

Modélisation du cycle du carbone avec le logiciel STELLA

CONSTRUIRE UN MODELE

- 1- A partir du texte (Doc.1), schématiser le **cycle naturel du carbone** (stocks fixes/flux constants). CC0.stm
 - 2- Rajouter les **influences humaines** sur le cycle du carbone (Doc.1 et Doc.2).
 - 3- En utilisant les séries de mesures présentées dans le Doc.2, trouver les relations entre contenance du stock atmosphérique (Gt), concentration atmosphérique en CO₂ (ppm) et variation de température (°C) et les intégrer au modèle.
*Exemple d'interprétation : de 1960 à 2000 on passe de 310 ppm à 360 ppm de CO₂ pour une augmentation de température ΔT de 0,5 °C ; Avec une hypothèse "ΔCO₂_ppm proportionnel à ΔT", chaque ppm supplémentaire de CO₂ correspond à une élévation d'1/100 de °C ; ⇒ (pour une valeur initiale en 2000 de 350 ppm de CO₂) : CO₂_ppm = 350 * Atmosphère / 750 et dT = 0,01 * (CO₂_ppm - 350)*
 - 4- Créer une courbe d'évolution de la composition atmosphérique (CO₂ ppm) avec le temps sur 100 ans ... CC1.stm
 - 5- Améliorer l'interface en proposant, entre autre, un ajustement (curseur ou graphe) des valeurs des flux liés aux activités humaines CC2.stm
 - 6- Alors que les activités humaines représentent actuellement un flux entrant de 6 GT/an de carbone dans l'atmosphère, le stock de carbone atmosphérique ne s'accroît que de 3 Gt/an : il existe donc des **puits de Carbone** qui "épongent" le surplus produit par l'Homme. Ainsi, de 1991 à 2001, sur les 63 Gt de Carbone émises, seules 32 Gt se sont accumulées dans l'atmosphère, 12 Gt ont été assimilées par la biosphère végétale ; 19 Gt se sont dissoutes dans l'océan. Comment intégrer l'impact de ces puits dans le cycle ?
Hypothèse : le flux vidant un réservoir est proportionnel au contenu du réservoir .
*Ex. : Dissolution océan = valeur initiale du flux * valeur du stock / Valeur initiale du stock = 100 * Atmosphère / 750*
- Paramétrer ces relations pour tous les réservoirs susceptibles de vérifier cette hypothèse et tester le nouveau modèle ainsi obtenu ... CC3.stm

DISCUTER ET AMELIORER LE MODELE

Envisager les modifications du modèle qui intègrent différentes hypothèses et leurs conséquences sur l'atmosphère et le climat :

7- Des rétrocontrôles à affiner

- le CO₂ est d'autant plus soluble dans l'eau de mer que la température de celle-ci est faible ; ainsi les masses d'eau froides qui se forment autour des pôles piègent de grandes quantités de CO₂ ; un réchauffement ralentirait ce processus de capture océanique du CO₂ atmosphérique en défavorisant sa dissolution ...
- le taux atmosphérique de CO₂ est actuellement un facteur limitant de l'activité photosynthétique ; son accroissement pourrait simuler la capture de CO₂ par les puits biosphériques ...

8- Des puits en sommeil qui risquent de se réveiller :

- le réchauffement favoriserait le développement des forêts boréales (14 millions d'ha) dont l'activité photosynthétique, actuellement limitée par un climat rigoureux, pourrait alors capturer d'importantes quantités de CO₂ atmosphérique. On estime que la capacité du réservoir forêt boréale pourrait passer de 4 Gt C à 42 Gt C.
- le permafrost, sol en permanence gelé des régions boréales, est un réservoir inactif de 1400 Gt de Carbone. Sa fonte progressive (actuellement 1 à 2 % de sa surface par an) entraînerait la reprise de son activité biologique et la libération d'un surplus de CO₂ dans l'atmosphère.

*A partir du modèle CC4.stm l'efficacité des prélèvements de CO₂ atmosphérique par l'océan et les forêts est affectée d'un coefficient paramétrable. Avec l'hypothèse "l'accroissement du flux vidant un réservoir est proportionnel à un coeff.", on peut écrire par exemple : Dissolution océan = 100+coef1*Atmosphère/750 et Photosynthèse = 100 + coef2*Atmosphère/750*

A partir du modèle CC7.stm, les rétrocontrôles de la température globale et du taux atmosphérique de CO₂ sur la photosynthèse, la respiration des sols et les échanges océan-atmosphère sont intégrés au modèle.

9- La sensibilité discutée du climat à la composition atmosphérique

Le modèle CC6.stm propose des estimations haute et basse de l'impact de l'accroissement du CO₂ sur l'augmentation de température ...

L'augmentation de la température de +2°C pour un doublement de la teneur en CO₂ d'ici 2010 est une estimation moyenne.

- Certains limitent cette augmentation à +1,5 °C : les aérosols libérés, en même temps que le CO₂, lors de la combustion des énergies fossiles ralentissent la pénétration des rayons solaires dans l'atmosphère et limitent le réchauffement lié à l'accroissement du CO₂ ...
- D'autres envisagent une augmentation allant jusqu'à +4,5 °C :
 - une augmentation de température accroît l'évaporation de l'eau des mers et les nuages ainsi formés renforcent d'autant l'effet de serre
 - une augmentation de température accélère la fonte des glaces et réduit d'autant les surfaces à fort albédo ...

PREVOIR EN UTILISANT LE MODELE

(utiliser CC7.stm)

- 10- Faire varier les émissions anthropiques de CO₂ et observer l'impact sur l'atmosphère et les variations de température. Depuis le début de l'ère industrielle les rejets humains de CO₂ n'ont cessé d'augmenter : leur valeur actuelle de 6 Gt/an est, compte tenu des prévisions de croissance démographique et économique, appelée à croître ...
- 11- Le GIEC (Groupement international pour l'étude du climat) publie régulièrement un rapport scientifique à l'attention des législateurs simulant les évolutions climatiques prévisibles selon plusieurs scénarios (Document 3). A partir de ce rapport, tester l'impact des différents scénarios sur l'atmosphère et le climat ...
- 12- Le protocole de Kyoto, ratifié en 1997, vise à ramener à l'horizon 2010 les émissions de carbone à 95 % de leur valeur de 1990. Tester l'effet d'une telle décision : le taux atmosphérique de CO₂ revient-il à sa valeur initiale ?

CO₂ atmosphérique et cycle du carbone

Extrait de « La Terre chauffe-t-elle ? » G.Lambert - EDP 2001

Le CO₂ étant chimiquement stable, sa concentration dans l'atmosphère est le résultat d'échanges incessants entre celle-ci et les deux autres grands réservoirs de carbone que sont d'une part la biomasse continentale (la végétation) et d'autre part les différents composés carbonés présents dans la mer ...

Les réservoirs de carbone

Des 3 grands réservoirs de carbone, **atmosphère, océans et biomasse continentale**, les 2 premiers sont aisés à évaluer. Pour l'atmosphère, dont la masse est de 5×10^{15} tonnes, une partie par million de CO₂ (on dit 1 ppm) représente 2 milliards de tonnes de carbone par ppm (1 milliard de tonne peut être abrégé 1 Gt = 1 gigatonne).

Au début de l'ère industrielle, la concentration était de 280 ppm, soit 560 Gt de carbone. La valeur actuelle de 365 ppm correspond à 750 Gt de carbone, soit une augmentation de 190 Gt de carbone depuis la fin du XVII^e siècle.

En ce qui concerne l'océan, le carbone y est essentiellement sous forme d'ion bicarbonate HCO₃⁻ à une teneur un peu inférieure à 140 milligrammes par litre d'eau, soit 28 milligrammes pour le seul carbone. Pour un volume des océans de 1,4 milliards de kilomètres cubes, on trouve un contenu impressionnant de 40 000 Gt de carbone.

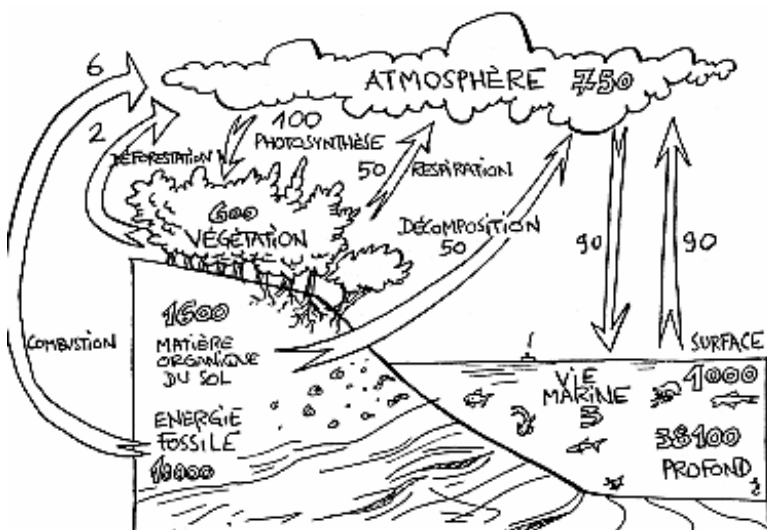
Ces calculs simplifiés ne sont malheureusement pas possibles en ce qui concerne les continents. Dans la végétation, on admettra que l'essentiel du carbone se trouve dans le bois des forêts. Celles-ci recouvrent environ 3600 millions d'hectares (le quart des surfaces émergées) dont une moitié sous les tropiques. Il est déjà plus délicat d'estimer le contenu en carbone d'un hectare « moyen » de forêt. Une valeur acceptable de 150 à 200 tonnes de carbone à l'hectare conduit à une estimation moyenne de 600 Gt. On peut, à la rigueur, considérer l'ensemble des prairies et de tous les animaux comme négligeables par rapport aux forêts, mais il reste une grande inconnue : quelle est la quantité de carbone stockée dans le sol sous forme de composés organiques divers en décomposition ? En analysant divers types de sols, et en considérant leurs répartitions en surface, on arrive à estimer de façon très imparfaite le contenu en carbone des sols végétaux à environ 1600 Gt, soit deux fois plus de carbone au-dessous de la surface du sol qu'au-dessus.

Les échanges de carbone

Cependant, à une échelle de temps de quelques décennies, seules l'atmosphère, la végétation, une partie du sol végétal et la partie la plus superficielle des océans échangent leur carbone et déterminent ainsi la concentration atmosphérique en CO₂ qui est celle qui intervient dans l'effet de serre et le bilan radiatif de la Terre. C'est pourquoi, au-delà de l'évaluation des réservoirs de carbone, ce sont les flux échangés entre ces réservoirs superficiels qu'il nous faut connaître.

En ce qui concerne les océans, les échanges de carbone sont essentiellement dus à la plus grande solubilité du CO₂ dans les eaux froides que dans les eaux chaudes. Ainsi, le CO₂ est absorbé par la mer dans les régions froides, transporté par les courants marins, et redégagé dans l'air au-dessus des régions chaudes. On calcule avec une précision acceptable qu'environ 100 Gt de carbone par an sont échangés dans les deux sens entre l'atmosphère et les océans.

Les échanges naturels de carbone entre la biomasse continentale et l'atmosphère peuvent, quant à eux, être estimés parce qu'on connaît la vitesse de pousse des différents végétaux, et, par déduction, leur taux de pourrissement y compris dans le sol où ils finissent par s'enfouir. On arrive ainsi au chiffre de 100 Gt par an échangés dans les deux sens entre l'atmosphère et la biomasse : 100 Gt pour la photosynthèse, 50 Gt pour la respiration végétale et 50 Gt pour la décomposition de la matière organique des sols. 50 Gt de carbone végétal alimentent annuellement le stock de matière organique en décomposition du sol.



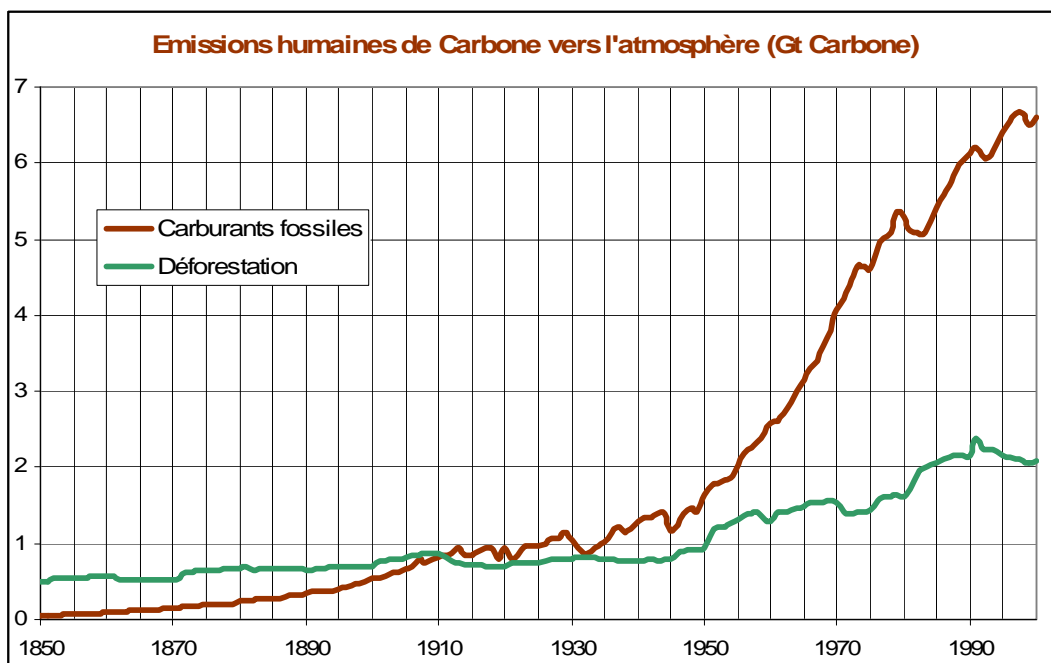
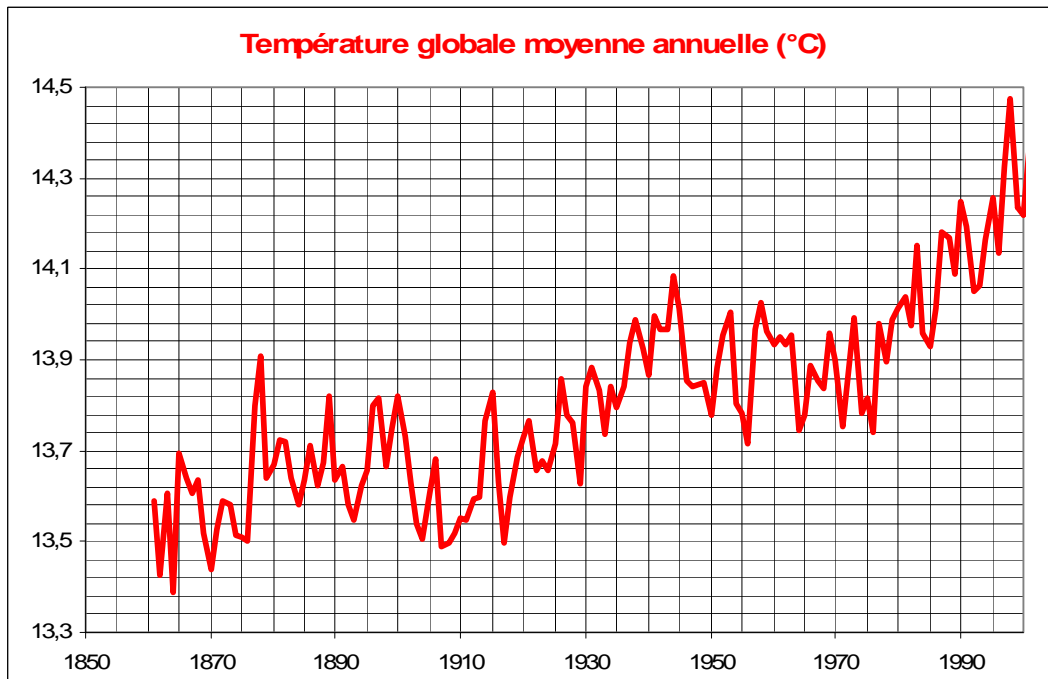
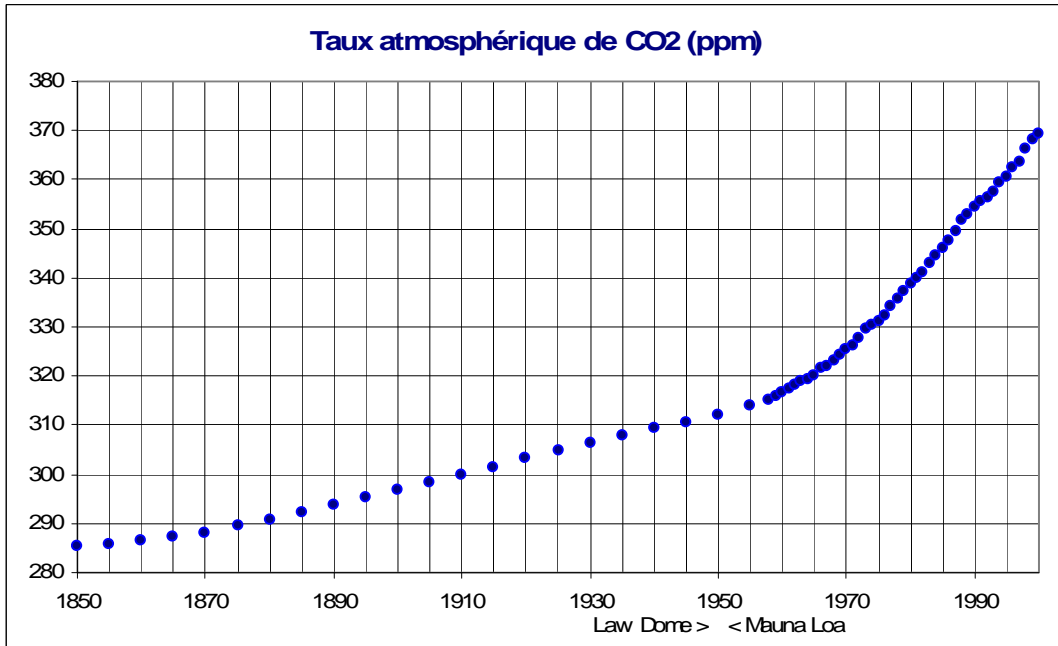
Les émissions de CO₂ par l'homme

Il est permis de penser que, dans les conditions naturelles les sources de CO₂ et les mécanismes d'absorption (on dit « les puits ») s'équilibrent et qu'il en résulte, dans les conditions climatiques actuelles, une concentration relativement stable de CO₂ de l'ordre de 280 ppm, telle qu'elle régnait jusqu'à la fin du XVII^e siècle.

Pendant des millénaires, les hommes ont utilisé comme combustible du bois, qui chaque année se reformait à partir du CO₂ atmosphérique, d'où un équilibre non perturbé à l'échelle d'une ou quelques années. Là-dessus, la population s'accroît et ses besoins alimentaires nécessitent des surfaces plus grandes consacrées à l'agriculture, qui seront gagnées sur les forêts. On estime actuellement à 2 Gt de carbone par an le retour de carbone vers l'atmosphère lié à la déforestation humaine.

En même temps, les activités humaines deviennent plus gourmandes en énergie, et les hommes recherchent dans le sous sol des composés carbonés qui y étaient enfouis depuis la nuit des temps (charbon, pétrole, gaz naturel) ; ils les brûlent en dégageant un surplus de gaz carbonique. Ce débit supplémentaire de CO₂, dû à l'utilisation des combustibles fossiles (dont le stock est actuellement estimé à 5000 Gt de carbone), est d'ailleurs le seul débit de ce gaz connu avec une bonne précision, car on connaît les quantités de combustibles extraites et brûlées chaque année. Au cours des années 1980-2000, ce débit de gaz a représenté 22 milliards de tonnes de CO₂ par an, soit 6 Gt de carbone, c'est à dire 3% des flux naturels.

Une simple comparaison avec les courbes de croissance du CO₂ montre que, pendant ce temps, le contenu de l'atmosphère augmentait chaque année de 3 Gt de carbone, donc moins de la moitié des injections résultant de l'utilisation des combustibles fossiles...



Scénarios d'émission de CO₂

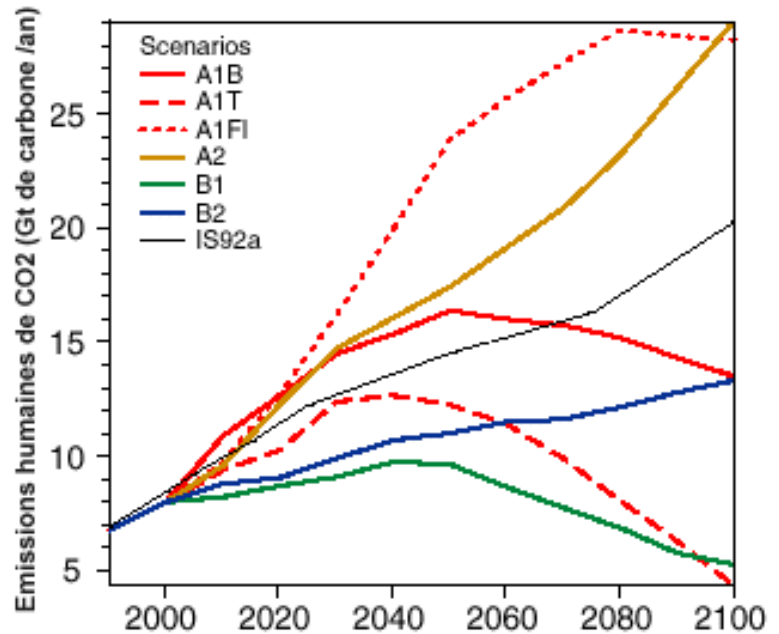
(source GIEC : groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat – 3^e rapport d'évaluation : 2001)

En développant des modèles prévisionnels, le GIEC essaie d'évaluer l'augmentation des températures terrestres.

Ces modèles sont basés sur des scénarios qui ont été développés en tenant compte de facteurs démographiques, économiques et technologiques susceptibles d'influencer les émissions futures de gaz à effet de serre.

Voici, pour six de ces scénarios, les évolutions possibles des émissions humaines de CO₂ :

Ans	A1B	A2	B1	B2	A1F1	A1T
2000	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
2010	11	9	8,4	8,5	9	9
2020	13	12,8	8,6	8,7	13	10,2
2030	14	14,2	8,8	9,5	16	12,5
2040	15	16,3	9,1	10	19	12,6
2050	16	17,5	9	10,8	24	12,1
2060	15,5	19	8,5	11,7	26	11,5
2070	15	20,5	7,7	12	25,5	9,8
2080	14,5	23,5	7	12,5	28,2	8
2090	14	25,5	6	13,3	28	6
2100	13,5	29	6,7	13,5	27,7	0



Ces scénarios ont été développés par le GIEC à compter de 1996 pour remplacer ceux d'une modélisation plus ancienne identifiés ici comme IS92. Un ensemble de 40 scénarios ont été groupés en quatre familles, A1, A2, B1 et B2 ; sur le graphique, la famille A1 a été subdivisée en trois sous-familles. Les scénarios présentés correspondent à ces regroupements.

- Famille A1** : décrit un monde futur à croissance économique très rapide, une population mondiale qui atteint un sommet au milieu du siècle et qui diminue ensuite, et l'introduction de technologies nouvelles et plus efficaces. Les traits dominants sont la convergence des régions, l'augmentation des interactions culturelles et sociales, avec une réduction substantielle des différences régionales. Les trois sous-familles de A1 expriment leurs différences principalement dans leur choix au niveau des énergies : A1T choisit des sources d'énergie non fossiles, A1F1 est fortement centrée sur les énergies fossiles, et A1B tente un équilibre entre toutes les sources d'énergie.
- Famille A2** : décrit un monde très hétérogène. Le trait dominant est l'auto-suffisance et la préservation des identités locales. La convergence des patrons de fertilité entre les régions est très lente, ce qui résulte en une augmentation continue de la population. Le développement économique est d'abord orienté régionalement et sur la croissance individuelle. Les changements technologiques sont plus fragmentés et plus lents que chez les autres familles.
- Famille B1** : décrit un monde convergent qui, comme en A1, possède la même population mondiale qui culmine au milieu du siècle et décline par la suite. Elle s'en distingue par un changement rapide des structures économiques qui se dirigent vers une économie de services et de l'information, avec une réduction du matérialisme et l'introduction de technologies propres et efficaces au niveau des ressources. L'emphase est mise sur des solutions globales quant à la durabilité du développement économique, social et environnemental, incluant une amélioration de l'équité, mais sans initiatives additionnelles concernant le climat.
- Famille B2** : décrit un monde où l'emphase est mise sur des solutions locales en ce qui concerne la durabilité du développement économique, social et environnemental. C'est un monde où la population mondiale croît continuellement, mais à un rythme plus lent que A2. Le développement économique se situe à un niveau intermédiaire et les changements technologiques sont moins rapides et moins diversifiés par rapport à B1 et A1. Bien que ce scénario soit aussi orienté vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, il est centré sur le local et le régional.

