# Projet d'introduction aux méthodes numériques et projet (PROJ0001-1) : Étude du cycle carbone-climat pour une planète hypothétique

*Premier bachelier en sciences de l'ingénieur*
*Année académique 2019-2020*

## 1 Introduction

Dans ce projet, nous allons étudier un modèle simplifié [1] du cycle global carbone-climat pour une planète hypothétique sans océans (sur Terre, ceux-ci absorbent environ 30 % des émissions de $CO_2$). Ce modèle nous permettra d'étudier l'incidence des gaz à effet de serre sur différentes variables climatiques et de tester différents scénarios de réduction des émissions de $CO_2$ [2], tels que le prévoient par exemple les accords de Paris.
Ces scénarios peuvent dépendre non seulement de décisions politiques, mais aussi des solutions technologiques que des ingénieurs et scientifiques conçoivent pour lutter contre le réchauffement climatique. Certaines de ces solutions sont à un stade expérimental avec des sites pilotes (par exemple : la capture et le stockage géologique de $CO_2$ [3]), alors que d'autres (utilisation d'aérosols ou de panneaux solaires pour modifier l'albedo ou limiter l'énergie solaire incidente) sont plus difficiles à mettre en œuvre et sont ainsi étudiées de manière plus théorique par des méthodes numériques [4].

Nous étudions ici un système zéro-dimensionnel, c'est-à-dire un modèle qui considère une seule valeur moyenne de toutes les variables (température, carbone et eau) pour toute la surface de la planète. Nous prendrons en compte les principaux phénomènes ayant une influence sur différentes variables climatiques, dont la température de la planète. L'apport énergétique du soleil, l'émission naturelle d'énergie de la planète et l'effet de serre dû au carbone et à l'eau présents dans l'atmosphère sont étudiés. Pour ce faire, les échanges de carbone et d'eau entre l'atmosphère et le sol doivent être pris en compte.

## 2 Modélisation

Le modèle que nous considérons dépend du temps et comporte cinq variables : la température moyenne de la terre ($T$), la quantité de carbone contenue dans l'atmosphère ($C_a$), la quantité de carbone contenue dans le sol et la végétation ($C_s$), la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère ($W_a$) et finalement la quantité d'eau contenue dans le sol ($W_s$). Dans ce modèle, nous négligeons les océans et supposons que la planète est uniquement recouverte de continents. L'eau est donc soit contenue dans le sous-sol, soit dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau.

Ce modèle est défini en fonction de trois bilans : le bilan d'énergie de la Terre (influençant la température, sections 2.1 et 2.2), le bilan du carbone (système couplé atmosphère-sol, section

2.3) et le bilan de l'eau (système couplé atmosphère-sol, section 2.4). Ces trois bilans peuvent s'écrire sous forme d'un système de cinq équations différentielles ordinaires qu'il vous faudra résoudre numériquement par la suite.

## 2.1 Bilan d'énergie

Le bilan s'écrit en considérant trois échanges énergétiques détaillés ci-après : l'apport du soleil, l'énergie émise par la planète, et l'énergie associée aux changements d'état. La planète reçoit une énergie $S$ $[W/m^2]$ venant du soleil et une certaine partie de cette énergie est absorbée (premier terme de la partie droite du bilan écrit à l'équation (1)). La proportion reçue dépend d'un facteur $\alpha$ sans dimension appelé albedo qui correspond au rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. Ce facteur dépend des propriétés de la surface considérée. Par exemple, une quantité moindre d'énergie sera absorbée sur un sol couvert de neige par rapport à un sol couvert de terre. L'équation permettant de calculer l'albedo est détaillée à la section 2.2 et dépend principalement de la température et de la quantité de carbone dans le sol. Sous l'hypothèse que la planète se comporte comme un corps noir idéal, la loi de Stefan-Boltzmann établit que la puissance totale rayonnée par unité de surface est directement proportionnelle à la quatrième puissance de sa température. Cependant, une partie de cette émission est absorbée par les molécules d'eau et le carbone contenus dans l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre (deuxième terme de la partie droite du bilan écrit à l'équation (1)). Finalement, la quantité d'eau changeant d'état (passant de l'état liquide à l'état gazeux ou inversement) influence également le bilan d'énergie par l'enthalpie de changement d'état (dernier terme de la partie droite du bilan écrit à l'équation (1)). Plus spécifiquement, on a

$$k\frac{dT}{dt} = S(1-\alpha) - \sigma_{\text{eff}}T^4 - k_W\frac{dW_s}{dt} \tag{1}$$

où $T$ $[K]$ est la température, $t$ $[an]$ est le temps, $k$ $[W\,an/m^2K]$ est la capacité thermique de la planète, $S$ $[W/m^2]$ est l'énergie apportée par le soleil, $\alpha$ [] est l'albedo, $\sigma_{\text{eff}}$ $[W/m^2K^4]$ est le coefficient de proportionnalité de la loi de Stefan-Boltzmann prenant en compte l'effet de serre et $k_W\,dW_s/dt$ $[W/m^2]$ représente l'enthalpie d'évaporation de l'eau. Pour être cohérent avec les unités utilisées dans la suite, le dernier terme peut d'abord être évalué en $[J/cm^2\,an]$, avec $W_s$ $[g/cm^2]$ la quantité d'eau dans le sol et $k_W$ $[J/g]$ la chaleur latente d'évaporation de l'eau, puis être converti en $[W/m^2]$.

Le coefficient de proportionnalité efficace de la loi de Stefan-Boltzmann $\sigma_{\text{eff}}$ dépend de la quantité de carbone et de vapeur d'eau dans l'atmosphère

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma\,\phi_C(C_a)\,\phi_W(W_a) \tag{2}$$

où $\sigma$ $[W/m^2K^4]$ est la constante de Stefan-Boltzmann et les fonctions adimensionelles prenant en compte l'effet de serre s'écrivent

$$\phi_C(C_a) = 1 - \frac{0.4\;C_a}{750 + C_a} \tag{3}$$

$$\phi_W(W_a) = \frac{1.02258 + W_a^{0.409}}{1 + 2.258\;W_a^{0.409}} \tag{4}$$

où $C_a$ est la quantité de carbone dans l'air exprimée en Gigatonnes ($Gt$) et donnée par le bilan de carbone et $W_a$ est la quantité de vapeur d'eau dans l'air en $g/cm^2$.

Les valeurs des constantes $S, k, \sigma, k_W$ qui apparaissent dans ces équations sont reprises dans un tableau à la fin de l'énoncé.

### 2.2 Albedo

L'albedo $\alpha$ présent dans l'équation (1) dépend de plusieurs facteurs. En particulier, il dépend de la quantité de nuages présents dans l'atmosphère ainsi que de la quantité de neige et de végétation présentes au sol. Pour trouver la quantité moyenne de nuages, on calcule d'abord l'humidité moyenne relative. Pour ce faire, la quantité de saturation en eau $W_a^*$ $[g/cm^2]$ est calculée selon

$$W_a^*(T) = e^{\frac{17.638\,T}{T+243.4}} \tag{5}$$

où $T$ est la température exprimée en **degrés celsius**. L'humidité relative moyenne $q$ [] est donnée par

$$q = \frac{W_a}{W_a^*(T)}. \tag{6}$$

Connaissant l'humidité relative moyenne, qui dans certains cas peut s'avérer supérieure à 1, on peut déterminer un paramètre $n \in [0, 1]$ sans dimension déterminant la quantité relative de nuages. Ce paramètre est donné par

$$n = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq q \leq \frac{1}{2} \\ 2q - 1 & \text{si } \frac{1}{2} < q < 1 \\ 1 & \text{si } 1 \leq q \end{cases} \tag{7}$$

La quantité relative de terre recouverte par la neige $f_{sn}$ [] dépend de la température moyenne de la planète $T$ selon

$$f_{sn} = \begin{cases} 0 & \text{si } T > 15°C \\ 1 - \frac{T+15}{30} & \text{si } -15°C \leq T \leq 15°C \\ 1 & \text{si } T < -15°C. \end{cases} \tag{8}$$

Finalement, la fraction $\lambda$ [] représente la quantité de végétation par rapport au sol sans végétation qui se calcule par

$$\lambda(C_s) = 1 - \frac{C_s}{600 + C_s}. \tag{9}$$

où $C_s$ $[Gt]$ est la quantité de carbone dans le sol. Un sol sans végétation ($\lambda(C_s) = 1$) correspond à $C_s = 0\ Gt$ et un sol recouvert par la végétation correspond à $C_s \to \infty\ Gt$. On peut maintenant écrire la formule de l'albedo de la planète

$$\alpha = \alpha_a + 0.4\ n + \alpha_{\text{surf}}(0.81 - 0.56\ n), \tag{10}$$

où $\alpha_a = 0.1$ correspond à l'albedo de l'atmosphère supérieure sans nuage (susceptible d'être modifié par des aérosols) et où

$$\alpha_{\text{surf}} = (\lambda(C_s)0.4 + (1 - \lambda(C_s))0.1)\,(1 - f_{sn}) + 0.7 f_{sn}. \tag{11}$$

Dans l'équation (11), 0.4 représente l'albedo d'un sol sans végétation, 0.1 l'albedo d'un sol avec de la végétation et 0.7 l'albedo d'un sol recouvert de neige.

### 2.3 Bilan de carbone

Le bilan de carbone concerne à la fois le carbone présent dans l'air ($C_a$) et le carbone présent dans le sous-sol (ou la végétation) ($C_s$). En réalité, on fera la supposition que le carbone disparaissant du sous-sol apparaît dans l'atmosphère et vice-versa. Concentrons-nous donc sur le bilan carbone du sous-sol (et de la végétation) $C_s$. En un an, une partie de la végétation croît et une autre partie "meurt". Nous allons noter la croissance de la végétation par $P$ $[Gt/an]$, appelée *productivité*. La productivité dépend des conditions extérieures. Les conditions optimales correspondent à une température modérée (environ $22°C$), une humidité du sol modérée et à une quantité de carbone modérée dans le sol. Mathématiquement, la productivité est donnée par

$$P = P_{\max} g_T(T) g_C(C_s) g_W(W_s). \tag{12}$$

où $P_{\max}$ correspond à la productivité maximale par an, et $g_T(T)$, $g_C(C_s)$, et $g_W(W_s)$ sont des fonctions adimensionnelles de production dépendant respectivement de la température, de la quantité de carbone dans le sol et de la quantité d'eau dans le sol. La fonction $g_C(C_s)$ est fournie explicitement

$$g_C(C_s) = \frac{4}{(C_a + C_s)^2} C_s\, C_a. \tag{13}$$

Les fonctions $g_T$ et $g_W$ ne sont pas données explicitement mais des données sont disponibles. Sur cette base, vous devrez établir une estimation de ces fonctions afin d'effectuer vos calculs, en tenant compte du fait que l'image de ces fonctions est toujours comprise entre 0 et 1. $P_{max}$ est renseignée en fin d'énoncé.

Le bilan en carbone du sol s'écrit

$$\frac{dC_s}{dt} = P - mC_s, \tag{14}$$

où la constante $m$ $[an^{-1}]$ (donnée en fin d'énoncé) est l'inverse du temps de vie moyen de la végétation.

L'équation du bilan de carbone dans l'air correspond à une croissance opposée à celle du carbone dans le sol et la végétation :

$$\frac{dC_a}{dt} = -P + mC_s + e(t) \tag{15}$$

où $e(t)$ $[Gt/an]$ représente les émissions de $CO_2$ anthropiques. Dans un premier temps, nous suposerons que $e(t) = 0$. C'est seulement à la question 3.5, que vous affecterez des valeurs non triviales à $e(t)$.

### 2.4 Bilan de l'eau

Nous terminons la présentation du modèle par la description du bilan de l'eau comprise dans l'atmosphère et le sol. Similairement au cas du carbone, la somme de la quantité d'eau comprise dans l'air et de la quantité comprise dans le sol est une constante. Ainsi même si une quantité correspond à de l'eau sous forme liquide et l'autre sous forme de vapeur, nous les mesurerons rapportées à la même unité (en $g/cm^2$).

L'équation du bilan de l'eau dans l'atmosphère est donnée par

$$\frac{dW_a}{dt} = -H + E, \tag{16}$$

où $H$ $[g/cm^2\ an]$ représente la pluie tombée en un an et $E$ $[g/cm^2\ an]$ l'évaporation et l'évapotranspiration des végétaux (par an). La pluie est donnée par la relation qualitative

$$H = \nu n W_a, \tag{17}$$

où $n$ est le coefficient "nuages" donné par l'équation (7) et $\nu = 0.192\ an^{-1}$. L'évaporation $E$ est donnée par un terme correspondant à l'évaporation du sol sans végétation et un terme correspondant à l'évapotranspiration des végétaux. On a donc

$$E = \lambda(C_s)E_{sol} + (1 - \lambda(C_s))E_{veg}, \tag{18}$$

où

$$E_{sol} = (W_a^*(T) - W_a)\frac{W_s}{k_{sol}} \tag{19}$$

et

$$E_{veg} = k_{veg}\ P \tag{20}$$

avec $k_{sol} = 7\ g\ an/cm^2$ et $k_{veg} = 0.7\ g/cm^2\ Gt$.

L'équation de bilan de l'eau dans le sol étant opposée, on a donc

$$\frac{dW_s}{dt} = H - E. \tag{21}$$

# 3 Projet

Nous en venons maintenant au projet en lui-même. Nous détaillons ici les différentes parties que vous devrez programmer en MATLAB.

## 3.1 Méthodes de la sécante et de la bissection

A la fin du projet, nous aurons besoin de résoudre une équation non-linéaire. La première question du projet consiste à implémenter deux méthodes de recherche de racine qui ont été vues au cours, à savoir la méthode de la bissection et la méthode de la sécante. Ces implémentations doivent être le plus générique possible et donc pouvoir fonctionner pour tout type de fonction et avec le moins d'hypothèses de départ possibles. On demande d'implémenter les deux fonctions

```
function [x,statut] = secante(f,x0,x1, tol)
```

et

```
function [x,statut] = bissection(f,x0, x1, tol)
```

qui permettent de rechercher la racine d'une fonction MATLAB `f(x)`, avec une tolérance définie par la valeur `tol`, à partir de deux valeurs initiales `x0` et `x1` selon la méthode de la sécante et de la bissection. Il est primordial de respecter le format demandé ci-dessus étant donné que ces fonctions seront testées automatiquement. En sortie, les deux fonctions doivent retourner un vecteur avec deux valeurs. Dans le cas où la fonction a correctement terminé et trouvé une approximation de la racine (à la tolérance près), la première valeur `x` contient la valeur de la racine et la deuxième valeur `statut` contient la valeur 0. Dans le cas où l'utilisateur a rentré deux valeurs qui ne satisfont pas les hypothèses de la méthode, il vous est demandé d'afficher un message d'erreur et d'affecter à la variable de sortie `statut` la valeur 1. Dans ce cas, `x` contient n'importe quelle valeur. Dans le cas où la méthode de la recherche de racine ne converge pas (par exemple parce que la fonction n'a pas de racine), vous devez afficher un message d'erreur et affecter la valeur $-1$ à la variable `statut`. Dans ce cas, à nouveau, n'importe quelle valeur peut être affectée à la variable de sortie `x`.

Dans votre implémentation, prenez soin (i) de vérifier les hypothèses de chacune de ces méthodes et de prévoir un comportement adéquat du code dans le cas où ces hypothèses ne sont pas rencontrées, de manière à fournir une solution dans un maximum de cas, (ii) de veiller à réduire autant que possible le nombre d'appels de la fonction `f(x)` à l'intérieur des fonctions `secante` et `bissection`, et ce pour des raisons d'efficacité.

Ces deux fonctions seront testées lors du premier milestone (voir ci-dessous).

### 3.2 Mise en équation du modèle climatique

Il faut maintenant écrire le modèle climatique sous forme d'un système de cinq équations différentielles ordinaires à partir des bilans donnés dans l'énoncé au travers des équations (1), (14), (15), (16) et (21). Pour ce faire, vous aurez besoin de construire les fonctions $g_T$ et $g_W$ par interpolation à partir des données qui vous sont fournies dans les fichiers gt.txt et gw.txt. On demande ensuite d'implémenter une fonction `odefunction` qui prend en entrée le temps $t$ et un vecteur de cinq composantes représentant dans l'ordre les différentes valeurs courantes des cinq variables $T, C_a, C_s, W_a, W_s$ et donne en sortie un vecteur de cinq composantes représentant les dérivées :

```
function [dVar] = odefun(t,Var)
```

où `Var = [T Ca Cs Wa Ws]` et `dVar = [dT dCa dCs dWa dWs]` .

Cette fonction sera testée avec les fonctions `secante` et `bissection` lors du premier *milestone* le vendredi 6 mars 2020. Le test étant automatique, il est de nouveau critique de respecter le format demandé pour ces trois fonctions.

### 3.3 Modélisation du climat

Utiliser la fonction `odefun` pour résoudre le système d'équations différentielles de deux manières :

— En implémentant la méthode d'Euler explicite

— En utilisant la fonction `ode45` de Matlab

Dessiner le graphique des cinq variables principales en fonction du temps. Après un certain nombre d'années, le système d'équations différentielles ordinaire doit tendre vers un équilibre. Déterminer une condition permettant de vérifier qu'un équilibre a été atteint. Pour trois différentes conditions initiales, déterminer le type de point d'équilibre obtenu : désert, planète glaciaire, climat tempéré, ... Vu leur signification physique, les variables `Ca, Cs, Wa` et `Ws` doivent en principe rester positives. Si la résolution numérique conduit a des valeurs négatives, il est nécessaire de le détecter et d'adapter le comportement de l'algorithme.

— Choisissez un des deux solveurs et justifiez votre choix.

### 3.4 Recherche d'un paramètre du modèle pour atteindre un équilibre climatique donné

Il est fort probable que les points d'équilibre obtenus précédemment soient éloignés de la température moyenne que nous connaissons sur terre (entre $15°C$ et $17°C$). Ecrire une fonction qui calcule un intervalle de valeurs, `Param = [Param1 Param2]`, d'un paramètre du modèle menant à un point d'équilibre où la température est comprise entre $T1 = 15°C$ et $T2 = 17°C$. Cette question constitue le deuxième *milestone* à terminer pour le vendredi 27 mars 2020. La fonction de recherche devra avoir la forme suivante et sera également testée automatiquement. Elle devra faire varier respectivement les paramètre $S$ (ensoleillement), $\alpha_a$ (albedo) et $C_a$ (carbone initial dans l'air)

```
function [Param,statut] =rechercheparamS(T1, T2, Var0, SMin, SMax)
function [Param,statut] =rechercheparamAlpha(T1, T2, Var0, AlphaMin, AlphaMax)
function [Param,statut] =rechercheparamCa(T1, T2, Var0, CaMin, CaMax)
```

où `Var0` représente les conditions initiales du système et les valeurs `Min` et `Max` définissent les bornes initiales de l'intervalle de recherche. La variable `statut` vaut 0 quand la fonction a réussi à trouver les deux valeurs et vaut 1 quand la fonction a rencontré une erreur et n'a pas pu converger.

### 3.5 Impact de la réduction d'émissions sur le climat

En introduisant un apport de carbone par l'homme dans l'atmosphère dans l'équation (15), la Terre peut connaitre un réchauffement important. A partir du scénario fourni dans le fichier emission.txt, tester différents scénarios de réduction d'émission $e(t)$ devant limiter le réchauffement. Quel pourcentage de réduction d'émissions est-il nécessaire d'imposer à partir de 2020 pour réduire la température de 2 °C (par rapport au scénario de base) en 2100 ?

## 4 Tableau des constantes et conditions initiales

| Paramètre | Valeur | Unité |
|---|---|---|
| $S$ | 340 | $W/m^2$ |
| $k$ | 16.9 | $W\,an/m^2K$ |
| $\sigma$ | $5.67\,10^{-8}$ | $W/m^2K^4$ |
| $m$ | 0.08 | 1/an |
| $P_{\max}$ | 200 | $Gt$/an |
| $k_W$ | 2257 | $J/g$ |

Intervalles de variations des conditions initiales :

- $C_s$ et $C_a$ entre 100 et $10^4$ $Gt$ ;
- $W_s$ et $W_a$ entre 1 et 20 $g/cm^2$ ;
- $T$ entre 10 °C et 20 °C.

## 5 Consignes

- Le travail comporte un code de calcul MATLAB et un rapport d'une longueur de 10 pages maximum.

— Le code doit être correct et écrit par vous (ce que nous vérifierons à la présentation orale).
— Le code doit être soigné et commenté.
— Le code doit utiliser au maximum les possibilités vectorielles de MATLAB.
— Pour toute fonction, nous sommes susceptibles de vous demander de montrer un *profile* MATLAB et de l'interpréter.

# 6 Critères d'évaluation

La note finale $n_f$ sera définie sur base de l'examen oral en prenant en compte la note de l'évaluation continue (milestones), et la note du rapport et du code MATLAB.

$$n_f = 0.2 \times n_m + 0.35 \times n_r + 0.45 \times n_o$$

où $n_m$ est la note de l'évaluation continue (milestones), $n_r$ est la note du rapport et du code MATLAB et $n_o$ est la note de la présentation orale.

Cependant, **une note inférieure ou égale à 9/20 pour l'oral** implique que c'est cette note qui est octroyée à l'étudiant.

## 6.1 Évaluation continue

Deux "milestones" permettront de vérifier votre état d'avancement en cours de projet.
— Vendredi 6 mars : vérification des questions 3.1 et 3.2.
— Vendredi 27 mars : vérification de la question 3.4.

Vos fonctions seront testées automatiquement, il donc primordial de respecter les consignes et le format demandé en termes de nom de fonction, de nom de fichier, de variables d'entrée et de sortie :

Un non-respect des consignes sera sanctionné par une note individuelle de 0/10, indépendamment du résultat du groupe.

## 6.2 Rapport et code MATLAB

Un fichier .zip par groupe comprenant un rapport au format PDF et accompagné des fichiers .m de votre programme doit être soumis via la plateforme de soumission au plus tard pour le mercredi 8 avril à 23h59. Le nom du fichier .zip et le nom du fichier .pdf doivent respecter le format suivant : "NumeroGroupe_NomA_NomB_NomC.xxx" (exemple : l'archive "27_Dupond_Beckers_Bastin.zip" doit inclure le fichier "27_Dupond_Beckers_Bastin.pdf").
— La longueur du rapport ne peut dépasser 10 pages et ne doit pas comporter d'introduction.
— Pour chaque question, les résultats obtenus doivent être illustrés.
— La justification des choix numériques est très importante. Pensez à expliquer les choix qui vous ont semblé cruciaux.
— La forme du rapport est prise en compte. Il est recommandé de suivre les règles de bonne pratique pour la réalisation d'un rapport scientifique qui feront l'objet d'une présentation le mercredi 27 mars. Le nombre de pages étant limité, il est inutile de répéter l'énoncé. Allez donc à l'essentiel.
— La qualité du code (efficacité et soin) est également considérée dans l'évaluation.
— Le code sera testé automatiquement avant l'examen oral.

### 6.3 Examen oral

L'examen oral est **individuel** et dure 10 minutes. Vous devez faire une démonstration du programme de votre groupe et répondre à des questions supplémentaires. Les éléments suivants seront pris en considération :

- la maîtrise de Matlab en tirant au sort dans une liste de questions disponibles avant l'examen ;
- la maîtrise du programme réalisé par votre groupe en tirant au sort dans une liste de questions disponibles avant l'examen ;
- les justifications et éclaircissements par rapport aux choix réalisés et aux résultats présentés dans le rapport et dans le code ;
- la maîtrise des notions théoriques vues au cours en lien avec votre travail et la maîtrise générale du projet.

### 6.4 Deuxièmes sessions

Les groupes qui, en première session, ont obtenu pour le rapport et le code une note suffisante sont, s'ils le souhaitent, dispensés de remettre un nouveau code et un nouveau rapport lors de la session de septembre. Dans ce cas, seul l'oral doit être représenté et compte pour 100% de la note finale. Pour les autres groupes, un nouveau code et un nouveau rapport doivent être remis 5 jours avant l'examen oral.

## Références

[1] Y. W. Svirezhev and W. von Bloh. A zero-dimensional climate-vegetation model containing gobal carbon and hydrological cycle. *Ecological Modelling* 106:119-127, 1998.

[2] T.M.L. Wigley, A.K. Jain, F. Joos, B.S. Nyenzi, and P.R. Shukla. Implications of proposed $CO_2$ emissions limitations. In J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs and M. Noguer (Eds), *IPCC Technical Paper IV*, 1997. http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-IV-en.pdf.

[3] European Commission - Directorate-General for Research. $CO_2$ capture and storage projects, 2007. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/co2capt_en.pdf.

[4] T.M.L. Wigley. A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization. *Science* 314(5798):452-454, 2006. http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/314/5798/452.