Figure 4 : Evolution des écarts de température du scénario 2 par rapport à 2010, calculés avec un PRG à 100 ans et un PRG variable en fonction de l'horizon temporel.**



La figure 4 montre que le calcul avec un PRG à 100 ans sous estime fortement le réchauffement. L'écart atteint 0,52 degrés en 2080.

Ces mêmes études de cas montrent que le respect du « budget eqCO<sub>2</sub> » indispensable pour maintenir l'augmentation de la température de la surface terrestre dans la limite de 2 degrés par rapport à la période préindustrielle entraîne non seulement la nécessité d'une réduction drastique des émissions de CO<sub>2</sub> pour parvenir autour de 2050 à la « neutralité CO<sub>2</sub> », mais aussi du méthane dont l'importance dans le bilan eqCO<sub>2</sub> devient primordial au fur et à mesure qu'on se rapproche de cette neutralité CO<sub>2</sub>.