
Exercices pour l'enseignement des enjeux socio-écologiques

Table des matières

Liste des exercices	3
Préambule	5
1 Modèles et scénarios	7
2 Les frontières planétaires	17
2.1 Les pollutions (nouvelles entités)	17
2.2 Le cycle de l'eau	19
2.3 Le cycle du phosphore	26
3 L'énergie	35
4 Le climat	53
5 L'empreinte carbone	85
6 La physique des transports	113
6.1 La voiture thermique	113
6.2 La voiture électrique	115
6.3 Le vélo	122
7 Regards sur la technologie	131
8 Les inégalités	145
Annexes	151
A Frottements	153
B Température d'un conducteur électrique cylindrique	155
C Données voitures	159
C.1 Voiture thermique	159
C.2 Voiture électrique	159
Références	161

Liste des exercices

1.1	Analyse d'un modèle historique, le modèle World3 — Nouveau!	7
1.2	Les scénarios de l'ADEME pour la neutralité carbone en 2050 — Nouveau!	11
1.3	Croissance exponentielle de la population — Nouveau!	12
2.1	Océan de plastiques	17
2.2	Un robot collecteur de microplastiques	19
2.3	Peut-il pleuvoir moins dans un climat plus chaud? — Nouveau!	19
2.4	Changement du bilan hydrique — Nouveau!	23
2.5	Formes chimiques et réactivité du phosphore dans l'environnement — Nouveau!	26
2.6	Appréhender le cycle naturel du phosphore — Nouveau!	29
2.7	Perturbations anthropiques du cycle biogéochimique du phosphore — Nouveau!	30
3.1	Consommation d'énergie et croissance	35
3.2	Jouons avec les unités d'énergie	36
3.3	Calcul de puissance	38
3.4	Puissance surfacique moyenne de différentes sources d'électricité	38
3.5	Des carburants fossiles aux biocarburants...	40
3.6	Pertes sur le réseau électrique	44
3.7	Combien de réacteurs nucléaires?	45
3.8	Réserves d'uranium	45
3.9	Consommation d'énergie et limites à la croissance	47
4.1	Du CO ₂ dans l'atmosphère	53
4.2	Réchauffement climatique : de Causes à Effet	54
4.3	Bilan radiatif du corps humain	57
4.4	Température d'équilibre de la Terre et des planètes	57
4.5	Rayonnement thermique	60
4.6	Réchauffement climatique	61
4.7	Bilan radiatif de la Terre	62
4.8	Effet d'une perturbation	64
4.9	Banquise et réchauffement climatique	67
4.10	Augmentation du niveau des océans	68
4.11	Pour quelques watts de plus...	70
4.12	Vénus	71
4.13	Corrélation température-CO ₂	73
4.14	SO ₂ , gaz à effet de serre?	77
4.15	Températures paléoclimatiques — Nouveau!	77
4.16	Perturbations anthropiques depuis 1850 — Nouveau!	79
4.17	Projections — Nouveau!	81
5.1	CO ₂ et GES	85
5.2	Bilan gaz à effet de serre d'un scooter	86
5.3	Comparaison des émissions carbone de trois modes de transport	88
5.4	Combustion du méthane	89
5.5	Bilan gaz à effet de serre des transports	89
5.6	Bilan gaz à effet de serre du chauffage résidentiel	92
5.7	Votre bilan de gaz à effet de serre individuel	94
5.8	Empreinte carbone d'un teeshirt	97
5.9	Empreinte carbone d'un VAE	103

5.10 Empreinte carbone & facteur d'émission d'un panneau photovoltaïque	105
5.11 Accélérateur de particules — <i>Nouveau!</i>	111
6.1 « 110 max » sur autoroute?	113
6.2 Combien de kilomètres?	115
6.3 ACV	117
6.4 Plein d'énergie	118
6.5 Un weekend de vacances	120
6.6 Le col d'Izoard	123
6.7 L'efficacité énergétique du vélo	126
6.8 Une transition écologique locale?	129
7.1 Ecotopia	131
7.2 Time for the Planet	132
7.3 Conquête spatiale... ou pas?	134
7.4 Résilience	137
7.5 Regards sur la technologie nucléaire	140
7.6 La technologie peut-elle nous sauver?	142
8.1 Climat et inégalités	145
8.2 Indice de Gini	149

Préambule

Ce recueil d'exercices de difficultés, longueurs, disciplines variées est proposé par des enseignants de l'équipe *Enseignement* de Labos1point5 et de l'association pour l'*Enseignement des Enjeux Socio-Écologiques dans le Supérieur* (EESES).

Il a vocation à s'enrichir. Vous pouvez proposer vos exercices originaux sur **tous les sujets** des enjeux socio-écologiques, pour **toutes les disciplines** de l'enseignement supérieur. Envoyez-les avec la correction à Guillaume Blanc (si possible en format $\LaTeX$ simple).

La version du 15 juillet 2026 contient 63 exercices. Ce recueil est actuellement biaisé du côté des sciences physique, chimique...

Les contributeurs actuels sont :

Guillaume Blanc (guillaume.blanc@ijclab.in2p3.fr)

Florent Brient

David Boilley (boilley@unicaen.fr)

Mathieu Chassé (mathieu.chasse@sorbonne-universite.fr)

Christophe Coillot (christophe.coillot@umontpellier.fr)

Romain Jarrier (romain.jarrier@upmc.fr)

Kévin Jean (kevin.jean@bio.ens.psl.eu)

Roland Lehoucq (roland.lehoucq@cea.fr)

Chapitre 1

Modèles et scénarios

Exercice 1.1 – Analyse d'un modèle historique, le modèle World3 — *Nouveau!*

Source : F. Brient et M. Chassé

Le modèle World3 a été implémenté dans le cadre du projet commandité par le Club de Rome en 1970 et financé par la fondation Volkswagen. Ce modèle informatique a été conçu pour représenter les mécanismes de croissance de la production de biens et services et d'usage des ressources nécessaires à cette production identifiés par ses concepteurs afin de proposer des scénarios plausibles concernant le futur de déterminer si la croissance démographique et économique atteindra des limites avant la fin du xxi^e siècle. Dans cette optique, les sorties du modèle visent à reproduire et à comprendre la dynamique de cinq tendances majeures : l'industrialisation, la population, la production alimentaire, les ressources et la détérioration de l'environnement afin de comprendre leur dynamique. Les résultats de ce modèle ont été présentés et discutés dans le cadre du rapport Meadows (dit aussi du Club de Rome) ¹. Nous proposons dans cette première partie d'analyser le modèle.

1. Définir les notions de stock et de flux et distinguer les notions de variable et de paramètre.

Réponse : Le stock est une quantité accumulée à un moment donné (population). Le flux sont les quantités ajoutées ou retirées des stocks par unité de temps. Une variable est une grandeur qui peut varier en fonction du temps et est influencée par les propriétés du modèle (stock, flux, paramètres). Un paramètre est une donnée fixe (constante) dans une simulation (valeur initiale ou coefficient).

2. La figure 1.1 présente les boucles d'évolution de la population et du capital. Identifier les variables de stock, les variables de flux et les paramètres dans ces deux cas.

Réponse : Les variables de stocks sont la population et le capital industriel. Les variables de flux sont le taux de naissance par année, le nombre de morts par année, l'investissement (nouveau capital par année) et la dépréciation (perte de valeur par année). Les paramètres d'entrée du modèle sont la fertilité, l'espérance de vie, le taux d'investissement, la durée de vie moyenne du capital. Les sorties industriels est un paramètre de sortie du modèle qui influence les flux.

3. Quelle équation différentielle écrire afin de décrire l'évolution de la population à partir des variables de flux identifiées précédemment?

1. Donella Meadows, Dennis Meadows et Jürgen Randers, *The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York : Universe Books, 1972.

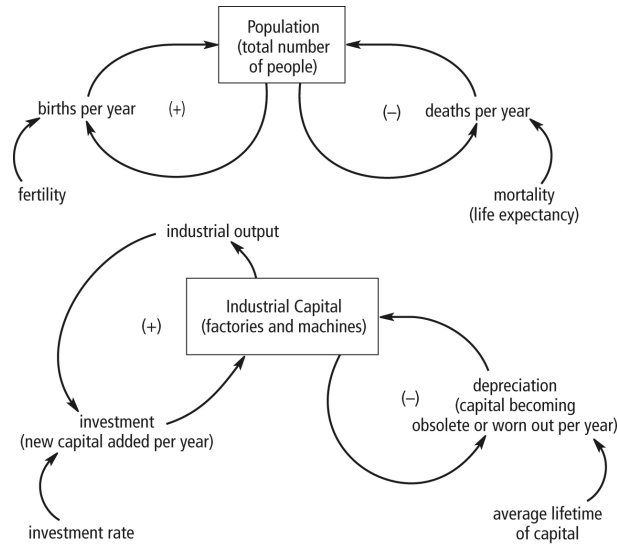


FIGURE 1.1 – Boucles d’évolution de la population et du capital telles que décrites dans le modèle World3 (d’après D. L. Meadows, D. H. Meadows et J. Randers, *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, édition des 50 ans, 2022)

Réponse : Une équation différentielle s’écrit sous la forme

$$\frac{\partial y}{\partial t}(t) = f(y) \quad (1.1)$$

Le changement temporel de la variable y dépend de la fonction $f(y)$ qui dépend la variable y initiale. Ici nous avons y la population, et nous définissons f comme une fonction linéaire de la population ($f(y) = \alpha \cdot y(t)$ avec α le flux affectant y). Ici, la population (POP) dépend du taux de natalité (t_{nat} augmentant POP) et du taux de mortalité (t_{mor} diminuant POP). Nous obtenons donc :

$$\frac{\partial \text{POP}}{\partial t}(t) = t_{nat} \cdot \text{POP}(t) - t_{mor} \cdot \text{POP}(t) \quad (1.2)$$

$$= (t_{nat} - t_{mor}) \cdot \text{POP}(t) \quad (1.3)$$

4. Comment la résoudre numériquement ?

Réponse : On peut utiliser la méthode d’Euler. En considérant un pas de temps Δt annuel ($\Delta t=1$), à l’année $n+1$, la population ($\text{POP}(n+1)$) peut s’écrire en fonction de la population à l’année n ($\text{POP}(n)$) de la manière suivante :

$$\frac{\text{POP}(n+1) - \text{POP}(n)}{\Delta t} = t_{nat} \cdot \text{POP}(n) - t_{mor} \cdot \text{POP}(n) \quad (1.4)$$

$$\text{POP}(n+1) = \text{POP}(n) + (t_{nat} \cdot \text{POP}(n) - t_{mor} \cdot \text{POP}(n)) \cdot \Delta t \quad (1.5)$$

$$\text{POP}(n+1) = \text{POP}(n) \cdot (1 + t_{nat} - t_{mor}) \quad (1.6)$$

5. Pour 2025, le *World Population Prospects* des Nations Unies fournit les estimations démographiques suivantes :

- Population mondiale : 8,2 milliards de personnes ;
- Taux de natalité : 16,1 naissances par an pour 1000 personnes ;

- Taux de mortalité : 7,7 décès par an pour 1000 personnes.

À partir de ces estimations et de l'équation précédente, prédire l'évolution de la population en 2100.

Réponse : On obtient un peu plus de 15 milliards de personnes en 2100 en utilisant ces valeurs (se fait avec une boucle Python ou bien dans un tableur en fonction de l'affinité des étudiant·e·s).

Pour l'année m , nous pouvons obtenir la suite à partir de l'équation précédente :

$$\text{POP}(n+m) = \text{POP}(n) \cdot (1 + t_{\text{nat}} - t_{\text{mor}})^m \quad (1.7)$$

Pour $m=75$ ans et $t_{\text{nat}} - t_{\text{mor}}=8,4/1000$, nous obtenons $\text{POP}(n+75)=15.3$ milliards de personnes.

6. Ce même rapport estime en réalité que la population devrait se stabiliser à un peu plus de 10 milliards de personnes à l'horizon 2100. Comment expliquer la différence avec le résultat précédent?

Réponse : Ici les taux de natalité et de mortalité sont restés constants. Ils peuvent néanmoins évoluer avec le temps. Si le taux de natalité égale le taux de mortalité, la population est stable dans le temps.

Le modèle World3 est évidemment plus complexe puisqu'il prend en compte la dynamique des systèmes et donc les rétroactions qui font que les paramètres contrôlant les variables de flux ne restent pas constants comme c'était le cas dans cet exemple mais sont affectés par l'évolution des autres variables. La figure 1.4 présente l'ensemble des variables de flux et de stocks du modèle World3.

7. Identifier les ensembles de variables associées aux principales grandeurs étudiées en sortie du modèle : les ressources, la population, la nourriture, la production et la pollution.

Réponse : Elles sont facilement identifiables dans la figure simplifiée, l'idée est, si le temps le permet, de discuter des influences relatives et de mettre de la réalité sur les variables de stock et de flux, les paramètres.

La figure 1.2 présente les résultats de l'exécution standard du modèle, à savoir une évolution dite « business as usual », c'est-à-dire qui suit l'évolution tendancielle observée sur les années de calibration du modèle.

8. Discuter des modalités de construction du modèle à partir de cette figure.

Réponse : Le modèle est construit à partir des données réelles sur la période 1900–1970. Les paramètres sont ajustés sur cette base pour reproduire au mieux les tendances (ce qui pose des questions sur la validité du modèle, une des limites étant qu'on utilise des corrélations entre différentes variables pour définir des paramètres, comme s'il y avait des liens de causalité entre eux (par exemple on corrèle le capital disponible par personne aux services de santé disponibles, or on sait que s'il y a une corrélation, des choix politiques peuvent amener à un système de santé (et donc des services disponibles) très différents pour des niveaux de richesse identiques, voir comparaison système de santé aux États-Unis basé sur

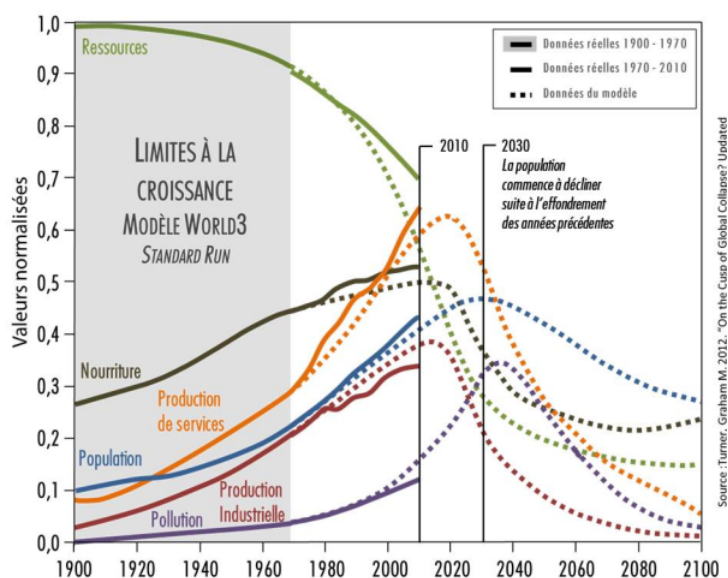


FIGURE 1.2 – Sorties du modèle World3 calibré sur la période 1900–1970 dans le scénario « Business as usual » (d’après G. M. Turner, *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 21 :2, 116-124, 2012)

un accès qui dépend du niveau de revenu ou des assurances et dans des pays avec un système de sécurité sociale universel). Ensuite, on observe que ça suit bien les évolutions réelles jusqu’en 2010, avec quelques décalages.

9. Comment se comporte le modèle dans ce scénario? Qu’est-ce que cela signifie en termes de capacité de charge du système Terre par rapport à l’impact humain?

Réponse : Après 1970, la simulation suggère la continuité de ces tendances jusqu’en 2020 environ. La production industrielle et la production de service commencent à diminuer après 2020. Ceci est associée à une diminution de la nourriture disponible. La population présente un maximum vers 2030, avec une diminution liée à un taux de mortalité supérieur au taux de natalité qui peut être associée à l’augmentation de la pollution ou une diminution de la nourriture disponible. La pollution continue à augmenter pour atteindre un maximum vers 2040. Les ressources diminuent et stabilisent vers la fin du siècle seulement. Cela signifie que la croissance des stocks et flux sur une période donnée finira par entraîner une diminution de la capacité de production et provoquera une rétroaction négative sur cette croissance. Ceci suggère qu’avec les ressources disponibles, le système de Terre présente des limites au développement de l’humain sur les trajectoires qui ont été suivies au XX^e siècle (capacité de charge). Dépasser ces limites peut entraîner un effondrement partiel ou total des stocks.

La figure 1.3 présente les résultats de l’exécution du modèle pour trois scénarios différents dont les hypothèses sont résumées dans la légende.

10. Identifier pour chacun de ces scénarios les variables qui ont été modifiées pour appliquer ces scénarios dans le modèle et discuter du comportement du modèle dans chaque cas.

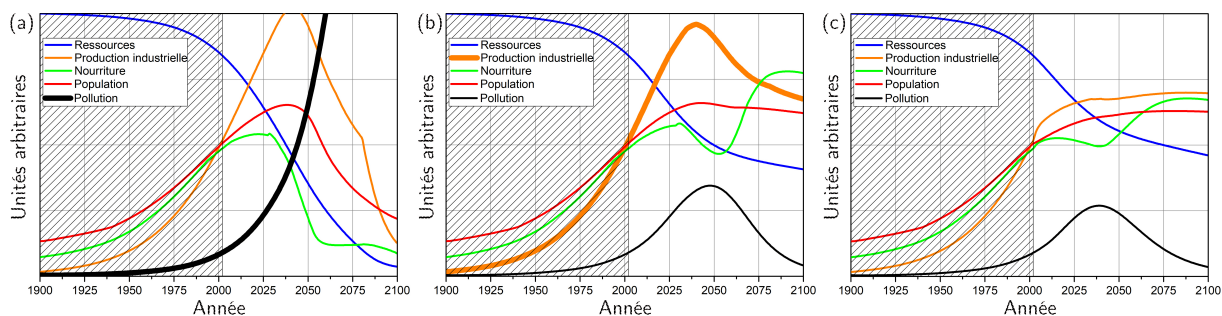


FIGURE 1.3 – Sorties du modèle World3 sur la période 1900–2002 pour trois scénarios distincts débutant en 2002 : (a) l’abondance des ressources disponibles est multipliée par deux et l’efficacité technologique augmente favorisant l’efficace dans l’usage des ressources; (b) les hypothèses précédentes sont conservées et des technologies de dépollution, d’augmentation des rendements agricoles et de lutte contre l’érosion des sols sont développées; (c) on conserve les hypothèses des deux précédents scénarios et le taux de natalité et la production industrielle sont limités (d’après D. L. Meadows, D. H. Meadows, et J. Randers, *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, édition des 50 ans, 2022).

Réponse :

- Scénario 1 : L’augmentation des ressources disponibles et l’efficacité de leur utilisation permet seulement de décaler de quelques années l’effondrement de la production, de la nourriture et de la population. C’est la pollution qui semble engendrer l’effondrement.
- Scénario 2 : Des avancées technologies permettent de contrôler la pollution et de maintenir une quantité de nourriture significative. Ces modifications réduisent l’épuisement des ressources et la diminution de la production industrielle (sans empêcher sa chute). L’augmentation de la capacité de production de nourriture permet de réduire la baisse de population. Après une augmentation jusqu’en 2045, la pollution est réduite. Ce scénario permet une stabilisation après une période d’effondrement partiel.
- Scénario 3 : Le contrôle des taux de natalité et de production industrielle permettent de stabiliser la population totale, l’utilisation de ressources et le production de nourriture. Seul le scénario associant une augmentation de ressources, de l’efficacité de production industrielle et de nourriture et une limite sur le taux de natalité permet une durabilité de l’être humain dans le système Terre sans conséquence grave pour les sociétés humaines.

11. Discuter des implications de ces résultats, si l’on considère le modèle comme valide, en termes de leviers d’action pour stabiliser le système Terre.

Réponse : La capacité à réduire l’impact de l’humain sur Terre passerait par une association entre (1) des améliorations technologiques pour augmenter la productivité et réduire la pollution et (2) un contrôle sur la croissance de la population et une limite sur la production industrielle (sobriété).

Exercice 1.2 – Les scénarios de l’ADEME pour la neutralité carbone en 2050 — **Nouveau!**

Source : F. Brient et M. Chassé

Afin d’aider à la prise de décision et de construire des chemins compatibles avec les objectifs sociaux et écologiques fixés à différentes échelles spatiales et temporelles, différentes institutions pro-

duisent des scénarios. C'est le cas de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ou Agence de la transition écologique) qui a produit récemment quatre scénarios théoriquement compatibles avec la neutralité carbone pour la France à l'horizon 2050. Ils sont présentés en Figure 1.5.

1. Qu'est ce qui distingue un modèle d'un scénario?

Réponse : Un modèle est une représentation simplifiée (mathématique, numérique) d'un système réel. Un scénario fournit les conditions aux limites du modèle ainsi que des contraintes sur les paramètres et permet une application spécifique de celui-ci.

2. Lorsque c'est possible, imaginer comment intégrer les différentes mesures proposées dans un modèle comme World3?

Réponse : Dans les différents scénarios, nous voyons un certain de limites proposées qui peuvent être imposées sur le taux de production industrielle (frugalité, quota, recyclage, réutilisation). Ceci concerne principalement les scénarios S1 et S2. Un autre champ de mesure important concerne l'augmentation de l'efficacité énergétique (rénovation, nouvelles technologies, consommation plus faible, innovation). L'augmentation des rendements agricoles n'est pas beaucoup mentionné, à part sur la valorisation du bio ou des protéines de synthèse. Il manque des variables importantes : dépollution, lutte contre l'érosion des sols, limite de taux de natalité.

3. Quels effets attendre des différents scénarios sur l'évolution des paramètres environnementaux autres que les émissions carbone? Discuter ces effets dans le cadre conceptuel des différentes frontières planétaires présenté en cours.

Réponse : mais on peut identifier des grandes tendances, sur les technologies vertes et a fortiori sur le pari réparateur. L'augmentation de la consommation de viande implique des pressions qui augmentent sur les écosystèmes avec leurs conséquences sur la biodiversité et sur la perturbation des cycles biogéochimiques. Construction implique consommation de ressources minérales et d'énergie. Pressions sur les ressources minérales aussi au travers des développements technologiques. Évidemment les cycles de l'eau sont affectés (pression sur l'eau pour l'exploitation des ressources, pour la production d'énergie (refroidissement de centrales, énergie hydraulique) pour l'agriculture.

4. Discuter du scénario que vous préféreriez, identifier les valeurs qui sous-tendent ce choix et préparer un argumentaire pour défendre votre position.

Réponse : C'est une question ouverte afin d'ouvrir la discussion et de lancer le débat dans la séance.

Exercice 1.3 – Croissance exponentielle de la population — *Nouveau!*

Source : G. Blanc

En 2024, la population mondiale est de 8,1 milliards de personnes et son taux de croissance est de 0,8 %/an.

1. La population mondiale augmente de combien de personnes chaque année?

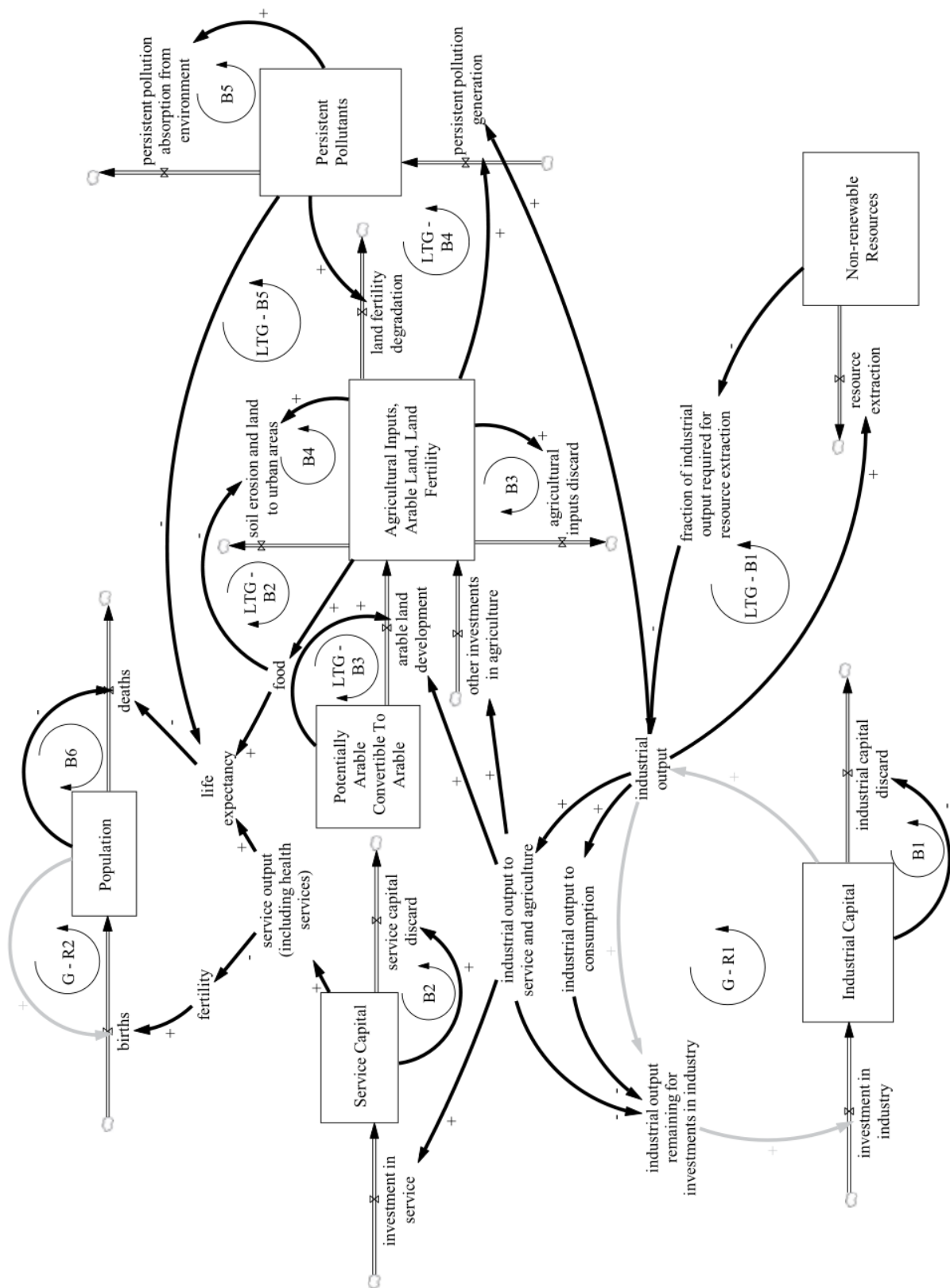


FIGURE 1.4 – Schéma de stocks et de flux de la structure du modèle World3 (Pasqualino et Jones, *Resources, Financial Risk and the Dynamics of Growth : Systems and Global Society*, 2020)

Réponse :

$$8,1 \cdot 10^9 \times 0,8 \cdot 10^{-2} = 65 \cdot 10^6$$



S1 GÉNÉRATION FRUGALE

MODES DE VIE	Société	- Recherche de sens - Frugalité choisie mais aussi contrainte - Préférence pour le local - Nature sanctuarisée
	Alimentation	- Division par 3 de la consommation de viande - Part du bio : 70 %
	Habitat	- Rénovation massive et rapide - Limitation forte de la construction neuve (transformation de logements vacants et résidences secondaires en résidences principales)
	Mobilité des personnes	- Réduction forte de la mobilité - Réduction d'un tiers des km parcourus par personne - La moitié des trajets à pied ou à vélo
ÉCONOMIE	Technique	- Innovation autant organisationnelle que technique - Règne des low-tech, réutilisation et réparation - Numerique collaboratif - Consommation des <i>data centers</i> stable grâce à la stabilisation des flux
	Gouvernance	- Décision locale, faible coopération internationale - Réglementation, interdiction et rationnement <i>via</i> des quotas
	Territoire	- Rôle important du territoire pour les ressources et l'action « Démétropolisation » en faveur des villes moyennes et des zones rurales
	Macro-économie	- Nouveaux indicateurs de prospérité (écarts de revenus, qualité de la vie...) - Commerce international contracté
ÉCONOMIE	Industrie	- Production au plus près des besoins 70 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage



S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

MODES DE VIE	Société	- Évolution soutenable des modes de vie - Économie du partage - Équité - Préservation de la nature inscrite dans le droit
	Alimentation	- Division par 2 de la consommation de viande - Part du bio : 50 %
	Habitat	Rénovation massive, évolutions graduelles mais profondes des modes de vie (cohabitation plus développée et adaptation de la taille des logements à celle des ménages)
	Mobilité des personnes	- Mobilité maîtrisée - 17 % de km parcourus par personne - Près de la moitié des trajets à pied ou à vélo
ÉCONOMIE	Technique	- Investissement massif (efficacité énergétique, ENR et infrastructures) - Numerique au service du développement territorial - Consommation des <i>data centers</i> stable grâce à la stabilisation des flux
	Gouvernance	- Gouvernance partagée - Fiscalité environnementale et redistribution - Décisions nationales et coopération européenne - Reconquête démographique des villes moyennes - Coopération entre territoires - Planification énergétique territoriale et politiques foncières
	Territoire	- Croissance qualitative, « réindustrialisation » de secteurs clés en lien avec territoires - Commerce international régulé
	Macro-économie	- Production en valeur plutôt qu'en volume - Dynamisme des marchés locaux 80 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage



S3 TECHNOLOGIES VERTES

MODES DE VIE	Société	- Plus de nouvelles technologies que de sobriété - Consumérisme « vert » au profit des populations solvables, société connectée - Les services rendus par la nature sont optimisés
	Alimentation	- Baisse de 30 % de la consommation de viande - Part du bio : 30 %
	Habitat	- Déconstruction-reconstruction à grande échelle de logements - Ensemble des logements rénovés mais de façon peu performante : la moitié seulement au niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC)
	Mobilité des personnes	- Mobilités accompagnées par l'état pour les maillages : infrastructures, télétravail massif, covoiturage + 13 % de km parcourus par personne 30 % des trajets à pied ou à vélo
ÉCONOMIE	Technique	- Ciblage sur les technologies les plus compétitives pour décarboner - Numerique au service de l'optimisation - Les <i>data centers</i> consomment 10 fois plus d'énergie qu'en 2020
	Gouvernance	- Cadre de régulation minimale pour les acteurs privés - État planificateur - Fiscalité carbone ciblée
	Territoire	Métropolisation, mise en concurrence des territoires, villes fonctionnelles
	Macro-économie	- Croissance verte, innovation poussée par la technologie - Spécialisation régionale - Concurrence internationale et échanges mondialisés
ÉCONOMIE	Industrie	- Décarbonation de l'énergie 60 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage



S4 PARI RÉPARATEUR

MODES DE VIE	Société	- Sauvegarde des modes de vie de consommation de masse - La nature est une ressource à exploiter - Confiance dans la capacité à réparer les dégâts causés aux écosystèmes
	Alimentation	Consommation de viande quasi-stable (baisse de 10 %), complétée par des protéines de synthèse ou végétales
	Habitat	- Maintien de la construction neuve - La moitié des logements seulement est rénovée au niveau BBC - Les équipements se multiplient, alliant innovations technologiques et efficacité énergétique
	Mobilité des personnes	- Augmentation forte des mobilités + 28 % de km parcourus par personne - Recherche de vitesse 20 % des trajets à pied ou à vélo
ÉCONOMIE	Technique	- Innovations tout azimut - Captage, stockage ou usage du carbone capté indispensable - Internet des objets et intelligence artificielle omniprésents : les <i>data centers</i> consomment 15 fois plus d'énergie qu'en 2020
	Gouvernance	- Soutien de l'offre - Coopération internationale forte et ciblée sur quelques filières clés - Planification centralisée du système énergétique
	Territoire	Faible dimension territoriale, étalement urbain, agriculture intensive
	Macro-économie	- Croissance économique carbonée - Fiscalité carbone minimaliste et ciblée - Économie mondialisée
ÉCONOMIE	Industrie	- Décarbonation de l'industrie partant sur le captage et stockage géologique de CO₂ 45 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage

FIGURE 1.5 – Synthèse générale des quatre scénarios proposés par l'ADEME visant à une neutralité carbone à l'horizon 2050 (ADEME, *Prospective – Transition(s) 2050, Résumé exécutif*, 2024)

65 millions de personnes en plus chaque année.

2. En supposant ce taux constant (ce qui est actuellement faux, il décroît), au bout de combien de temps la population double ?

Réponse : On a une croissance exponentielle, donc :

$$P(\Delta t) = P(0) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t}$$

où $P(\Delta t)$ est la population doublée au bout de Δt , $P(0)$ est la population initiale (en 2024), α est le taux de croissance de la population.

Soit :

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left(\frac{P(\Delta t)}{P(0)} \right)$$

Avec $P(\Delta t) = 2 \times P(0)$ et $\alpha = 0,008 \text{ an}^{-1}$, on obtient :

$$\Delta t = \frac{1}{0,008} \cdot \ln 2 = 86 \text{ ans}$$

3. En 1974, la population mondiale était de 4 milliard de personnes. En supposant une croissance exponentielle constante entre 1974 et 2024, quel est le taux de croissance moyen sur cette période ?

Réponse : On a :

$$P(2024) = P(1974) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t}$$

Soit :

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \frac{P(2024)}{P(1974)}$$

D'où :

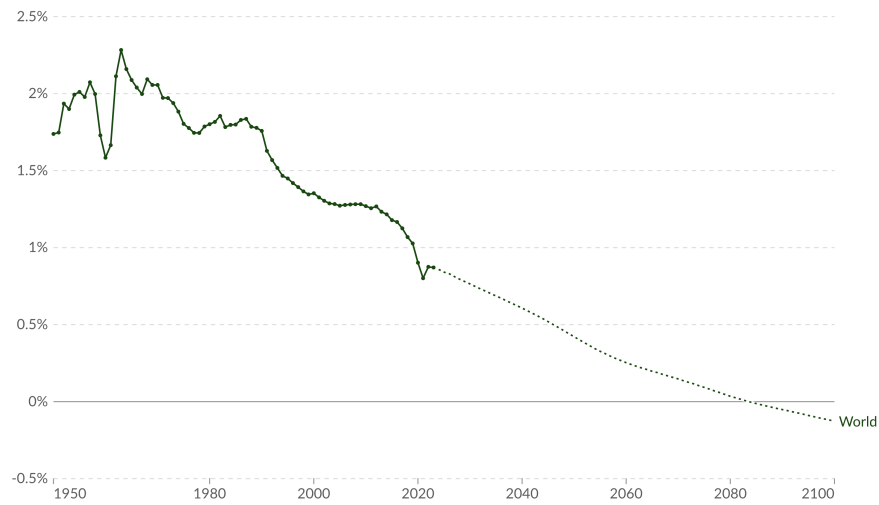
$$\alpha = \frac{1}{2024 - 1974} \times \ln \frac{8,1 \cdot 10^9}{4 \cdot 10^9} = 0,014 \text{ an}^{-1}$$

Complément : le taux de croissance de la population mondiale décroît depuis environ 1970 où il était d'environ 2 % comme l'indique la figure ci-dessous (Source : Our World in Data).

Population growth rate, 1950 to 2100

Our World
in Data

Annual population change determined by births, deaths, and migration, expressed as a percentage of the population. Future projections are based on the UN's medium scenario¹.



Data source: UN, World Population Prospects (2024)

OurWorldinData.org/population-growth | CC BY

¹ **United Nations projection scenarios** The United Nations' World Population Prospects include a range of projected scenarios for population change. These scenarios rely on different assumptions for fertility, mortality, and migration patterns to project different demographic futures.
[Read more on population.un.org](https://population.un.org/)

Chapitre 2

Les frontières planétaires

2.1 Les pollutions (nouvelles entités)

Exercice 2.1 – Océan de plastiques

Source : G. Blanc

La quasi-totalité du plastique que nous jettons (dans la poubelle jaune ou pas) se retrouve in fine dans la nature. Le plastique se dégrade en petits morceaux, les microplastiques de rayon moyen $R_P = 1,5 \text{ mm}$ (en supposant qu'ils soient sphériques¹). La masse volumique du plastique est en moyenne $\rho_P = 1 \text{ g/cm}^3$, il a donc tendance à flotter sur l'eau. En revanche, les molécules de plastique ne sont pas dégradées par les écosystèmes, les microparticules s'y accumulent donc. Et se retrouvent dans la chaîne alimentaire.

1. Sachant que le rayon de la Terre est $R_T = 6371 \text{ km}$ et que la proportion en surface des mers et océans est de $f = 71 \%$, quelle est la surface des mers et océans?

Réponse : La surface de la Terre est donnée par :

$$S_T = 4 \cdot \pi \cdot R_T^2$$

soit :

$$S_T = 4 \times \pi \times 6371^2 = 510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$$

La surface des mers et océans est alors :

$$S_O = S_T \times f = 510 \cdot 10^6, 71 = 362 \cdot 10^6 \text{ km}^2 = 362 \text{ Mkm}^2$$

On estime qu'il y a $N_P = 170 \cdot 10^{12}$ morceaux de microplastiques (Eriksen et al. 2023) qui flottent entre la surface et $H_P = 5 \text{ m}$ de profondeur sur l'ensemble de la surface des mers et océans.

2. Quelle est la concentration surfacique C_P^S des microplastiques?

Réponse : On a :

$$C_P^S = \frac{N_P}{S_O} = \frac{170 \cdot 10^{12}}{362 \cdot 10^6} = 470000 \text{ km}^{-2}$$

1. Eriksen et al. 2023 donne $1,36 \cdot 10^{-2} \text{ g}$ pour la masse moyenne des microplastiques. En supposant une masse volumique de 1 g/cm^3 et une forme sphérique, on obtient un rayon moyen de $1,5 \text{ mm}$.

3. Quelle est leur concentration volumique C_P^V ?

Réponse : On a :

$$C_P^V = \frac{N_P}{S_O \cdot H_P} = \frac{170 \cdot 10^{12}}{362 \cdot 10^6 \times 5 \cdot 10^{-3}} = 1,81 \cdot 10^6 \text{ km}^{-3} = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-3}$$

4. La masse moyenne d'un microplastique est de $m_P = 1,36 \cdot 10^{-2}$ g. Quelle est la concentration massique C_P^m correspondante?

Réponse : On a :

$$C_P^m = C_P^V \cdot m_P = 1,81 \cdot 10^{-3} \times 1,36 \cdot 10^{-2} = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Une gorgée humaine a un volume d'environ $V_G = 4$ cL. Une baleine bleue filtre en moyenne $V_B = 17000 \text{ m}^3$ d'eau par jour pour se nourrir (Savoca et al. 2021).

5. Quelle est la probabilité d'avaler un morceau de microplastique en buvant la tasse en se baignant en bord de mer?

Réponse : Il faut déterminer le nombre de morceaux de microplastiques dans une gorgée. Soit :

$$N_P^G = C_P^V \cdot V_G = 1,81 \cdot 10^{-3} \times 4 \cdot 10^{-5} = 7,24 \cdot 10^{-8}$$

Il faudrait avaler 13,8 millions de gorgées pour être sûr d'avaler un morceau de microplastique. Pas trop de risque!

Mais la concentration des microplastiques en bord de mer est probablement bien plus élevée que la moyenne. Et si on regarde l'ensemble des baigneurs buveurs de tasse, ce n'est (peut-être) plus si négligeable.

6. Une baleine avale combien de microplastiques par jour en moyenne?

Réponse :

$$N_P^B = C_P^V \cdot V_B = 1,81 \cdot 10^{-3} \times 17000 = 31$$

Soit 11 231 par an!!

7. Cela fait quel masse de plastique m_P^B ingurgitée par jour? Et par an?

Réponse : Par jour :

$$m_P^B = N_P^B \cdot m_P = 31 \times 1,36 \cdot 10^{-2} = 0,42 \text{ g}$$

Par an :

$$m_P^B = N_P^B \cdot m_P = 31 \times 365 \times 1,36 \cdot 10^{-2} = 153 \text{ g}$$

C'est énorme!!

Exercice 2.2 – Un robot collecteur de microplastiques

Source : G. Blanc

Cho et al. 2025 proposent un concept de robot pour récolter les microplastiques à la surface des océans à l'aide de la force de capillarité². Leur prototype est petit. Imaginons un modèle industriel dont la « bouche » collectrice aurait une taille de $L = 10$ m de large et de $p = 5$ m de profondeur, qui pourrait naviguer à la vitesse de $v_r = 10$ nœuds soit 18,52 km/h.

1. Quel volume d'eau V_e est filtré par le robot en une seconde?

Réponse : La vitesse du robot est 5,14 m/s, avec une « bouche » de $10 \times 5 = 50$ m², cela fait $v_e = 257$ m³/s.

2. Combien de temps d_f lui faudra-t-il pour traiter tout le volume des mers et océans contenant des microplastiques (voir exercice 2.1)? Mettez le résultat dans l'unité adéquate. Concluez.

Réponse : Le volume d'océan contenant des microplastiques est :

$$V_P = 362 \cdot 10^{12} \times 5 = 1,81 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$$

La durée nécessaire au robot pour filtrer tout cela est donc :

$$d_f = \frac{1,81 \cdot 10^{15}}{257} = 7,0 \cdot 10^{12} \text{ s} = \frac{7,0 \cdot 10^{12}}{3,14 \cdot 10^7} = 224\,000 \text{ ans}$$

Ou alors 200 000 robots en un an (à construire, ce qui consomme de la matière, de l'énergie et du... plastique)!

Ce n'est pas gagné, d'autant qu'on en ajoute plus chaque année, c'est un Sisyphe...

Il faudrait évidemment repêcher le plastique qui s'accumule dans l'environnement mais il vaudrait surtout chercher à réduire voire stopper les rejets de plastiques dans les écosystèmes...

2.2 Le cycle de l'eau

Exercice 2.3 – Peut-il pleuvoir moins dans un climat plus chaud? — **Nouveau!**

Source : F. Brient et M. Chassé

La précipitation annuelle est le résultat de journées avec et sans pluie, et de journées avec de fortes et faibles précipitations. Nous pouvons définir cette précipitation moyenne $\bar{P}$ de la façon suivante :

$$\bar{P} = (1 - f_d) \cdot \bar{P}_w \quad (2.1)$$

avec f_d la fréquence de journées sans pluie ($P < 0,1$ mm/jour) et $\bar{P}_w$ la précipitation moyenne des journées pluvieuses³. Nous avons donc deux indices influençant la pluie moyenne.

1. Le tableau 2.1 montre les valeurs de $\bar{P}$, $\bar{P}_w$ et la fraction de jours secs pour différentes localisations autour de l'Europe (Fig 2.1). Complétez le tableau en calculant la précipitation moyenne à partir l'équation 2.1. Quelles principales conclusions tirez-vous de ce tableau?

2. Voir aussi cet article : https://www.lemonde.fr/sciences/article/2025/01/10/un-robot-flottant-pour-ecumer-les-microplastiques_6491123_1650684.html

3. Cette méthodologie est basée sur le travail de thèse de Julie André [1] [2]

	Brest	Nice	Valencia	Stockholm	Samos	South Uist	Ksara
$\bar{P}$ mesurée (mm/j)	3,2	2,1	1,2	1,4	1,7	3,3	2,0
$\bar{P}_w$ (mm/j)	5,3	7,1	6,6	3,2	10,7	4,4	10,2
f_d (%)	39,2	71,0	81,3	55,0	84,3	24,6	79,8
$\bar{P}$ calculé (mm/j)							

TABLE 2.1 – Mesures moyennes (1860–2021) de la précipitation totale ($\bar{P}$), de la précipitation des jours humides ($\bar{P}_w$) et de la fréquence des jours secs (f_d) pour sept localités. Source : [E-OBS]

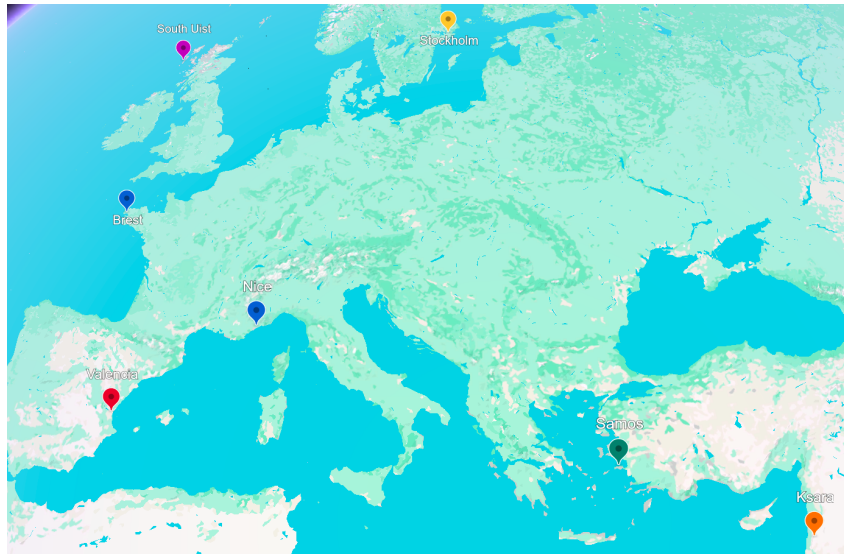


FIGURE 2.1 – Localisation des 7 villes étudiées

Réponse : L'équation proposée est très fidèle aux mesures. Par ailleurs, les précipitations moyennes peuvent être importantes (cas de Samos, localité la plus pluvieuse) en dépit de la forte fréquence de jours secs (84,3% pour Samos). À l'inverse les précipitations moyennes P_w peuvent être faibles (South Uist, deuxième localité la moins pluvieuse) mais la fréquence de jour secs très faible (South Uist est la localité la plus fréquemment arrosée). On a d'ailleurs plutôt une tendance à avoir peu de jours secs dans les localités avec le moins de précipitation et à l'inverse des précipitation peu fréquentes dans les localités où les précipitations sont intenses. La précipitation $\bar{P}$ représente moins la variabilité météorologique entre localités.

	Brest	Nice	Valencia	Stockholm	Samos	South Uist	Ksara
$\bar{P}$ mesurée (mm/j)	3,2	2,1	1,2	1,4	1,7	3,3	2,0
$\bar{P}_w$ (mm/j)	5,3	7,1	6,6	3,2	10,7	4,4	10,2
f_d (%)	39,2	71,0	81,3	55,0	84,3	24,6	79,8
$\bar{P}$ calculé (mm/j)	3,2	2,1	1,2	1,4	1,7	3,3	2,1

2. Dérivez l'équation du changement relatif de précipitation moyenne $\frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}}$ à l'équation 2.1.

Réponse :

$$\frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}} = \Delta \ln(\bar{P}) \quad (2.2)$$

$$= \Delta \ln((1 - f_d) \cdot \bar{P}_w) \quad (2.3)$$

$$= \Delta \ln(1 - f_d) + \Delta \ln(\bar{P}_w) \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}} = \frac{\Delta \bar{P}_w}{\bar{P}_w} - \frac{\Delta f_d}{1 - f_d} \quad (2.5)$$

3. À partir des connaissances du cours et de cette équation, interprétez les changements de précipitation attendus. Dans quelle condition la précipitation moyenne peut diminuer ?

Réponse : Sachant qu'un air plus chaud contient plus de vapeur d'eau, les précipitations annuelles vont avoir tendance à augmenter, donc $\frac{\Delta \bar{P}_w}{\bar{P}_w} > 0$. À partir de l'équation précédente, cela suggère que les précipitations moyenne annuelles augmentent si la fréquence des jours secs (Δf_d) ne changent pas. Le changement du nombre de jours sec est plus complexe. Nous pouvons néanmoins dire qu'il est possible d'avoir une diminution des précipitation moyenne $\Delta \bar{P} < 0$ quand $\frac{\Delta \bar{P}_w}{\bar{P}_w} < \frac{\Delta f_d}{1 - f_d}$, c'est-à-dire quand l'augmentation relative de la fréquence des jours secs est plus intense que l'augmentation relative des précipitations.

	Brest	Nice	Valencia	Stockholm	Samos	South Uist	Ksara
f_d' (%)	45	76	85	53	89	28	86
$\Delta \bar{T}_s$ (K)	3,1	4,2	3,4	4,6	3,8	2,4	5,1
Δf_d (%)							
$\Delta \bar{P}_w$ (mm/j)							
$\Delta \bar{P}$ (mm/j)							

TABLE 2.2 – Pour un scénario de forte augmentation en gaz à effet de serre (RCP8.5), on note la moyenne multi-modèle de la fréquence des jours secs à la fin du siècle (f_d') et du changement de température à la surface ($\Delta \bar{T}_s$) relativement au climat récent (1970–2000). Les changements de fréquence de jours secs (Δf_d), les changements de précipitation des jours humides ($\Delta \bar{P}_w$), et les changements de précipitation totale ($\Delta \bar{P}$) sont à calculer.

4. Le tableau 2.2 indique les projections à la fin du siècle (2070–2100) à partir de modèles climatiques régionaux pour un scénario intense d'augmentation en CO_2 . À partir de la question 2 et en supposant que les précipitations varient comme prédit par la relation de Clausius–Clapeyron, complétez le tableau et estimez le changement de pluies attendu à ces différents endroits.

Réponse : En supposant une augmentation relative des pluies de 5,5%/K, on complète la

tableau 2.2 en utilisant la formule :

$$\Delta \bar{P} = \bar{P} \left(\frac{\Delta \bar{P}_w}{\bar{P}_w} - \frac{\Delta f_d}{1 - f_d} \right) \quad (2.6)$$

$$= \bar{P} \left(0.055 \cdot \Delta T_s - \frac{f'_d - f_d}{1 - f_d} \right) \quad (2.7)$$

Nous voyons que les précipitations augmentent dans la moitié des localités, sauf à Valencia, SAmos et Ksara. Vous remarquez que ce sont les endroits les plus secs (fort f_d) qui présentent des diminuent de précipitations. AU premier ordre, ce sont les conséquences du processus "dry get drier, wet get wetter".

	Brest	Nice	Valencia	Stockholm	Samos	South Uist	Ksara
f'_d (%)	45	76	85	53	89	28	86
ΔT_s (K)	3,1	4,2	3,4	4,6	3,8	2,4	5,1
$\frac{\Delta f_d}{1 - f_d}$ (-)	0,09	0,17	0,19	-0,04	0,30	0,04	0,31
$\frac{\Delta \bar{P}_w}{\bar{P}_w}$ (-)	0,17	0,23	0,19	0,25	0,21	0,13	0,28
$\Delta \bar{P}$ (mm/j)	0,24	0,12	-0,01	0,42	-0,15	0,29	-0,05

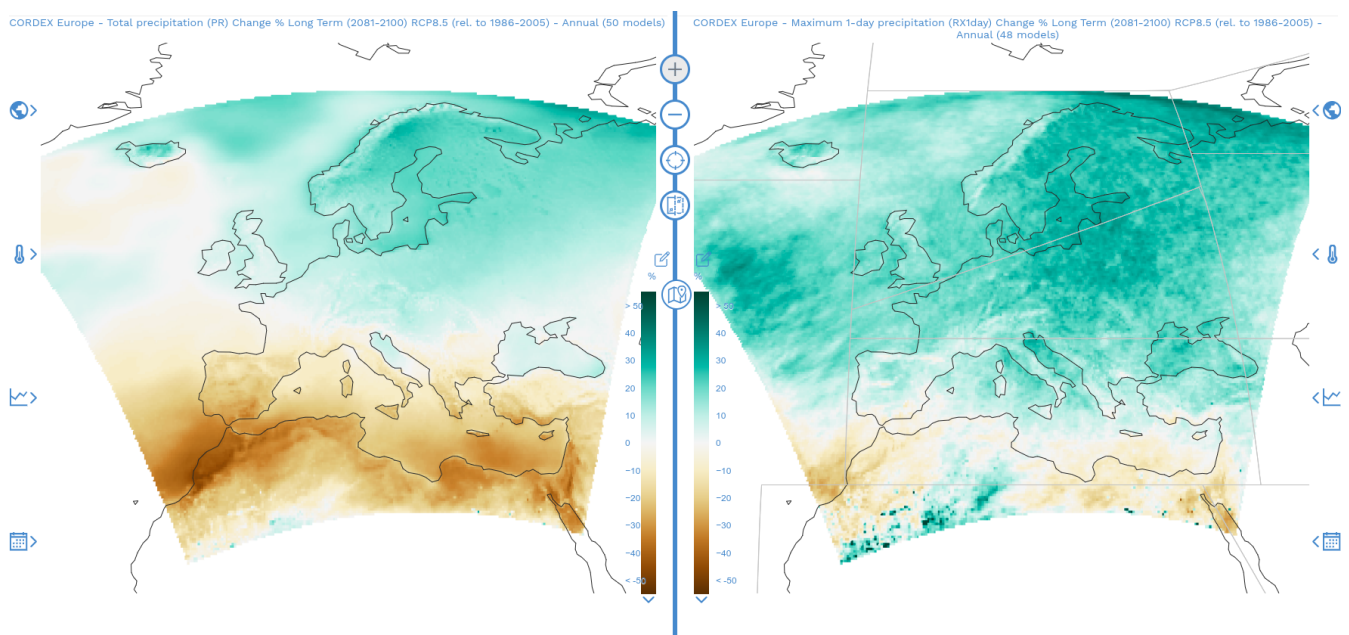


FIGURE 2.2 – Changement relatif de précipitation moyenne $\bar{P}$ (gauche) et du maximum journalier Rx1day (droite) à la fin du siècle (2081-2100) relativement au présent (1986-2005) sous une projection d'augmentation forte du niveau en gaz à effet de serre (simulation EURO-CORDEX historique et RCP8.5). Source : [Atlas IPCC](#)

- La figure 2.2a montre les changements relatifs de précipitation moyenne. Commentez la carte. Est-ce cohérent avec vos résultats?

Réponse : La carte montre que les régions déjà humides, au nord, vont devenir plus humides et celles déjà sèches, au sud, vont devenir plus sèches. C'est en accord avec les données du tableau qui montrent que des villes comme Brest ou South Uist vont devenir plus humides, tandis que des villes comme Valencia, Samos ou Ksara vont devenir plus sèches.

6. La figure 2.2b montre les changements relatifs du maximum de précipitation journalière ($R_{x1\text{ day}}$). Dans quelles régions ces changements sont différents du $\Delta\bar{P}$? Que cela signifie-t-il pour les populations locales?

Réponse : Dans les régions du sud de la carte qui présentent une baisse des précipitations moyennes, on observe aussi, en dehors de la côte sud de la mer Méditerranée, une augmentation de l'intensité des précipitations lors du maximum journalier. L'intensité des événements extrêmes va donc augmenter dans la majorité des régions présentées sur la carte. L'aléa climatique associé aux précipitation extrêmes va donc augmenter et donc le risque climatique, si aucune mesure ne limitant la vulnérabilité des populations locales n'est prise. L'exemple récent des inondations de Valencia (28–29 octobre 2024) est caractéristique de cette situation, avec un assèchement moyen de la région espagnole mais des précipitations instantanées plus fortes.

Exercice 2.4 – Changement du bilan hydrique — *Nouveau!*

Source : F. Brient et M. Chassé

L'évolution temporelle du stock d'eau dans une nappe phréatique peut être modélisé par l'équation du bilan hydrique suivante

$$\frac{dS}{dt} = P(t) - R(t) - E(t) - Q(t) \quad (2.8)$$

avec

- $S(t)$: le stock d'eau dans la nappe phréatique (m^3)
- $P(t)$: la précipitation (m^3/an)
- $R(t)$: le ruissellement (m^3/an)
- $E(t)$: l'évapotranspiration (m^3/an)
- $Q(t)$: le débit d'extraction pour les usages humains (m^3/an)

Le rechargement de la nappe dépend de la différence entre la pluie moyenne P et les pertes associées au ruissellement R (dépendant de la porosité du sol), à l'évapotranspiration E (dépendant de la température et du type de végétation) et au débit d'extraction Q qui dépend des besoins des populations (agricoles, industriels, domestiques).

1. Dans un premier temps, on suppose P , R , E et Q comme des valeurs constantes. Résolvez l'équation différentielle pour retrouver $S(t)$ en fonction du stock initial S_0 .

Réponse :

$$\frac{dS}{dt} = P - R - E - Q = C^{te} \quad (2.9)$$

$$dS = C^{te} \cdot dt \quad (2.10)$$

$$\int_0^t dS = \int_0^t C^{te} \cdot dt \quad (2.11)$$

$$[S]_0^t = [C^{te} \cdot t]_0^t \quad (2.12)$$

$$S(t) = S_0 + (P - R - E - Q) \cdot t \quad (2.13)$$

2. Dans quelles conditions le stock de la nappe phréatique reste constant. Que cela signifie-t-il en terme de débit d'extraction ?

Réponse : Le stock reste constant ($S=S_0$) si $P - R - E - Q = 0$. Le débit d'extraction est limité par la quantité de précipitations et les niveaux de ruissellement et d'évapotranspiration si l'on souhaite maintenir le stock.

3. Pour un petit bassin versant idéalisé de surface 2000 km^2 subissant une précipitation annuelle de 800 mm , une évapotranspiration moyenne de 500 mm et un coefficient de ruissellement C_r (volume d'eau ruisselé sur volume d'eau versé) de $0,2$, calculez le débit d'extraction moyen pour être à l'équilibre (en m^3/an).

Réponse : On peut tout convertir en m^3 ou parler en mm . En mm , on a $P = 800 \text{ mm}$, $E = 500 \text{ mm}$ et $R = 800 \cdot 0,2 = 160 \text{ mm}$. Si le stock est à l'équilibre, $P - E - R = Q = 140 \text{ mm}$ pour une année. Ce qui correspond à une valeur en m^3 de $140 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 \cdot 10^6 = 2,8 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{an}$ ou $0,28 \text{ km}^3/\text{an}$.

4. L'évolution de la demande suggère une augmentation du débit d'extraction de 10% . À partir de cet équilibre et pour une hauteur de nappe de $H \text{ (m)}$ et une porosité efficace de $\phi_e \text{ (}\%)$, déduire l'équation exprimant le temps au bout duquel le stock d'eau sera épuisé. À partir d'une nappe saturée de 10 m dont la porosité efficace est de 5% , estimez à combien d'années cela correspond ?

Réponse : D'après la question 1, $S(t) = S_0 + (P - R - E - Q') \cdot t$, lorsque le stock est épuisé, $S(t) = 0$ ce qui correspond à $t = \frac{S_0}{Q' + E + R - P} = \frac{S_0}{\Delta Q}$ avec $\Delta Q = \alpha Q$ et $\alpha = 10\%$. Nous pouvons calculer le stock initial par $S_0 = H \cdot A \cdot \frac{\phi_e}{100}$ avec A l'aire du bassin. Nous obtenons :

$$t = \frac{H \cdot A \cdot \phi_e / 100}{\alpha \cdot Q} \quad (2.14)$$

Le débit d'extraction a augmenté de 14 mm par an, soit $2,8 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ par an. Cela correspond à un assèchement au bout de $t \approx 36 \text{ ans}$.

5. Dans des conditions de canicule, le nombre de jours secs peut être important. Dans ces conditions sèches, calculez maintenant le temps pour que la nappe d'eau souterraine devienne épuisée en utilisant la valeur du débit d'extraction de la question 3.

Réponse : S'il ne pleut pas, on a $P = R = 0$. L'épuisement a lieu lorsque $t = \frac{S_0}{Q + E + R - P}$ comme vu à la question précédente, donc $t = \frac{H \cdot A \cdot \phi_e / 100}{Q + E}$. Pour $E = 1 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ (500 mm question 3), on obtient $t = 0,78 \text{ an}$. Dans un peu plus de 9 mois, la nappe est à sec.

6. Avec le réchauffement climatique, les précipitations augmentent. Pour ce bassin versant, l'augmentation estimée est d'environ 2% par degré. L'évapotranspiration augmente également d'environ 5% par degré. Pour un même coefficient C_r , quel est le nouveau débit d'extraction permettant un équilibre de la nappe pour une augmentation de la température moyenne de 2°C ? Qu'en conclure ?

Réponse : D'après la question 3, nous avons un équilibre pour $Q = P - E - R$. Dans des conditions de réchauffement climatique, nous avons des changements relatifs α_P et α_E pour la précipitation et l'évaporation tel que le nouveau débit Q' satisfait :

$$Q' = P + \alpha_P \cdot P - (E + \alpha_E \cdot E) - (R + \alpha_P C_r P) \quad (2.15)$$

$$= Q + \alpha_P \cdot P - \alpha_E \cdot E - \alpha_P C_r P \quad (2.16)$$

$$= Q + \alpha_P \cdot P(1 - C_r) - \alpha_E \cdot E \quad (2.17)$$

Pour des valeurs de $\alpha_P = 0,02 \cdot \Delta T$, $\alpha_E = 0,05 \cdot \Delta T$ et $\Delta = 2^\circ\text{C}$, nous obtenons un nouveau débit d'extraction de $Q' = 115,6 \text{ mm}$ ($0,23 \text{ km}^3/\text{an}$) contre $Q = 140 \text{ mm}$ ($0,28 \text{ km}^3/\text{an}$) avant, soit une réduction de 17,4% pour un réchauffement de 2°C .

MC - Erreur x2 pour E : Une augmentation de 5% de l'évapotranspiration donne 525 mm / an. 800 mm de précipitations annuelles, en faisant l'hypothèse d'une augmentation de 2% par $^\circ\text{C}$, ça donne une augmentation des précipitations de 32 mm soit 832 mm. Le ruissellement est maintenant de $0,2 \cdot 800 = 166,4 \text{ mm}$. Donc le nouveau débit d'extraction maintenant l'équilibre de la nappe peut atteindre $832 - 525 - 166,4 = 140,6$ (j'ai supprimé la référence au tableau 3, car 800 mm ça correspond à peu près aux précipitations de Nice, mais on ne sait pas exactement dans quel contexte on est. Il faudrait sans doute revoir les valeurs numériques pour se placer éventuellement dans un cas plus réaliste dans le nord du bassin méditerranéen par exemple avec une diminution attendue des niveaux d'extraction possibles?).

7. Afin de s'adapter aux effets du dérèglement climatique, cette région procède à une revégétalisation des terres artificialisées. Le coefficient de ruissellement C_r passe ainsi de 0,2 à 0,1. Quel est le nouveau débit d'extraction permettant l'équilibre de la nappe? Est-ce suffisant pour parer à l'assèchement prévu?

Réponse : Nous reprenons l'équation précédente, avec $C_r = 0,1$. Nous obtenons $Q'' = 118,8 \text{ mm}$ ($0,24 \text{ km}^3/\text{an}$). Le débit d'extraction possible a maintenant été réduit de -15,1%, contre -17,4% sans changement des terres. L'impact est faible car le bassin était déjà peu artificialisé ($C_r = 0,2$).

MC : Avec la valeur initiale de coefficient de ruissellement proposée 0,9, on assèche la nappe en très peu de temps, il n'y a plus de possibilité d'avoir un débit d'extraction à l'équilibre. En remplaçant par 0,3 et avec les valeurs de la question précédente on a $Q = 832 - 525 - 249,6 = 57,4 \text{ mm}$ donc un débit d'extraction divisé pratiquement par 3. À voir là aussi pour prendre des valeurs un peu réalistes d'effet de l'artificialisation?

8. D'après vos connaissances, quels sont les points d'incertitudes qui n'ont pas été considérés dans cet exercice?

Réponse : L'évolution des niveaux de précipitations reste une incertitude assez forte des modèles climatiques. Ici, nous prenons des moyennes annuels alors que le rythme du stock des nappes phréatiques est très saisonnier (rechargement hivernal, assèchement estival). Les changements de précipitations moyens représentent moins le rechargement des nappes que les changements de fréquence d'événements extrêmes : les fortes pluies peuvent créer des sols saturés qui n'absorbent plus, la durée du nombre de jours secs influencent fortement l'assèchement des nappes.

2.3 Le cycle du phosphore

Exercice 2.5 – Formes chimiques et réactivité du phosphore dans l'environnement — *Nouveau!*

Source : F. Brient et M. Chassé

1. Listez quelques molécules organiques naturelles contenant du phosphore.

Réponse : Adénosine tri-phosphate (intermédiaire permettant de capter l'énergie libérée par l'oxydation des nutriments), ADN et ARN (supports de l'information génétique, des nucléotides sont liés entre eux par une liaison phosphodiester), phospholipides (composants des membranes), glucose-6-phosphate (forme du glucose utilisée pour débiter les réactions de la glycolyse).

2. Au vu du rôle de ces molécules, par analogie avec l'azote, que pouvez-vous supposer de l'importance du phosphore dans le développement des organismes vivants?

Réponse : Les exemples choisis illustrent l'importance du phosphore dans le fonctionnement des organismes vivants. Sans phosphore pas d'information génétique (ou pas sous cette forme), pas de possibilité de stockage de l'énergie et d'utilisation de l'énergie chimique des sucres par exemple.

3. Donnez la configuration électronique du phosphore (P, Z = 15).⁴

Les états d'oxydation du phosphore que l'on peut trouver dans l'environnement sont présentées en Figure 2.3.

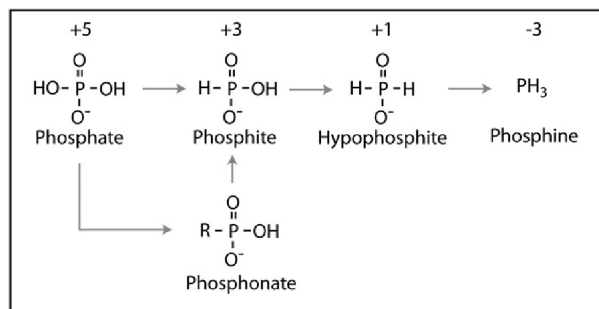


FIGURE 2.3 – Formes chimiques du phosphore (Pasek et coll., 2014)

4. Ces états d'oxydation sont-ils cohérents avec la configuration électronique précédemment établie?⁵

4. On utilisera la règle de Klechkowski qui permet de prédire dans la majorité des cas l'ordre de remplissage des orbitales atomiques et qui stipule qu'à l'état fondamental, les sous-couches électroniques se remplissent par ordre croissant des valeurs de $n + l$. À valeurs de $n + l$ égales, le remplissage se fait par ordre croissant des valeurs de n .

On rappelle que le nombre quantique principal, n , est un entier ≥ 1 et que, pour une valeur donnée de n , le nombre quantique azimutal, l est un entier dans l'intervalle $[0, n[$. Chaque sous-couche contient un nombre d'orbitales qui dépend du nombre quantique magnétique, m_l , qui est un entier dans l'intervalle $]-l, l[$. Chaque orbitale peut contenir deux électrons, un avec un spin *up* ($m_s = +1/2$) et l'autre avec un spin *down* ($m_s = -1/2$).

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$.

5. On rappelle que la stabilité des ions est maximale quand ils prennent la configuration du gaz rare le plus proche. Parmi les gaz rares, on trouve le néon (Ne, Z = 10) et l'argon (Ar, Z = 18). Des sous-couches remplies et dans une moindre mesure demi-remplies confèrent aussi une certaine stabilité à l'ion.

Réponse : Perte de 5 électrons (P^{5+}), configuration du néon ($Z = 10, 1s^2 2s^2 2p^6$), gain de 3 électrons (P^{3-}) configuration de l'Ar ($Z = 18, 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$), dans les deux cas des configuration stables. Perte de 3 électrons, permet d'atteindre une configuration qui vide une couche électronique : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$.

5. Au regard de la composition chimique des différentes formes présentées par le phosphore, sous quelle forme peut-on s'attendre à trouver le phosphore le plus communément en solution aqueuse en équilibre avec l'atmosphère dans l'environnement?

Réponse : Le plus probable est une oxydation du fait de l'abondance d'oxygène dans l'environnement, configuration du gaz rare précédent la plus stable et présence d'oxygène qui a tendance à oxyder les composés chimiques, donc la forme la plus probable est la forme de phosphate.

Des analyses chimiques ont été effectuées dans différents milieux aquatiques en Floride. Une partie de ces analyses sont présentées en Figure 2.4.

Sample	Depth, cm	ORP, mV	pH	TDP, mg/L	$H_2PO_2^-$	HPO_3^{2-}	PO_4^{3-}
River Front Park, 28° 4' 12.25" N, 82° 22' 39.41" W							
A-1	0	213	8.1	0.3	2 (± 1)	3 (± 0.5)	95 (± 1.5)
A-2	15	213	8.1	0.3	2 (± 1)	1 (± 0.5)	97 (± 1.5)
A-3-g	35	n.d.	n.d.	0.2	2 (± 1)	0 (± 0.3)	98 (± 1)
B-1	0	169	8.46	0.08	8 (± 4)	3 (± 2)	89 (± 6)
B-2	20	168	8.46	0.3	2 (± 1)	1 (± 1)	97 (± 2)
B-3-g	41	n.d.	n.d.	0.2	21 (± 1)	5 (± 0.5)	74 (± 0.6)
Pemberton Creek Retention Pond, 28° 2' 4.74" N, 82° 15' 30.71" W							
A-1	0	167	6.5	0.15	18 (± 2)	33 (± 3)	49 (± 9)
A-2-g	15	-31	6.4	0.18	8 (± 1)	33 (± 3)	59 (± 8)
B-1	0	195	6.5	0.16	10 (± 2)	33 (± 3)	57 (± 8)
B-2-g	17	-12	6.1	0.22	23 (± 1)	25 (± 2)	52 (± 6)

FIGURE 2.4 – Caractéristiques générales et analyses chimiques des formes du phosphore dans divers milieux aquatiques en Floride; ORP : oxidation reduction potential; TDP : total dissolved phosphorus; les compositions en $H_2PO_2^-$, HPO_3^{2-} et PO_4^{3-} sont données en pourcentage du phosphore dissous (Pasek et coll., 2014)

6. Ces analyses confirment-elles les conclusions tirées à la question précédente?

Réponse : On observe que la forme dominante est bien l'ion phosphate (PO_4^{3-}) dans tous les échantillons étudiés. Néanmoins, dans des conditions moins oxydantes que les eaux de surface d'une rivière (eau bien aérée qui circule) comme un étang ou les niveaux plus profonds de la rivière, on observe que les autres formes du phosphore moins oxydées peuvent ne pas être négligeables.

Une coenzyme présente dans toutes les cellules vivantes est le NADH (nicotinamide adénine dinucléotide). Elle forme un couple redox avec NAD^+ . À pH = 7, le potentiel redox du couple $NAD^+ / NADH$ a été estimé à -0,56 V et celui du couple H_3PO_4 / H_3PO_3 à -0,28 V.

7. Quelle réaction spontanée peut avoir lieu en présence de NADH et de H_3PO_4 ?

Réponse : Écriture de demi-équations redox : (1) $NADH = NAD^+ + H^+ + 2e^-$, (2) $H_3PO_4 + 2H^+ + 2e^- = H_3PO_3 + H_2O$. En combinant (1) et (2), ça donne (3) $NADH + H_3PO_4 + H^+ = NAD^+ + H_3PO_3 + H_2O$.

8. Le métabolisme des êtres vivants peut-il expliquer la présence de formes chimiques du phosphore différentes de la forme dominante?

Réponse : On voit avec l'équation précédente qui peut être spontanée que le NADH peut être oxydé en NAD⁺ et engendrer la réduction des phosphates en phosphites. On peut donc supposer que certains composés organiques produits par les organismes vivants peuvent mener à une réduction des phosphates et donc à la présence de formes distinctes du phosphore.

Bien que d'autres espèces existent, comme l'ont démontré les questions précédentes, seule l'espèce dominante du phosphore dans l'environnement sera considérée comme présente pour la suite. La figure 2.5, indique les formes chimiques dominantes du phosphore en fonction des paramètres physico-chimiques du milieu.

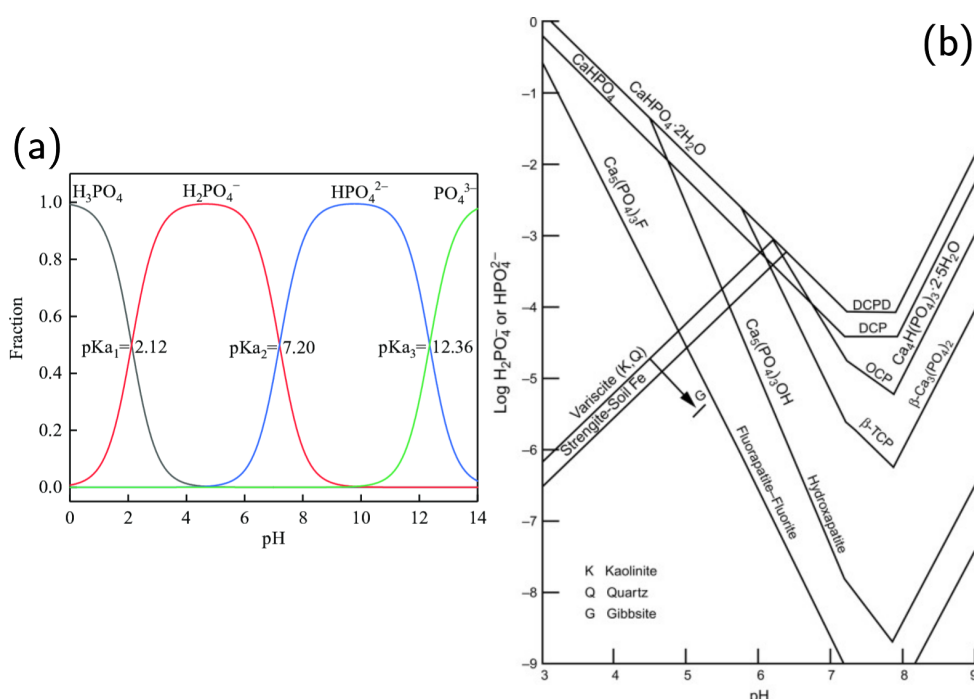


FIGURE 2.5 – Diagramme de spéciation du phosphore : (a) formes en solution en fonction du pH (Chen *et coll.*, 2021); (b) solubilité en présence de Ca, Al et Fe, les concentrations sont données en mol · L⁻¹, variscite : AlPO₄ · 2H₂O et strengite : FePO₄ · 2H₂O (Lindsay, 1979).

9. D'après la figure 2.5a, dans quel type de réactions peut être impliqué l'ion phosphate?

Réponse : Des réactions acido-basiques.

10. Quel sont les formes dominantes de l'ion phosphate dans les milieux aquatiques?

Réponse : Dans les eaux de rivière, le pH est légèrement acide du fait de l'équilibre des carbonates, la forme dominante est donc $H_2PO_4^-$ avec un peu de HPO_4^{2-} . Dans des rivières en équilibre avec des carbonates de calcium (drainage d'un environnement calcaire) comme dans l'eau de mer, le pH est plutôt autour de 8 et HPO_4^{2-} est dominant avec une proportion faible de $H_2PO_4^-$.

11. Proposez des mécanismes qui pourraient limiter la disponibilité de cet ion dans l'environnement.

Réponse : Étant donné la charge négative de cet ion, il pourrait être complexé par des cations en solution ou bien être adsorbé sur des surfaces chargées positivement. La dernière possibilité, objet de la question suivante est une précipitation avec ces composés.

12. D'après la figure 2.5b, quelles est la solubilité maximale du phosphore en présence de Ca, Al et Fe, des ions communs dans les environnements de surface?

Réponse : Les droites représentent la limite de solubilité de l'ion phosphate, au dessus il précipite sous la forme indiquée. Si Ca, Fe et Al sont présents, le maximum de solubilité se situe autour de $10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pour un pH un peu au dessus de 6.

Le minéral porteur de phosphore le plus commun dans les roches continentales est l'apatite.

13. Au regard de la figure 2.5b, que penser de l'altérabilité de ces minéraux et de l'importance de l'apport en phosphore dans les environnements de surface?

Réponse : Les phosphates de Ca sont peu solubles en conditions basiques limitant leur altération dans les environnements de surface aux conditions acides, mais dans ces cas là, en présence d'ions communs comme Al^{3+} ou Fe^{3+} , les phosphates vont de nouveau précipiter et seront difficilement altérables du fait de leur faible solubilité. Les apports de phosphores risquent donc d'être limités.

14. Par comparaison avec la solubilité d'autres ions et à la lecture des questions précédentes, concluez quant à la biodisponibilité des phosphates et à leur importance comme facteur limitant dans le développement des organismes vivants.

Réponse : Très peu biodisponible contrairement par exemple à l'azote qui sous forme de nitrates est extrêmement soluble. Or les phosphates qui sont essentiels pour de nombreuses réactions du métabolisme et c'est donc un élément fortement limitant du développement des organismes vivants.

Exercice 2.6 – Appréhender le cycle naturel du phosphore — **Nouveau!**

Source : F. Brient et M. Chassé

Le cycle naturel du phosphore est présenté en figure 2.6. Afin d'estimer ces stocks et ces flux, des calculs d'ordre de grandeur sont menés à partir des propriétés des différents compartiments.

Par exemple, pour les sols, la surface totale est estimée à $1,3 \cdot 10^8 \text{ km}^2$, leur épaisseur moyenne est de 0,6 m, la densité moyenne d'un sol est de $1,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ et la concentration moyenne en P des sols est de l'ordre de 0,1 pds%⁶ (Lerman et coll., 1975).

Le contenu en P des sédiments est en moyenne de 0,075 pds%. La quantité de sédiments transportés par les rivières mondiales est de $18\,920 \text{ Tg} \cdot \text{an}^{-1}$. Par ailleurs, le ruissellement est estimé à $37\,000 \text{ km}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ avec un contenu en phosphore dissous moyen de $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Pierrou, 1976).

6. Pourcentage en masse.

1. Estimez le stock de phosphore contenu dans les sols. Est-ce cohérent avec la valeur proposée dans la figure 2.6?

Réponse : $1,3 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 1,3 \cdot 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,001 = 1,95 \cdot 10^{17} \text{ g} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Tg}$, soit le même ordre de grandeur que l'estimation donnée ici, légèrement supérieur, mais identique en considérant l'erreur sur la valeur.

2. Estimez le flux de phosphore des rivières vers l'océan. Est-ce cohérent avec la valeur proposée dans la figure 2.6?

Réponse : $0,00075 \cdot 18\,920 = 14,2 \text{ Tg}$ associé à l'érosion et $37\,000 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1} \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 3,7 \text{ Tg}$. Soit un total de 17,9 Tg. Si l'on prend F6 + F5 qui correspondent, cela donne 11 Tg, les ordres de grandeur sont à nouveau cohérents.

3. Proposez des pistes pour améliorer ces estimations.

Réponse : On pourrait faire des typologies de sols et avoir des contenus moyens en P entre les horizons pour raffiner l'approche. Avec de grandes bases de données sur les contenus en P et les types de sols, couplées à des informations géographiques sur la nature des sols à l'échelle du globe on pourrait avoir une estimation globale qui prenne en compte les hétérogénéités des sols. Ce type de modèle pourrait s'appliquer pour les flux associés aux rivières avec des données sur les débits des rivières, la charge en sédiments et les concentration en P dissous et dans la fraction particulaire.

4. À partir de la Figure 2.6, identifiez les principaux compartiments et flux. Pour cela, retracez un diagramme de stock et de flux en pourcentage relatif du stock et du flux total.

Réponse : Le principal stock de P est situé dans les sédiments, si l'on prend l'ensemble des stocks (R1–R8), il représente plus de 99 % du stock de P. Si l'on exclue ce réservoir, 50 % du stock restant est dans l'eau de mer, 44 % dans les sols, et un peu moins de 4 % dans les gisements de roches phosphatées. En termes de flux, les flux géologiques sont dominants (enfouissement et soulèvement représentent 40 % des flux totaux). 25 % des flux sont associés aux processus d'érosion. Le cycle du phosphore est donc contrôlé, au moins sur les échelles de temps longues par les apports géologiques. Les flux dans les rivières représentent environ 20 % du total (transport à l'état solide et dissous) assurant une redistribution des apports géologiques à l'échelle des surfaces continentales, mais aussi un retour à l'océan avant enfouissement. Les flux atmosphériques (émission et déposition) sont plus faibles, de l'ordre de 10 % mais contribuent aussi à la redistribution, d'autant plus qu'une majeure partie reste sur les surfaces continentales.

Exercice 2.7 – Perturbations anthropiques du cycle biogéochimique du phosphore — *Nouveau!*

Source : F. Briant et M. Chassé

La figure 2.7 présente le cycle biogéochimique du phosphore actuel.

1. Évaluez l'importance de la perturbation anthropique du cycle biogéochimique du phosphore. Pour cela, estimez en pourcentage la proportion relative des flux en fonction de leur origine,

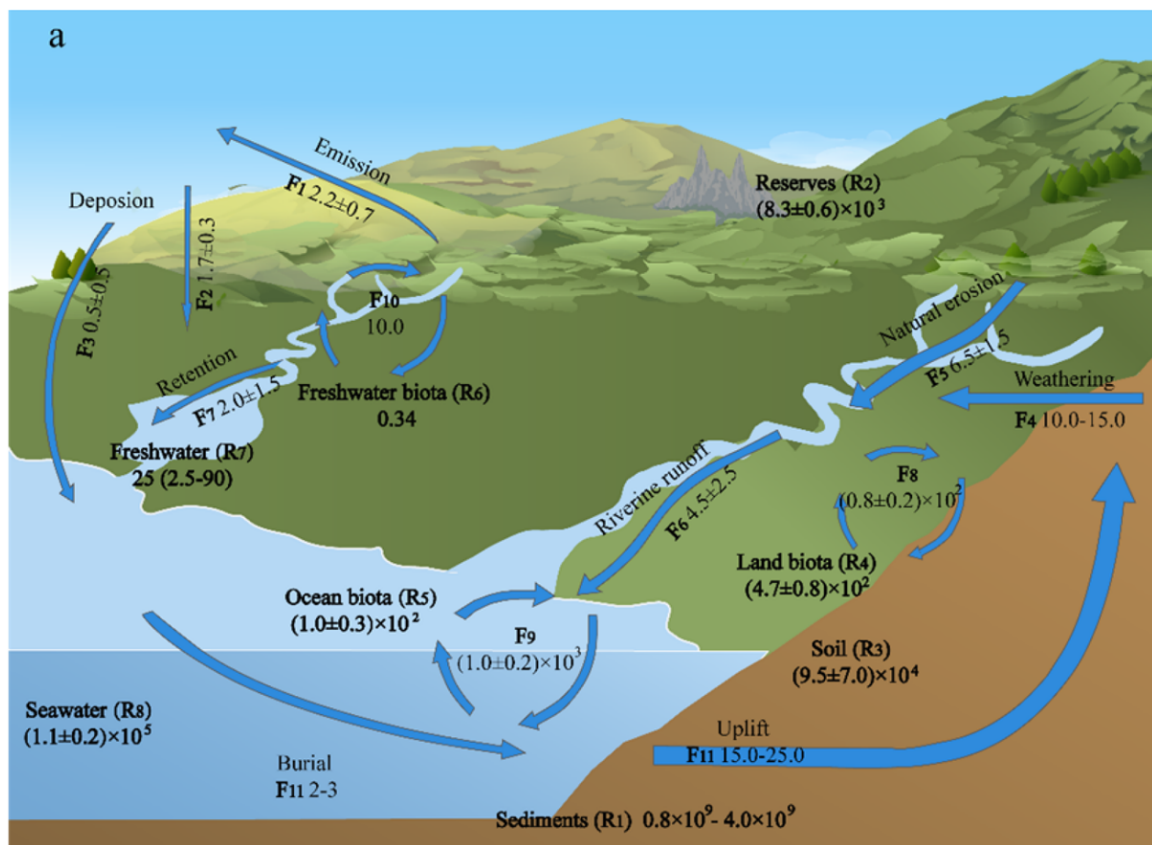


FIGURE 2.6 – Schéma du cycle biogéochimique naturel du phosphore, les stocks sont exprimés en Tg P, les flux en Tg P · an⁻¹ (Yuan et coll., 2018)

anthropique ou naturelle.

Réponse : Si l'on prend en compte l'ensemble des flèches bleues, cela donne 72,6 Tg P. Les flèches oranges correspondent à 71,4 Tg P. Les flux anthropiques représentent donc à l'heure actuelle 49,6 % (grossièrement de l'ordre de grandeur de 50% au vu des incertitudes existant sur les valeurs estimées des flux). La perturbation est donc conséquente.

2. À partir de vos connaissances et de la figure 2.8, indiquez l'origine des flux de phosphore excédentaires d'origine anthropique constatés dans l'environnement.

Réponse : On observe que la majorité du phosphore est utilisé pour la production alimentaire, liée à l'utilisation d'engrais pour favoriser la croissance des cultures. Néanmoins une part est utilisée pour les usages industriels mais à pour en lien avec l'agriculture, le phosphore étant employé dans les herbicides comme le glyphosate (plus des usages dans des alliages et des verres). Une part encore plus faible est liée à son usage dans les détergents. Dans la plupart de ces cas, le phosphore excédentaire sera ensuite dispersé dans l'environnement.

3. Comment se nomme le phénomène illustré dans la figure 2.9, comment les excès d'usage du phosphore peuvent-ils l'expliquer et quelles sont les conséquences ?

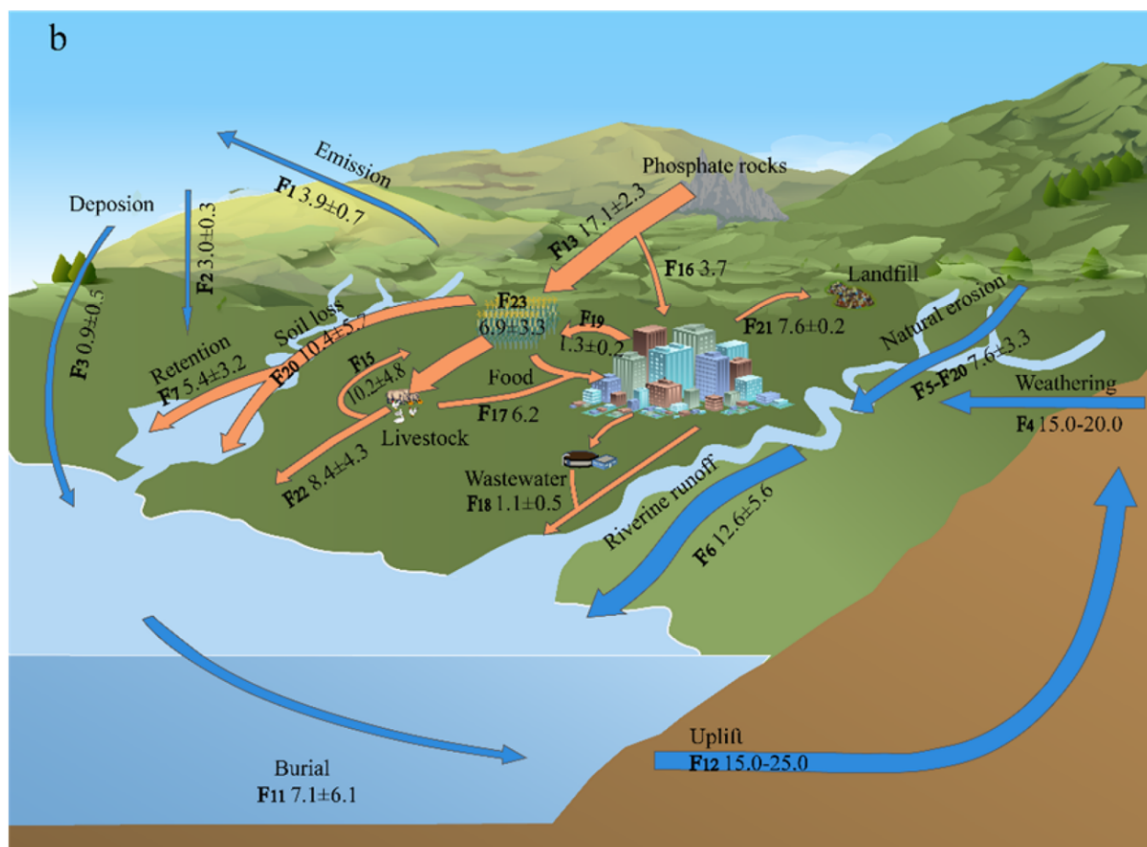


FIGURE 2.7 – Schéma du cycle biogéochimique du phosphore affecté par les activités anthropiques, les stocks sont exprimés en Tg P, les flux en Tg P · an⁻¹ (Yuan et coll., 2018)

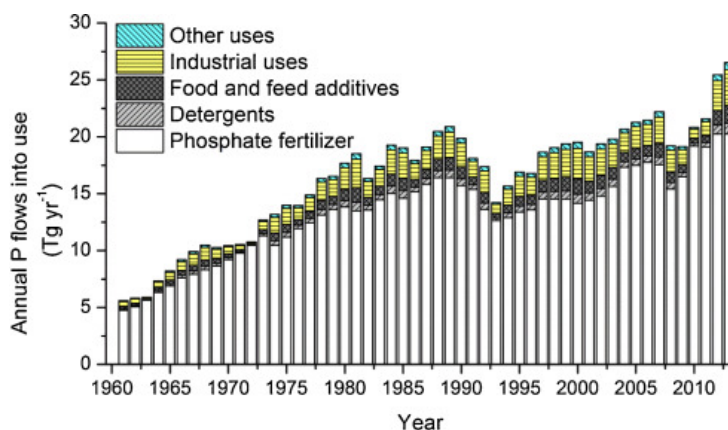


FIGURE 2.8 – Usages finaux des principaux produits à base de phosphore entre 1961 et 2013 (Chen et Graedel, 2016)

Réponse : Ce phénomène est l'eutrophisation. Les milieux aquatiques, en particulier d'eau douce, sont largement appauvris en phosphore, limitant la croissance de certains organismes. L'explosion du développement des végétaux associée à l'absence de limitation de la disponibilité en phosphore engendre l'accumulation de biomasse avec diverses conséquences néfastes. On peut citer un appauvrissement de la biodiversité (liée à la diminution de la disponibilité en oxygène pour les espèces aérobies), des nuisances visuelle et olfactive, une gêne pour la baignade, des difficultés dans le traitement de l'eau pour obtenir



FIGURE 2.9 – Photographie d’une mare dans la forêt de Pontault-Combault, Seine-et-Marne (crédits : M. Delarue)

de l’eau potable, des dégagements gazeux potentiellement nocifs, la colonisation par des algues produisant des toxines comme certaines Cyanophycées, etc.

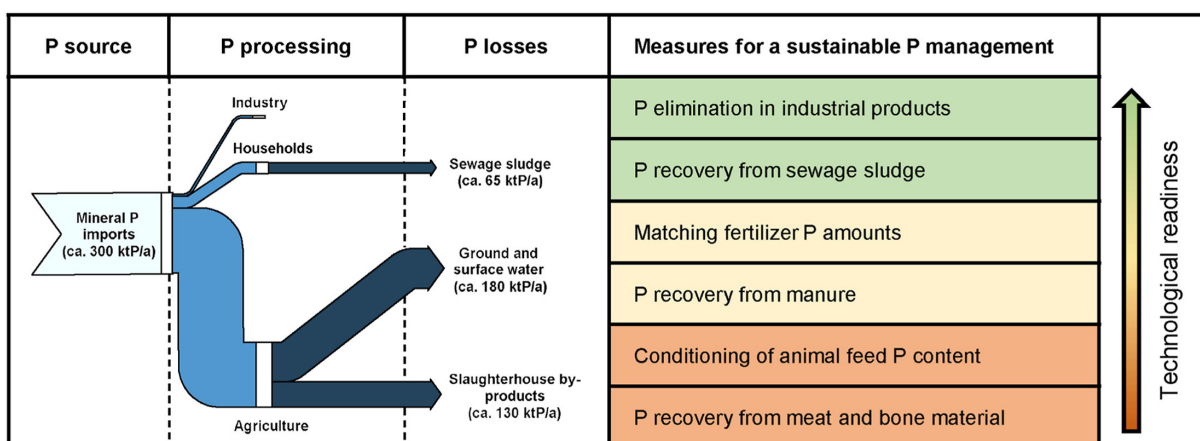


FIGURE 2.10 – Étude dans le contexte allemand de la pertinence de mesures pour limiter les pertes de phosphore dans l’environnement (Mayer et Kaltschmitt, 2022)

- À la lecture des résultats résumés de l’étude présentée en figure 2.10, listez les leviers d’actions proposés pour tenter de « boucler » le cycle du phosphore, indiquer les freins qui peuvent exister à la mise en place de tels leviers et proposer des pistes complémentaires d’action.

Réponse : Les leviers d’actions proposés peuvent se lire sur la figure. Sont indiquées l’origine des émissions de P et l’importance des flux associés. Pour les flux industriels, l’idée serait de recourir à des substituts pour les applications qui utilisent du phosphore, si cette technologie est prête, les flux sont faibles et plutôt que l’élimination du P des composés industriels, on pourrait aussi questionner la pertinence des usages. Pour les flux domestiques, ce sont les eaux d’épuration qu’il faudrait retraiter. C’est une solution techniquement prête mais qui pose la question de la volonté et la capacité d’utiliser des eaux d’épuration, par exemple pour la production agricole (pollutions diverses autre que le phosphore,

médicaments, métaux...), ou simplement l'image associée à l'usage d'excréments. Cela ne pose pas la question du changement d'habitude avec des toilettes sèches par exemple et un retour en local du P dans l'environnement plutôt qu'une gestion centralisée et des rejets concentrés au niveau des stations d'épuration. Au niveau agricole, l'optimisation de l'usage des engrais phosphatés et l'utilisation de fumier est proposée, avec un niveau de maturité moins bon. L'usage d'engrais phosphatés est difficile à optimiser sans risquer une baisse de la productivité, par ailleurs, le produit ayant un coût les agriculteurs, il y a déjà une recherche d'optimisation existante. La disponibilité des lisiers à l'échelle locale est limitée puisque les zones de production céréalière par exemple ne sont pas celles d'élevage, donc il faut mettre en place des filières pour exporter. Questionne plus généralement le modèle agricole avec une hyperspécialisation des cultures et des imports massifs d'intrants. Des systèmes plus diversifiés couplant polyculture et élevage pourraient être moins demandeurs en engrais en alternant des cultures plus ou moins exigeantes en intrants et permettre des apports locaux via les fumiers issus de l'élevage. Finalement, les technologies associées à la production de viande et à l'abattage associé sont peu matures. L'étude ne questionne pas la consommation de viande qui en la limitant pourrait limiter les pertes de phosphore et pourrait *in fine* être couplée à des technologies qui arriveraient à maturité.

Chapitre 3

L'énergie

Exercice 3.1 – Consommation d'énergie et croissance

Source : G. Blanc

La consommation totale d'énergie par l'humanité est passée de 194 EJ en 1973 à 418 EJ en 2019 (1 EJ = 10^{18} J).

1. En supposant une croissance exponentielle sur cette période, que vaut le taux de croissance annuel en pourcents?

Réponse : On a :

$$E(t) = E(t_0) \cdot e^{\alpha \cdot (t - t_0)}$$

donc :

$$E(2019) = E(1973) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t}$$

soit :

$$\ln \frac{E(2019)}{E(1973)} = \alpha \cdot \Delta t$$

d'où :

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \frac{E(2019)}{E(1973)}$$

Soit :

$$\alpha = \frac{1}{46} \cdot \ln \frac{418}{194} = 0,0167 = 1,67 \%$$

2. À ce rythme, dans combien de temps la consommation d'énergie aura doublé?

Réponse : On a :

$$2 = e^{\alpha \cdot \Delta t}$$

soit :

$$\Delta t = \frac{\ln 2}{\alpha} = \frac{0,69}{0,0167} = 41,5 \text{ ans}$$

3. Quelle est la masse de matière équivalente (par la relation d'équivalence masse-énergie : $E = mc^2$) utilisée sous forme d'énergie en 2019 par l'humanité?

Réponse : En 2019 l'humanité a consommé 418 EJ d'énergie. Soit :

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{418 \cdot 10^{18}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4644 \text{ kg}$$

4,6 t tonnes de matière qui disparaissent en énergie chaque année.

4. Au rythme de consommation actuelle d'énergie par l'humanité, dans combien de temps l'équivalent de la masse de la Terre aura été utilisé? La Terre a une masse de $6 \cdot 10^{24}$ kg.

Réponse : Comme $E \propto m$, on a :

$$M(\text{Terre}) = M(0) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t}$$

soit :

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{M(\text{Terre})}{M(2019)} = \frac{1}{0,0167} \cdot \ln \frac{6 \cdot 10^{24}}{4644} = 2910 \text{ ans}$$

5. Compte tenu de ce que vous savez sur les énergies utilisées par l'humanité (énergies de flux, de stock), que pensez-vous de la pertinence de ce calcul? Argumentez!

Réponse : 85 % d'énergie fossiles = énergies de stock sous forme d'énergie chimique. Une petite partie de la masse disparaît dans la combustion (énergie de liaison). Quand on en brûle beaucoup, ça fait beaucoup de masse. L'énergie solaire (renouvelable) sous forme de flux ne concerne que moins de 10 % du total.

Exercice 3.2 – Jouons avec les unités d'énergie

Source : Roland Lehoucq

Un article publié sur le site « L'Energieek »¹ le 3 novembre 2020, classe les plus grosses entreprises fournissant de l'énergie. On y lit :

Les bilans énergétiques utilisent le plus souvent le kilowatt-heure. [...] Ce choix est essentiellement symbolique car, le kilowatt-heure est une unité liée aux joules, puisqu'elle vaut exactement 3,6 mégajoules. Mais la banque a estimé que le kilowatt-heure était trop lié, dans l'imaginaire collectif, à la production d'électricité. Le joule aurait le mérite de la « neutralité ». Ils se sont donc appuyés sur l'équivalence suivante (les chiffres ont été arrondis) : 1 baril de pétrole = 5 800 pieds cubes de gaz = 1 600 kilowatt-heure = 6,1 gigajoules (soit 6,1 milliard de joules). [...] En France, Total a vendu 187 millions de barils de pétrole en 2019, soit 1,14 exajoules. S'y ajoutent 26 terawatt-heures d'électricité (soit 0,093 exajoules) et 2,4 milliards de m³ de gaz, pour un total de 1,34 exajoules.

1. Rappelez la définition du kilowatt-heure et exprimez sa valeur en joule.

Réponse : Un kilowatt-heure est l'énergie produite par une machine dont la puissance est 1000 watts (J/s) fonctionnant 1 heure, soit 3 600 secondes. Elle vaut donc $1 \text{ kWh} = 1\,000 \times 3\,600 = 3,6 \text{ MJ}$.

2. Le baril de pétrole est une unité de volume utilisée par les entreprises pétrolières et valant 159 litres. Sachant que la masse volumique du pétrole est égale à 920 kg/m³ et que l'équivalent

1. <https://lenergieek.com/2020/11/03/petroliers-plus-gros-producteurs-energie/>

énergétique d'une tonne de pétrole, la tep, vaut 41,868 GJ, déterminez l'équivalent énergétique d'un baril de pétrole, le bep, exprimé en joule.

Réponse : La masse d'un baril de pétrole est égale à $0,159 \text{ m}^3 \times 920 \text{ kg/m}^3 = 146,3 \text{ kg}$, soit 0,146 tonne. L'énergie contenue dans un baril de pétrole est donc de 0,146 tep. On obtient alors l'équivalent énergétique d'un baril de pétrole exprimée en joules : $0,146 \text{ tep} \times 41,868 \text{ GJ/tep} = 6,12 \text{ GJ}$. La valeur de l'article est correcte.

3. En déduire l'équivalent énergétique d'un baril de pétrole exprimé en kWh. Comparez à la valeur indiquée par l'article.

Réponse : On utilise le résultat de la question 1. L'équivalent énergétique d'un baril de pétrole exprimé en kWh vaut : $6,12 \text{ GJ} / (3,6 \text{ MJ/kWh}) = 1701,2 \text{ kWh}$, arrondi à 1700 kWh. La valeur indiquée par l'article est donc fautive. Remarquons que nous venons de faire une conversion d'unité, comme nous l'aurions fait pour passer de la tep au kWh (1 tep = 11 630 kWh). Si l'on devait estimer la quantité d'électricité produite par 1 tonne de pétrole transformée en énergie électrique dans une centrale thermique, il faudrait, en plus, tenir compte de l'efficacité énergétique de la centrale, qui de l'ordre de 38%. Il ne s'agirait plus d'une conversion d'une unité arbitraire à une autre qui l'est tout autant, mais de la conversion physique d'1 tonne de pétrole en électricité.

4. Le conseil mondial de l'énergie a fixé le contenu énergétique de 1000 m^3 de gaz naturel à 0,86 tep. Exprimez l'équivalent énergétique d'un baril de pétrole en pied cube de gaz naturel sachant que cette unité de volume² vaut 28,32 litres. Comparez à la valeur indiquée par l'article.

Réponse : Nous avons vu qu'1 baril de pétrole était équivalent à 0,146 tep, donc à $(0,146 / 0,860) \times 1000 = 169,8 \text{ m}^3$ de gaz naturel. L'équivalent en gaz naturel d'1 baril de pétrole est donc de $169,8 \text{ m}^3 / (28,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{pied cube}) = 5995 \text{ piedscubes}$. En arrondissant, 1 baril de pétrole est équivalent à 6000 pieds cubes de gaz naturel. Là encore l'auteur de l'article aurait pu mieux faire.

5. Vérifiez les valeurs de l'article concernant la production énergétique de Total.

Réponse : La production de pétrole représente $187 \cdot 10^6 \text{ baril} \times 6,12 \text{ GJ/baril} = 1,14 \cdot 10^{18} \text{ J}$ soit 1,14 EJ. Les 26 terawatt-heures d'électricité représentent $26 \cdot 10^9 \text{ kWh} \times 3,6 \text{ MJ/kWh} = 9,36 \cdot 10^{16} \text{ J} = 0,094 \text{ EJ}$. Enfin, comme le contenu énergétique de 1000 m^3 de gaz naturel vaut 0,86 tep, soit 36 GJ, les 2,4 milliards de m^3 de gaz représentent $2,4 \cdot 10^6 \times 36 \cdot 10^9 = 8,64 \cdot 10^{16} \text{ J} = 0,086 \text{ EJ}$. Au final, la production de Total vaut $1,14 + 0,094 + 0,086 = 1,32 \text{ EJ}$. L'auteur de l'article aurait pu être plus précis. Concluons en rappelant que la France consomme annuellement environ 10 EJ d'énergie primaire, quand les USA sont à près de 100 EJ, le monde entier se situant à 585 EJ.

2. Comme son nom l'indique, le pied cube est le volume d'un cube d'un pied de côté. Sachant qu'1 pied vaut 12 pouces de 2,54 cm, on a 1 pied = 30,48 cm et 1 pied cube = $28,32 \text{ dm}^3$. Cette unité de volume est principalement utilisée aux États-Unis.

Exercice 3.3 – Calcul de puissance

Source : Roland Lehoucq

1. Le métabolisme de base d'un humain adulte consomme 1 500 kcal par jour. Exprimez en watt la puissance correspondante. Rappel : 1 cal = 4,18 J.

Réponse : Le métabolisme de base consomme $1\,500 \cdot 10^3 \times 4,18 = 6,27 \text{ MJ}$. Comme une journée dure $24 \times 3\,600 = 86\,400$ secondes, la puissance nécessaire au métabolisme de base d'un adulte est donc de l'ordre de $6,27 \times 10^6 / 86\,400 = 72,6 \text{ W}$.

2. En 2019, la consommation électrique annuelle moyenne d'un foyer français était de 4 800 kWh. À quelle puissance moyenne cela correspond-il? Sachant qu'un humain adulte sur un vélo peut produire une puissance électrique de 100 watts, et seulement 8 heures par jour, combien en faudrait-il pour alimenter un foyer?

Réponse : Une année durant $365 \times 24 = 8\,760$ heures, la consommation d'un foyer est donc associée à une puissance moyenne de $4\,800 \cdot 10^3 / 8\,760 = 548 \text{ W}$. Cela correspond donc à 5,5 humains à vélo en permanence, mais s'ils ne sont disponibles que 8 heures par jour, il en faut donc 3 fois plus, plutôt de l'ordre de 17 pour un foyer...

3. Estimez la puissance qui traverse le pistolet d'une pompe à essence durant le remplissage du réservoir d'une voiture. On considérera qu'il faut environ 2 minutes pour remplir un réservoir de 60 litres, et que l'essence SP95 a une énergie volumique de 36 MJ/L.

Réponse : Le débit du pistolet est donc de $60/120 = 0,5$ litre par seconde. La puissance qui le traverse est donc égale à $36 \text{ MJ/L} \times 0,5 \text{ L/s} = 18 \text{ MJ/s} = 18 \text{ MW}$.

4. La batterie d'un véhicule électrique peut stocker 20 kWh d'énergie. À combien de litres d'essence cette quantité est-elle équivalente? Quelle est la durée de la charge complète d'une batterie initialement totalement déchargée si elle est alimentée à une borne délivrant une puissance de 40 kW?

Réponse : Comme $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$ on a $20 \text{ kWh} = 20 \times 3,6 \text{ MJ} / (36 \text{ MJ/L}) = 2$ litres de SP95. Avec une puissance de 40 kW, il faut $20 \text{ kWh} / 40 \text{ kW} = 0,5$ heure, soit 30 minutes pour recharger la batterie. Cet ordre de grandeur permet de comprendre pourquoi il est plus long de charger une batterie que de faire un plein d'essence : une batterie ne peut pas supporter la puissance associée au plein d'essence.

Exercice 3.4 – Puissance surfacique moyenne de différentes sources d'électricité

Source : Roland Lehoucq

Dans cet exercice nous allons comparer les puissances moyennes produites par unité de surface de différentes sources d'électricité : nucléaire, éolienne et solaire photovoltaïque (PV).

1. Le bilan électrique publié par RTE en 2020 indique que les centrales nucléaires françaises ont produit 335,4 TWh d'électricité pour une puissance installée de 61,4 GW. Calculez le facteur de charge de la production nucléaire française en 2020.

Réponse : Le facteur de charge (puissance moyenne/puissance installée) vaut : $(335,4 \text{ TWh}/8\,760 \text{ h})/61,4 \text{ GW} = 62,4\%$.

2. Sachant que les centrales nucléaires françaises en service occupent 3 185 hectares, calculez la puissance surfacique moyenne du nucléaire, exprimée en W/m^2 .

Réponse : La puissance surfacique moyenne vaut $(335,4 \text{ TWh}/8\,760 \text{ h})/3\,185 \text{ ha} \simeq 1\,200 \text{ W}/\text{m}^2$.

3. La société Ailes Marines installe, au large de la baie de Saint-Brieuc, un parc de 62 éoliennes off-shore de 8 MW de puissance chacune. Elles devraient produire 1 820 GWh d'électricité chaque année. Quels sont les deux paramètres clefs qui fixent la puissance d'une éolienne ?

Réponse : La puissance d'une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et à la surface balayée par ses pales (carré de leur diamètre donc).

4. La distance prévue entre chaque éolienne est de l'ordre du kilomètre. Pourquoi doit-elle être si grande ?

Réponse : Il faut éloigner les éoliennes les unes des autres pour ne pas « perdre » le vent (sa vitesse diminue après être passé par les pales), c'est analogue à l'effet d'ombre pour un panneau solaire.

5. Calculez le facteur de charge du parc. Pourquoi est-il supérieur à celui d'éoliennes disposées sur terre (dites onshore), qui est de l'ordre de 20 à 25% ?

Réponse : Le facteur de charge vaut $(1\,820 \text{ GWh}/8\,760 \text{ h})/0,496 \text{ GW} = 41,9\%$.

6. Calculez la puissance surfacique moyenne du parc de Saint-Brieuc, qui couvrira 75 km^2 .

Réponse : La puissance surfacique moyenne du parc vaut $(1\,820 \text{ GWh}/8\,760 \text{ h})/75 \text{ km}^2 = 2,8 \text{ W}/\text{m}^2$, plus de 400 fois inférieure à celle du nucléaire.

7. La centrale photovoltaïque (PV) de Cestas (Gironde) a une puissance installée de 300 MW et produit environ 350 GWh d'électricité par an. Calculez le facteur de charge de cette centrale photovoltaïque.

Réponse : Le facteur de charge vaut $(350 \text{ GWh}/8\,760 \text{ h})/0,3 \text{ GW} = 13,3\%$.

8. Calculez la puissance surfacique moyenne du parc sachant qu'il couvre 260 hectares.

Réponse : La puissance surfacique moyenne du parc vaut $(350 \text{ GWh}/8\,760 \text{ h})/260 \text{ ha} = 15,4 \text{ W}/\text{m}^2$, près de 80 fois inférieure à celle du nucléaire.

9. L'option basse du décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) indique qu'une puissance supplémentaire d'environ 25 GW de solaire PV doit être installée d'ici 2028. En vous fondant sur la centrale de Cestas, estimez la surface que ces installations mobiliseront en 2028. Commentez votre résultat à la lumière du rythme annuel d'artificialisation des sols, de l'ordre de 30 000 hectares/an.

Réponse : 25 GW c'est $25\,000/300 = 83,3$ fois la puissance de Cestas, soit $83,3 \times 260 = 21\,600$ ha. Installation sur les 8 prochaines années, du même ordre que l'artificialisation des sols sur 1 an. Ce n'est donc pas négligeable et l'on doit en tenir compte si l'on veut aussi réduire/limiter l'artificialisation des sols. Une option est d'installer des panneaux solaires pour couvrir des parkings déjà existants.

Exercice 3.5 – Des carburants fossiles aux biocarburants...

Source : R. Jarrier

Remplacer les carburants fossiles par des biocarburants permettrait théoriquement de décarboner le secteur des transports, notamment. Voyons ce qu'il advient si on fait l'hypothèse de remplacer la consommation d'énergies fossiles, en France, par des biocarburants.

Données :

		Source	Charbon	Pétrole	Gaz
Secteur	Énergétique		4,9	3,5	7,7
	Agriculture, industrie, construction		0,6	5,8	9,4
	Résidentiel, tertiaire		0,1	5,6	0,3
	Transports		0	40,2	0,3

TABLE 3.1 – Les consommations d'énergie primaire fossile des différents secteurs en France en 2022 (en Mtep). Source des données : INSEE (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2016345>)

On donne :

- 1 tep $\equiv$ 41,8 GJ
- 1 ha = 10 000 m² $\equiv$ 100 m $\times$ 100 m
- L'énergie contenue dans le bio-éthanol³ est de 21 MJ/L (l'énergie contenue dans l'essence⁴ est de 32 MJ/L et l'énergie contenue dans le gazole⁵ est de 43 MJ/L).
- Le coefficient de transformation de la masse de blé vers un volume de bio-éthanol⁶ est de 0,23 t/hL
- Le coefficient de transformation de la masse de maïs vers un volume de bio-éthanol⁷ est de 0,24 t/hL
- Coefficient de transformation de la masse (betterave) vers un volume de bio-éthanol⁸ est de 1 t/hL
- Le rendement agricole du blé⁹ est de 7,01 t/ha
- Le rendement agricole du maïs¹⁰ est de 7,45 t/ha

3. Douane française : https://www.douane.gouv.fr/sites/default/files/uploads/files/2020-08/Annexes_circulaire_TIRIB.pdf

4. ibid.

5. ibid.

6. France AgriMer : https://www.franceagrimer.fr/content/download/63194/document/2024_NOTE_MAJ%20SAU_MAJ_AVRIL24.pdf

7. ibid.

8. ibid.

9. ibid.

10. ibid.

- Le rendement agricole de la betterave¹¹ est de 78,55 t/ha
- La surface agricole totale française¹² est de 26,9 Mha

1. Convertissez les consommations énergétiques de chaque secteur du tableau 3.1 en joules :

Réponse : À l'aide de :

$$E_{MJ} = E_{Mtep} \times \frac{41,8 \cdot 10^9 \times 10^6}{10^6} = E_{Mtep} \times 4,18 \cdot 10^{10}$$

On obtient le tableau 3.1 des consommations d'énergie primaire fossile des différents secteurs en France en 2022 convertit en MJ :

	Source	Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	$2,05 \cdot 10^{11}$	$1,46 \cdot 10^{11}$	$3,22 \cdot 10^{11}$	$6,73 \cdot 10^{11}$
	Agriculture, industrie, construction	$2,51 \cdot 10^{10}$	$2,42 \cdot 10^{11}$	$3,93 \cdot 10^{11}$	$6,60 \cdot 10^{11}$
	Résidentiel, tertiaire	$4,18 \cdot 10^9$	$2,34 \cdot 10^{11}$	$1,25 \cdot 10^{10}$	$2,51 \cdot 10^{11}$
	Transports	0	$1,68 \cdot 10^{12}$	$1,25 \cdot 10^{10}$	$1,69 \cdot 10^{12}$
Total					$3,28 \cdot 10^{12}$

2. Convertissez chaque valeur des consommations d'énergie fossiles du tableau 3.1 en volume de bio-éthanol.

Réponse : On a la relation :

$$V_{\text{bio-éthanol, hL}} = \frac{E_{MJ}}{21 \times 100}$$

Qui permet d'obtenir le tableau des volumes équivalents en bio-éthanol des différents secteurs en hL :

	Source	Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	$9,75 \cdot 10^7$	$6,97 \cdot 10^7$	$1,53 \cdot 10^8$	$3,20 \cdot 10^8$
	Agriculture, industrie, construction	$1,19 \cdot 10^7$	$1,15 \cdot 10^8$	$1,87 \cdot 10^8$	$3,14 \cdot 10^8$
	Résidentiel, tertiaire	$1,99 \cdot 10^6$	$1,11 \cdot 10^8$	$5,97 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^8$
	Transports	0	$8,00 \cdot 10^8$	$5,97 \cdot 10^6$	$8,06 \cdot 10^8$
Total					$1,56 \cdot 10^9$

3. Convertissez ce volume en masse de produit agricole pour le blé, le maïs et la betterave :

Réponse : Pour Le blé on a :

$$m_{\text{blé, t}} = V_{\text{bio-éthanol, hL}} \times 0,23$$

Soit le tableau qui donne la masse équivalente de blé des différents secteurs en t :

11. *ibid.*

12. Chambres d'agriculture France : https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Chiffres_cles_agriculture_francaise_2023.pdf

Source		Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	$2,24.10^7$	$1,60.10^7$	$3,53.10^7$	$7,37.10^7$
	Agriculture, industrie, construction	$2,75.10^6$	$2,66.10^7$	$4,30.10^7$	$7,23.10^7$
	Résidentiel, tertiaire	$4,58.10^5$	$2,56.10^7$	$1,37.10^6$	$2,75.10^7$
	Transports	0	$1,84.10^8$	$1,37.10^6$	$1,85.10^8$
Total					$3,59.10^9$

Pour le maïs, on a :

$$m_{\text{maïs}, t} = V_{\text{bio-éthanol}, \text{hL}} \times 0,24$$

Soit le tableau qui donne la masse équivalente de maïs des différents secteurs en t :

Source		Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	$2,34.10^7$	$1,67.10^7$	$3,68.10^7$	$7,69.10^7$
	Agriculture, industrie, construction	$2,87.10^6$	$2,77.10^7$	$4,49.10^7$	$7,55.10^7$
	Résidentiel, tertiaire	$4,78.10^5$	$2,68.10^7$	$1,43.10^6$	$2,87.10^7$
	Transports	0	$1,92.10^8$	$1,43.10^6$	$1,93.10^8$
Total					$3,75.10^9$

Pour la betterave, on a :

$$m_{\text{betterave}, t} = V_{\text{bio-éthanol}, \text{hL}} \times 1$$

Soit le tableau qui donne la masse équivalente de betterave des différents secteurs en t :

Source		Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	$9,75.10^7$	$6,97.10^7$	$1,53.10^8$	$3,20.10^8$
	Agriculture, industrie, construction	$1,19.10^7$	$1,15.10^8$	$1,87.10^8$	$3,14.10^8$
	Résidentiel, tertiaire	$1,99.10^6$	$1,11.10^8$	$5,97.10^6$	$1,19.10^8$
	Transports	0	$8,00.10^8$	$5,97.10^6$	$8,06.10^8$
Total					$1,56.10^9$

4. Calculez la surface agricole nécessaire pour obtenir ces masses de blé, de maïs et de betterave.

Réponse : La surface de blé est donnée par :

$$S_{\text{blé}, \text{Mha}} = \frac{m_{\text{blé}, t}}{7,01 \times 10^6}$$

Ce qui donne le tableau (en Mha) :

Source		Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	3,20	2,29	5,03	10,51
	Agriculture, industrie, construction	0,39	3,79	6,14	10,32
	Résidentiel, tertiaire	0,07	3,66	0,20	3,92
	Transports	0	26,25	0,20	26,45
Total					51,20

La surface de maïs est donnée par :

$$S_{\text{maïs, Mha}} = \frac{m_{\text{maïs, t}}}{7,45 \times 10^6}$$

Ce qui donne le tableau (en Mha) :

	Source	Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	3,14	2,24	4,94	10,32
	Agriculture, industrie, construction	0,38	3,72	6,03	10,13
	Résidentiel, tertiaire	0,06	3,59	0,19	3,85
	Transports	0	26,78	0,19	25,97
Total					50,27

La surface de betterave est donnée par :

$$S_{\text{betterave, Mha}} = \frac{m_{\text{betterave, t}}}{78,55 \times 10^6}$$

Ce qui donne le tableau (en Mha) :

	Source	Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	1,24	0,89	1,95	4,08
	Agriculture, industrie, construction	0,15	1,47	2,38	4,00
	Résidentiel, tertiaire	0,03	1,42	0,08	1,52
	Transports	0	10,19	0,08	10,26
Total					19,87

5. Calculez la fraction que représente ces surfaces de blé, maïs et betterave par rapport à la surface agricole française totale.

Réponse : Pour le blé, la fraction de la surface agricole est donnée par (en %) :

$$S_{\text{blé, \%}} = \frac{S_{\text{blé, Mha}}}{26,9} \times 100$$

Soit le tableau, en % :

	Source	Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	11,90	8,50	18,69	36,09
	Agriculture, industrie, construction	1,46	14,08	22,82	38,36
	Résidentiel, tertiaire	0,24	13,60	0,73	14,57
	Transports	0	97,60	0,73	98,33
Total					190,34

Pour le maïs, la fraction de la surface agricole est donnée par (en %) :

$$S_{\text{maïs, \%}} = \frac{S_{\text{maïs, Mha}}}{26,9} \times 100$$

Ce qui donne le tableau (en %) :

Source		Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	11,68	8,34	18,35	38,38
	Agriculture, industrie, construction	1,43	13,83	22,41	37,66
	Résidentiel, tertiaire	0,24	13,35	0,72	14,30
	Transports	0	95,63	0,72	96,54
Total					186,89

Pour la betterave, la fraction de la surface agricole est donnée par (en %) :

$$S_{\text{betterave, \%}} = \frac{S_{\text{betterave, Mha}}}{26,9} \times 100$$

Soit le tableau (en %) :

Source		Charbon	Pétrole	Gaz	Total
Secteur	Énergétique	4,62	3,30	7,25	15,17
	Agriculture, industrie, construction	0,57	5,46	8,85	14,88
	Résidentiel, tertiaire	0,09	5,28	0,28	5,65
	Transports	0	37,87	0,28	38,15
Total					73,85

6. Quelles conclusions pouvez-vous tirer de ces résultats?

Réponse : Selon la source de bio-éthanol choisie pour remplacer la totalité des sources fossiles :

- Il faudrait les 3/4 de la surface agricole française pour la betterave
- Il faudrait doubler la surface agricole française pour le blé ou le maïs

Donc :

- Nous ne pourrions plus manger de fruits et légumes issus la production française
- Nous ne pourrions plus bénéficier de l'agriculture française pour en retirer de la matière : chanvre et lin (textile), bois
- Nous perdriions toutes nos exportations agricoles
- Et c'est sans compter l'impact économique de l'agriculture à l'intérieur du pays...
- Nous ne pourrions plus fournir de la nourriture française au français : il faudra donc l'importer. Ce qui déséquilibrera d'autant plus notre balance commerciale...
- Si nous ne faisons que quelques types de culture (blé et/ou maïs et/ou betterave), la biodiversité accusera un sévère contre-coup.

Exercice 3.6 – Pertes sur le réseau électrique

Source : G. Blanc

Les pertes sous forme d'énergie thermique sur le réseau électrique français sont chaque année d'environ 11 TWh. Combin cela représente-t-il de réacteurs nucléaires?

Réponse :

L'énergie électrique perdue (effet Joule) est de :

$$11 \text{ TWh} = 11 \cdot 10^{12} \times 3600 = 4 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Sur une année, soit $3,14 \cdot 10^7$ s, cela représente une puissance moyenne (électrique) de :

$$\frac{4 \cdot 10^{16}}{3,14 \cdot 10^7} = 1,26 \cdot 10^9 \text{ W} = 1,26 \text{ GW}$$

En France, il y a 56 réacteurs REP en fonctionnement dont la puissance électrique est entre 900 et 1500 MW. Les deux réacteurs EPR de Flamanville ont une puissance de 1330 MW.

Les pertes thermiques sur le réseau sont donc équivalentes à un réacteur nucléaire.

Exercice 3.7 – Combien de réacteurs nucléaires?

Source : G. Blanc

La consommation d'énergie primaire annuelle par l'humanité est environ de 600 EJ aujourd'hui (1 EJ = 10^{18} J).

1. Quelle puissance moyenne cela représente-t-il?

Réponse : Il suffit de diviser par le nombre de secondes dans une année :

$$\frac{600 \cdot 10^{18}}{3,14 \cdot 10^7} = 19 \cdot 10^{12} \text{ W} = 19 \text{ GW}$$

2. La consommation d'énergie primaire croît de manière exponentielle à un taux de 2,2 % par an. Cela représente combien de réacteurs nucléaires en plus la première année?

Réponse : L'année initiale, la puissance moyenne primaire consommée est de 19 TW. L'année suivante, elle sera de : $19 + 0,022 \times 19 = 19 + 0,418$ TW. Soit 418 GW en plus.

Il s'agit de puissance primaire. Pour obtenir la puissance électrique obtenue dans une centrale nucléaire correspondante est faut tenir compte du rendement de 33 % des centrales. $418 \times 0,33 = 139$ GW électrique.

Or la puissance électrique d'un réacteur nucléaire est environ de 1 GW.

Pour compenser l'augmentation de la consommation d'énergie par l'humanité, il faut ajouter 139 réacteurs nucléaires la première année.

Pour information, en 2020, il y a 444 réacteurs nucléaires dans 32 pays.

Exercice 3.8 – Réserves d'uranium

Source : G. Blanc

La consommation d'énergie primaire nucléaire dans le monde en 2022 est de 6702 TWh.

1. Quelle est la consommation d'électricité nucléaire dans le monde en 2022?

Réponse : À partir de l'énergie primaire, on obtient l'électricité nucléaire en multipliant par le rendement des centrales nucléaire à savoir 33 %. Ainsi : $6702 \times 0.33 = 2212$ TWh

2. Cela correspond à quelle puissance moyenne?

Réponse : La puissance électrique correspondante est :

$$\frac{2212 \cdot 10^{12} \times 3600}{3,14 \cdot 10^7} = 254 \text{ GW}$$

3. La fission d'un noyau d'uranium 235 libère 200 MeV d'énergie thermique. Combien faut-il fissionner de noyaux pour produire 1 GW d'électricité?

Réponse : On a :

$$200 \text{ MeV} = 200 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,2 \cdot 10^{11} \text{ J (thermique)}$$

Pour avoir 1 GW électrique, il faut 3 GW thermique. Ce qui correspond, sur un an à une énergie thermique de :

$$3 \cdot 10^9 \times 3,14 \cdot 10^7 = 9,4 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

On obtient le nombre de fissions nécessaires :

$$\frac{9,4 \cdot 10^{16}}{3,2 \cdot 10^{11}} = 3 \cdot 10^{27}$$

qui est aussi le nombre de noyaux d'uranium 235.

4. Quelle masse d'uranium 235 cela représente-t-il?

Réponse : La masse molaire de l'uranium 235 est de 235 g/mol. Le nombre de moles en jeu est de :

$$\frac{3 \cdot 10^{27}}{6 \cdot 10^{23}} = 5000 \text{ mol}$$

D'où une masse de : $5000 \times 235 = 1,175 \cdot 10^6 \text{ g} = 1175 \text{ kg}$ pour 1 GW électrique.

5. Quelle masse d'uranium 235 est nécessaire pour la consommation annuelle mondiale d'électricité nucléaire?

Réponse :

$$254 \times 1175 = 298 \cdot 10^3 \text{ kg} \approx 300 \text{ t}$$

La consommation mondiale annuelle d'électricité nucléaire est actuellement d'environ 300 t d'uranium 235.

6. Les réserves d'uranium 235 estimées dans le monde sont de 43000 t (Blanc & Noûs 2023). Avec la consommation annuelle calculée, cela permet de durer combien de temps?

Réponse : Il suffit de diviser les réserves par la quantité consommée chaque année :

$$\frac{43000}{300} = 143 \text{ ans}$$

Ce résultat est un argument pour dire que « sauver le climat » en multipliant le nombre de centrales nucléaire fonctionnant avec la technologie actuelle n'est pas réaliste.

Exercice 3.9 – Consommation d’énergie et limites à la croissance
Source : F. Brient et M. Chassé

La période parfois appelée « grande accélération » a été marquée par une croissance exponentielle d’un ensemble de grandeurs socio-économiques couplée à des variations similaires de diverses variables environnementales. Une grandeur particulièrement utile pour appréhender l’importance des bouleversements associés aux activités humaines est l’énergie. La tendance de l’évolution de la consommation d’énergie primaire mondiale est présentée dans les documents suivants.

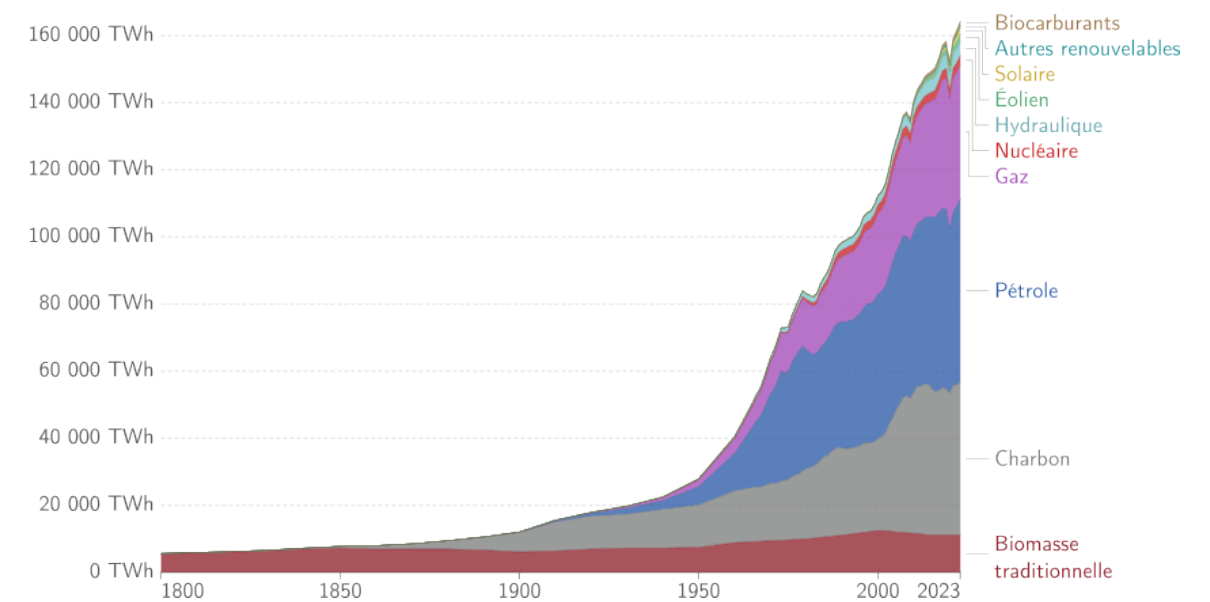


FIGURE 3.1 – Consommation mondiale directe d’énergie primaire (modifié d’après OurWorldin-Data.org/energy)

Année	1800	1850	1900	1950	2000	2023
Consommation d’énergie primaire (TWh)	5600	7791	12 101	27 972	112 496	164 385
Taux de croissance annuel moyen (%)						
Extrapolation à partir de $t_{1800-1850}$ (TWh)						
Extrapolée linéaire, tendance 1800–1850 (TWh)						

TABLE 3.2 – Consommation mondiale d’énergie primaire à différentes périodes (sources : Energy Institute – Statistical Review of World Energy (2024) ; Energy Transitions : Global and National Perspectives, 2nd edition, Appendix A, Vaclav Smil (2017)).

1. Décrire l'évolution des sources d'énergie primaire utilisées et expliquer pourquoi on parle parfois de transition énergétique avec les débuts de l'utilisation du charbon ou du pétrole. Discuter de la pertinence de cette notion au regard des données historiques.

Réponse : La consommation mondiale d'énergie a augmenté depuis 1850 avec une augmentation significative à partir de 1950. De nouvelles sources d'énergie ont été exploitées de plus en plus massivement au cours du temps : le charbon autour de 1850, le pétrole autour 1910, le gaz autour 1920, et les énergies renouvelables et le nucléaire autour de 1970. Malgré l'apparition de nouvelles sources d'énergie, chacune d'entre elles augmente avec le temps. Il n'y a donc pas de remplacement d'un type d'énergie par une autre, mais plutôt une addition des sources d'énergie. La transition énergétique décrit plutôt un changement de la source principale d'énergie utilisée plutôt qu'un changement de source d'énergie pour une même consommation (le paradoxe de Jevons n'est pas tout à fait celui là, c'est plutôt que si l'efficacité de l'usage de la ressource augmente, les économies potentielles sur la ressource sont compensées par une augmentation des usages, ici ça s'y apparente mais on ne discute pas de l'efficacité des différentes sources). Il n'y a pas réellement eu de transition énergétique mais plutôt un empilement/une addition des énergies. De plus, la figure nous montre que les énergies renouvelables ne représentent qu'une petite partie de la consommation totale.

2. Quel type de fonction utiliser pour approximer la tendance observée de l'évolution de la consommation d'énergie primaire (Figure 3.1) ?

Réponse : La tendance de consommation d'énergie suit des tendances exponentielles, en particulier sur la période 1800–1970, la tendance continue jusqu'à aujourd'hui avec une inflexion du taux de croissance autour de 1970.

3. À partir du tableau 3.2, estimer le taux de croissance annuel moyen de la consommation mondiale d'énergie primaire sur les différents intervalles proposés (t_{0-n}). On peut estimer le taux de croissance annuel entre deux années à l'aide de la formule suivante¹³ :

$$t_{0-n} = \left(\frac{EP_n}{EP_0} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (3.1)$$

avec

- EP_n : la consommation d'énergie primaire à l'année n ;
- EP_0 : la consommation d'énergie primaire à l'année initiale considérée ;
- n : le nombre d'années écoulées entre les deux mesures d'énergie primaire consommée.

13. Pour comprendre l'origine de cette formule, on pourra se rappeler que l'évolution annuelle d'une variable u avec un taux de croissance annuel t donné correspond à une suite définie par récurrence de la manière suivante :

$\forall n \in \mathbb{N}, u_{n+1} = (1 + t) \cdot u_n$

On peut reconnaître ici une suite géométrique dont on peut démontrer qu'elle est définie explicitement comme suit :

$\forall n \in \mathbb{N}, u_n = u_0 \cdot (1 + t)^n$.

Réponse : Pour l'intervalle entre 1850 et 1800, nous avons :

$$t_{1850-1800} = \left(\frac{EP_{1850}}{EP_{1800}} \right)^{\frac{1}{1850-1800}} - 1 \quad (3.2)$$

$$= \left(\frac{7791}{5600} \right)^{\frac{1}{50}} - 1 \quad (3.3)$$

$$= 0,66\% \quad (3.4)$$

Nous faisons le même calcul pour chaque intervalle de 50 ans et le dernier de 23 ans. Nous voyons que le taux de croissance annuel moyen augmente avec le temps avec un maximum sur l'intervalle 1950–2000.

Année	1800	1850	1900	1950	2000	2023
Consommation d'énergie primaire (TWh)	5600	7791	12 101	27 972	112 496	164 385
Taux de croissance annuel moyen (%)		0,7	0,9	1,7	2,8	1,7
Extrapolation à partir de $t_{1800-1850}$ (TWh)		7791	10 839	15 080	20 980	24 422
Extrapolation linéaire, tendance 1800–1850 (TWh)		7791	9982	12 173	14 364	15 371

4. Estimer la consommation d'énergie primaire aux différentes périodes si le taux de croissance était resté celui de la période 1800–1850 (vous pourrez vous aider de la note de bas de page pour l'estimer directement). Une variation de quelques pourcents du taux de croissance a-t-elle une influence significative sur les évolutions à long terme de la consommation d'énergie primaire?

Réponse : En utilisant la formule $u_n = u_0 \cdot (1 + t)^n$, et en utilisant $t = t_{1850-1800}$ et $u_0 = 5000$ TWh, nous obtenons

$$u_n = 5000 \cdot (1 + 0,66/100)^n \quad (3.5)$$

Alors que le taux de croissance n'est passé que de 0,7% à 2,8% maximum, la consommation cumulée d'énergie en 2023 a été multipliée par 6,7 environ. C'est l'effet exponentiel de quantités cumulées.

5. Estimer la consommation d'énergie primaire aux différentes périodes si l'évolution avait suivi une tendance linéaire correspondant à l'évolution observée sur la période 1800–1850. Une tendance de croissance linéaire a-t-elle des effets comparables à une tendance exponentielle, même pour des taux de croissance faibles?

Réponse : Il faut tout d'abord calculer le taux annuel d'augmentation de la consommation (α) sur la période 1800–1850. Ici, nous faisons $\alpha = (7791 - 5600)/50 = 43,82$ TWh/an. Nous pouvons ainsi calculer l'extrapolation linéaire et nous voyons que la consommation est environ 10 fois plus faible que la consommation réelle. Une tendance exponentielle, même avec des taux de croissance très faible, a donc des conséquences plus importantes qu'une tendance linéaire si la période de temps est suffisamment longue.

6. En considérant les taux de croissance observés sur la période 1950–2000, estimer le temps de doublement de la consommation d'énergie primaire. Estimer alors en combien de temps environ on multiplie par 1000 cette consommation. Comparer à l'évolution sur la période 1800–2023. Est-ce aisément soutenable?

Réponse : Nous utilisons à nouveau la formule précédente avec $EP_n = 2 \cdot EP_0$. Nous avons donc $t = 2^{1/n} - 1$. Nous souhaitons isoler n :

$$2^{1/n} = t + 1 \quad (3.6)$$

$$e^{(1/n)\ln 2} = t + 1 \quad (3.7)$$

$$\frac{\ln 2}{n} = \ln(t + 1) \quad (3.8)$$

$$n = \frac{\ln 2}{\ln(t + 1)} \quad (3.9)$$

Avec $t = 2,8\%$, nous doublons ainsi la consommation en 25 ans. A ce rythme, la consommation serait multipliée par 1000 en 250 ans ($2^{10} = 1024$). Entre 1800 et 2023 (soit 223 ans), la consommation réelle a été multipliée par 11. Il est impossible d'imaginer la soutenabilité d'une telle évolution alors que les évolutions pour une multiplication par 10 de la consommation énergétique sur un intervalle similaire ont amené à des perturbations majeures du système Terre bien documentées aujourd'hui.

7. L'énergie solaire reçue par la Terre chaque seconde est d'environ $1,74 \cdot 10^{17}$ J. Estimer en combien de temps la demande énergétique nécessiterait que l'ensemble de l'énergie solaire reçue par la Terre soit utilisée si les taux de croissance restaient aux niveaux de la période 1950–2000. L'énergie produite chaque seconde par fusion dans le cœur du Soleil est d'environ $3,9 \cdot 10^{26}$ J. Faites de même pour estimer au bout de combien de temps il faudrait avoir l'énergie de fusion d'un Soleil à disposition chaque année pour assouvir la demande énergétique. Que penser de l'éventualité de telles perspectives aux horizons temporels obtenus?

Réponse : Calculons d'abord l'énergie nécessaire en joules nécessaire à la consommation. Sachant que 1 KWh = 3600 kJ, l'humanité utilise $164\,385 \cdot 10^{12} \cdot 3600 = 5,92 \cdot 10^{20}$ J par an, soit une puissance $1,87 \cdot 10^{13}$ W. La question est de savoir en combien de temps cette consommation atteint la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre chaque seconde, soit $1,74 \cdot 10^{17}$ W. Le rapport entre les deux est $EP_{\text{final, solaire reçu}} / EP_{\text{initial, humain 2023}}$ est de 9278. Par analogie avec la question précédente, on a $n_{f-i} = \ln(EP_f/EP_i) / \ln(1 + t_{1950-2000})$. L'application numérique donne environ 328 ans. Pour la puissance de fusion, un calcul identique nous donne 1102 ans environ. Ces discussions relèvent de la science fiction, mais avoir un soleil disponible pour notre seule consommation (simplement l'énergie qui arrive sur Terre ou bien celle de la fusion) relève d'une évolution technologique inimaginable si l'on se compare à l'évolution technique 300 ans en arrière ou 1000 ans en arrière. Sans parler des limites physiques intrinsèques à de tels développements.

8. La figure 3.2 présente la consommation d'énergie par habitant en fonction du PIB par habitant pour différents pays du monde. Qu'en déduire des liens probables entre l'évolution de la consommation d'énergie et celle du PIB? Quelles limites peut-on opposer à cette interprétation?

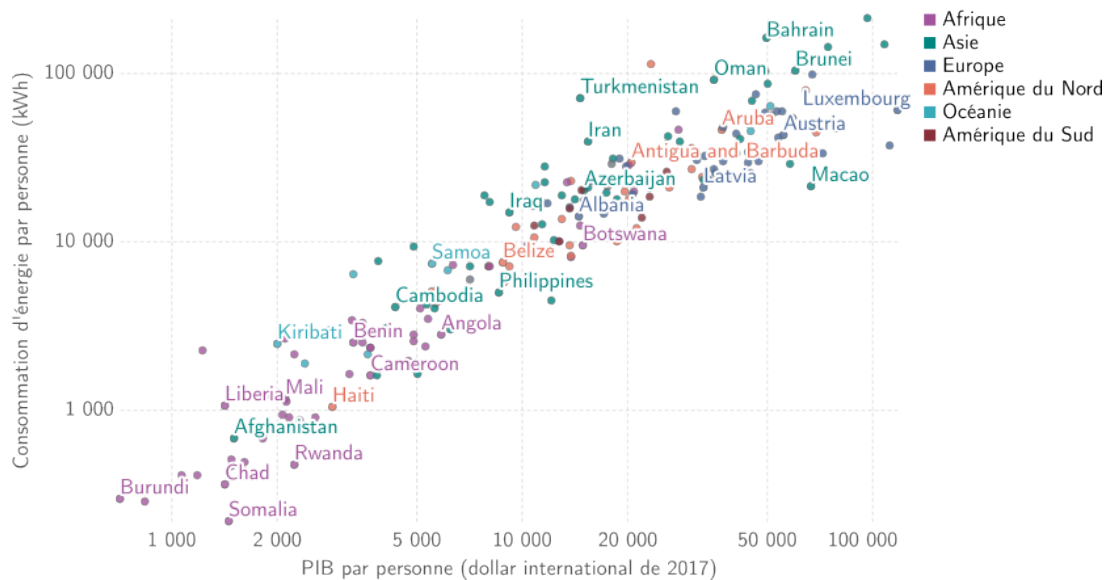


FIGURE 3.2 – Consommation d'énergie par personne relativement au produit intérieur brut (PIB) par personne présentée en échelle log–log (modifié d'après OurWorldinData.org/energy)

Réponse : Les deux échelles sont en logarithmes, il y a donc une relation linéaire entre le PIB par personne et la consommation d'énergie par personne.

Une partie des limites à cette interprétation repose sur l'échelle qui est log–log et écrase donc la dispersion. Néanmoins, la tendance est bien là, mais elle relève d'un modèle largement mondialisé de développement basé sur l'usage massif d'énergies fossiles à bas coût. Une même consommation d'énergie peut avoir des effets très différents sur l'environnement en fonction de son origine : énergies fossiles, énergie nucléaire et/ou énergies renouvelables. On peut aussi se poser la question de savoir si la lutte contre la pauvreté passe forcément par une augmentation de la consommation d'énergie (via une diversification des sources ou à un meilleur accès à l'énergie). Le PIB ne signifie pas non plus qualité de vie, l'objectif serait de limiter la consommation d'énergie par personne en augmentant une variable plus représentative de la qualité de vie (voir le bonheur national brut au Bhoutan ou l'indice de développement humain des Nations Unies).

9. L'équation 3.10 dite « de Kaya »¹⁴, rappelée ci-dessous, relie la consommation d'énergie, le PIB aux émissions de CO₂. À quelle condition est-ce possible de limiter les émissions de CO₂ tout en maintenant une croissance économique? Discuter du potentiel et des limites de ces évolutions pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{Énergie}} \cdot \frac{\text{Énergie}}{\text{PIB}} \cdot \text{PIB} \quad (3.10)$$

avec

- CO₂ : les émissions de CO₂ mondiales;
- Énergie : la consommation mondiale d'énergie primaire;
- PIB : le produit intérieur brut.

14. L'équation présentée ici est modifiée, une autre variable est habituellement prise en compte dans l'équation, la population.

Réponse : Pour garder une croissance économique (PIB qui augmente) en limitant les émissions de gaz à effet de serre (CO₂) qui diminue, il est nécessaire de faire diminuer la quantité de CO₂ émise par quantité d'énergie utilisée et diminuer l'énergie utilisée par point de PIB. Le premier point peut se faire via l'électrification des usages et l'utilisation d'énergies renouvelables et nucléaire (mix énergétique). Le second nécessite une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'énergie, via une diminution des pertes, une augmentation des rendements et une rationalisation de son utilisation. Ce type de développement implique ce que l'on appelle un découplage entre émissions de CO₂ et production de richesse. Ce découplage se doit d'être absolu (évolution opposée de la croissance des émissions et du PIB), mondial (à l'heure actuel il est relatif et régional), pérenne (il faut qu'il soit structurel et non conjoncturel comme pendant le COVID) et rapide (objectifs de l'accord de Paris (environ 10%/an d'ici 2030) afin de répondre pleinement à la crise environnementale que nous vivons, et dont nos sociétés ne font que subir les prémisses. Cet effort de découplage devrait également être justement réparti, les pays développés disposant de marges de manœuvre plus importantes pour modifier leurs usages. Ils portent de ce fait la responsabilité historique de faire émerger rapidement des modèles d'économies soutenables et décarbonées.

10. Plus généralement, existe-t-il d'autres limites à cette approche visant à concilier la croissance économique tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre?

Réponse : Nous sommes dans un monde fini qui ne peut permettre une croissance infinie. Même avec une diminution des gaz à effet de serre, les ressources restent limitées et les conditions de vie sur Terre peuvent se dégrader. Cette approche ne considère en effet que les émissions carbone, pas les autres impacts qui sont divers (voir cadre des frontières planétaires pour exemple). Le découplage doit être total (décorrélation de tous les dommages environnementaux).

Chapitre 4

Le climat

Exercice 4.1 – Du CO₂ dans l'atmosphère

Source : G. Blanc

1. Montrez que la masse molaire de l'air atmosphérique est environ de 29 g·mol⁻¹.

Réponse : L'atmosphère contient 21 % d'oxygène (O₂) et 78 % d'azote (N₂). Soit :

$$M(\text{air}) = 0,21 \times (2 \times 16) + 0,78 \times (2 \times 14) = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

2. Quelle est la masse molaire du dioxyde de carbone?

Réponse : $12 + 2 \times 16 = 44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

3. Que signifie « ppm » quand on dit qu'il y a X ppm de CO₂ dans l'atmosphère?

Réponse : 1 molécule de CO₂ pour 1 million de molécules d'air.

4. Sachant que la masse totale de l'atmosphère terrestre est de $5,148 \cdot 10^{18}$ kg, à quelle masse de dioxyde de carbone correspond une proportion de 1 ppm?

Réponse : 1 ppm signifie que l'on a 1 mole de CO₂ pour 10⁶ moles d'air. Donc 44 g de CO₂ pour $29 \cdot 10^6$ g d'air. Donc, pour $5,148 \cdot 10^{18}$ kg d'air, on a :

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{M(\text{CO}_2) \times m(\text{atmo})}{M(\text{air})^6} = \frac{44 \times 5,148 \cdot 10^{18}}{29 \times 10^6} = 7,8 \cdot 10^{12} \text{ kg}$$

la masse de 1 ppm de CO₂ dans toute l'atmosphère.

5. Quelle était la concentration du CO₂ dans l'atmosphère avant l'ère industrielle?

Réponse : 280 ppm

6. Quelle est la concentration actuelle du CO₂ dans l'atmosphère en ppm ?

Réponse : 410 ppm (ça c'était en 2018!)

7. Compte tenu de la différence de concentration du CO₂ dans l'atmosphère entre aujourd'hui et l'ère pré-industrielle, quelle masse de CO₂ rejetée par les activités humaines s'est accumulée dans l'atmosphère ?

Réponse : $410 - 280 = 130$ ppm Soit $1 \cdot 10^{15}$ kg.

8. Entre 1850 et 2021 l'humanité a rejeté 2390 Gt de CO₂ dans l'atmosphère. Comparer cette valeur avec celle que vous obtenez. Sont-elles différentes ? Si oui, d'où vient la différence ?

Réponse : 10^{15} kg = 10^{12} t = 10^3 Gt de CO₂.

Il y a environ deux fois plus de CO₂ qui a été rejeté par les activités humaines. La moitié a été absorbé par les puits naturels, que sont les océans et la biosphère.

Exercice 4.2 – Réchauffement climatique : de Causes à Effet

Sources : C. Coillot - F. Dulac - A. Faivre

Émissions anthropiques de CO₂ liées aux énergies fossiles en 2021 :

D'après les données 2021 nous connaissons les consommations mondiales annuelles des différentes énergies fossiles. La base empreinte de l'ADEME nous renseigne ensuite sur les facteurs d'émissions (FEs) de chacune de ces énergies fossiles (ces FEs découlent en partie des équations bilan de la chimie), permettant de convertir chacune de ces consommations en équivalent CO₂ (noté CO₂e).

Les consommations mondiales en énergies fossiles sont ainsi répaties :

- **Quantité de pétrole** : 94088 kbarils/jour ($FE_{\text{pétrole}} = 3,34 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ – rq. 1 baril = 159 kg)
- **Quantité de gaz** : 4037 Gm³/an ($FE_{\text{gaz}} = 2,15 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$)
- **Quantité de charbon** : 8000 Mtonnes/an ($FE_{\text{charbon}} = 2,23 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$)

1. Calculez la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère en GtCO₂ (Gt = Gigatonnes). Rq. : nous faisons ici l'hypothèse que l'essentiel des gaz émis dans les processus de l'extraction à la combustion est du CO₂ et qu'en l'occurrence on peut, à ce stade, assimiler CO₂e et CO₂.

Réponse : Nous obtenons la quantité totale de CO₂ émise en 2021 :

$$\delta Q_{\text{CO}_2} = Q_{\text{pétrole}} FE_{\text{pétrole}} + Q_{\text{gaz}} FE_{\text{gaz}} + Q_{\text{charbon}} FE_{\text{charbon}} = 44,75 \text{ GtCO}_2$$

Des puits de carbone à l'atmosphère :

2. Les puits de carbone (océan et végétation) absorbent en moyenne un peu plus de la moitié du CO₂ (57), d'après Blanc & Noûs 2023. En déduire la quantité de CO₂ dans l'atmosphère en 2021 : $\delta Q_{\text{CO}_2\text{-Atmosphère}}(2021)$ (en GtCO₂).

Réponse : La quantité de CO₂ dans l'atmosphère émis en 2021 et restant dans l'atmosphère (car l'absorption n'est pas instantanée) serait alors de :

$$\delta Q_{\text{CO}_2\text{-atmosphère}}(2021) = 0,43 \times \delta Q_{\text{CO}_2}(2021) = 19,25 \text{ GtCO}_2$$

3. La quantité totale de CO₂ dans l'atmosphère (2020) est : $Q_{\text{CO}_2}(2020) = 3252 \text{ GtCO}_2$. À partir de la masse totale de l'atmosphère (Vernier & Even-Baudouin 2020) : $M_{\text{atm}} = 5,14 \times 10^{18} \text{ kg}$ en déduire la concentration de CO₂ (C_{CO_2}) dans l'atmosphère pour l'année 2020 que vous exprimerez en ppmv (partie par million en volume). On rappelle les densités respectives volumiques du CO₂ ($\rho_{\text{CO}_2} = 1,87 \text{ kg/m}^3$) et de l'air ($\rho_{\text{air}} = 1,204 \text{ kg/m}^3$).

Réponse :

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{Q_{\text{CO}_2}}{M_{\text{atm}}} \times \frac{\rho_{\text{atm}}}{\rho_{\text{CO}_2}} = 407 \text{ ppm}$$

du volume de l'atmosphère.

4. Exprimez la variation annuelle de la quantité de CO₂ en % (δQ_{CO_2}).

Réponse : Les émissions de CO₂ de l'année 2021 causeront une variation de la quantité de CO₂ de : $\delta Q_{\text{CO}_2}(\%) = \frac{\delta Q_{\text{CO}_2}(2021)}{Q_{\text{CO}_2}} = 0,59\%$

5. En déduire la variation relative en ppm/an (δQ_{CO_2} (ppm/an)). Comparez aux valeurs reportées par l'observatoire de Mauna Loa ($\approx 2,7 \text{ ppm/an}$).

Réponse : En considérant une concentration de 407 ppm en 2020 (correspondant à la quantité totale de CO₂e). La variation de 0,59 % peut s'exprimer en ppm : on obtient une variation 2021/2020 de concentration de CO₂ de $\delta \text{CO}_2/\text{an} = 0,0059 \times 407 \text{ ppm} = 2,8 \text{ ppm/an}$

Température moyenne à la surface de la Terre en l'absence de forçage radiatif lié aux émissions d'origine anthropique :

Dans le cas du modèle d'atmosphère à une couche, on montre que le bilan d'énergie entre le flux solaire et le flux radiatif se met sous la forme simplifiée suivante (Blanc & Noûs 2023 ; Vernier & Even-Baudouin 2020) en négligeant l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère) : $(1 - \alpha) \frac{S}{4} = \sigma (1 - \frac{\epsilon_{\text{IR}}}{2}) T_S^4$, où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ est la constante de Stefan-Boltzmann, α l'albédo, ϵ_{IR} est l'émissivité/absorptivité dans le domaine infrarouge de l'atmosphère (par rapport à la référence de 1880) et ($S = 1368 \text{ W/m}^2$) le flux solaire.

6. Donner l'expression de la température moyenne annuelle globale à l'équilibre de la Terre en fonction des différents paramètres (T_S), puis donner sa valeur en K et en °C. Pour l'application numérique, nous utiliserons les valeurs des paramètres données dans Kandel 2019 : $\epsilon = 0,3$, $\epsilon_{\text{IR}}/2 = 0,39$.

Réponse : La relation est : $T_S = \left(\frac{(1-\alpha)S}{4\sigma(1-\epsilon_{\text{IR}}/2)} \right)^{1/4}$ Une simple application numérique permet d'estimer la température moyenne à la surface de la Terre : $T_S = 288 \text{ K}$ qui devient donc $T_S = 15,4^\circ \text{C}$. N.B : le modèle à une couche ici utilisé (dit à « 1 vitre ») présente des limites liées à la saturation de l'absorptivité du CO₂ décrite dans Dufresne & Treiner 2011.

Remarque : le climat va mettre plusieurs années à s'équilibrer pour un forçage donné une fois la teneur en CO_2 stabilisée (par ex. du fait des temps de réponse de la glace et que l'excès de chaleur s'évacue en grande partie en profondeur dans l'océan) ; on parle d'équilibre thermique pour un bilan radiatif donné, et donc de T_S à l'équilibre.

Forçage radiatif

Le forçage radiatif illustre le déséquilibre énergétique dans l'atmosphère causé par l'absorption supplémentaire du rayonnement infrarouge. Ce déséquilibre énergétique se traduit par une augmentation de la température terrestre. Il s'exprime en fonction du rapport des concentrations de CO_2 de l'année considérée (ici 2021) en ppm par rapport à une année de référence (en général on considère 1880 comme étant l'année de référence). On note la concentration de CO_2 de l'année de référence : $C_{CO_2_0} = C_{CO_2}(1880) = 280$ ppm). Le forçage radiatif est donné par la relation suivante (Ramanathan(1979) ??) :

$$\Delta F_{\frac{\text{année}}{1880}} = 5,35 \times \ln \left(\frac{CO_2(\text{année})}{CO_{2_0}} \right)$$

7. En déduire le forçage radiatif de 2021 par rapport à 1880.

Réponse : L'application numérique avec la concentration de $CO_2(2021)$ par rapport à 1880 conduit à : $\Delta F_{\frac{2021}{1880}} \approx 2 \text{ W/m}^2$.

Modèle climat d'ordre 0 en présence de forçage radiatif en 2021 :

En présence de forçage radiatif anthropique, le bilan d'énergie (Budyko(1967) ??), s'exprime :

$$(1 - \alpha) \frac{S}{4} + \Delta F_{\frac{2021}{1880}} = \sigma \left(1 - \frac{\epsilon_{IR}}{2} \right) T_S^4$$

8. En considérant le rapport de concentration de CO_2 de l'atmosphère de 1880 à 2021, déterminer la température moyenne à l'équilibre ($T_S(2021)$) du fait du forçage radiatif, en déduire l'augmentation de température d'origine anthropique, nommée anomalie de température δT_S en $^{\circ}C$

Réponse : On exprime la température d'équilibre du système climatique terrestre en présence du forçage radiatif :

$$T_S = \left(\frac{(1 - \alpha)S + 4\Delta F_{\frac{2021}{1880}}}{4\sigma(1 - \epsilon_{IR}/2)} \right)^{1/4}$$

Une application numérique permet ensuite d'estimer la température moyenne à la surface de la Terre en considérant le forçage radiatif lié au surplus de CO_2 : $T_S = 16,06^{\circ}C$ soit une anomalie de température de : $\delta T_S = 0,6^{\circ}C$.

Impact des contre-réactions (feedback) :

L'augmentation de la température liée à l'augmentation de la concentration de CO_2 , induit deux contre-réactions. D'abord la température augmentant, la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente, ensuite l'augmentation de température implique une fonte des glaces modifiant l'albédo (Charney 1979).

9. Compte-tenu de l'anomalie de température mesurée en 2021 ($\delta T_{S\text{-mesuré}} = 1,2^{\circ}C$) en déduire le facteur d'amplification des contre-réactions K_{feedback} .

Réponse : $K_{\text{feedback}} \approx 2$

Proposition alternative : expliquer l'écart entre $\delta T_S = 0,6^\circ\text{C}$ calculé du au CO_2 et l'anomalie de température mesurée en 2021 ($\delta T_S = 1,2^\circ\text{C}$)

Exercice 4.3 – Bilan radiatif du corps humain

Source : Roland Lehoucq

1. Faites votre bilan radiatif dans une pièce chauffée à 20°C . Vous supposerez que votre corps rayonne comme un corps noir dont la température est celle de la peau, soit environ 27°C .

Réponse : Si l'on suppose que le corps humain rayonne comme un corps noir, sa luminosité (puissance émise) est $L_c = S\sigma T_c^4$ où $T_c = 27^\circ\text{C}$ est la température de la peau et S l'aire du corps. Dans une pièce chauffée à $T_a = 20^\circ\text{C}$, le corps reçoit la puissance $L_a = S\sigma T_a^4$. Au total, le corps humain perd la puissance $\mathcal{P} = L_c - L_a = S\sigma(T_c^4 - T_a^4)$.

2. Quelle est la puissance nette que vous rayonnez? En déduire la quantité d'énergie perdue en une journée et comparer cette valeur à votre métabolisme de base.

Réponse : L'application numérique donne $\mathcal{P} \approx 77\text{ W}$ pour un humain mâle de 1.75 m et de 75 kg. Cela représente une puissance de 1 500 kcal/jour. Le métabolisme de base de cet humain, supposé âgé de 30 ans est de 1 750 kcal/jour, sensiblement égal donc.

Formulaire : Le corps humain a une aire S (m^2) donnée empiriquement par la relation $S \simeq \sqrt{HM}/6$, où H est la taille en mètre et M la masse corporelle en kg. Le métabolisme de base M_b est l'énergie quotidienne minimum que doit produire l'organisme pour fonctionner durablement. Il est exprimé en kcal et donné empiriquement par $M_b = c M^{0.48} H^{0.50} A^{-0.13}$, où A est l'âge en années et c une constante valant 230 pour les femmes et 259 pour les hommes.

Exercice 4.4 – Température d'équilibre de la Terre et des planètes

Source : Roland Lehoucq

On considère que la Terre a une orbite circulaire autour du Soleil et on supposera que ces deux astres rayonnent comme des corps noirs.

1. Commençons par ignorer l'atmosphère de la Terre. Ecrire la relation liant la luminosité Soleil $L_\odot$ à sa température $T_\odot$ et à son rayon $R_\odot$. En déduire le flux reçu par la Terre située à la distance D .

Réponse : La luminosité du Soleil est donnée par $L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma T_\odot^4$. A la distance D la Terre reçoit la fraction $1/4\pi D^2$ de cette puissance, soit un flux $\phi_\odot = (R_\odot/D)^2 \sigma T_\odot^4$.

2. La Terre (nuages et calottes polaires) réfléchit la fraction $\alpha = 0.3$ du rayonnement solaire incident (α s'appelle l'albédo). Trouver la relation qui, à l'équilibre, lie la température moyenne de la Terre $T_\oplus$ à celle du Soleil.

Réponse : La Terre absorbe la fraction $(1 - \alpha)$ du flux incident sur la surface qui fait face au Soleil, égale à $\pi R_\oplus^2$. La puissance absorbée par la Terre est donc égale à $(1 - \alpha) \phi_\odot \pi R_\oplus^2$.

À l'équilibre thermique, la Terre rayonne par toute sa surface une puissance égale à la puissance absorbée. Si sa température d'équilibre est notée $T_{\oplus}$, cette condition s'écrit :

$$4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4 = (1 - \alpha) \phi_{\odot} \pi R_{\oplus}^2$$

La température d'équilibre de la Terre est donc donnée par

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \left(\frac{1 - \alpha}{4} \right)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^{1/2}$$

3. *Application numérique* : Calculez la température moyenne de la Terre sachant que le diamètre apparent du Soleil est de 0.53° . Comparez la valeur obtenue avec la température moyenne de la Terre, qui est de 288 K.

Réponse : Le diamètre apparent du Soleil est égal à $2R_{\odot}/D$ et l'on trouve que $T_{\oplus} \approx 254$ K, soit -19°C , nettement plus basse que la température moyenne mesurée.

4. La Terre est en réalité dotée d'une atmosphère transparente à la lumière visible et opaque à l'infrarouge. Ecrire le bilan radiatif du système Terre+atmosphère et en déduire la nouvelle température d'équilibre de la planète. Comment expliquer la différence avec la température moyenne mesurée?

Réponse : Il faut tenir compte d'une atmosphère considérée comme un corps noir en infrarouge rayonnant à la température d'équilibre T_a . On note $T_{\oplus}$ la température du sol. Le bilan pour l'atmosphère s'écrit :

$$8\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_a^4 = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$

car l'atmosphère perd une puissance $4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_a^4$ vers l'espace et une puissance égale vers la Terre, mais elle absorbe tout le rayonnement de corps noir de la Terre, qui est émis dans l'infrarouge.

Pour la Terre, le bilan s'écrit : $4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4 = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_a^4 + (1 - \alpha) \phi_{\odot} \pi R_{\oplus}^2$.

On en déduit que la température de l'atmosphère est donnée par l'estimation de la question précédente :

$$T_a = T_{\odot} \left(\frac{1 - \alpha}{4} \right)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^{1/2},$$

mais que la température de la surface est un facteur $2^{1/4}$ plus élevée :

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \left(\frac{1 - \alpha}{2} \right)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^{1/2}$$

en raison du rayonnement piégé dans puis renvoyé par l'atmosphère. L'application numérique donne $T_{\oplus} \approx 302$ K, soit 29°C , un peu chaud donc...

5. Refaire les applications numériques pour les autres planètes du système solaire, et pour la Lune, et discuter les résultats obtenus.

Planète	Distance au Soleil (U.A.)	Albédo α	Température observée T_{obs}
Mercure	0.39	0.12	442 K (min : 90 K; max : 700 K)
Vénus	0.72	0.75	735 K
Lune	1.00	0.12	196 K (min : 40 K; max : 396 K)
Mars	1.52	0.25	210 K
Jupiter	5.20	0.34	110 K
Saturne	9.54	0.34	84 K
Uranus	19.2	0.30	53 K
Neptune	30.1	0.29	55 K

Réponse : Note : dans l'énoncé, les extrema de la température observée ne sont données que pour Mercure et la Lune car pour les autres corps, l'amplitude relative des variations est beaucoup plus faible.

Le tableau ci-dessous donne les températures d'équilibre calculées sans et avec atmosphère absorbante si l'objet en a une (Vénus, Terre).

Planète	Distance (U.A.)	Albédo	Température observée	Température théorique sans atmosphère	Température théorique avec atmosphère
Mercure	0.39	0.12	442 K (90 K $\rightarrow$ 700 K)	430 K	
Vénus	0.72	0.75	735 K	230 K	280 K
Terre	1.00	0.31	288 K	250 K	300 K
Lune	1.00	0.12	196 K (40 K $\rightarrow$ 396 K)	270 K	
Mars	1.52	0.25	210 K	210 K	
Jupiter	5.20	0.34	110 K	110 K	
Saturne	9.54	0.34	84 K	81 K	
Uranus	19.2	0.30	53 K	58 K	
Neptune	30.1	0.29	55 K	47 K	

L'atmosphère de Mars est très ténue, on garde donc le modèle sans atmosphère.

Résultats et commentaires :

- (1) on constate que l'accord est très bon pour la majorité des planètes (Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune);
- (2) il est également très bon pour Mercure à condition de considérer la température moyenne mais on peut s'interroger sur la légitimité du modèle tant la rotation de Mercure est lente (résonance 3 : 2, quand Mercure fait 2 tours autour du Soleil, elle fait trois tours sur elle-même);
- (3) on constate aussi une légère tendance des planètes géantes à être plus chaude que le modèle : les planètes géantes n'ont pas encore entièrement perdu la chaleur interne stockée lors de leur formation, et disposent en plus d'une source d'énergie liée à leur contraction lente (mécanisme de Kelvin-Helmholtz convertissant une partie de l'énergie gravitationnelle en énergie interne);
- (4) on constate enfin que Vénus, la Terre et la Lune s'éloignent nettement de la prédiction théorique. Pour Vénus, il s'agit clairement d'un emballement de "l'effet de serre". Pour la Terre, l'écart est moindre mais reste dû à l'"effet de serre" (à noter : sans effet de serre, pas

d'eau liquide sur Terre ...). Enfin, pour la Lune, la situation est un peu la même que pour Mercure : la rotation est très lente et le modèle n'est pas valide (résonance 1 :1, la Lune présente toujours la même face à la Terre). En considérant que l'énergie solaire absorbée par la Lune est essentiellement rayonnée par la partie éclairée par le Soleil, on obtient une estimation

$$T_{\text{Lune}} = T_{\odot} (1 - \alpha)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^{1/2} \approx 390 \text{ K}$$

effectivement assez proche de la température maximum observée.

Exercice 4.5 – Rayonnement thermique

Source : G. Blanc

1. Calculer numériquement la puissance rayonnée par le Soleil dans tout l'espace. En déduire la valeur de la « constante solaire, » flux (puissance par unité de surface normale au rayonnement) de chaleur en provenance du Soleil reçu par la Terre au sommet de son atmosphère. Donner également la puissance reçue par unité de surface de l'atmosphère terrestre, en moyenne sur toute la surface de la Terre.

On donne : la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, la température de surface du Soleil : 5800 K, son diamètre : $1,4 \cdot 10^6 \text{ km}$, la distance de la Terre au Soleil : $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$.

Réponse : La loi de Stefan-Boltzmann donne la puissance rayonnée par un corps noir à la température T par unité de surface S : $dP/dS = \sigma T^4$.

Ainsi, la puissance totale rayonnée par le Soleil dans tout l'espace est : $P_{\odot} = \sigma T^4 \times \pi D^2$ soit numériquement : $P_{\odot} = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Le flux de rayonnement reçu au niveau de l'orbite de la Terre est alors : $C_{\odot} = P_{\odot} / (4\pi D_{\oplus-\odot}^2)$ soit : $C_{\odot} = 1381 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Il s'agit de la puissance reçue par la surface de l'atmosphère de la Terre offerte au Soleil (soit $\pi R_{\oplus}^2$, la surface du disque soutenu par la Terre, perpendiculaire au Soleil). Donc l'énergie totale reçue par la Terre en une rotation (c'est-à-dire en 24 h) est $C_{\odot} \pi R_{\oplus}^2 \times 86400$. Cette énergie se répartie sur l'ensemble de la surface de l'atmosphère (donc $4\pi R_{\oplus}^2$), soit 1/4 fois la valeur précédente. On obtient ainsi la valeur moyenne de la puissance reçue du Soleil, répartie sur l'ensemble de la surface de l'atmosphère, soit par unité de surface $1/4 C_{\odot} = 345 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Bien sûr, cette moyenne s'effectue entre des zones comme l'équateur, entre les tropiques, où elle est bien supérieure, et des zones, comme les pôles, où elle est bien plus faible. Par ailleurs, ce n'est pas la puissance directement reçue (et absorbée) au niveau du sol, celle-ci est de $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, le reste étant absorbé par l'atmosphère et réémis vers l'espace.

Voir par exemple :

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/biblio/pigb14/00_grandes/02_00_bilan.htm

2. Calculer numériquement la puissance totale rayonnée par la Terre dans tout l'espace. Comparer cette puissance à celle reçue du Soleil par la Terre. Conclusion ? On donne : la température moyenne à la surface de la Terre : 15°C , son rayon : 6378 km .

Réponse : La puissance totale rayonnée par la Terre est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann : $P_{\oplus} = \sigma T^4 \times 4\pi R_{\oplus}^2 = 1,99 \cdot 10^{17} \text{ W}$.

Or la Terre intercepte une fraction $(\pi R_{\oplus}^2)/(4\pi D_{\oplus-\odot}^2)$ du rayonnement solaire, soit $(6378^2)/(4 \times (150 \cdot 10^6)^2) = 4,5 \cdot 10^{-10}$. Donc le Soleil inonde la surface éclairée de la Terre d'une puissance : $3,9 \cdot 10^{26} \times 4,5 \cdot 10^{-10} = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ W}$.

Remarque : on peut aussi multiplier la constante solaire par la surface de la Terre au Soleil, soit $C_{\odot} \cdot \pi R_{\oplus}^2 = 1381 \times \pi \times (6378 \cdot 10^3)^2 = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ W}$.

On obtient la même valeur entre l'énergie qui arrive sur la Terre du Soleil et celle qu'elle réémet. Normal, la Terre est à l'équilibre (la légère différence observée vient de ce que la température d'équilibre n'est pas tout à fait 15 °C). Cette température de 15 °C est le résultat de l'effet de serre dû à l'atmosphère.

3. Calculer la puissance totale « nette » rayonnée par un être humain (nu) dans un environnement à 20 °C. Comparer l'énergie ainsi perdue par le corps humain, avec l'apport alimentaire journalier recommandé (2000 à 2200 kcal, 1 cal = 4,18 J). Conclure. On donne : la température du corps humain : 37,2 °C, sa surface moyenne : 1,8 m².

Réponse : Un corps humain est très proche d'un corps noir : l'émissivité (rapport entre l'énergie qu'il rayonne et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température) de la peau est en effet très proche de l'unité et vaut 0,98.

La puissance rayonnée par un être humain est donc : $P_H = \sigma (T_H^4 - T^4) \times S_H$ où T_H est la température du corps, T la température de l'environnement et S_H la surface du corps humain. Ce qui donne : $P_H = 193 \text{ W}$.

Chaque jour on dépense donc une énergie $193 \times 86400 = 16,7 \text{ MJ}$ ou encore 4000 kcal... C'est beaucoup, mais ça correspond à l'absence de vêtements qui ont un pouvoir isolant.

Si $T = 30 \text{ °C}$, l'énergie rayonnée vaut 1751 kcal...

Et si $T = 0 \text{ °K}$, on dépenserait une énergie de 19570 kcal, mais à moins qu'un astronaute se retrouve tout nu dans l'espace (et encore, il y fait 3 °K)!

Exercice 4.6 – Réchauffement climatique

Source : G. Blanc

1. Expliquer succinctement et qualitativement (sans formule; mais il peut y avoir des nombres!) ce qu'est physiquement le réchauffement climatique.

Réponse : Il s'agit de l'augmentation de la température de la surface de la Terre depuis environ 130 ans. C'est dû à l'augmentation de la quantité de gaz à effet de serre comme le CO₂ dans l'atmosphère, rejetés par les activités humaines, ce qui diminue la transmission de l'atmosphère dans l'infrarouge, et donc augmente l'absorption de ce rayonnement. La température d'équilibre de la surface de la Terre est ainsi décalée vers le haut.

2. Donner au moins quatre manifestations observables (ou mesurables) imputables de manière certaine au réchauffement climatique.

Réponse :

- Augmentation de la température moyenne de l'atmosphère
- Augmentation du niveau des mers
- Fonte des glaces terrestres (glaciers)
- Augmentation du nombre moyen de jours estivaux (en France)
- Diminution du nombre moyen de jours de gel
- etc...

Exercice 4.7 – Bilan radiatif de la Terre

Source : G. Blanc

1. Qu'est-ce qu'un « corps noir » ?

Réponse : Un **corps noir** est un corps qui absorbe, sans la réfléchir ni la diffuser, toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Il réémet l'énergie qu'il reçoit selon un spectre dépendant de sa température.

2. Donner la loi de Stefan-Boltzmann. Que signifie-t-elle ? Quelles sont les unités des différentes grandeurs qu'elle contient ?

Réponse : La densité surfacique de puissance $\frac{dP}{dS}$ émise par un corps noir est donnée par :

$$\frac{dP}{dS} = \sigma T^4$$

où $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan, et T est la température (en Kelvin - K).

3. Calculer littéralement puis numériquement la puissance P_S rayonnée par le Soleil dans tout l'espace.

Réponse : la puissance totale rayonnée par le Soleil dans tout l'espace est : $P_S = \sigma T_S^4 \times \pi R_S^2$ soit numériquement : $P_\odot = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

4. En déduire la valeur littérale puis numérique de la « constante solaire, » I_0 , la puissance de rayonnement par unité de surface normale au rayonnement en provenance du Soleil reçue par la Terre au sommet de son atmosphère.

Réponse : Le flux de rayonnement reçu au niveau de l'orbite de la Terre est alors : $I_0 = P_S / (4\pi D_{ST}^2)$ soit : $I_0 = 1381 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

5. En déduire l'expression littérale puis la valeur numérique de $P_T^{\text{reçue-atm}}$, la puissance reçue par unité de surface, en moyenne sur toute la surface de la Terre et sur une rotation de la Terre, au sommet de l'atmosphère de la Terre.

Réponse : La constante solaire concerne l'angle solide de la Terre vue du soleil, et donc un disque de surface πR_T^2 .

Donc l'énergie totale reçue par la Terre en une rotation (c'est-à-dire en 24 h) est $I_0 \pi R_T^2 \times 86400$. Cette énergie se répartie sur l'ensemble de la surface de l'atmosphère (donc $4\pi R_T^2$), soit 1/4 fois la valeur précédente. On obtient ainsi la valeur moyenne de la puissance reçue du Soleil, répartie sur l'ensemble de la surface de l'atmosphère, soit par unité de surface $P_T^{\text{reçue-atm}} = 1/4 I_0 = 345 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

6. Sachant que l'albédo moyen de la Terre est $\alpha_T = 0,3$, et que le coefficient de transmission de l'atmosphère dans le domaine visible du spectre électromagnétique est $\gamma_{\text{vis}} = 0,7$, quelle est l'expression littérale puis la valeur numérique de la puissance surfacique moyenne $P_T^{\text{reçue-surf}}$ effectivement reçue au niveau de la surface de la Terre ?

Réponse : $P_T^{\text{reçue-surf}} = (1 - \alpha_T) \cdot \gamma_{\text{vis}} \cdot P_T^{\text{reçue-atm}} = 166 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

7. Sachant que la température moyenne de la surface de la Terre est $T_{\text{surf}} = 288 \text{ K}$, quelle est l'expression littérale puis la valeur numérique de la puissance surfacique rayonnée par la surface de la Terre P_T^{ray} ?

Réponse : $P_T^{\text{ray}} = \sigma T_{\text{surf}}^4 = 390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

8. Sachant que le coefficient de transmission de l'atmosphère dans l'infrarouge thermique (autour d'une longueur d'onde de $10 \mu\text{m}$) est $\beta_{\text{IR}} = 0,1$, et que la température moyenne de l'atmosphère est $T_{\text{atm}} = 244 \text{ K}$, quelle est l'expression littérale et la valeur numérique de la puissance surfacique moyenne totale que la Terre « perd » dans l'espace P_T^{perdue} ?

Réponse : La puissance perdue dans l'espace, est celle issue de la surface de la Terre, transmise à travers l'atmosphère ($\beta_{\text{IR}} \cdot P_T^{\text{ray}} = 39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) à laquelle s'ajoute celle rayonnée par l'atmosphère elle-même ($\sigma T_{\text{atm}}^4 = 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Soit :

$$P_T^{\text{perdue}} = \beta_{\text{IR}} \cdot P_T^{\text{ray}} + \sigma T_{\text{atm}}^4 = 239 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

9. Faire un schéma représentant toutes ces puissances surfaciques, qui sont aussi des « flux » de rayonnement. Vérifier que la Terre est à l'équilibre énergétique radiatif.
10. En déduire, en justifiant votre réponse, quelle est l'expression littérale puis la valeur numérique de la puissance surfacique moyenne qui alimente l'effet de serre P_T^{serre} ?

Réponse : L'effet de serre c'est dans l'infrarouge !

$$P_T^{\text{serre}} = P_T^{\text{ray}} - P_T^{\text{perdue}} = 390 - 239 = 151 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

11. Quelle est la valeur numérique de la puissance surfacique correspondant au réchauffement climatique (effet de serre additionnel) ? Quelle fraction de l'effet de serre cela représente-il ?

Réponse : $2,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (1,5 %)

On donne également :

- la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ SI}$,
- la température de surface du Soleil : $T_S = 5800 \text{ K}$,
- le rayon du Soleil : $R_S = 7 \cdot 10^5 \text{ km}$,
- la distance de la Terre au Soleil : $D_{TS} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$.
- le rayon de la Terre : $R_T = 6378 \text{ km}$.

Exercice 4.8 – Effet d’une perturbation

Source : G. Blanc

On considère le modèle « climatique » **sans atmosphère** (bilan énergétique directement sur la surface terrestre). À l’équilibre thermique, la puissance surfacique solaire absorbée par la Terre qui est égale à la puissance surfacique rayonnée par la Terre dans l’espace : $P_a = \sigma T_e^4$, où σ est la constante de Stefan et T_e est la température d’équilibre de la Terre.

On suppose qu’une quantité de chaleur est instantanément ajoutée au système considéré (la surface de la Terre), la température de celle-ci augmente donc de $(\Delta T)_0$.

1. Dire qualitativement (sans calculs) comment va réagir le système? L’équilibre thermique est-il stable?

Réponse : La puissance surfacique rayonnée dans l’espace après la perturbation sera $\sigma (T_e + (\Delta T)_0)^4$. Elle sera supérieure à la puissance surfacique solaire absorbée. La différence d’énergie va donc être perdue par rayonnement, et donc la Terre va finalement se refroidir.

Ainsi la perturbation initiale en température va décroître avec le temps, ce qui signifie que l’équilibre envisagé est stable.

2. Que peut-on dire de l’échelle de temps sur le retour à la normale (à l’équilibre)?

Réponse : On ne peut rien dire avec cet argument qualitatif sur l’échelle de temps en jeu. Mais connaître cette échelle de temps aiderait pourtant à voir si l’argument est consistant.

Par exemple, si la température élevée persiste longtemps (échelle de temps longue), des paramètres physiques (comme l’albédo) et donc la quantité de rayonnement correspondante absorbée par la Terre pourraient être altérés ce qui résulterait en un « forçage » thermique supplémentaire; le retour à l’équilibre serait alors loin d’être évident...

Afin d’avoir une idée de cette constante de temps de retour à l’équilibre, considérons une atmosphère (= surface terrestre dans le modèle simple considéré) ayant une masse surfacique m_A et une capacité thermique massique c_A .

3. Si la température de cette « atmosphère » augmente de dT , comment varie la puissance surfacique « interne » (ie emmagasinée par l’atmosphère)? Donner son expression en fonction de m_A et c_A .

Réponse : $m_A c_A dT/dt$

4. En considérant que le déséquilibre de puissance radiative est absorbé par le système pour faire varier sa température, quel est le bilan énergétique (ou en puissance surfacique) du système qui se trouve à la température $T \neq T_e$? Montrer que l'on obtient une équation différentielle en T .

Réponse : puissance solaire absorbée - puissance rayonnée = puissance emmagasinée
Soit :

$$P_a - \sigma T^4 = m_A c_A \frac{dT}{dt}$$

Que l'on peut écrire aussi, comme $P_a = \sigma T_e^4$:

$$m_A c_A \frac{dT}{dt} = \sigma T_e^4 - \sigma T^4$$

5. On peut simplifier cette équation, en considérant d'une part que $T = T_e + \Delta T$, et d'autre part que $\Delta T \ll T_e$ (la perturbation est « petite »). On peut ainsi faire un développement limité (au premier ordre) afin d'obtenir une équation différentielle linéaire en ΔT .

Réponse : On a donc : $T = T_e + \Delta T$, dont l'équation devient :

$$m_A c_A \frac{d(\Delta T)}{dt} = \sigma T_e^4 - \sigma T_e^4 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_e}\right)^4$$

Développement limité :

$$\left(1 + \frac{\Delta T}{T_e}\right)^4 \simeq 1 + 4 \frac{\Delta T}{T_e}$$

au premier ordre.

Soit :

$$m_A c_A \frac{d(\Delta T)}{dt} = \sigma T_e^4 - \sigma T_e^4 \left(1 + 4 \frac{\Delta T}{T_e}\right)$$

soit :

$$m_A c_A \frac{d(\Delta T)}{dt} = -4\sigma T_e^3 \Delta T$$

6. Résoudre cette équation avec la condition initiale $(\Delta T) = (\Delta T)_0$ à $t = 0$.

Réponse : En séparant les variables, on a :

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{4\sigma T_e^3}{m_A c_A} dt$$

soit :

$$\ln \frac{\Delta T}{(\Delta T)_0} = -\frac{4\sigma T_e^3}{m_A c_A} t$$

soit :

$$\Delta T = (\Delta T)_0 e^{-t/\tau_R}$$

avec :

$$\tau_R = \frac{m_A c_A}{4\sigma T_e^3}$$

7. En déduire l'échelle de temps τ_R associée.

Réponse :

$$\tau_R = \frac{m_A c_A}{4\sigma T_e^3}$$

8. Faire l'application numérique pour $T_e = 255$ K (température d'équilibre du modèle sans atmosphère). (Chercher sur internet les valeurs des grandeurs nécessaires).

Réponse : La masse totale de l'atmosphère terrestre est $M_A = 5,1480 \times 10^{18}$ kg, le rayon terrestre est $R_T = 6371$ km. On en déduit la masse surfacique de l'atmosphère : $m_A = M_A / (4\pi R_T^2) = 10093 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

La capacité calorifique massique de l'air est : $c_a = 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

La constante de Stefan-Boltzmann est : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Ce qui donne : $\tau_R = 31$ jours.

Remarque : si $T_e = 288$ K, $\tau_R = 22$ jours.

9. Quelle est la masse totale de charbon qu'il faut brûler pour augmenter la température de l'atmosphère terrestre de 1 K? Comparer avec la consommation annuelle mondiale de charbon et la consommation annuelle mondiale d'énergie. (Chercher les données manquantes sur internet).

Réponse : L'énergie à fournir pour réchauffer l'atmosphère de 1 K est $E = M_A \times c_A \times \Delta T = (5,1480 \times 10^{18}) \times (1004) \times (1) = 5,17 \times 10^{21} \text{ J}$.

Or une tonne de charbon libère 29,3076 GJ. Il faut donc 176 Gt de charbon. Soit 26 années de consommation de charbon annuelle.

Consommation de charbon dans le monde en 2008 : 6737 millions de tonnes (source = http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/espace_travail/mine/carbone/texcarb.htm)

Consommation mondiale d'énergie = 8,9 milliards de tep en 2011 (source : wikipédia). 1 tep (tonne équivalent pétrole) = 41,868 GJ. Ce qui fait donc : $3,73 \times 10^{20} \text{ J}$.

1 K en plus, c'est donc 13,87 fois la consommation d'énergie annuelle!!

10. Remarques, commentaires, conclusions...?

Réponse : Augmenter la température moyenne de l'atmosphère, de 1 K, cela demande énormément d'énergie!

Et pourtant, il faut *seulement* 31 jours pour réduire l'écart de température à $\Delta T = (1)e^{-1} = 0,37$ K, et 93 jours pour qu'il redevienne quasiment nul (0,05 K), en rayonnant vers l'espace...

Notre problème est que la perturbation qui nous préoccupe actuellement n'est pas ponctuelle dans le temps, elle perdure...

Exercice 4.9 – Banquise et réchauffement climatique

Source : G. Blanc

Un réchauffement planétaire étant d'ores et déjà amorcé, la banquise arctique, cette couche de glace permanente qui flotte sur l'océan glacial arctique, autour du Pôle Nord, est en train de fondre. L'objectif de cet exercice est de déterminer si oui ou non la fonte des glaces du Pôle Nord va provoquer une montée du niveau des mers.

On donne : la masse volumique de l'eau $\rho_e = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et la masse volumique de la glace $\rho_g = 917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1. Un glaçon, morceau de glace d'eau, flotte-t-il sur de l'eau libre?

Réponse : Oui, car sa masse volumique est inférieure à celle de l'eau.

2. Quelle fraction du volume de glace se trouve-t-il hors de l'eau à l'équilibre?

Réponse : Notations :

- m_g^t = masse totale du glaçon;
- m_e^t = masse totale du glaçon fondu (eau);
- m_g^e = masse de glace émergée;
- m_g^i = masse de glace immergée;
- m_e^e = masse de glace émergée fondue (eau);
- m_e^i = masse de glace immergée fondue (eau);
- V_g^t = volume total du glaçon;
- V_e^t = volume total du glaçon fondu (eau);
- V_g^e = volume de glace émergée;
- V_g^i = volume de glace immergée;
- V_e^e = volume de glace émergée fondue (eau);
- V_e^i = volume de glace immergée fondue (eau);

Dans cette question, on cherche V_g^i / V_g^t .

PFD $\Rightarrow$ Poids = poussée d'Archimède à l'équilibre, soit :

$$m_g^t \cdot g = \rho_e V_g^i \cdot g$$

Le volume d'eau « déplacé » correspondant au volume de glace immergée est V_g^i .

soit :

$$\rho_g V_g^t g = \rho_e V_g^i g$$

Donc :

$$\frac{V_g^i}{V_g^t} = \frac{\rho_g}{\rho_e} = \frac{917}{1000} = 0,917$$

Donc la fraction du volume du glaçon qui est immergée est de 90 %.

3. On met un glaçon dans le verre de Pastis pour le rafraîchir, le niveau de Pastis arrive alors au ras du bord du verre. En assimilant le Pastis à de l'eau pure (*sic!*), est-ce que le verre va déborder ou pas quand le glaçon va fondre. Quelle conclusion peut-on en tirer quant à la fonte de la

banquise arctique?

Réponse : On veut montrer que $V_g^i = V_e^e + V_e^i = V_e^t$, à savoir que le volume de glace immergée correspond au volume total de l'eau du glaçon fondu.

Pour ce faire, exprimons les trois volumes V_g^i , V_e^e et V_e^i en fonction de V_g^t .

La question précédente (PFD) fournit une équation :

$$V_g^i = \frac{\rho_g}{\rho_e} \times V_g^t \quad (4.1)$$

La conservation de la masse en fournit deux autres :

$$m_e^e = m_g^e \quad (4.2)$$

et

$$m_e^i = m_g^i \quad (4.3)$$

La deuxième donne :

$$\rho_e V_e^i = \rho_g V_g^i$$

soit : $V_e^i = \frac{\rho_g}{\rho_e} V_g^i$, soit :

$$V_e^i = \left(\frac{\rho_g}{\rho_e} \right)^2 V_g^t \quad (4.4)$$

La première donne :

$$\rho_e V_e^e = \rho_g V_g^e$$

soit :

$$V_e^e = \frac{\rho_g}{\rho_e} V_g^e = \frac{\rho_g}{\rho_e} (V_g^t - V_g^i)$$

ce qui donne :

$$V_e^e = \frac{\rho_g}{\rho_e} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_e} \right) V_g^t \quad (4.5)$$

Donc, finalement :

$$V_e^i + V_e^e = \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_e} \right)^2 + \frac{\rho_g}{\rho_e} - \left(\frac{\rho_g}{\rho_e} \right)^2 \right] V_g^t = \frac{\rho_g}{\rho_e} V_g^t = V_g^i$$

Donc le volume total d'eau issu du glaçon fondu est rigoureusement égal au volume de glace initialement immergée. Donc une fois le glaçon fondu, l'eau ne déborde pas.

Il en est de même pour la banquise : en fondant, elle n'augmente pas le niveau des mers.

Exercice 4.10 – Augmentation du niveau des océans

Source : G. Blanc

Donner une estimation de l'élévation du niveau des mers due à la dilatation thermique pour 0,8 °C d'élévation de température ; le coefficient de dilatation thermique de l'eau de mer est :

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

La profondeur moyenne des océans est de 3700 m. On considérera que les océans se réchauffent en totalité, puis dans un deuxième temps, seulement sur les 700 premiers mètres.

Réponse : On a :

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

soit :

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_V \cdot \Delta T$$

Et :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta h}{H_0}$$

où Δh est l'élévation du niveau des océans et H_0 est la profondeur moyenne des océans. Donc :

$$\Delta h = \alpha_V \cdot \Delta T \cdot H_0$$

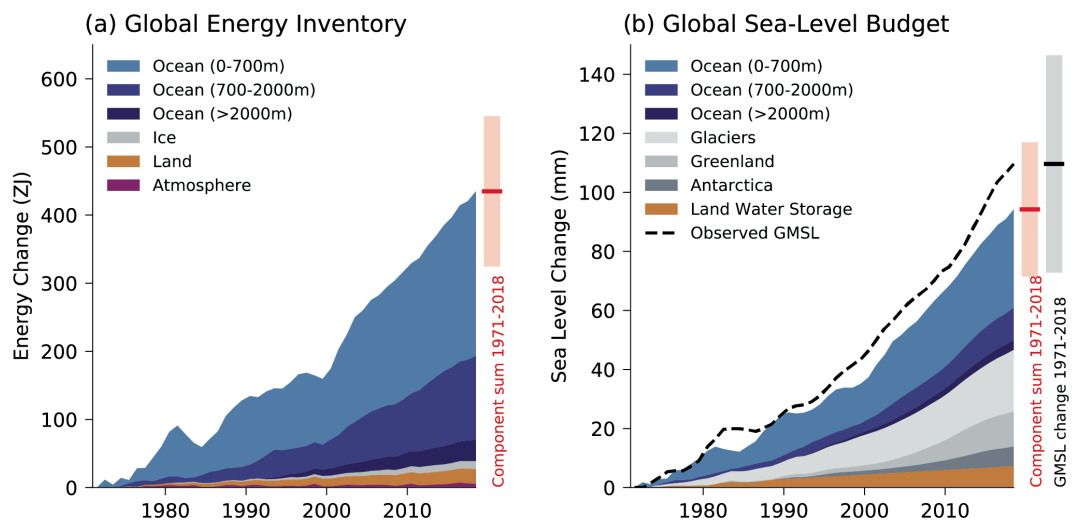
La profondeur moyenne des océans est de $H_0 = 3700$ m.

Ce qui donne : $\Delta h = 0,77$ m.

Si on considère que le réchauffement n'affecte que les 700 premiers mètres, alors $H_0 = 700$ m, ce qui donne : $\Delta h = 0,14$ m.

Les profondeurs plus basses (< 700 m) ont une inertie plus importante et contribuent peu (actuellement) à l'expansion thermique des océans (cf. table 3.1, p. 291 de AR5).

La dilation thermique contribue pour environ 38 % à l'élévation du niveau des mers (16 cm depuis 1900, voir figure 9.1 p. 1291 de IPCC 2021 et table 9.5 p. 1289 de IPCC 2021).



Observed contribution to GMSL change		1901–1990 {9.6.1.1}	1971–2018 {CCBox 9.1}	1993–2018 {9.6.1.2}	2006–2018 {9.6.1.2}	1901–2018 {9.6.1.1}
Thermal expansion (Section 2.3.3.1; Table 2.7)	Δ (mm)	31.6 [14.7 to 48.5] (31.9%)	47.5 [34.3 to 60.7] (50.4%)	32.7 [23.8 to 41.6] (45.9%)	16.7 [8.9 to 24.6] (38.6%)	63.2 [47.0 to 79.4] (38.4%)
	mm yr ⁻¹	0.36 [0.17 to 0.54]	1.01 [0.73 to 1.29]	1.31 [0.95 to 1.66]	1.39 [0.74 to 2.05]	0.54 [0.40 to 0.68]
Glaciers (excluding peripheral glaciers) (Sections 2.3.2.3, 9.5.1.1)	Δ (mm)	51.8 [30.4 to 73.2] (52.3%)	20.9 [10.0 to 31.7] (22.2%)	13.8 [10.0 to 17.6] (19.4%)	7.5 [6.8 to 8.2] (17.3%)	67.2 [41.8 to 92.6] (40.8%)
	mm yr ⁻¹	0.58 [0.34 to 0.82]	0.44 [0.21 to 0.67]	0.55 [0.40 to 0.70]	0.62 [0.57 to 0.68]	0.57 [0.36 to 0.79]
Greenland Ice Sheet (including peripheral glaciers) (Sections 2.3.2.4.1, 9.4.1.1)	Δ (mm)	29.0 [16.3 to 41.7] (29.3%)	11.9 [7.7 to 16.1] (12.6%)	10.8 [8.9 to 12.7] (15.2%)	7.5 [6.2 to 8.9] (17.3%)	40.4 [27.2 to 53.5] (24.5%)
	mm yr ⁻¹	0.33 [0.18 to 0.47]	0.25 [0.16 to 0.34]	0.43 [0.36 to 0.51]	0.63 [0.51 to 0.74]	0.35 [0.23 to 0.46]
Antarctic Ice Sheet (including peripheral glaciers) (Sections 2.3.2.4.2, 9.4.2.1)	Δ (mm)	0.4 [−8.8 to 9.6] (0.4%)	6.7 [−4.0 to 17.3] (7.1%)	6.1 [4.0 to 8.3] (8.6%)	4.4 [2.9 to 6.0] (10.2%)	6.7 [−4.0 to 17.4] (4.1%)
	mm yr ⁻¹	0.00 [−0.10 to 0.11]	0.14 [−0.09 to 0.37]	0.25 [0.16 to 0.33]	0.37 [0.24 to 0.50]	0.06 [−0.03 to 0.15]
Land-water storage ^a (Section 9.6.1.1)	Δ (mm)	−13.8 [−31.4 to 3.8] (−13.9%)	7.3 [−2.4 to 16.9] (7.7%)	7.8 [3.3 to 12.2] (10.9%)	7.2 [3.8 to 10.6] (16.6%)	−12.9 [−45.8 to 20.0] (−7.8%)
	mm yr ⁻¹	−0.15 [−0.35 to 0.04]	0.15 [−0.05 to 0.36]	0.31 [0.13 to 0.49]	0.60 [0.32 to 0.88]	−0.11 [−0.39 to 0.17]
Sum of observed contributions	Δ (mm)	99.0 [63.0 to 135.1]	94.2 [71.5 to 117.0]	71.2 [60.2 to 82.3]	43.4 [34.5 to 52.2]	164.6 [116.9 to 212.4]
	mm yr ⁻¹	1.11 [0.71 to 1.52]	2.00 [1.52 to 2.49]	2.85 [2.41 to 3.29]	3.61 [2.88 to 4.35]	1.41 [1.00 to 1.82]
Observed GMSL change (Section 2.3.3.3)	Δ (mm)	120.1 ^f [69.3 to 170.8]	109.6 ^{fBA} [72.8 to 146.4]	81.2 ^A [72.1 to 90.2]	44.3 ^A [38.6 to 50.0]	201.9 ^{fBA} [150.3 to 253.5]
	mm yr ⁻¹	1.35 ^f [0.78 to 1.92]	2.33 ^{fBA} [1.55 to 3.12]	3.25 ^A [2.88 to 3.61]	3.69 ^A [3.21 to 4.17]	1.73 ^{fBA} [1.28 to 2.17]

Exercice 4.11 – Pour quelques watts de plus...

Source : G. Blanc

Un flux (ou puissance surfacique) de 2,3 W/m² de plus que l'équilibre thermique peut paraître dérisoire...

1. Quelle est la puissance supplémentaire ainsi reçue sur l'ensemble de la surface de la Terre?

Réponse : $2,3 \times 4 \times \pi \times (6400 \cdot 10^3)^2 = 1,18 \cdot 10^{15} \text{ W}$

2. Quelle est l'énergie correspondante sur une année?

Réponse : Une année = $86400 \times 365,25 = 31557600 \text{ s}$.
Soit $3,7 \cdot 10^{22} \text{ J}$.

3. Estimez l'énergie d'une bombe atomique de 100 kg d'²³⁵U, sachant que son énergie de liaison par nucléon est de $E_L/A = 7,59 \text{ MeV} \cdot /c^2$, que sa fission produit, par exemple, un noyau de ¹⁴²Xe ($E_L/A = 8,23 \text{ MeV} \cdot /c^2$), un noyau de ⁹⁰Sr ($E_L/A = 8,70 \text{ MeV} \cdot /c^2$) et trois neutrons.

On donne la masse moyenne d'un nucléon : $1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Réponse : Lors de la fission de ^{235}U , on récupère l'énergie de liaison :

$$E = 142 \times 8,23 + 90 \times 8,70 - 235 \times 7,59 = 168 \text{ MeV}$$

Soit $E = 168 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,69 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.

Or dans 100 kg d'uranium 235, il y a $N_U = 100 / (235 \times 1,6605402 \cdot 10^{-27}) = 2,56 \cdot 10^{26}$ noyaux.

En supposant qu'ils fissionnent tous, on obtient une énergie totale dégagée :
 $E_{\text{tot}} = E \times N_U = 2,69 \cdot 10^{-11} \times 2,56 \cdot 10^{26} = 6,9 \cdot 10^{15} \text{ J}$.

Souvent l'énergie dégagée par les explosions atomiques sont exprimées en kilotonne ou mégatonne. Une mégatonne (Mt) est l'énergie dégagée par l'explosion d'un million de tonnes de trinitrotoluène (TNT), un explosif chimique classique dont l'énergie de combustion est 4.6 MJ/kg. On a : 1 Mt = 4,6 PJ = $4,6 \cdot 10^{15} \text{ J}$. Donc nos 100 kg d'uranium dégagent 1,5 Mt.

La bombe atomique *Little Boy* largée en 1945 sur Hiroshima contenait 64 kg d'uranium 235 dont 700 g entrèrent en fission. Elle fut d'une puissance de 13 à 16 kt. On a bien un facteur 100 (15 kt pour 0,7 kg, pour 1,5 Mt pour 100 kg) sur l'énergie par rapport à notre bombe à nous...

La bombe qui fut lancée sur Nagasaki était une bombe au plutonium.

4. À combien de bombes atomiques correspond l'énergie en sus reçue annuellement par la Terre ?

Réponse : Cela correspond à 5,4 millions de bombes atomiques de 100 kg (ou bien 540 millions de fois Hiroshima!!!).

Exercice 4.12 – Vénus

Source : G. Blanc

On souhaite appliquer les modèles de l'effet de serre à la planète Vénus.

Pour ce faire, on donne :

- la constante solaire sur Vénus : $I_0 = 2613.9 \text{ W/m}^2$;
- l'albédo de Vénus : $\alpha_V = 0.90$;
- le coefficient de transmission de l'atmosphère de Vénus dans le visible : $\gamma_{vis} = 0.1$;
- le coefficient de transmission de l'atmosphère de Vénus dans l'infra-rouge : $\beta_{IR} = 0$;
- la température moyenne à la surface de Vénus : 737 K ;
- la pression moyenne à la surface de Vénus : 92 atm.

1. Appliquer les modèles de l'effet de serre sans atmosphère et avec une couche d'atmosphère (Blanc & Noûs 2023) à Vénus.

Réponse : On avait obtenu la température à la surface :

$$T_{\text{surf}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)(1 + \gamma)}{(1 + \beta)} \cdot \frac{I_0}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Avec : I_0 la « constante solaire », ie la densité de puissance surfacique issue du soleil ;
 σ la constante de Stefan ;

α_T l'albédo de la planète;

γ coefficient de transmission de l'atmosphère dans le spectre visible;

β coefficient de transmission de l'atmosphère dans l'infrarouge thermique.

Pour la constante solaire ou irradiance solaire. Sur <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html> on trouve : $I_o = 2613.9 \text{ W/m}^2$ (Vénus est à 0.723 UA du Soleil, donc la constante solaire de Vénus est égale à celle de la Terre divisé par $0.723^2 = 0.523$).

Pour l'albédo. D'après le même site, l'albédo de Vénus (Bond albedo) est de 0.90, mais cela va jusqu'à 0.75 ou 0.65 selon les sources. Wikipédia (anglais) donne 0.90. Donc $\alpha_T = 0.90$

Pour les coefficients de transmission dans le visible et l'IR thermique, j'ai trouvé cette publi : <http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PUBLIS/2008JE003276.pdf>. Soit $\gamma = 0.1$ (10 % du rayonnement solaire atteint la surface), et $\beta = 0$ (sous les nuages, l'atmosphère dense peut seulement rayonner vers l'espace dans le proche infra-rouge).

On obtient ainsi :

$$T_{\text{surf}} = \left[\frac{(1 - 0.9)(1 + 0.1)}{(1 + 0.0)} \cdot \frac{2613.9}{4 \times 5.67 \cdot 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Soit : $T_{\text{surf}} = 188 \text{ K} = -84^\circ\text{C}$.

Avec le modèle sans atmosphère, on trouve 184 K.

Alors que la température moyenne à la surface de la planète est de 737 K (464 C).

2. Discuter, au vu des résultats obtenus, des hypothèses des modèles et de leurs validités.

Réponse : En fait l'atmosphère de Vénus est très dense (pression au sol de 92 atmosphères). Or dans notre modèle, nous avons implicitement fait l'hypothèse que la couche d'atmosphère considérée était mince (ou peu épaisse), et que quel que soit la position d'un petit volume au sein de l'atmosphère, tout son rayonnement émis vers le haut partait vers l'espace et tout son rayonnement émis vers le bas partait vers le sol.

Or si l'atmosphère est épaisse le rayonnement émis aura toutes les chances d'interagir à nouveau avec l'atmosphère avant d'atteindre le sol ou l'espace. On pourrait donc raffiner notre modèle en ajoutant une (ou plus) couche supplémentaire simulant les interactions au sein même de l'atmosphère. Le résultat serait ainsi plus réaliste pour représenter l'atmosphère dense de Vénus.

3. Sans calcul, discuter l'effet de serre sur Vénus par rapport à celui existant sur Terre, à partir de ce que l'on peut trouver sur internet.

Réponse : On pourra lire l'article de wikipédia sur l'atmosphère vénusienne¹. En résumé : C'est 96.5 % de CO₂ et 3.5 % de N₂. Des vents à 100 m/s (360 km/h), des nuages composés de dioxyde de soufre avec des gouttelettes d'acide sulfurique, et donc des pluies d'acide sulfurique, qui n'atteignent pas le sol, évaporées avant...

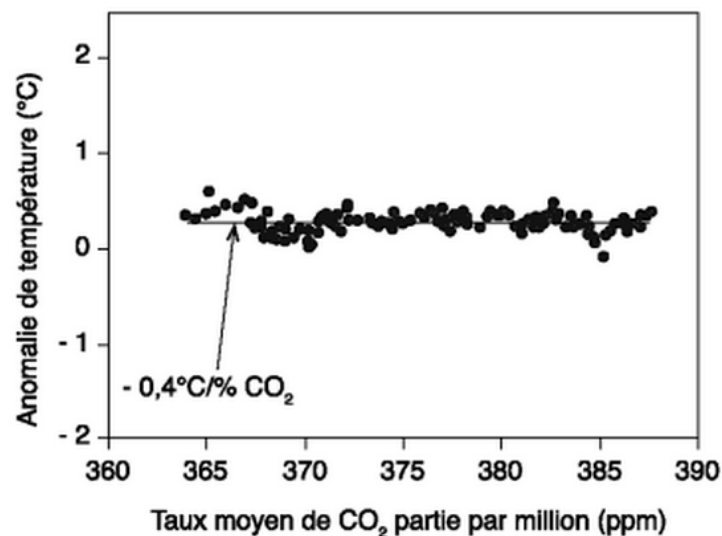
On pense qu'il y a 4 milliards d'années l'atmosphère vénusienne était semblable à celle de la Terre, avec de l'eau liquide à la surface. Mais sa proximité avec le soleil (2 fois plus de rayonnement solaire que la Terre), a rapidement évaporé l'eau, créant ainsi un effet de

serre corsé (la vapeur d'eau étant un puissant GES), ce qui aurait entraîné par la suite l'augmentation des autres GES dans l'atmosphère, pour aboutir à ce que connaît Vénus actuellement.

Exercice 4.13 – Corrélation température-CO₂

Source : G. Blanc

Dans son livre *L'innocence du carbone* (2013), François Gervais part du constat qu'il n'y a (d'après lui) aucune corrélation entre la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère et l'anomalie de température. Sur la figure ci-dessous, extraite de son livre, est représentée l'anomalie de température en fonction de la concentration en CO₂, pour la période 1997-2010.



Reproduisez cette figure.

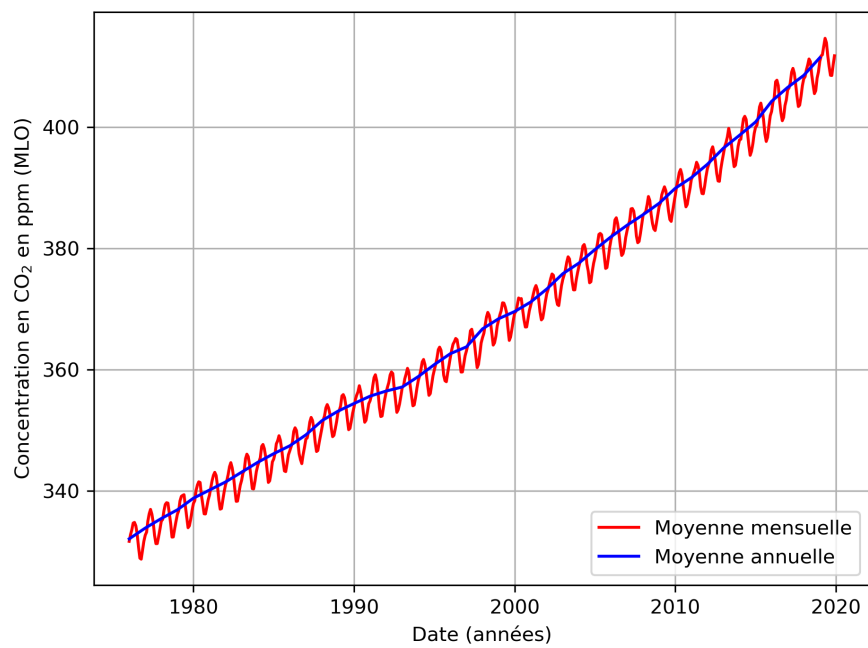
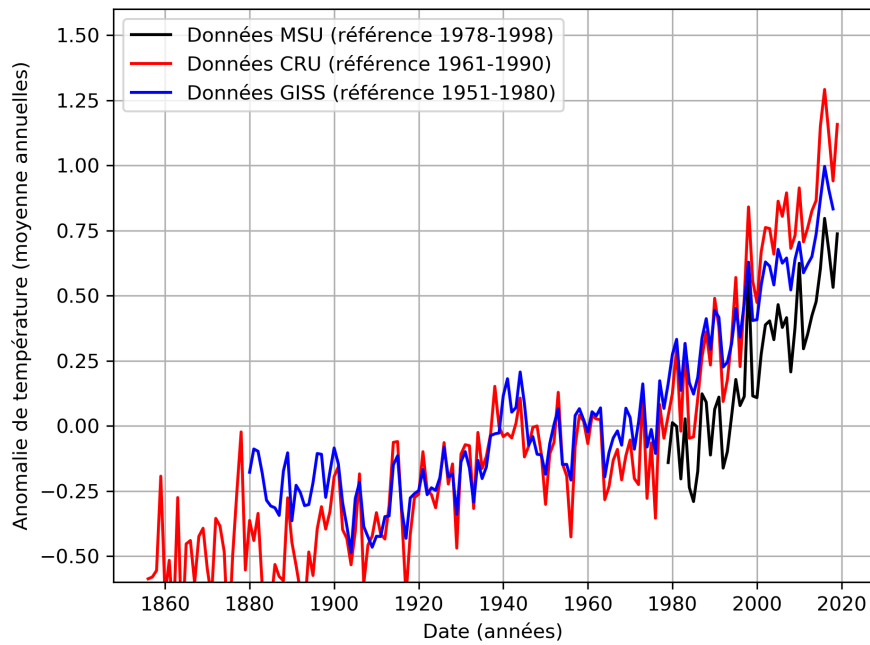
Pour cela, vous pourrez chercher les données adéquates sur internet. À défaut, vous pouvez utiliser celles fournies ici : <https://box.in2p3.fr/s/p4tTDsnXjGN83pM>. Le fichier `tltg1hmm_5.6_cut.dat` donne l'anomalie de température, en moyenne mensuelle, pour la basse troposphère²; le fichier `co2_mlo_surface-insitu_1_ccgg_month_data.txt` fournit les moyennes mensuelles de la concentration en CO₂ (en ppm), d'après les mesures faites à l'observatoire du Mauna Loa (Hawaï); le fichier `plot_data.py` est un bout de code Python qui lit ces fichiers.

L'idée est de tracer à l'aide d'un logiciel quelconque (par exemple en faisant un petit programme en python, ou avec matlab, Mathematica ou autre), l'anomalie de température en fonction de la concentration en dioxyde de carbone. Et de faire un ajustement linéaire par moindres carrés du nuage de points obtenu. Vous pourrez calculer le coefficient de corrélation entre les deux jeux de données. Et enfin conclure.

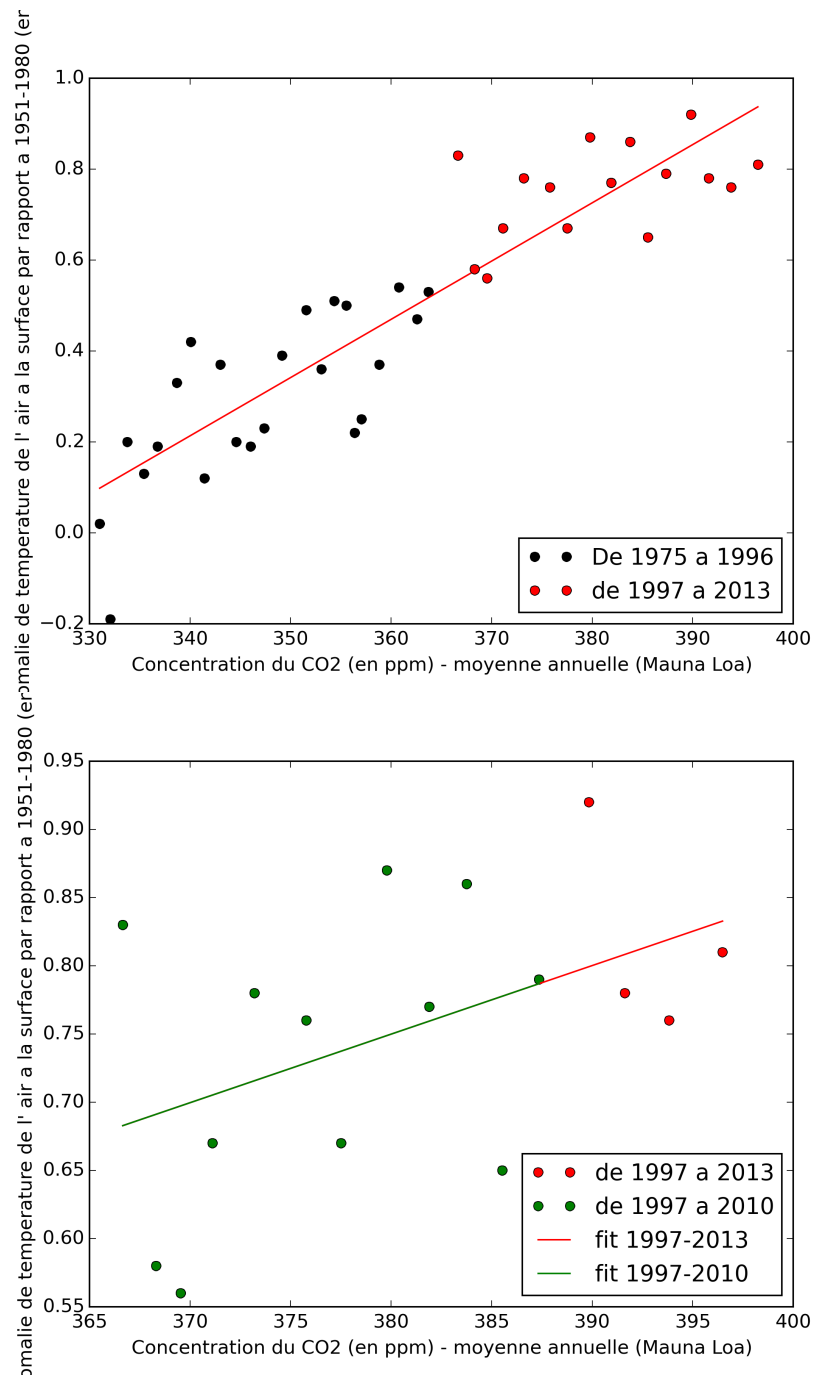
Réponse :

Données mensuelles : anomalie de température et CO₂.

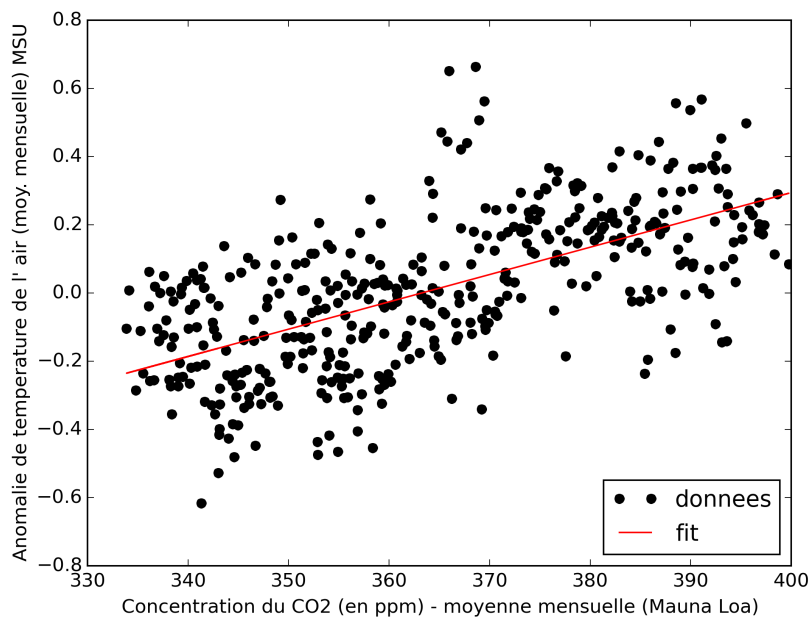
2. tiré de https://www.nsstc.uah.edu/climate/archives_05-1978_maps.html



Avec des données annuelles :



Avec des données mensuelles :



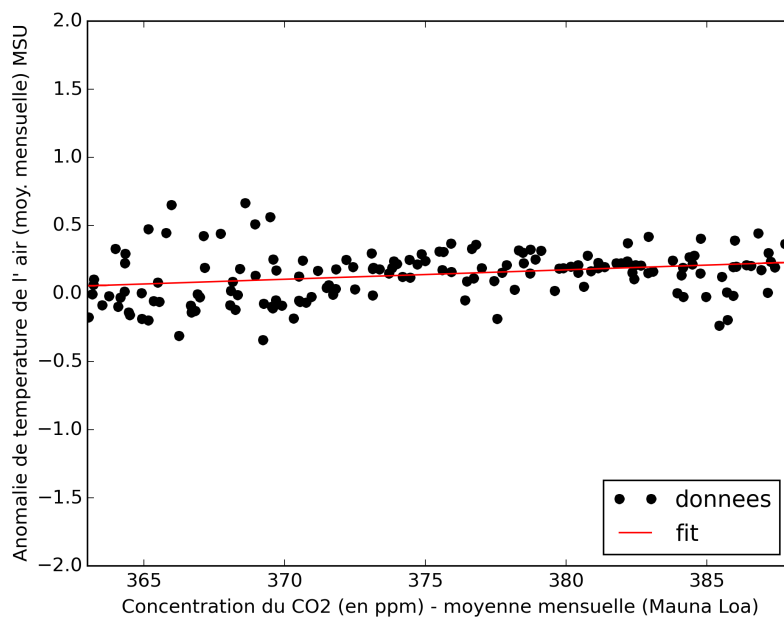
Le fit sur la figure ci-dessus est : $\Delta T = 0,008C_{CO_2} - 2,910$.

Le coefficient de corrélation est de 0,62.

Conclusion : Gervais base son argumentation sur une figure complètement fausse... De l'art de fausser les données pour tromper son lecteur!

- graphe présenté avec une échelle trompeuse!
- données tronquées (entre 1997 et 2010)

Ceci étant, même quand on trace exactement la même chose (données entre 1997 et 2010 inclus) et échelle large, avec les mêmes données, on obtient :



Le fit est : $\Delta T = 0,0069 C_{CO_2} - 2.4609$

correlation = 0,3 (plus faible, certes, mais pas nulle!)

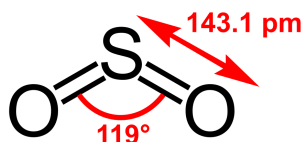
Exercice 4.14 – SO₂, gaz à effet de serre?

Le dioxyde de soufre est rejeté par certaines industries dans l'atmosphère. C'est une molécule qui ressemble beaucoup à celle du dioxyde de carbone. Est-ce également un gaz à effet de serre?

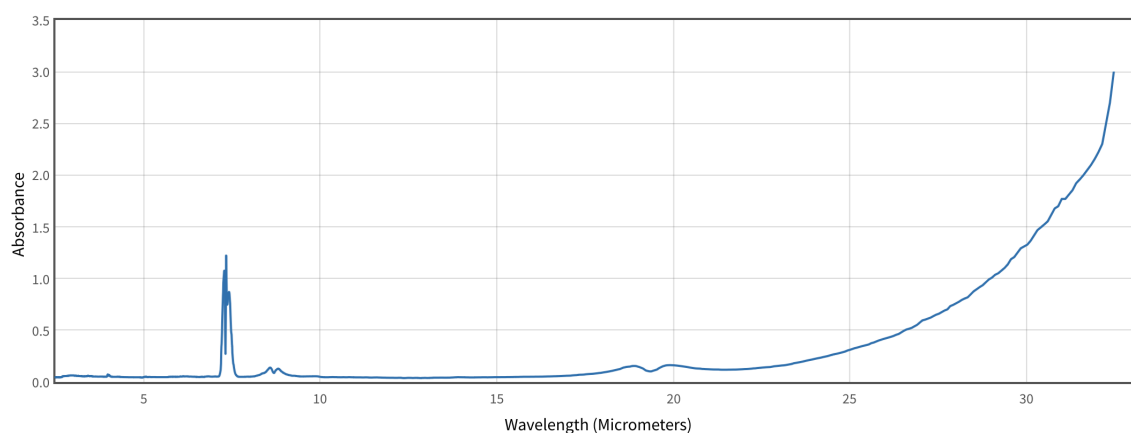
Réponse : Le CO₂ est un gaz à effet de serre, c'est une molécule linéaire dont le moment dipolaire permanent est nul, mais qui peut vibrer sous l'action de photons infrarouges et donc avoir un moment dipolaire induit non nul, ce qui lui permet d'absorber ces photons infrarouges.

L'eau, H₂O est également un gaz à effet de serre, la molécule n'est pas linéaire (angle de 104°), elle a un moment dipolaire permanent de 1,85 D.

Le dioxyde de soufre, SO₂, a également un moment dipolaire permanent de 1,63 D.



Le spectre d'absorption en infrarouge du SO₂ est celui-ci³ :



On constate une bande d'absorption vers 7 μm puis une absorption continue au-delà de 30-40 μm .

Le dioxyde de soufre a toutes les caractéristiques pour être un gaz à effet de serre. Pourquoi n'est-il pas considéré comme tel?

Simplement parce que c'est un gaz très réactif chimiquement, il reste très peu de temps dans l'atmosphère. C'est d'ailleurs un gaz dangereux pour la santé humaine et pour l'environnement, il est notamment à l'origine des pluies acides. Il est utilisé dans de nombreux procédés industriels et rejeté massivement dans l'environnement⁴.

Exercice 4.15 – Températures paléoclimatiques — *Nouveau!*

Source : F. Brient et M. Chassé

La température moyenne globale est le résultat de l'équilibre énergétique global de la Terre. À partir de la version simplifiée à deux couches, on peut obtenir les flux entrants et sortants :

$$F_{in} = \frac{S}{4}(1 - A_b) \quad (4.6)$$

$$F_{out} = \sigma(1 - \frac{\epsilon}{2})T_s^4 \quad (4.7)$$

où on définit les variables :

- S la constante solaire définie comme la densité de flux moyenne arrivant au sommet de l'atmosphère (W / m^2)
- A_b l'albédo planétaire (sans unité)
- ϵ l'émissivité moyenne de l'atmosphère terrestre (sans unité)
- T_s la température moyenne de surface de la Terre (K)

et σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W / m^2 / K^4$). Les conditions pour le climat présent, le dernier maximum glaciaire (Last Glacial Maximum, LGM) et le maximum thermique du passage Paléocène-Éocène (PETM) sont notés dans la tableau suivant :

	Présent	LGM	PETM
S	1361	1361	1355
A_b	0,29	0,32	0,27
ϵ	0,77	0,73	0,82
T_s mesurée (°C)	14	7	24
T_s calculé (°C)			

TABLE 4.1 – Caractéristiques climatiques pour le climat actuel, au dernier maximum glaciaire (–21 ka) et au maximum thermique du passage Paléocène-Éocène (–58 Ma)

1. En considérant le système à l'équilibre $F_{in} = F_{out}$, déterminer l'équation de la température de surface. De quelle manière peut-on augmenter ou diminuer la température du globe?

Réponse :

$$F_{in} = F_{out} \quad (4.8)$$

$$\frac{S}{4}(1 - A_b) = \sigma(1 - \frac{\epsilon}{2})T_s^4 \quad (4.9)$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{S(1 - A_b)}{4\sigma(1 - \frac{\epsilon}{2})}} \quad (4.10)$$

La température du globe augmente si S , la constante solaire, augmente donc si la densité de flux arrivant du Soleil au sommet de l'atmosphère augmente. Elle augmente si A_b , l'albédo, diminue, donc si les surfaces les plus réfléchissantes, comme les surfaces englacées, diminuent. Elle augmente si ϵ augmente (fonction inverse décroissante, mais on a $-\epsilon$ au dénominateur), donc si l'émissivité de l'atmosphère, associée aux nuages et aux gaz à effet de serre, augmente.

2. Calculer la température globale dans les conditions présentes. Est-ce que le modèle est réaliste par rapport à la température mesurée?

Réponse : L'application numérique à l'aide des données du Tableau 1 donne $T_s = 288,50 \text{ K}$ soit 15°C (rappel sur les K et les $^\circ \text{C}$). Le modèle est cohérent, surtout considérant la simplicité du modèle.

3. Calculer les températures au LGM et au PETM. Pour chaque période, quelle est l'origine principale de la différence de température par rapport à l'époque actuelle? Est-ce lié à des perturbations du flux entrant ou sortant?

Réponse : Températures calculées : 10°C au LGM, 20°C au PETM.

Au LGM, si on ne change pas l'albédo, on obtient $13,1^\circ \text{C}$, si on ne change pas l'émissivité on obtient $12,3^\circ \text{C}$, on a donc un effet majoritaire de l'émissivité (baisse de 3°C) qui correspond à une perturbation du flux sortant par rapport à l'albédo (baisse de 2°C) qui correspond à une perturbation du flux entrant. Aucune des deux n'est néanmoins négligeable.

Au PETM, on obtient $20,4^\circ \text{C}$ si on met la constante solaire à sa valeur présente, c'est donc un facteur qui fait légèrement baisser la température. On obtient 18°C si on ne fait pas varier l'albédo, donc une hausse de 3°C associée à l'émissivité. On obtient 17°C si on ne fait pas varier l'émissivité, donc une hausse de 2°C associée à l'albédo. À nouveau l'effet de l'émissivité est dominant, mais l'albédo n'est pas négligeable. En revanche la variation associée à la diminution de la constante solaire (qui est une perturbation du flux entrant) est négligeable.

4. Quels facteurs peuvent expliquer les différences entre températures mesurées et calculées?

Réponse : On peut citer des erreurs dans l'estimation de l'albédo et de l'émissivité aux deux périodes (comment reconstituer ces valeurs, surtout pour des périodes aussi lointaines que le PETM?). L'autre hypothèse, sans doute plus probable repose sur la simplicité du modèle, un modèle à plusieurs couches qui peuvent avoir des températures et une émissivité différente, voire un modèle continu. Enfin, il manque les flux de chaleur sensible et latent qui contrôlent une partie des échanges.

Exercice 4.16 – Perturbations anthropiques depuis 1850 — *Nouveau!*

Source : F. Brient et M. Chassé

Depuis les années 1850, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté significativement. Les émissions cumulées sont d'environ 2400 GtCO_2 (gigatonnes de CO_2 – Figure 4.1). En conséquence, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est passée de 280 ppm à 415 ppm (parties par millions).

1. Convertissez les émissions cumulées de GtCO_2 en ppm pour évaluer l'augmentation de la concentration de CO_2 correspondante (Rappel : 1 ppm de CO_2 équivaut à environ $2,12 \text{ GtC}$ (gigatonnes de carbone), sachant que $1 \text{ GtCO}_2 = 0,27 \text{ GtC}$). Est-ce cohérent avec l'augmentation mesurée? Pourquoi?

Réponse : $2400 \text{ GtCO}_2 = 0,27 \cdot 2400 \text{ GtC} = 648 \text{ GtC}$, or $1 \text{ ppm} = 2,12 \text{ GtC}$ donc une règle de trois nous donne une augmentation de 306 ppm . L'augmentation observée est de seulement 135 ppm , ce n'est donc pas cohérent du fait de l'existence de puits de carbone qui ont absorbé une partie du CO_2 émis.

2. Le déséquilibre radiatif R est calculé comme la différence entre le flux entrant (F_{in}) et le flux sortant (F_{out}). En supposant l'albédo et l'émissivité constants, dériver la sensibilité du déséquilibre radiatif R à la température de surface T_s ($\lambda_s = \frac{\partial R}{\partial T_s}$). Cette sensibilité est aussi appelée

Augmentation de la température de surface globale depuis 1850-1900 (°C) en fonction des émissions cumulées de CO₂ (GtCO₂)

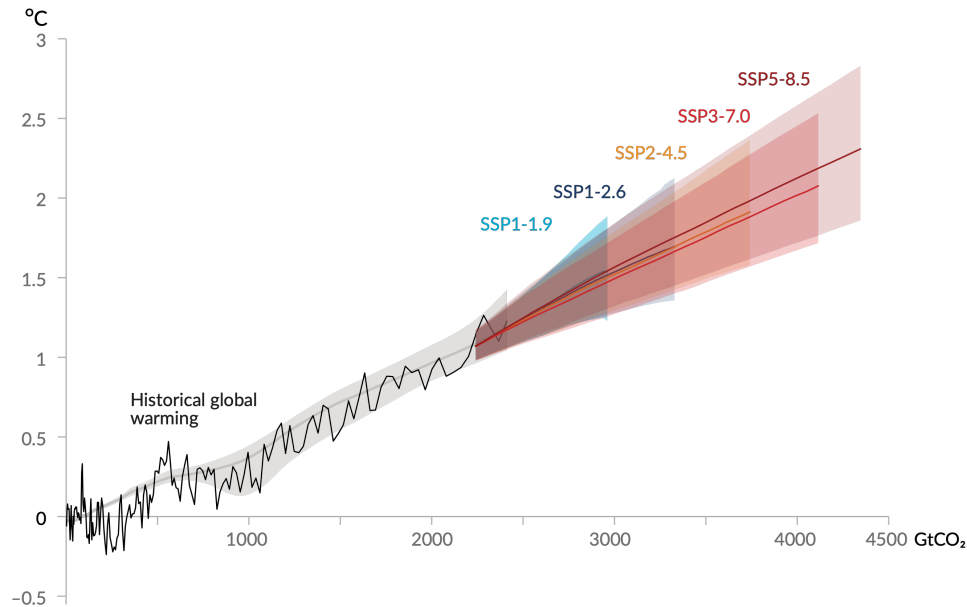


FIGURE 4.1 – Augmentation de la température moyenne globale en fonction des émissions cumulées en CO₂. (Figure SPM.10 du résumé pour décideurs du 6^e rapport du GIEC, [IPCC SPM]).

réponse de Planck, c'est-à-dire la réponse de T_s toutes choses égales par ailleurs (c.-à-d. à ϵ et A_b constant).

Réponse :

$$R = F_{in} - F_{out} \quad (4.11)$$

$$= \frac{S}{4}(1 - A_b) - \sigma(1 - \frac{\epsilon}{2})T_s^4 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial R}{\partial T_s} = -4\sigma(1 - \frac{\epsilon}{2})T_s^3 \quad (4.13)$$

3. Le forçage radiatif (W / m²) lié au CO₂ est estimé par la formule empirique :

$$\Delta F = 5,35 \cdot \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \quad (4.14)$$

Calculez le forçage radiatif associé à l'augmentation de la concentration de CO₂ de 280 ppm (en 1850) à 420 ppm (en 2024).

Réponse : L'application directe de la formule donne $\Delta F = 2,17$ W / m².

4. En utilisant le tableau 4.1 et la réponse de Planck, calculer ensuite le changement de température associé à ce forçage radiatif. Est-ce cohérent avec le réchauffement actuel observé en

Figure 4.1 ?

Réponse : Le calcul de la réponse de Planck donne $\lambda_s = -3,30 \text{ W / m}^2 \text{ / K}$. On obtient $\Delta T = -\frac{\Delta F}{\lambda_s} = 2,17 / 3,30 = 0,65 \text{ K}$. On a un $-\Delta F$ car une augmentation de la concentration de CO_2 augmente l'émissivité et augmente diminue F_{out} , donc $\Delta F = -\Delta R$ (et $\lambda_s \approx \frac{\Delta R}{\Delta T}$). Le réchauffement actuel observé est d'environ $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ d'après la Figure 1, donc bien au-dessus de ce qui est attendu à partir de la réponse de Planck seule et du forçage radiatif estimé ici.

5. L'augmentation de la température moyenne globale (ΔT_s) peut être mieux estimée en prenant en compte la sensibilité climatique (associé à la rétroaction totale λ_s) et l'efficacité de l'absorption de la chaleur par les océans τ par la formule

$$\Delta T_s = -\frac{\Delta F}{\lambda_s + \tau} \quad (4.15)$$

où $\lambda_s = -1.16 \text{ W / m}^2 \text{ / K}$ et $\tau = -0.69 \text{ W / m}^2 \text{ / K}$. Pour le même forçage radiatif, calculer le nouveau changement de température. Est-ce plus cohérent? Quels sont les facteurs rentrant en compte dans cette sensibilité climatique λ_s ?

Réponse : L'application directe de la formule donne $1,17 \text{ }^\circ\text{C}$, en accord avec les observations. La rétroaction totale λ_s est plus forte que la réponse de Planck seule car elle prend en compte des rétroactions positives : augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère (rétroaction de la vapeur d'eau), fonte des neiges et glace (rétroaction de la surface) et augmentation de l'effet de serre des nuages hauts et diminution de l'albédo nuageux (rétroaction nuageuse).

Exercice 4.17 – Projections — **Nouveau!**

Source : F. Brient et M. Chassé

Au cours de la 21^e conférence des parties (COP21) à Paris en 2015, les états se sont engagés à limiter le réchauffement global bien en dessous de $2 \text{ }^\circ\text{C}$ par rapport aux niveaux pré-industriels et poursuivre les efforts en vue de limiter cette augmentation à $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour cela, nous allons voir qu'il est nécessaire de réduire les émissions nettes de CO_2 .

1. La figure 4.2 nous montre les contributions relatives par continent des émissions de CO_2 cumulées (encadré) et son évolution temporelle depuis 1750. Quel est la contribution relative de chaque région à l'augmentation de température calculée précédemment?

Réponse : La lecture de l'encart de la Figure 2 indique directement la contribution relative cumulée aux émissions de CO_2 en pourcent pour chaque région du monde. L'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie ont des contributions proches avec respectivement, 33%, 29% et 29%. Les autres régions du monde ont des contributions beaucoup plus faibles avec 3% pour l'Afrique, 3% pour l'Amérique du Sud et 1,2% pour l'Océanie. Il y a évidemment des disparités au sein des régions et ces calculs ne tiennent pas compte des populations relatives cumulées qui ont émis ce CO_2 . Pour être totalement rigoureux, il faudrait considérer que l'influence sur le forçage radiatif (ΔF) n'est pas linéaire mais est une fonction logarithmique, qui croît moins vite qu'une fonction linéaire. Si une région émet 10 fois plus qu'une autre (30% contre 3% par exemple), sa contribution au réchauffement ne sera pas 10 fois plus importante (mais seulement 9,4 fois plus importante pour l'exemple choisi). Au premier ordre, comme C/C_0 est proche de 1, on a $\ln(C/C_0) \approx C/C_0$.

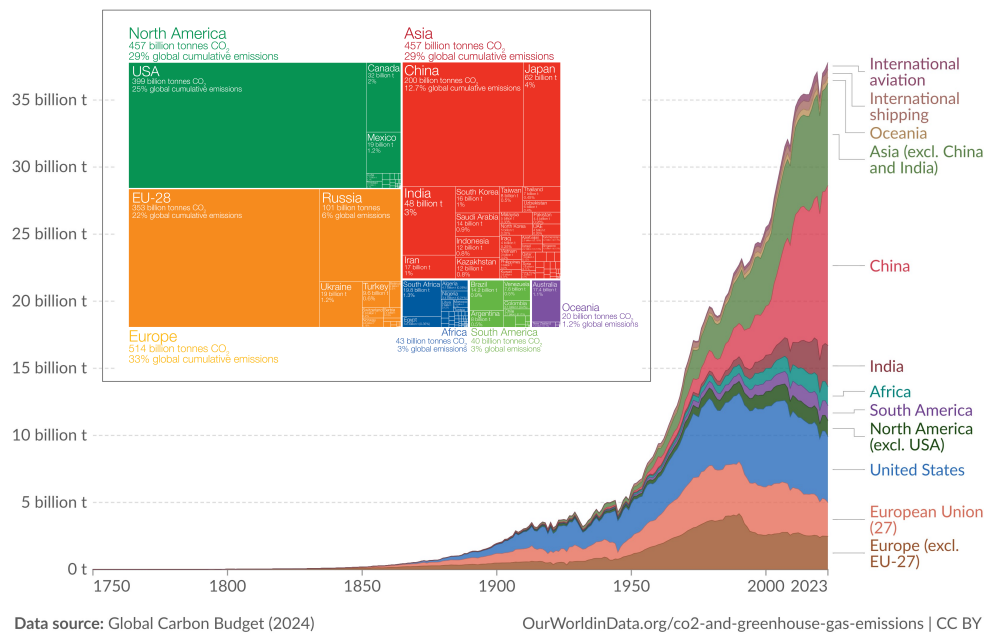


FIGURE 4.2 – Évolution temporelle des émissions annuelles de CO₂ (hors déforestation) séparées par régions mondiales (en billions de tonnes de CO₂ = GtCO₂). L'encart représente la contribution par pays et continent des émissions cumulées de CO₂ depuis 1750. Source : Our World In Data [1] [2]

- En utilisant les formules de l'exercice 4.16, estimer la concentration maximale de CO₂ (en ppm) pour une augmentation de 2 °C. Convertissez cela en émissions de GtCO₂. Calculer les « émissions restantes » par rapport aux conditions actuelles. D'après la figure 4.2, à quel scénario cela correspond-t-il le mieux?

Réponse :

$$\Delta F = -\Delta T_s \cdot (\lambda + \tau) \quad (4.16)$$

$$5,35 \cdot \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\Delta T_s \cdot (\lambda + \tau) \quad (4.17)$$

$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta T_s \cdot (\lambda + \tau)}{5,35}\right) \quad (4.18)$$

[ATTENTION, le calcul numérique ne permet de retrouver le lien entre les valeurs des émissions cumulées depuis 1850 et le changement de température]

L'application numérique donne $C = 559$ ppm, donc 279 ppm au dessus des niveaux pré-industriels, soit 592 GtC, soit 2192 GtCO₂, si l'on considère les 1531 GtCO₂ déjà émises en 2024 d'après la Figure 4.1, cela laisse 661 GtCO₂ à émettre pour rester sous 2 °C.

On peut aussi utiliser la différence de concentration de CO₂ restante, soit 559-420=139 ppm. Ces 139 ppm équivalent à 1091 GtCO₂ restants.

Cela correspond grossièrement aux scénarios SSP1-2.6 et SSP2-4.5.

- Les émissions de CO₂ restantes pour rester à 2 °C sont réellement de 946 GtCO₂ (à compter de l'année 2024). À partir de la figure 4.2 et en gardant le rythme actuel d'émission de CO₂, calculer le nombre d'années restantes avant d'atteindre + 2 °C.

Réponse : Les émissions annuelles sont actuellement autour de 38 GtCO_2 d'après la Figure 4.1, en divisant les 946 GtCO_2 restantes par 38, on obtient 25 ans.

4. Afin de limiter l'augmentation de la concentration de CO_2 , l'utilisation de technologies modifiant volontairement notre action sur le bilan radiatif global est envisagée. Les technologies de Captage et piégeage du Carbone (CDR) permettrait de diminuer les émissions par capture directe, valorisation ou stockage géologique. En 2023, $1,35 \text{ MtCO}_2$ ont été enlevé de l'atmosphère par ces techniques CDR (hors reforestation). Combien de temps a-t-on gagné par l'utilisation de ces techniques (pour 2023) ?

Réponse : Si l'on considère les émissions de 2023, soit 38 GtCO_2 , sachant que $1,35 \text{ MtCO}_2 = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ GtCO}_2 = 0,00135 \text{ GtCO}_2$, en divisant ce résultat par 38 et en convertissant une année en minutes, on obtient un peu moins de 19 minutes d'émissions de gagnées pour une année d'émission.

5. Les scénarios optimistes suggèrent un potentiel de 8 GtCO_2 par les techniques CDR. Combien de temps pourrait-on gagner avec cette estimation ? Comment peut-on faire pour réduire plus efficacement le réchauffement ?

Réponse : Par le même calcul que pour la question précédente, en convertissant cette fois en jours, on gagne 77 jours. Si l'on considère que l'on stabilise les émissions au niveau de 2023, on économise 21% chaque année, donc on peut continuer à ce rythme pendant un peu plus de 31 ans contre 25 ans initialement calculés. La capture du carbone est donc insuffisante par ces méthodes, il faut réduire drastiquement les émissions pour que ces 8 GtCO_2 potentielles puissent permettre de compenser les émissions incompressibles, voire diminuer la concentration de CO_2 atmosphérique pour progressivement revenir à des réchauffements. Des gains d'efficacité sont possibles mais sont globalement insuffisants, ce d'autant plus qu'ils sont souvent perdus par effet rebond (aussi appelé paradoxe de Jevons). Par exemple, des logements plus économes en chauffage ont tendance à être plus chauffés ce qui tend à limiter les gains associés. Cette efficacité doit donc être couplée à une sobriété dont les modalités de mise en place restent à préciser. Une option serait l'introduction de quotas d'émissions carbone individuels, bien que diverses options soient envisageables.

6. A partir du bilan énergétique du climat, imaginer d'autres méthodes de modification volontaires du climat. Discuter de leurs efficacités potentielles et des effets négatifs possibles.

Réponse : On distingue deux grandes familles de techniques de géoingénierie, celles visant à moduler le rayonnement solaire entrant (en augmentant A_s) et celle visant à piéger des gaz à effet de serre (en diminuant ϵ), évoquées plus haut. Cependant, plutôt que de la capture directe, il est aussi envisagé de stimuler artificiellement les puits de carbone existants. Pour la première famille, l'émission de particules de SO_2 dans la stratosphère, à l'image de ce qui se produit lors d'éruptions volcaniques, permettrait de réfléchir une plus grande partie du rayonnement solaire arrivant. Outre l'énergie nécessaire pour déployer les flottes d'avions qui répandraient ces particules dans la stratosphère, les limites résident dans l'existence d'un cadre géopolitique international permettant le maintien de ce procédé aussi longtemps que la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'aura pas diminué, au risque d'une augmentation extrêmement rapide de la température lorsque ce procédé serait stoppé ("termination shock"). Des procédés similaires de blanchissement

des nuages ou des surfaces océaniques ont été envisagés mais présentent le même type de contraintes. Les conséquences sur les climats régionaux restent aussi mal maîtrisées, notamment les modifications de la pluviométrie, en particulier sur les moussons.

Le principal puits de carbone qui pourrait être artificiellement stimulé est l'océan. Son alcalinisation engendrerait un décalage de l'équilibre acido-basique des carbonates et augmenterait la solubilité du CO₂ dans l'eau, limitant sa concentration dans l'atmosphère. Là aussi se pose la question du passage à l'échelle, extraire et broyer des substances alcalines (basaltes, calcaires) aura forcément un coût énergétique et plus généralement écologique non négligeable. Les conséquences sur les écosystèmes marins sont par ailleurs difficile à anticiper. Plus anciennement, des tentatives d'ensemencement des océans pour stimuler la productivité biologique et en particulier le développement du phytoplancton qui, au travers de la photosynthèse absorbe le CO₂, ont été développées. Le passage à l'échelle a montré des limites avec un rendement beaucoup moins important qu'espéré, sans compter les déséquilibres introduits dans les écosystèmes. Un protocole a été signé afin de prévenir le recours à de telles techniques. Dans les écosystèmes terrestres, la biomasse et les sols sont des puits de carbone sur lesquels il est envisagé de jouer. Néanmoins, la compétition pour l'usage des sols est une problématique forte notamment entre besoins agricoles et piégeage des gaz à effet de serre. De nombreuses limites à l'efficacité du développement de telles techniques ont été pointées du doigt. On peut citer les ravages sur les écosystèmes de monocultures d'arbres qui, même si elles piègent rapidement le carbone, sont très pauvres en termes de biodiversité. L'autre problème est que le potentiel est limité dans le temps et que l'on atteint une saturation de ces puits à des échéances relativement brèves à l'échelle climatique.

Chapitre 5

L'empreinte carbone

Exercice 5.1 – CO₂ et GES

Source : G. Blanc

1. Quels sont les principaux gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère ?

Réponse : Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_%C3%A0_effet_de_serre

Gaz à effet de serre	Formule	Concentration préindustrielle	Concentration actuelle	Durée de séjour moyenne (ans)	PRG à 100 ans
Vapeur d'eau	H ₂ O	3000 ppm	3000 ppm	~ 0,02 (1-2 semaines)	~ 0
Dioxyde de carbone	CO ₂	280 ppm	412 ppm	100	1
Méthane	CH ₄	0,6 à 0,7 ppm	1,8 ppm	12	25
Protoxyde d'azote	N ₂ O	0,270 ppm	0,327 ppm	114	298
Dichlorodifluorométhane (CFC-12)	CCl ₂ F ₂	0	0,52 ppb	100	10 900
Chlorodifluorométhane (HCFC-22)	CHClF ₂	0	0,105 ppb	12	1 810
Tétrafluorure de carbone	CF ₄	0	0,070 ppb	50 000	7 390
Hexafluorure de soufre	SF ₆	0	0,008 ppb	3 200	22 800

2. Quelles sont leurs concentrations actuelles dans l'atmosphère ?

Réponse : cf. tableau

3. Sont-ils naturels ou émis par les activités humaines ?

Réponse : cf. tableau

4. Comment peut-on comparer l'effet de serre (forçage radiatif) induit par ces différents gaz? Qu'est-ce que 1 kgCO₂é (kilogramme de CO₂ équivalent)?

Réponse : Pour cela on utilise le pouvoir de réchauffement global qui permet de comparer les gaz à effet de serre en fonction de leur forçage radiatif induit sur l'atmosphère pour un horizon temporel donné.

Le pouvoir de réchauffement global (PRG) du gaz i par rapport au gaz de référence r pour l'horizon temporel T est donné par :

$$\text{PRG}_{i,r}(T) = \frac{\int_0^T a_i C_i(t) dt}{\int_0^T a_r C_r(t) dt} \quad (5.1)$$

où $a_{i,r}$ est l'efficacité radiative du gaz i, r et $C_{i,r}(t)$ est la concentration du gaz i, r à l'instant t en réponse à l'émission d'une unité de masse de ce gaz à l'instant $t = 0$. Notons que le produit de l'efficacité radiative par la concentration donne le forçage radiatif du gaz considéré.

Par convention (depuis le protocole de Kyoto), l'horizon temporel est fixé à 100 ans, et le gaz de référence est le CO₂.

	Temps de résidence (années)	Efficacité radiative (W · m ⁻² · ppb ⁻¹)	PRG pour différents horizons		
			20 ans	100 ans	500 ans
CO ₂	> 100	1,4 · 10 ⁻⁵	1	1	1
CH ₄	12	3,7 · 10 ⁻⁴	72	25	7,6
N ₂ O	114	3,03 · 10 ⁻³	289	298	153
CF ₄	50000	0,10	5210	7390	11200

5. À quelle masse de CO₂é correspondent le rejet de 1 kg de dioxyde de carbone, de 1 kg de méthane et de 1 kg de protoxyde d'azote?

Réponse : 1 kg de CO₂ = 1 kgCO₂é

1 kg de CH₄ = 25 kgCO₂é

1 kg de N₂O = 298 kgCO₂é

Exercice 5.2 – Bilan gaz à effet de serre d'un scooter

Source : G. Blanc

1. Qu'est-ce qu'un bilan de gaz à effet de serre (BGES)? Comment le réalise-t-on?

Réponse : Un BGES permet d'évaluer quelle quantité de GES une activité donnée rejette. Cela nécessite de connaître la quantité d'activité que l'on souhaite analyser et le facteur d'émission correspondant, à savoir la quantité de GES en kgCO₂é par unité de l'activité en question.

Un BGES est dépendant d'un périmètre, c'est-à-dire du contour de l'activité en question.

2. Comment peut-on comparer les effets de ces différents gaz sur l'effet de serre?

Réponse : On utilise le pouvoir de réchauffement global qui permet de comparer les gaz à effet de serre en fonction de leur forçage radiatif induit sur l'atmosphère pour un horizon temporel donné (100 ans par convention). Cela permet d'exprimer les rejets de tous les GES en une unique unité, le kgCO₂éq.

Par exemple, 1 kg de méthane rejeté équivaut à 25 kg de CO₂ rejeté, soit 25 kgCO₂éq.

Un scooter ou une moto de petite cylindrée (disons 125 cm³) consomme environ 2 L d'essence pour parcourir 100 km. On assimile l'essence à de l'octane (C₈H₁₈) dont l'équation de combustion dans l'air est :



La masse volumique de l'essence est : $\rho_e = 0,74 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$. La masse molaire de l'octane vaut 114 g/mol et celle du dioxyde de carbone vaut 44 g/mol.

La concentration volumique molaire de l'octane est de 6,49 mol/L.

3. Quelle masse de dioxyde de carbone est émise par mole d'essence brûlée?

Réponse : Pour une mole d'essence brûlée, on émet 8 moles de CO₂. Or la masse molaire du CO₂ est de 44 g/mol, donc chaque mole d'essence émet $8 \times 44 = 352 \text{ g}$ de CO₂.

4. Quelle masse de dioxyde de carbone est émise pour un litre d'essence brûlé?

Réponse :

La combustion d'un litre d'essence rejette donc : $0,352 \times 6,49 = 2,28 \text{ kg}$ de CO₂.

5. Quelle masse de dioxyde de carbone est émise par le scooter par kilomètre parcouru?

Réponse : Le scooter consomme 0,02 L d'essence par km. Dont la combustion rejette $0,02 \times 2,28 = 0,0456 \text{ kg}$ de CO₂/km.

6. Le rejet de gaz à effet de serre d'un scooter vaut 0,0736 kgCO₂éq/km dans les données tabulées officiellement. D'après vous, d'où peut provenir la différence entre votre résultat et cette valeur?

Réponse : Source : base carbone de l'ADEME.

La combustion de l'essence proprement dite rejette 0,0472 kgCO₂éq, soit une valeur très proche de celle calculée ici. « Amont carburant » (0,0104 kgCO₂éq) doit concerner (??) les rejets de GES lors de la production de l'essence, tandis que « fabrication » (0,0159 kgCO₂éq) concerne les rejets lors de la fabrication du scooter. Il s'agit donc d'une différence de périmètre.

7. Une voiture rejette typiquement 0,162 kgCO₂éq/km. Vaut-il mieux rouler en voiture ou en scooter?

Réponse : La voiture rejette 3,43 fois plus de GES. À partir de 4 personnes en covoiturage, la voiture est préférable du point de vue des émissions de GES. C'est également le cas en terme de bruit. Par contre le scooter est préférable en terme d'espace consommé sur la voirie (encore que, si une voiture c'est 4 à 5 personnes, ce n'est plus vrai, mais les voitures transportent rarement autant de monde!).

Exercice 5.3 – Comparaison des émissions carbone de trois modes de transport

Source : Roland Lehoucq

Dans une publicité récente, la SNCF affirmait que voyager en train dégage 30 fois moins de CO₂ que la voiture individuelle et 20 fois moins que l'avion. Nous allons tester cette assertion en prenant pour exemple le trajet Paris – Toulouse.

1. Dans les transports, les facteurs d'émission kilométriques sont souvent exprimés en gCO₂é/km. Que signifie l'unité gCO₂é?

Réponse : Il s'agit de la masse de gaz à effet de serre émise à chaque kilomètre parcouru, masse ramenée à celle du CO₂, en tenant compte du pouvoir réchauffant de chaque gaz incriminé (méthane CH₄, oxyde nitreux N₂O, etc.)

2. La base de données de la SNCF nous apprend que la ligne Paris – Toulouse fait 793 kilomètres et que le facteur d'émission par passager est de 1,374 kgCO₂é. Calculez le facteur d'émission kilométrique par passager associé à la liaison Paris-Toulouse en TGV.

Réponse : $1374/793 = 1,73 \text{ gCO}_2\text{é/km/pax}$

3. La base carbone de l'ADEME indique que facteur d'émission volumique du carburant SP95-E10 est de 2,8 kgCO₂é/litre. Calculez le facteur d'émission kilométrique par passager d'une voiture transportant 2 personnes et consommant en moyenne 6 litres de SP95-E10 au 100 kilomètres.

Réponse : $2800 \text{ gCO}_2\text{e/litre} \times 6 \text{ litres}/100 \text{ km}/2 \text{ passagers} = 84,0 \text{ gCO}_2\text{é/km/pax}$.

4. Un Airbus A320 transporte 186 passagers et consomme en moyenne 3 900 litres de kérosène par heure. Le kérosène émet 2,545 kgCO₂é/litre, mais il faut augmenter ce facteur d'émission de 22% pour tenir compte des émissions liées à la production et à la distribution du carburant. Paris-Orly et Toulouse-Blagnac sont distants de 571 kilomètres et le voyage dure 1 h 15. Calculez le facteur d'émission kilométrique par passager de ce vol.

Réponse : $1,22 \times 2545 \text{ gCO}_2\text{é/litre} \times 3900 \text{ litre/h} \times 1,25\text{h}/571 \text{ km}/186 \text{ passagers} = 142,5 \text{ gCO}_2\text{é/km/pax}$.

5. Comparez les émissions kilométriques par passager des 3 modes de transport précédents et commentez la publicité citée en exergue.

Réponse : Voiture = 48 × TGV, Avion = 82 × TGV. Les valeurs de la SNCF sont donc « gentilles ».

6. Comment varieraient ces résultats si la France avait le mix énergétique de la Pologne ?

Réponse : Pour l'avion et la voiture rien ne change, pour le train on multiplie par le quotient de l'intensité carbone Pologne/France, soit x 10 en gros. Même ainsi le train reste plus favorable.

Exercice 5.4 – Combustion du méthane

Source : D. Boilley

1. Ecrire la réaction de combustion du méthane (CH_4) dans l'air.

Réponse : $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

2. En déduire la masse de CO_2 émise lors de la combustion d'un kilogramme de méthane.

Réponse : Les masses molaires du méthane et du dioxyde de carbone étant respectivement égales à $M_{\text{CH}_4} = 16 \text{ g/mol}$ et $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ g/mol}$, la combustion d'un kilogramme de méthane entraîne le dégagement de 2,75 kg de CO_2 .

3. La combustion du méthane à 25 °C libère une énergie 55,53 MJ/kg. En déduire la masse de CO_2 émise pour obtenir une énergie thermique de 1 kWh.

Réponse : L'obtention de 1 kWh thermique à partir de la combustion du méthane dégage 178 g de CO_2 .

4. En déduire la quantité de CO_2 émise pour une consommation annuelle de référence typique de 5 500 kWh (eau chaude et cuisson au gaz) et de 12 000 kWh (cuisson, eau chaude et chauffage), en supposant que la gaz est exclusivement composé de méthane (en réalité, c'est environ 90 %).

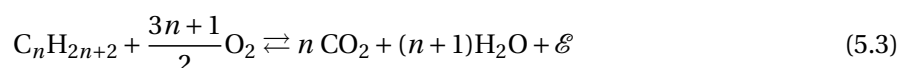
Réponse : La consommation de 5 500 kWh de méthane entraîne une émission de 981 kg de CO_2 et celle de 12 000 kWh de méthane, 2,1 tonnes.

Exercice 5.5 – Bilan gaz à effet de serre des transports

Source : G. Blanc

Réponse : Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/automobile-carburant-emet-plus-co2-essence-gasoil-947/>

On assimile l'essence à un alcane avec 8 atomes de carbone, l'octane ($n = 8$) et le gasoil à un alcane avec 16 atomes de carbone, l'hexadécane ($n = 16$). L'équation générale de combustion chimique des alcanes est :

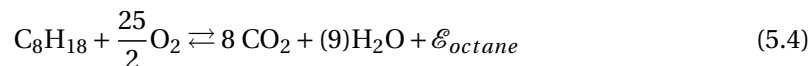


où $\mathcal{E}$ est de l'énergie thermique.

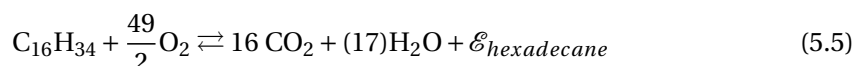
La masse volumique de l'essence est : $\rho_e = 0,74 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, et celle du gasoil est : $\rho_g = 0,85 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1. Écrire cette équation pour la combustion de l'essence et celle du gasoil.

Réponse : Pour l'essence ($n = 8$) :



Pour le gasoil ($n = 16$) :



2. Quelle masse de dioxyde de carbone est émise par mole d'essence et de gasoil brûlés?

Réponse : Pour une mole d'essence brûlée, on émet 8 moles de CO_2 . Or la masse molaire du CO_2 est de 44 g/mol, donc chaque mole d'essence émet $8 \times 44 = 352 \text{ g}$ de CO_2 .

Pour une mole de gasoil brûlée, on émet 16 moles de CO_2 soit $16 \times 44 = 704 \text{ g}$ de CO_2 .

3. Et pour un litre de carburant brûlé? Exprimez le résultat en kg de CO_2 et en kg de C.

Réponse :

- Pour l'essence :

La masse molaire de l'octane est de $8 \times 12 + 18 = 114 \text{ g/mol}$. Sachant que la masse volumique de l'essence est $\rho_e = 0,74 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0,114 kg équivaut à $0,114 / 0,74 = 0,154 \text{ L}$. Ainsi, 1 L d'essence sont $1 / 0,154 = 6,49$ moles d'octane.

La combustion d'un litre d'essence rejete donc : $0,352 \times 6,49 = 2,28 \text{ kg}$ de CO_2 .

On peut également exprimer cela en masse de carbone, sachant que le rapport des masses molaires entre le CO_2 et le carbone vaut : $44 / 12 = 3,67$. Ainsi 2,28 kg de CO_2 équivalent à $2,28 / 3,67 = 0,62 \text{ kg}$ de C.

- Pour le gasoil : La masse molaire de l'octane est de $16 \times 12 + 34 = 226 \text{ g/mol}$. Sachant que la masse volumique du gasoil est $\rho_g = 0,85 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0,226 kg équivaut à $0,226 / 0,85 = 0,266 \text{ L}$. Ainsi, 1 L d'essence sont $1 / 0,266 = 3,76$ moles d'hexadécane.

La combustion d'un litre de gasoil rejete donc : $0,704 \times 3,76 = 2,64 \text{ kg}$ de CO_2 .

Ce qui équivalent à $2,64 / 3,67 = 0,72 \text{ kg}$ de C.

Une voiture avec un moteur diesel, consommant donc du gasoil, consomme en moyenne 6,1 L de gasoil pour faire 100 km, en France, en 2019¹.

4. Quelle masse de dioxyde de carbone est émise par kilomètre parcouru?

Réponse : Pour 1 km, la consommation est de 0,061 L de gasoil. Le rejet de CO_2 est donc de : $0,061 \times 2,64 = 0,161 \text{ kg}$ de CO_2 .

1. Source : <https://fr.statista.com/statistiques/486554/consommation-de-carburant-moyenne-voiture-france/>

5. Sachant qu'en moyenne une voiture diesel parcourt en France, chaque année², 14400 km, quelle quantité de CO₂ est émise sur cette distance?

Réponse :

On obtient : $0,161 \times 14400 = 2319$ kg.

En France, en 2019³, une voiture à moteur essence consomme en moyenne 7,1 L d'essence pour faire 100 km.

6. Quelle masse de dioxyde de carbone est émise par kilomètre parcouru?

Réponse : $0,071 \times 2,28 = 0,162$ kg de CO₂

On obtient la même valeur que pour la voiture diesel.

7. Sachant qu'en moyenne une voiture essence parcourt en France, chaque année⁴, 8900 km, quelle quantité de CO₂ est émise sur cette distance?

Réponse : $0,162 \times 8900 = 1442$ kg de CO₂.

En 2019, il y avait 23205000 voitures diesel dans le parc automobile français et 14385000 voitures essence⁵.

8. En supposant que chaque voiture est une voiture « moyenne » c'est-à-dire parcourant la distance moyenne annuelle et consommant la quantité moyenne de carburant, donner la masse des émissions de CO₂ du secteur des transports individuels.

Réponse : La masse totale de CO₂ émise est :

$$23205000 \times 2319 + 14385000 \times 1442 = 74 \cdot 10^6 \text{ kg} \quad (5.6)$$

9. Commentez vos résultats sachant qu'en 2018, 71,8 MtCO₂éq ont été émises par les voitures particulières⁶.

Réponse : C'est pas mal! On ne tient compte dans notre calcul que des émissions de CO₂ lors de la combustion du carburant. Les rejets effectués lors de la construction des véhicules, de l'entretien, etc., ne sont pas pris en compte. Mais ils ne le sont probablement pas non plus dans le chiffre « officiel ».

2. Source : <https://fr.statista.com/statistiques/484345/distance-parcourue-en-moyenne-par-voiture-france/>

3. Source : <https://fr.statista.com/statistiques/486554/consommation-de-carburant-moyenne-voiture-france/>

4. Source : <https://fr.statista.com/statistiques/484345/distance-parcourue-en-moyenne-par-voiture-france/>

5. Source : <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/l-auto-en-chiffres/s-891-immatriculations-essence-diesel.php>

6. Source : <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-des-transport>

10. Estimez vos émissions de CO₂ liés à votre véhicule, ou celui que vous utilisez le plus fréquemment. Pour cela, il faut connaître le type de carburant qu'il consomme, sa consommation moyenne et la distance que vous parcourez annuellement avec.

Réponse : À chacun de faire son calcul...

Exemple personnel : j'ai une voiture diesel qui consomme en moyenne 5,2 L de gasoil pour 100 km. Je rejette donc 13,73 kg de CO₂ pour 100 km. Je fais environ 25 000 km/an, j'émet donc 3,4 tonnes de CO₂ chaque année avec ma voiture. Dans laquelle nous sommes en général 3, ma femme, ma fille et moi. Soit 1,14 tonne par personne.

Avec ma voiture, ma famille rejette donc 137 g de CO₂ par kilomètre. Soit 46 g/km/personne.

Exercice 5.6 – Bilan gaz à effet de serre du chauffage résidentiel

Source : G. Blanc

La surface moyenne des logements en France⁷ est de 91 m². La puissance de chauffage nécessaire est en moyenne⁸ de 40 W·m⁻³, sachant que la hauteur sous plafond typique⁹ est de 2,3 m. La période de chauffage en France métropolitaine est typiquement du 15 octobre au 15 avril de l'année suivante.

Le nombre de logements en France en 2020 est de 37 millions¹⁰.

1. Quelle est l'énergie nécessaire pour chauffer un logement pendant un an ?

Réponse : Un logement typique occupe un volume de $91 \times 2,3 = 209 \text{ m}^3$. Cela nécessite donc : $209 \times 40 = 8400 \text{ W}$.

Période d'utilisation : du 15 octobre au 31 décembre, il y a $31 - 15 + 30 + 31 = 77$ jours ; du 1er janvier au 15 avril, il y a : $31 + 28 + 31 + 15 = 105$ jours. Soit 182 jours de chauffage en tout. Ou encore $182 \times 86400 = 1,57 \cdot 10^7 \text{ s}$.

Le chauffage sur une demi-année nécessite donc une énergie de : $1,57 \cdot 10^7 \times 8400 = 1,32 \cdot 10^{11} \text{ J}$.

2. Exprimez cette énergie en kWh, l'unité que vous retrouvez sur vos factures énergétiques.

Réponse : $1 \text{ kWh} = 1000 \times 3600 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$.

Donc $1,44 \cdot 10^{11} \text{ J} = 1,44 \cdot 10^{11} / 3,6 \cdot 10^6 = 37000 \text{ kWh}$

3. Quelle est l'énergie nécessaire pour chauffer tous les logements ?

Réponse : $1,32 \cdot 10^{11} \times 37 \cdot 10^6 = 4,9 \cdot 10^{18} \text{ J}$

Dans un premier temps on suppose un chauffage au gaz naturel. Le gaz naturel est composé de

7. Source : https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2586024/LOGFRA17k2_F6.2.pdf

8. Source : <http://www.radiateur-electrique.org/calcul.php>

9. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Taille_des_logements_en_France#Hauteurs_des_pi%C3%A8ces

10. Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4985385>

méthane principalement et d'autres gaz, alcanes ou autre. Nous supposons qu'il est constitué uniquement de méthane. Le pouvoir calorifique inférieur¹¹ (PCI) du méthane est de $803,3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

4. Quelle est l'équation chimique de la combustion du méthane (voir exercice 5.5) ?

Réponse : Pour le méthane ($n = 1$) :



5. Quelle masse de CO_2 génère la combustion d'une mole de méthane ?

Réponse : Une mole de méthane rejette 1 mole de CO_2 soit 44 g.

6. Quelle quantité de méthane est nécessaire pour chauffer le logement précédent sachant que le rendement d'une chaudière au gaz (sans condensation) est typiquement de 90 % ?

Réponse : Pour chauffer le logement typique précédent pendant une année, il faut :

$$\frac{1,32 \cdot 10^{11} \text{ J}}{803,3 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \times 0,9} = 183000 \text{ moles} \quad (5.8)$$

7. Quelle est la masse de CO_2 alors rejetée ?

Réponse : La masse de CO_2 rejetée est de : $183000 \times 0,044 = 8000 \text{ kg}$

8. Et pour l'ensemble des logements de France ?

Réponse : Cela fait un rejet total de : $8000 \times 37 \cdot 10^6 = 3 \cdot 10^{11} \text{ kg}$ de CO_2 soit 300 Mt de CO_2 .

On suppose maintenant que le chauffage est électrique. En France, en 2020, l'électricité¹² est issue du nucléaire (67,1 %), de l'hydraulique (13 %), de l'éolien (7,9 %), du thermique (7,5 %) – à proportion¹³ de 77 % gaz, 12 % pétrole et 11 % charbon – du solaire (2,5 %) et de la biomasse (1,9 %).

9. Quelles sources d'énergie primaire dans le mix électrique français sont émettrices de gaz à effet de serre (bilan net en fonctionnement sans tenir compte de la construction des installations) ?

Réponse : Il s'agit des sources thermiques brûlant des combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon).

11. Le pouvoir calorifique inférieur est l'énergie libérée par la combustion sans tenir compte de la condensation de la vapeur d'eau produite. Si on en tient compte, la quantité d'énergie récupérée est plus importante, c'est le pouvoir calorifique supérieur. C'est le principe des chaudières à condensation (https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudi%C3%A8re_%C3%A0_condensation)

12. Source : <https://www.rte-france.com/actualites/bilan-electrique-francais-2020>

13. Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/15-electricite>

Le rendement d'un appareil de chauffage électrique (basé sur l'effet Joule) est de 100 %. On suppose que toute l'énergie thermique servant à produire de l'électricité est issue du gaz naturel (méthane). Le rendement de conversion électrique d'une centrale thermique ¹⁴ à gaz est de 47 % (c'est-à-dire que l'on obtient 47 J d'électricité avec 100 J de chaleur produite par la combustion du gaz).

10. Quelle est la quantité d'électricité nécessaire pour chauffer un logement? Quelle quantité de CO₂ cela rejette-t-il?

Réponse : Un logement a besoin de $1,32 \cdot 10^{11}$ J de chauffage. Comme le rendement d'un chauffage électrique est de 100 %, il faut $1,32 \cdot 10^{11}$ J d'électricité.

Déterminons maintenant la quantité de méthane nécessaire pour ça.

Dans le mix électrique français, on a 7,5 % de sources primaires émettrices de CO₂, que l'on suppose ici être exclusivement du méthane, soit $1,32 \cdot 10^{11} \times 0,075 = 10 \cdot 10^9$ J. Pour obtenir cela, il faut :

$$\frac{10 \cdot 10^9}{803,3 \cdot 10^3 \times 0,47} = 26000 \text{ moles} \quad (5.9)$$

Ce qui rejette $26000 \times 0,044 = 1100$ kg de CO₂.

11. Quelle est la quantité d'électricité nécessaire pour chauffer l'ensemble des logements? Quelle quantité de CO₂ cela rejette-t-il?

Réponse : Il faut $1,32 \cdot 10^{11} \times 37 \cdot 10^6 = 4,9 \cdot 10^{18}$ J

Les rejets sont de : $1100 \times 37 \cdot 10^6 = 4,1 \cdot 10^{10}$ kg de CO₂. Soit 41 Mt de CO₂.

12. En France, est-il préférable, du point de vue des rejets de GES, se chauffer au gaz naturel ou bien à l'électricité?

Réponse : Le chauffage d'un même logement (typique) « coûte » 8000 kg de CO₂ avec du gaz naturel, et 1100 kg de CO₂ avec le mix électrique français. On « économise » donc un facteur 7 avec l'électricité.

Le chauffage émet environ 55 MtCO₂eq en France chaque année ¹⁵.

13. Comparez cette valeur avec ce que vous obtenez pour un chauffage exclusivement au gaz ou exclusivement à l'électricité.

Réponse : On obtient un facteur $\sim 300/55 = 5,5$ fois plus élevé avec un chauffage au gaz exclusif, et 25 % de de moins avec l'électricité et les hypothèses effectuées. La réalité est donc entre les deux...

14. Déterminez les émissions de CO₂ pour votre logement. Pour cela, il vous faut connaître la surface, la source d'énergie et la consommation annuelle.

Exercice 5.7 – Votre bilan de gaz à effet de serre individuel

Source : G. Blanc

14. Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/14-gaz-naturel>

15. Source : <https://notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/emissions-de-co2-quelle-evolution-pour-le-chauffage-residentiel>

1. Sachant que les émissions GES de la France sont de 666 MtCO₂eq en 2019 (empreinte carbone qui tient compte des biens et services importés), quelle est l'empreinte carbone moyenne des français?

Réponse : Avec 67 millions d'habitants, cela fait 9,9 tCO₂eq en moyenne par personne et par an. Voir aussi : https://www.carbone4.com/myco2-empreinte-moyenne-evolution-methodo?mc_cid=69233218e6&mc_eid=0b0179c02a

2. Les objectifs des Accords de Paris pour la France sont de 2 tCO₂eq/personne en 2050. Pourquoi ce n'est pas zéro?

Réponse : Parce que les puits naturels de carbone absorbent une partie de nos émissions. Il s'agit essentiellement des océans et des terres, qui permettent d'absorber respectivement 2,5 et 3,2 GtC/an soit 9,1 et 11,7 GtCO₂eq/an, ce qui représente 52 % du total (qui est de 40 GtCO₂eq dans le monde).

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC – <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>) française élaborée suite à la COP21 en vue d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris pour limiter le réchauffement en deçà de 2 degrés stipule une diminution de l'empreinte carbone nationale de 666 à 80 MtCO₂eq, de façon à ce que cette quantité de CO₂ émise soit complètement absorbée par les puits naturels de carbone, ce qui amène ainsi à la « neutralité ». Cependant cette trajectoire suppose que la capacité des puits de carbone double en France d'ici 2050. Voir : <https://www.i4ce.org/download/puits-carbone-france-realiste/>.

3. Faites votre BGES personnel avec <https://nosgestesclimat.fr/>. Pour cela il vous faut quelques données sur votre façon de vivre et de consommer (véhicule et distance annuelle parcourue, type de carburant et consommation, chauffage : énergie consommée annuellement, superficie du logement, consommation annuelle d'électricité, achat de produits divers...). Aller dans « Faire le test à plusieurs ».

Réponse : Pour faire votre BGES personnel, il faut préparer et rechercher quelques données (factures) sur votre manière de vivre :

- la surface de votre logement;
- votre consommation annuelle de chauffage (en kWh) ainsi que le type d'énergie (gaz, électricité...);
- votre consommation annuelle d'électricité (en kWh);
- le nombre de kilomètres parcourus en moyenne chaque année pour vos différents modes de locomotion;
- la consommation kilométrique en carburant de votre véhicule.

4. Quelles actions pouvez-vous envisager pour le réduire? Simulez ces actions avec l'outil proposé.
 - (a) Quelles sont les actions auxquelles vous avez la main (à savoir que la décision ne dépend que de vous)? À quelle fraction de votre BGES cela correspond-il?
 - (b) Quelles sont les actions qui dépendent de votre entourage proche (famille)? À quelle fraction de votre BGES cela correspond-il?
 - (c) Quelles sont les actions sur lesquelles vous n'avez pas la main (la décision ne dépend pas de vous)? À quelle fraction de votre BGES cela correspond-il?

Réponse : Discussion autour de Dugast & Soyeux 2019. Sur l'empreinte moyenne des français, environ 1/4 est imputable aux actions individuelles et 3/4 aux actions collectives. L'action individuelle est ainsi loin d'être négligeable : le passage d'un régime carné à un régime végétarien permet de baisser ses émissions de 10 %. « Les écogestes, à condition qu'ils soient pertinents, ont un réel impact sur l'empreinte carbone. Ils sont par ailleurs nécessaires, au sens strict du terme : ils ne sont actionnables par personne d'autre que nous-mêmes »

Par exemple :

Régime végétarien	Supprimer la viande et le poisson du régime alimentaire
Vélo pour trajets courts	Remplacer les trajets voiture courte distance en milieu urbain par du vélo
Covoiturage sur tous trajets	Fixer le taux d'occupation de tous les trajets en voiture, courts et longs, à 2,2 personnes/voiture
Ne plus prendre l'avion	Supprimer 100 % des vols domestiques et internationaux
Moins de vêtements neufs	Acheter trois fois moins de vêtements neufs
Manger local	Consommer l'ensemble de son alimentation en circuit court
Thermostat	Baisser la température de consigne de son logement
Electroménager et hi-tech d'occasion	Tout acheter d'occasion
Zéro déchet et gourde	Supprimer les émissions liées aux emballages
LEDs dans logement	Equiper son logement d'un éclairage LED

5. Quelles sont les atouts d'un tel bilan GES?

Réponse : Le problème du réchauffement climatique nécessite une réduction drastique des émissions de GES. Quantifier nos émissions et où on les trouve est absolument nécessaire pour pouvoir hiérarchiser les gestes et ne pas passer à côté du principal.

6. Quelles en sont les limites?

Réponse : L'outil empreinte carbone ou bilan GES ne tient compte que des aspects GES, comme son nom l'indique. Il ne prend pas du tout en compte d'autres impacts environnementaux comme les ressources (matériaux, phosphates, eau, etc.) et les pollutions (extraction des métaux, azote, plastiques, pesticides, etc.). Il faut garder ça à l'esprit, dans la mesure où résoudre le problème du climat, ie décarboner notre énergie, ne résoudrait pas du

tout les autres problèmes environnementaux (ie autres limites planétaires). Il faut mettre en œuvre des solutions imbriquées.

Exercice 5.8 – Empreinte carbone d'un t-shirt

Source : C. Coillot

L'exercice porte sur le bilan carbone d'un vêtement de la marque fictive de vêtements « ZERO ». Nous considérerons deux catégories de t-shirt :

- t-shirt polyester emballé dans un sachet plastique (= t-shirt 1)
- t-shirt coton bio emballé dans une pochette papier (= t-shirt 2)

Une fois l'empreinte carbone sur le cycle de vie réalisée nous examinerons les leviers de réduction des impacts environnementaux.

Hypothèses : L'« Unité Fonctionnelle » considérée pour l'empreinte/bilan carbone est : « porter un t-shirt une fois ». Pour la résolution de l'exercice on considérera :

- un t-shirt porté une fois par mois pendant 2 ans (= durée de vie du t-shirt).
- t-shirt fabriqué en Asie par bateau cargo porte-conteneur sur une distance de 5000 km
- transport routier du « t-shirt + emballage » sur une distance de 3000 km.
- transport magasin-domicile par le consommateur (voiture) se trouvant à 5 km de son domicile.

1. Recensez les différents flux, les étapes du cycle de vie du t-shirt et définissez les frontières de l'étude.

Réponse : Deux flux : t-shirt polyester et t-shirt coton + lavage & repassage.

Étapes de l'ACV : Extraction/production matières premières, confection, transport usine-magasin, transport magasin-domicile, usage (lavage, séchage, repassage), fin de vie.

Frontières : machine à laver, eau, lessive, énergie. On exclut : les bâtiments des usines de confection et du magasin, les surfaces de logement pour accueillir les équipements électroménagers...

2. En vous appuyant de la base empreinte de l'ADEME, complétez les facteurs d'émission (inventaire des intrants et des extrants).

Facteurs d'émission pour le t-shirt 1 :

	t-shirt polyester	plastique moyenne / neuf	incinération
Fabrication et emballages			

Facteurs d'émission pour le t-shirt 2 :

	t-shirt coton	emballage papier / moyen	composte (bilan)
Fabrication et emballages			

Facteurs d'émission pour le transport et l'usage du t-shirt :

	cargo / 10000 à 20000 tonnes	camion 7,5 t France (50 %)	voiture / motorisation moyenne (2018)
Usage (transport)			

Facteurs d'émission pour l'usage (énergie et entretien) :

	électricité (mix français 2022)	machine à laver 5 kg	fer à repasser 1,5 kg – 1 kWh – 30 euros	eau	lessive liquide
Usage (énergie et entretien)					

Réponse :

Facteurs d'émission pour le teeshirt 1 :

	teeshirt polyester	plastique / moyenne / neuf	incinération
Fabrication et emballages	5,5 kgCO ₂ é	2,38 kgCO ₂ é/kg	2,2 kgCO ₂ é/kg

Facteurs d'émission pour le teeshirt 2 :

	teeshirt coton	emballage papier / moyen	composte (bilan)
Fabrication et emballages	5,2 kgCO ₂ é	0,9 kgCO ₂ é/kg	0,009 kgCO ₂ é/kg

Facteurs d'émission pour le transport et l'usage du teeshirt :

	Cargo / 10000 à 20000 tonnes	Camion 7,5 t France (50 %)	Voiture / Motorisation moyenne (2018)
Usage (transport)	0,0132 kgCO ₂ é/(t.km)	0,267 kgCO ₂ é/(t.km)	0,231 kgCO ₂ é/km

Facteurs d'émission pour l'usage (énergie et entretien) :

	Électricité (mix français 2022)	Machine à laver 5 kg	fer à repasser 1,5 kg – 1 kWh – 30 euros	Eau	Lessive liquide
Usage (énergie et entretien)	0,052 kgCO ₂ é/kWh	305 kgCO ₂ é	700 kgCO ₂ é/k€ soit 21 kgCO ₂ é	0,132 kgCO ₂ é/m ³	0,838 kgCO ₂ é/L

Déterminer le bilan carbone de la fabrication du teeshirt & de son emballage (en kgCO₂é).

	flux	FE (kgCO ₂ é/unité de flux)	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
teeshirt polyester (~ 150 g)	1 t-shirt		
Emballage plastique	0,015 kg		
Bilan carbone teeshirt 1			
T-shirt coton (~ 150 g)	1 teeshirt		
Emballage papier	0,050 kg		
Bilan carbone teeshirt 2			

Réponse :

	flux	FE (kgCO ₂ é/unité de flux)	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
T-shirt polyester (~ 150 g)	1 t-shirt	5,5	5,5
Emballage plastique	0,015 kg	2,38	0,04
Bilan carbone teeshirt 1			5,54
T-shirt coton (~ 150 g)	1 t-shirt	5,2	5,2
Emballage papier	0,050 kg	0,9	0,05
Bilan carbone teeshirt 2			5,25

3. Déterminer l'empreinte carbone de la logistique de distribution/transport.

	flux	FE (kgCO ₂ é/unité de flux)	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
Cargo t-shirt 1			
Camion t-shirt 1			
Transport magasin-domicile			
Bilan transport teeshirt 1			
Cargo t-shirt 2			
Camion t-shirt 2			
Transport magasin-domicile			
Bilan transport teeshirt 2			

Réponse :

	flux	FE (kgCO ₂ é/unité de flux)	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
Cargo teeshirt 1	0,825 t·km	0,013	0,011
Camion teeshirt 1	0,495 t·km	0,267	0,132
Transport magasin-domicile	10 km	0,231	2,31
Bilan transport teeshirt 1			2,44
Cargo teeshirt 2	1 t·km	0,013	0,013
Camion teeshirt 2	0,6 t·km	0,267	0,160
Transport magasin-domicile	10 km	0,231	2,31
Bilan transport teeshirt 2			2,48

4. Déterminer la fraction d'utilisation de l'énergie imputable au lavage du teeshirt. Les données sont les suivantes :

- la quantité moyenne de linge par cycle de lavage est de 4 kg.
- un cycle dure 1 h 30 et la puissance de la machine à laver est de 3 kW.

Réponse : L'énergie par cycle est de : $0,15/4 \times 3 \times 1,5 = 0,168$ kWh

5. Déterminer l'énergie totale nécessaire au lavage du teeshirt sur sa durée de vie.

Réponse : L'énergie par teeshirt est : $12 \times 2 \times 0,168 = 4,03$ kWh

6. Déterminez l'empreinte carbone liée à l'usage de la machine à laver sur la durée de vie du teeshirt.

Réponse : Le facteur d'émission de l'énergie électrique est 0,052 kgCO₂é/kWh. Donc l'empreinte carbone du lavage du teeshirt est de 0,21 kgCO₂é.

Nous allons maintenant nous intéresser à la fraction du bilan carbone de la machine à laver imputable au teeshirt. Vous considérerez que la durée de vie de la machine à laver est de 10 ans, à raison d'un cycle de lavage par semaine (et d'une masse moyenne de 4 kg/cycle).

7. Déterminez la masse totale de linge lavée par la machine sur sa durée de vie. En déduire la fraction de la « machine à laver » imputable au teeshirt.

Réponse : Masse totale de linge lavée par la machine sur sa durée de vie : $4 \text{ kg/semaine} \times 52 \text{ semaines} \times 10 \text{ ans} = 2080 \text{ kg}$.
Le teeshirt est porté une fois par mois pendant 2 ans, ce qui fait : $12 \times 2 = 24$ lavages. Il pèse 150 g, cela fait donc : $0,15 \times 24 = 3,6 \text{ kg} \cdot \text{lavages}$.

La fraction du teeshirt dans la vie de la machine à laver est donc :

$$\frac{3,6}{2080} = 0,00173$$

8. Déterminez l'empreinte carbone de la « machine à laver » imputable au teeshirt.

Réponse : Le FE de la machine à laver est 305 kgCO₂é, la fraction imputable au teeshirt est donc : $305 \times 0,00173 = 0,53 \text{ kgCO}_2\text{é}$

L'impact de l'usage de l'eau associé au lavage du teeshirt. La quantité d'eau utilisée par cycle de lavage est de 60 L.

9. Déterminez la fraction d'eau dédiée au lavage du teeshirt et en déduisez-en l'impact carbone.

Réponse : La fraction du teeshirt dans un cycle est $0,15 / 4 = 0,0375$.

La quantité d'eau imputable au teeshirt pour un lavage est donc : $0,0375 \times 60 = 2,25 \text{ L}$.

Dans sa vie, le teeshirt subit 24 lavages, il consomme donc : $24 \times 2,25 = 54 \text{ L d'eau}$.

Le FE de l'eau est 0,132 kgCO₂é/m³, l'empreinte carbone associée au lavage du teeshirt est donc : $0,132 \times 0,054 = 0,0071 \text{ kgCO}_2\text{é}$.

Impact de l'usage de la lessive associé au lavage du teeshirt : la quantité de lessive utilisée par cycle de lavage est de 40 mL.

10. Déterminez la fraction de lessive dédiée au lavage du teeshirt et en déduisez-en l'impact carbone.

Réponse : La quantité de lessive utilisée pour laver le teeshirt sur sa vie est :

$$0,04 \times \frac{0,15}{4} \times 24 = 0,036 \text{ L}$$

Le FE de la lessive est 0,838 kgCO₂é/L, ce qui fait une empreinte carbone de : $0,036 \times 0,838 = 0,3 \text{ kgCO}_2\text{é}$.

Fraction d'utilisation de l'énergie imputable au repassage du teeshirt : la durée d'utilisation du fer à repasser de 1 kW est de 6 min.

11. Déterminez l'énergie liée à l'usage du fer à repasser.

Réponse : Le teeshirt est repassé 24 fois dans sa vie (après chaque lavage). L'énergie correspondante est donc :

$$\frac{6}{60} \times 1 \times 24 = 2,4 \text{ kWh}$$

12. Déterminez l'empreinte carbone liée à l'usage du fer à repasser sachant que sa durée de vie est de 1200 h.

Réponse : Le FE du fer à repasser est de 21 kgCO₂é.

Le teeshirt utilise une fraction du fer à repasser égale à :

$$\frac{\frac{6}{60} \times 24}{1200} = 0,002$$

Ce qui fait une empreinte carbone de : $0,002 \times 21 = 0,042$ kgCO₂é.

Ce à quoi il faut ajouter l'empreinte carbone de la consommation électrique : $2,4 \times 0,052 = 0,125$ kgCO₂é.

Soit, au total : $0,042 + 0,125 = 0,167$ kgCO₂é.

13. Déterminez l'empreinte carbone liée à la fin de vie du teeshirt et des emballages.

Réponse : Le FE de l'incinération du teeshirt 1 et de son emballage est de 2,4 kgCO₂é/kg. La masse du teeshirt est 150 g, celle de l'emballage est de 15 g, soit 161 g. L'empreinte carbone correspondante est donc : $0,161 \times 2,4 = 0,39$ kgCO₂é.

Le FE du compostage du teeshirt 2 et de son emballage est de 0,009 kgCO₂é/kg. La masse du teeshirt 2 est de 150 g, celle de son emballage est de 50 g, soit 200 g. L'empreinte carbone correspondante est donc : $0,2 \times 0,009 = 0,0018$ kgCO₂é.

14. Faites la synthèse de l'empreinte carbone et commentez. Voyez-vous d'autres impacts à considérer?

Réponse :

	teeshirt 1 (kgCO ₂ é)	teeshirt 2 (kgCO ₂ é)
Fabrication	5,54	5,245
Transport	2,44	2,48
Énergie lavages	0,21	0,21
Machine à laver	0,52	0,52
Eau	0,0071	0,0071
Lessive	0,3	0,3
Repassage	0,167	0,167
Fin de vie	0,39	0,0018
Total	9,57	8,93

L'empreinte carbone est très proche entre les deux teeshirts.

15. Exprimez l'empreinte carbone du teeshirt 1 en fonction du nombre N de fois qu'il a été porté.

Réponse : L'empreinte carbone ne dépendant pas du nombre de fois où le teeshirt est porté est : $5,54 + 2,44 + 0,39 = 8,37$ kgCO₂é.

L'empreinte carbone qui correspond à 24 portages est : $0,21 + 0,52 + 0,0071 + 0,3 + 0,167 = 1,2$ kgCO₂é.

On a donc :

$$EC(N) = 8,37 + 1,2 \times \frac{N}{24}$$

16. Rapportez l'empreinte carbone à l'unité fonctionnelle (UF) : « porter un teeshirt une fois » et commentez l'effet sur EC(/UF).

Réponse :

$$EC(/UF) = \frac{EC(N)}{N} = \frac{8,37}{N} + \frac{1,2}{24}$$

17. Proposez des leviers pour améliorer le bilan carbone du produit de sa production à sa fin de vie.

Réponse : Prolonger la durée de vie du teeshirt par exemple en le réparant = augmenter N.
Aller le chercher à pieds, à vélo ou en transport en commun.

Teeshirt fabriqué en France (impact initial de la fabrication) avec des matières premières (lin ou chanvre).

Exercice 5.9 – Empreinte carbone d'un VAE

(Source : C. Coillot)

L'exercice porte sur l'empreinte carbone d'un VAE (Vélo à Assistance Électrique) et vise à identifier les leviers pour réduire cette empreinte¹⁶. L'unité fonctionnelle considérée sera : « Je parcours 1 km en VAE ». Il s'agira donc de calculer un facteur d'émission (FE) en kgCO₂é pour 1 km (équivalent au FE en kgCO₂é/km)

La fabrication du VAE requière :

- 1 cadre aluminium (12 kg)
- 1 moteur électrique (3 kg — prix = 80 euros)
- 1 batterie lithium-ion (2 kg -- Capacité 0,4 kWh)

Les facteurs d'émission (FE) utiles sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous :

Processus	Aluminium	Équipements électriques (moteur)	Batterie Li-ion
FE	7,8 kgCO ₂ É/kg	700 kgCO ₂ É/k€	100 kgCO ₂ é/kWh

Processus	Fin de vie aluminium (impacts)	Fin de vie équipements électriques (impacts)
FE	0,52 kgCO ₂ é/kg	0,5 kgCO ₂ é/kg

Processus	Transport par cargo	Transport par camion	Électricité (mix Asie)	Électricité (mix français 2022)
FE	0,0191 kgCO ₂ é/(t.km)	0,24 kgCO ₂ é/(t.km)	0,76 kgCO ₂ é/kWh	0,052 kgCO ₂ é/kWh

Empreinte matière et fabrication

En utilisant les facteurs d'émission adéquats vous déterminerez les empreintes carbone des différents éléments (en kgCO₂é) :

1. Empreinte carbone du cadre (EC_{cadre}).

16. Sources : <https://www.sami.eco/blog/bilan-carbone-velo-electrique> et base empreinte ADEME

Réponse : $EC_{\text{cadre}} = 12 \text{ kg} \times 7,8 \text{ kgCO}_2\text{é/kg} = 93,6 \text{ kgCO}_2\text{é}$

2. Empreinte carbone du moteur : (EC_{moteur}).

Réponse : $EC_{\text{moteur}} = 0,08 \text{ k€} \times 700 \text{ kgCO}_2\text{é/k€} = 56 \text{ kgCO}_2\text{é}$

3. Empreinte carbone de la batterie Li-ion : (EC_{batterie}).

Réponse : $EC_{\text{batterie}} = 12 \text{ kg} \times 7,8 \text{ kgCO}_2\text{é/kg} = 93,6 \text{ kgCO}_2\text{é}$

4. L'énergie nécessaire à la fabrication du VAE est de 50 kWh (hypothèse : fabrication en Asie). En déduire l'empreinte carbone énergie : ($EC_{\text{énergie}}$).

Réponse : $EC_{\text{énergie}} = 50 \text{ kWh} \times 0,76 \text{ kgCO}_2\text{é/kWh} = 38 \text{ kgCO}_2\text{é}$

Transport

Les matériaux nécessaires à la fabrication du vélo ont été transportés sur une distance totale de 4000 km (3000 km par cargo et 1000 km par routier)

5. Calculez la masse totale du VAE (m_{VAE})

Réponse : $m_{\text{VAE}} = 17 \text{ kg}$

6. En déduire les flux des transports par bateau-cargo et camion (en t.km) puis l'empreinte carbone totale du transport ($EC_{\text{transport}}$).

Réponse : $EC_{\text{transport}} = 0,017 \times (3000 \times 0,0191 + 1000 \times 0,135) = 3,26 \text{ kgCO}_2\text{é}$

Usage du VAE

La distance totale parcourue par le VAE sur sa durée de vie est supposée être de 15 000 km. L'énergie totale consommée pour la recharge de la batterie est de 60 kWh (énergie mix France).

7. En déduire l'empreinte carbone liée à l'usage (EC_{usage}).

Réponse : $EC_{\text{usage}} = 60 \text{ kWh} \times 0,052 \text{ kgCO}_2\text{é/kWh} = 3,12 \text{ kgCO}_2\text{é}$

Fin de vie du VAE

8. Déterminez l'empreinte carbone de fin de vie (EC_{FdV}).

Réponse : $EC_{\text{FdV}} = 12 \times 0,52 + 3 \times 0,5 + 2 \times 0,5 = 8,74 \text{ kgCO}_2\text{é}$

Empreinte carbone & facteur d'émission du VAE

Déduire des questions précédentes :

9. L'empreinte carbone du VAE (en kgCO₂é) (EC_{VAE}).

$$\text{Réponse : } EC_{VAE} = EC_{\text{matière}} + EC_{\text{énergie}} + EC_{\text{transport}} + EC_{\text{usage}} + EC_{FdV} = 242 \text{ kgCO}_2\text{é}$$

10. Le facteur d'émission (FE_{VAE}).

$$\text{Réponse : } FE_{VAE} = EC_{VAE} / 15000 \text{ km} = 16 \text{ gCO}_2\text{é/km}$$

Leviers d'écoconception

On considère maintenant un taux de recyclage à 90 % de l'aluminium du cadre et des matériaux du moteur.

11. Justifiez que les émissions évitées sont alors de -134 kgCO₂é.

Réponse : L'empreinte fin de vie de la matière recyclée est la résultante de l'impact du recyclage et du pourcentage de matière récupérée (x) dont l'empreinte carbone vient se substituer à la matière neuve, d'où : $EC_{\text{Matière-Recyclée}} = -0,9 \times EC_{\text{cadre}} - 0,9 \times EC_{\text{moteur}} = -134 \text{ kgCO}_2\text{é}$. On parle d'émissions évitées.

12. Que deviennent l'empreinte carbone et le facteur d'émission du VAE dans le cas de matériaux recyclés? ($EC_{VAE+\text{recyclage}}$ et $FE_{VAE+\text{recyclage}}$)

$$\text{Réponse : } EC_{VAE+\text{recyclage}} = EC_{VAE} - 134 = 108 \text{ kgCO}_2\text{é} \text{ et } FE_{VAE+\text{recyclage}} = EC_{VAE+\text{recyclage}} / 15000 \text{ km} = 7 \text{ gCO}_2\text{é/km}$$

13. Quels sont les autres leviers d'écoconception?

Réponse : Recyclage de la batterie Lithium-ion + fabrication en France (impact sur le transport et l'énergie pour la fabrication). Prolonger la durée de vie du VAE via la réparabilité (garantie, disponibilité des pièces de rechange, avantage économique).

14. Quels sont les verrous à la mise en œuvre des leviers d'écoconception et les moyens de les dépasser?

Réponse : Le coût de la fabrication en France qui pourrait être contourné grâce à une taxe carbone aux frontières. Le verrou pour le recyclage est économique et industriel : pour que la matière recyclée soit utilisée il faut un écosystème industriel incluant les usines de fabrication et le recyclage pour fermer la boucle au plus près. Il faut aussi un avantage économique à l'achat de la matière recyclée (incitations économiques)

Exercice 5.10 – Empreinte carbone & facteur d'émission d'un panneau photovoltaïque

(Source : C. Coillot)

L'exercice porte sur le bilan carbone d'un panneau photovoltaïque et des moyens de réduire son empreinte carbone (Fthenakis & Kim 2011).

Hypothèses et données

L'unité fonctionnelle sera rapportée à : « *production de 1 kWh* », ce qui est donc équivalent à calculer un facteur d'émission en kgCO₂é/kWh. Le panneau photovoltaïque (PV) étudié est de surface 1 m². Il est constitué de :

- un châssis en aluminium (4,5 kg)
- une plaque en verre (12 kg)
- deux encapsulants (résine polymère – 1,5 kg/feuille)
- cellules silicium (1,5 kg)
- une membrane Tedlar (2 kg)
- un boîtier de raccordement (15 €– 0,5 kg)

Performances d'un panneau PV :

- le panneau est installé dans le sud de la France, l'énergie liée à l'ensoleillement à cette latitude (47 °) est : 1800 kWh/m²/an
- l'efficacité de conversion des cellules PV est de 20 %
- la durée de vie du panneau PV est de 30 ans (hypothèse sans baisse de rendement)

Système fabriqué & assemblé en Asie – transport vers la France :

- Transport par ferry cargo sur 6000 km
- Transport routier sur une distance de 2000 km.
- Distance artisan-particulier par camion utilitaire = 30 km (2 aller-retours pour l'installation et 1 aller-retour pour le démontage en fin de vie) – Transport de 5 PV.

Les facteurs d'émission (FE) utiles sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous :

Processus	Aluminium (neuf)	Verre (neuf)	Encapsulant	Silicium	Tedlar
FE	7,8 kgCO ₂ é/kg	3,5 kgCO ₂ é/kg	5,5 kgCO ₂ é/kg	5 kgCO ₂ é/kg	5,5 kgCO ₂ é/kg

Processus	Boîtier de raccordement	Électricité (mix Asie)	Électricité (mix français 2022)	Ratio monétaire Équipements électroniques
FE		0,76 kgCO ₂ é/kWh	0,052 kgCO ₂ é/kWh	700 kgCO ₂ é/k€

Processus	Transport par cargo	Transport par camion	Camion utilitaire	Machine Outil
FE	0,0191 kgCO ₂ é/(t·km)	0,24 kgCO ₂ é/(t·km)	0,4 kgCO ₂ é/km	5000 kgCO ₂ é

Processus	Fin de Vie DEEE (impacts)	Fin de Vie DEEE (émissions évitées)	Fin de Vie Verre (impacts)	Fin de Vie Verre (recyclage)
FE	2 kgCO ₂ é/kg	-1,54 kgCO ₂ é/kg	0,3 kgCO ₂ é/kg	-3.5 kgCO ₂ é/kg

Processus	Fin de vie Aluminium (impacts)	Fin de vie Aluminium (recyclage émissions évitées)
FE	0,5 kgCO ₂ é/kg	-7,8 kgCO ₂ é/kg

1. Certains facteurs d'émission ne sont pas disponibles dans la base empreinte. Quand c'est le cas, il faut trouver un moyen de l'estimer. Dans l'exercice proposé, c'est le cas du boîtier de raccordement. Ainsi, vous estimerez son empreinte carbone ($EC_{\text{boîtier}}$) en utilisant le facteur d'émission des ratios monétaires adéquat.

$$\text{Réponse : } EC_{\text{boîtier}} = 0,015 \text{ k€} \times 700 \text{ kgCO}_2\text{é/k€} = 10,5 \text{ kgCO}_2\text{é}$$

Production d'énergie du PV

En utilisant les facteurs d'émission adéquats vous déterminerez les empreintes carbone des différents éléments (en $\text{kgCO}_2\text{é}$) :

2. Calculez l'énergie électrique annuelle convertie par le PV ($E_{PV/an}$ en kWh/an/m^2).

$$\text{Réponse : } E_{PV/an} = 1800 \times 0,2 = 360 \text{ kWh/an/m}^2$$

3. L'énergie nécessaire à la fabrication d'un PV de 1 m^2 est de 400 kWh. En déduire la durée du remboursement de l'énergie nécessaire à la fabrication du PV (dit EPBT).

$$\text{Réponse : } EPBT = 400/360 = 1,1 \text{ an}$$

4. Calculez l'énergie convertie par le PV (hypothèse : surface 1 m^2) sur sa durée de vie (E_{PV}).

$$\text{Réponse : } E_{PV} = 10800 \text{ kWh}$$

Empreinte carbone matière de la fabrication du PV

5. Complétez le tableau ci-dessous pour obtenir l'empreinte matière :

Processus	flux	FE	empreinte carbone ($\text{kgCO}_2\text{é}$)
Plaque aluminium			
Verre 1			
Encapsulant polymère (x2)			
Cellule silicium			
Membrane Tedlar			
Boîtier de raccordement			
Bilan matière			

Réponse :

Processus	flux	FE	empreinte carbone ($\text{kgCO}_2\text{é}$)
Plaque aluminium	4,5 kg	7,8 $\text{kgCO}_2\text{é/kg}$	35,1 $\text{kgCO}_2\text{é}$
Verre	12 kg	3,5 $\text{kgCO}_2\text{é/kg}$	42 $\text{kgCO}_2\text{é}$
Encapsulant polymère (x2)	3 kg	5,5 $\text{kgCO}_2\text{é/kg}$	16,5 $\text{kgCO}_2\text{é}$
Cellule silicium	1,5 kg	5 $\text{kgCO}_2\text{é/kg}$	7,5 $\text{kgCO}_2\text{é}$
Membrane Tedlar	2 kg	5,5 $\text{kgCO}_2\text{é/kg}$	11 $\text{kgCO}_2\text{é}$
Boîtier de raccordement	1 boîtier	10,5 $\text{kgCO}_2\text{é}$	10,5 $\text{kgCO}_2\text{é}$
Bilan matière			122,6 $\text{kgCO}_2\text{é}$

Empreinte carbone liée à la fabrication du système (usinage & assemblage)

On considère que la consommation moyenne des machines outil est de 5kW et que le temps d'utilisation machine-outil par PV est de 80 heures par système (hypothèse : fabrication en Asie). Vous reporterez les valeurs dans le tableau fabrication.

6. Déduisez-en l'empreinte carbone énergie.

Réponse : $E = 5 \text{ kW} / \text{times } 80 \text{ h} = 400 \text{ kWh}$ d'où $EC_E = 400 \times 0,76 = 304 \text{ kgCO}_2\text{é}$

7. La « durée de vie » moyenne des machines-outils est de 10 h 00 / jour, 200 jours / an, pendant 20 ans. En déduire la fraction de l'empreinte carbone de la machine outil imputable au PV (à reporter dans le tableau ci-dessous).

Réponse : Fraction utilisation = $80 / (10 \times 200 \times 20) = 0,002$

Processus	flux	FE	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
Énergie			
Machine-outil			
Bilan fabrication			

Réponse :

Processus	flux	FE	empreinte carbone
Énergie	400 kWh	0,76 kgCO ₂ é/kWh	304 kgCO ₂ é
Machine-outil	0,002	5000	10 kgCO ₂ é
Bilan fabrication			314 kgCO ₂ é

Empreinte carbone de la logistique de distribution/transport

8. Vous déterminerez les flux de transport de marchandise puis vous complèterez le tableau ci-dessous pour obtenir l'empreinte matière :

Processus	flux	FE	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
Transport par bateau			
Transport par camion			
Transport artisan			
Bilan transport			

Réponse : $Masse_{PV} = 23 \text{ kg}$.

$Flux_{bateau} = Masse \times Distance = 23 \text{ kg} \times 6000 \text{ km (bateau)} = 138 \text{ t}\cdot\text{km}$

$Flux_{camion} = Masse \times Distance = 23 \text{ kg} \times 2000 \text{ km (camion)} = 46 \text{ t}\cdot\text{km}$

Transport artisan : 3 aller-retour soit 180 km pour 5 PVs soit $180/5=36 \text{ km}$.

Processus	flux	FE	empreinte carbone
Transport par bateau	138 t·km	0,0191 kgCO ₂ é/(t·km)	2,64 kgCO ₂ é
Transport par camion	46 t·km	0,24 kgCO ₂ é/(t·km)	11 kgCO ₂ é
Transport artisan	30 km	0,4 kgCO ₂ é/km	12 kgCO ₂ é
Bilan transport			25,64 kgCO₂é

Empreinte carbone de la fin de vie

9. Déterminer l'empreinte carbone de la fin de vie du PV. Vous considérerez le bilan entre l'impact des déchets et les émissions évitées selon les hypothèses de recyclage (hypothèse : 100 % recyclage de DEEE – Déchet d'Équipement Électrique et Électronique – et 0 % pour l'aluminium et le verre). Seuls les DEEE, l'aluminium et le verre seront considérés. Vous complèterez le tableau ci-dessous.

Processus	flux	FE	empreinte carbone (kgCO ₂ é)
Déchets électroniques (DEEE)			
Fin de vie verre			
Fin de vie aluminium			
Bilan fin de vie			

Réponse : $FE_{DEE} = FE_{DEEE-\text{impacts}} - FE_{DEEE-\text{émissions-évitées}} = 0,46 \text{ kgCO}_2\text{é/kg}$.

Processus	flux	FE	empreinte carbone
Déchets électroniques (DEEE)	0,5 kg	0,46 kgCO ₂ é/kg	0,23 kgCO ₂ é
Fin de vie verre	4,5 kg	0,3 kgCO ₂ é/kg	3,6 kgCO ₂ é
Fin de vie aluminium	12 kg	0,5 kgCO ₂ é/kg	2,25 kgCO ₂ é
Bilan fin de vie			6,08 kgCO₂é

10. Dédurre des questions précédentes l'empreinte carbone du PV sur son cycle de vie puis son facteur d'émission (FE_{PV} en kgCO₂é/kWh).

Réponse : $EC_{PV} = 122,6 + 314 + 25,7 + 60,8 = 463 \text{ kgCO}_2\text{é}$

$FE_{PV} = 463 / 10800 = 0,043 \text{ kgCO}_2\text{é/kWh}$

11. Le panneau photovoltaïque est vendu au prix unitaire de 350 €. Estimez son empreinte carbone obtenue au moyen d'un FE de ratio monétaire et comparez à l'empreinte carbone que vous avez obtenue à la question précédente.

Réponse : $0,35 \text{ k€} \times 700 = 245 \text{ kgCO}_2\text{é}$

Leviers d'écoconception

12. Calculez l'impact de la fin de vie en considérant des matériaux recyclés. Vous complèterez le tableau fin de vie combinant les impacts et les émissions évitées.

Processus	flux	FE (impacts)	FE (émissions évitées)	empreinte carbone
Déchets électro-niques (DEEE)				
Fin de vie verre				
Fin de vie aluminium				
Bilan fin de vie				

Réponse :

Processus	flux	FE (impacts)	FE (émissions évitées)	empreinte carbone
Déchets électro-niques (DEEE)	0,5 kg	2 kgCO ₂ é/kg	-1,54 kgCO ₂ é/kg	0,23 kgCO ₂ é
Fin de vie verre	4,5 kg	0,3 kgCO ₂ é/kg	-3.5 kgCO ₂ é/kg	-38.2 kgCO ₂ é
Fin de vie aluminium	12 kg	0,5 kgCO ₂ é/kg	-7,8 kgCO ₂ é/kg	-32,8 kgCO ₂ é
Bilan fin de vie				-71 kgCO₂é

13. Calculez le facteur d'émission du PV en remplaçant le verre et l'aluminium par des matériaux recyclés ($EC_{PV+\text{recyclage}}$) puis son facteur d'émission ($FE_{PV+\text{recyclage}}$ en kgCO₂é/kWh).

Réponse : $EC_{PV+\text{recyclage}} = 122,6 + 314 + 25,7 - 71 = 391 \text{ kgCO}_2\text{é}$ et $FE_{PV+\text{recyclage}} = EC_{PV+\text{recyclage}} / 10800 \text{ kWh} = 0,039 \text{ kgCO}_2\text{é/kWh}$

14. Calculez le facteur d'émission du PV dans l'hypothèse d'une fabrication en France du PV (hypothèse : matériaux neufs) ($EC_{PV+\text{MadeInFrance}}$) puis son facteur d'émission ($FE_{PV+\text{MadeInFrance}+\text{recyclage}}$ en kgCO₂é/kWh).

Réponse : L'empreinte carbone de la fabrication (usage électricité France) devient $400 \text{ kWh} \times 0,052 = 20,8 \text{ kgCO}_2\text{é}$.

On peut aussi retrancher l'empreinte carbone du transport par bateau, même si elle est très faible.

$$EC_{PV+MadeInFrance} = 122,6 + 30,8 + 23 \sim 177 \text{ kgCO}_2\text{é} \text{ et } FE_{PV+MadeInFrance} = 177 \text{ kgCO}_2\text{é} / 10800 \text{ kWh} = 0,017 \text{ kgCO}_2\text{é/kWh}$$

15. Calculez le FE du PV en combinant le « made in France » et l'usage de matériaux recyclés ($EC_{PV+MIF+\text{recyclage}}$) puis son facteur d'émission (en $\text{kgCO}_2\text{é/kWh}$).

Réponse : $EC_{PV+MIF+\text{recyclage}} = EC_{PV} = 122,6 + 30,8 + 23 - 71 \sim 108 \text{ kgCO}_2\text{é}$ et $FE_{PV+MIF+\text{recyclage}} = 108 \text{ kgCO}_2\text{é} / 10800 \text{ kWh} = 0,01 \text{ kgCO}_2\text{é/kWh}$

16. Quels freins (individuels et collectifs) empêchent la mise en œuvre des solutions? Commentez, discutez.

Réponse : Le coût de la fabrication en France qui pourrait être contourné grâce à une taxe carbone aux frontières. Le verrou pour le recyclage est économique et industriel : pour que la matière recyclée soit utilisée il faut un écosystème industriel de proximité incluant les usines de fabrication et le recyclage pour fermer la boucle au plus près. Il faut aussi un avantage économique à l'achat de la matière recyclée (incitations économiques)

17. Quel serait l'effet de ces PVs sur le mix énergétique?

Réponse : Les PVs fabriqués en France à partir de matériaux recyclés feraient baisser plus efficacement le facteur d'émission du mix énergétique français (ce qui n'est pas le cas des PVs fabriqués en Asie) et cela bénéficierait à tous les usages de l'électricité.

Exercice 5.11 – Accélérateur de particules — *Nouveau!*

Source : G. Blanc

Le laboratoire de physique IJCLab (Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie) à Orsay dispose d'un accélérateur de particules de type électrostatique (Van de Graaff). Pour éviter les étincelles entre les électrodes, la cuve de l'accélérateur (qui a un volume de 380 m^3) est remplie d'hexafluorure de soufre (SF_6) à une pression de 8,5 bars et à température ambiante.

1. Quelle est la masse de gaz SF_6 présente dans la cuve de l'accélérateur?

Réponse : En faisant l'hypothèse que ce gaz se comporte comme un gaz parfait, on a :

$$PV = nRT$$

où P est la pression, V le volume, n le nombre de moles, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est la constante des gaz parfaits et T la température.

Avec $m = n \cdot M$, on a :

$$m = M \cdot \frac{PV}{RT}$$

La masse molaire du SF_6 est : $M = 32 + 6 \times 19 = 146 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Donc :

$$m = 146 \cdot 10^{-3} \times \frac{8,5 \cdot 10^5 \times 380}{8,3 \times 293} = 19\,400 \text{ kg}$$

2. Quel est le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) du SF₆ ?

Réponse : Il est de 23 900. C'est le gaz synthétisé par l'humanité qui a le plus gros PRG.

3. Lors des maintenances de l'accélérateur, une pompe permet de stocker le gaz dans des réservoirs sous pression. Mais cette pompe ne peut pas récupérer tout le gaz : environ 100 kg sont ainsi rejetés chaque année dans l'atmosphère. Quelle est la masse équivalente de dioxyde de carbone ?

Réponse :

$$100 \times 23900 = 2390000 \text{ kgCO}_2\text{éq}$$

4. Le bilan Gaz à Effet de Serre du laboratoire est en tout de 11 000 tCO₂éq. Quelle fraction les rejets de SF₆ représentent-ils ?

Réponse :

$$\frac{2390}{11000} = 22 \%$$

5. Si l'ensemble du gaz dans cet accélérateur était rejeté dans l'atmosphère, quel serait l'équivalent en CO₂ ? Et en « laboratoire IJCLab » ?

Réponse :

$$19 \times 23900 = 454100 \text{ tCO}_2\text{éq}$$

Soit l'équivalent de :

$$\frac{454100}{11000} = 41 \text{ labos}$$

Chapitre 6

La physique des transports

6.1 La voiture thermique

Exercice 6.1 – « 110 max » sur autoroute?

Source : G. Blanc

On cherche à quantifier la proposition de la Convention Citoyenne sur le Climat d'abaisser la limitation de la vitesse sur autoroute de 130 km/h à 110 km/h.

Pour cela, on considère une voiture thermique citadine, de type Renault Clio (SCe 65 Evolution), qui roule sur une route horizontale à une vitesse $v = 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. On trouvera les données sur cette voiture en annexe C, section C.1.

1. Quelles sont les forces qui s'appliquent sur la voiture? Dessinez-les sur un schéma, nommez-les, et donnez leur expression. Vous pourrez vous aider de l'annexe A.

Réponse : Cinq forces :

- Le poids, vertical, vers le bas ;
- La réaction de la route, verticale, vers le haut ;
- La force motrice dirigée vers l'avant : F_M ; on ne connaît pas son expression ;
- La force de frottement fluide (de l'air sur la carrosserie) vers l'arrière :

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x$$

- La force de résistance au roulement vers l'arrière :

$$F_R = C_{rr} \cdot m \cdot g$$

2. Quelle est l'expression littérale et la valeur numérique de l'énergie motrice par unité de distance parcourue E_M/L que doit fournir le moteur de la voiture?

Réponse :

D'après le théorème de l'énergie cinétique, on a :

$$\Delta E_c = \Sigma W_F$$

Où W_F est le travail de la force F sur la distance L . Or, la vitesse étant constante, $\Delta E_c = 0$.

Et :

$$\Sigma W_F = W_M - W_T - W_R = E_M - F_T \cdot L - F_R \cdot L = 0$$

Le poids et la réaction de la route, perpendiculaire au mouvement de la voiture, ne travaillent pas. D'où :

$$\frac{E_M}{L} = F_T + F_R = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x + C_{rr} \cdot m \cdot g$$

Numériquement, cela donne :

$$\frac{E_M}{L} = 0,5 \times 1,29 \times \left(\frac{100}{3,6}\right)^2 \times 0,64 + 0,01 \times 1044 \times 9,8 = 318,5 + 102,3 = 420,8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$$

3. Quelle est la valeur numérique de l'énergie motrice E_M^{100} que doit fournir le moteur pour que la voiture parcoure une distance $L = 100 \text{ km}$.

Réponse :

$$E_M^{100} = \left[F_T + F_R = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x + C_{rr} \cdot m \cdot g \right] \cdot L$$

Soit :

$$E_M^{100} = 420,8 \times 100 \cdot 10^3 = 4,2 \text{ GJ}$$

4. Exprimez l'énergie motrice E_M en fonction du volume V_E d'essence consommé.

Réponse :

$$E_M = V_E \times E_{th} \times \eta = V_E \times PCI_{SP95} \times \rho_{SP95} \times \eta$$

où $E_{th} = PCI_{SP95} \times \rho_{SP95}$ et η est le rendement du moteur, car toute l'énergie chimique, puis thermique contenue dans l'essence n'est pas transformée en énergie mécanique. Seulement 30 %.

5. En déduire l'expression et la valeur numérique du volume d'essence nécessaire pour parcourir $L = 100 \text{ km}$ à la vitesse constante $v = 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Réponse : On a donc :

$$V_E \times E_{th} \times \eta = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x \cdot L + C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot L$$

Soit :

$$V_E = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x \cdot L + C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot L}{PCI_E \cdot \rho_E \cdot \eta}$$

L'application numérique donne :

$$V_E = \frac{0,5 \times 1,29 \times \left(\frac{100}{3,6}\right)^2 \times 0,64 \times 100 \cdot 10^3 + 0,01 \times 1044 \times 9,8 \times 100 \cdot 10^3}{39,5 \cdot 10^6 \times 0,754 \times 0,3}$$

soit :

$$V_E = \frac{31,8 \cdot 10^6 + 10,2 \cdot 10^6}{8,9 \cdot 10^6} = 4,7 \text{ L}$$

6. Sachant que le constructeur annonce une consommation de 5,3 à 5,4 L pour 100 km, que concluez-vous quant à votre résultat ?

Réponse : Bah, c'est pas mal, on est à 11 % d'écart.

7. Quelle est la consommation d'essence V_E^{130} en roulant à 130 km/h? Et V_E^{110} en roulant à 110 km/h? Quel est le gain relatif d'essence? D'énergie? Quelle est l'écart relatif de durée?

Réponse :

$$V_E^{130} = \frac{0,5 \times 1,29 \times \left(\frac{130}{3,6}\right)^2 \times 0,64 \times 100 \cdot 10^3 + 0,01 \times 1044 \times 9,8 \times 100 \cdot 10^3}{39,5 \cdot 10^6 \times 0,754 \times 0,3}$$

$$V_E^{130} = \frac{53,8 \cdot 10^6 + 10,2 \cdot 10^6}{8,9 \cdot 10^6} = 7,2 \text{ L}$$

$$V_E^{110} = \frac{0,5 \times 1,29 \times \left(\frac{110}{3,6}\right)^2 \times 0,64 \times 100 \cdot 10^3 + 0,01 \times 1044 \times 9,8 \times 100 \cdot 10^3}{39,5 \cdot 10^6 \times 0,754 \times 0,3}$$

$$V_E^{110} = \frac{38,5 \cdot 10^6 + 10,2 \cdot 10^6}{8,9 \cdot 10^6} = 5,5 \text{ L}$$

Le gain relatif d'essence est :

$$\frac{7,2 - 5,5}{7,2} = 23,6\%$$

Le gain relatif d'énergie est le même.

La durée est donnée par : $D = v \times L$ donc

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta v}{v}$$

Soit :

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{20}{130} = 15\%$$

On perd 15 % du temps pour gagner 24 % d'énergie, de consommation (ou d'argent).

8. Que penser de la proposition de la Convention Citoyenne pour le Climat qui consistait à baisser la limitation de la vitesse sur autoroute à 110 km/h?

Réponse : Ça aurait permis une économie facile de rejet de gaz à effet de serre, pour une contrainte pas très importante. Avec d'autres co-bénéfices, comme une baisse de la mortalité routière.

Voir : <https://110max.wordpress.com/>

6.2 La voiture électrique

Exercice 6.2 – Combien de kilomètres?

Source : G. Blanc

On considère les deux voitures thermiques et électriques, Clio et Zoé. On trouvera les données relatives à ces voitures en annexe C.

1. Quelle est la quantité d'énergie (thermique) E_{th} obtenue par la combustion d'un litre d'essence (en J et en Wh) ?

Réponse : On considère le PCI car la vapeur d'eau issue de la combustion part dans les gaz d'échappement.

On a donc :

$$E_{th} = PCI_E \times \rho_E = 39,5 \times 0,754 = 29,8 \text{ MJ} \cdot \text{L}^{-1}$$

où PCI_E est le pouvoir calorifique inférieur de l'essence et ρ_E est la masse volumique de l'essence.

Ou encore 8,2 kWh.

2. Combien d'énergie thermique (en J) contient le réservoir de la Clio ?

Réponse : Comme 1 L d'essence contient 29,8 MJ, 42 L contiennent 1,25 GJ.

3. Combien d'énergie est perdue sous forme de chaleur dans le moteur ? Donc combien d'énergie mécanique permet effectivement de rouler ?

Réponse : 70 % de l'énergie issue de l'essence est perdue, soit 0,875 GJ. 30 % de l'énergie chimique est transformée en énergie mécanique, soit 0,375 GJ.

4. Quelle capacité (en kWh) une batterie de voiture électrique devrait avoir pour bénéficier de la même capacité en énergie mécanique ?

Réponse :

Comme le moteur électrique a un rendement de 100 %, il s'agit de convertir 375 MJ en Wh, soit $375 \cdot 10^6 / 3600 = 104 \text{ kWh}$. La batterie de la Zoé a une capacité deux fois moindre.

5. La Zoé nécessite quelle énergie mécanique par unité de distance ? Comparez avec la voiture thermique Clio de classe similaire. Qu'en concluez-vous sur la distance maximale parcourue par les deux véhicules ?

Réponse : Compte tenu de la réponse à la question 2 de l'exercice 6.1, à savoir :

$$\frac{E_M}{L} = F_T + F_R = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x + C_{rr} \cdot m \cdot g$$

Numériquement, pour la Zoé, cela donne :

$$\frac{E_M}{L} = 0,5 \times 1,29 \times \left(\frac{100}{3,6}\right)^2 \times 0,75 + 0,01 \times 1502 \times 9,8 = 373,2 + 147,2 = 520,4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$$

À comparer avec :

$$318,5 + 102,3 = 420,8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$$

pour la Clio. Donc une trainée et une résistance au roulement (à cause d'un poids plus élevé pour la Zoé) significativement plus élevées, ce qui donne une énergie mécanique

par unité de distance de 24 % supérieure pour la voiture électrique. À énergie mécanique égale, la Clio pourra parcourir une distance 24 % plus élevée.

Avec 42 L dans le réservoir et 4,7 L pour 100 km, la Clio peut parcourir $42 / 4,7 \times 100 = 893$ km.

Avec 52 kWh, soit 187,2 MJ, la Zoé peut parcourir $187,2 \cdot 10^6 / 520,4 = 359,7$ km.

6. Quelle est la densité massique d'énergie mécanique pour la voiture thermique et pour la voiture électrique ?

Réponse : Pour la Clio, l'énergie mécanique totale contenue dans le réservoir est de 375 MJ, pour une masse d'essence de $42 \times 0,754 = 31,7$ kg, soit une densité de $375 \cdot 10^6 / 31,7 = 11,8$ MJ/kg.

Pour la Zoé, 187,2 MJ sont contenus dans 230 kg, soit 0,81 MJ/kg.

Exercice 6.3 – ACV

Source : G. Blanc

Cet exercice se base sur le document « Analyse du cycle de vie comparative Nouvelle Zoé & Clio V », Groupe Renault, 2021 ¹.

1. Qu'est-ce que l'ACV ? En quoi cela consiste-t-il ?

Réponse : Wikipédia : « L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation normalisée (ISO 14040 et 14044) permettant de réaliser un bilan environnemental multicritère et multi-étape d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie.

Son but est de connaître et pouvoir comparer les impacts environnementaux d'un système tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...), en passant par ses phases d'usage, d'entretien et de transport.

L'ACV permet ainsi :

- de quantifier les contributions aux impacts environnementaux d'un système (par étape de cycle de vie ou par sous-système : composants, matériaux utilisés, procédés) afin d'en dégager des pistes d'écoconception ou d'amélioration du bilan environnemental du système ;
- de comparer du point de vue environnemental deux systèmes ayant la même fonction, à quantité de service rendu égale (voir la notion d'unité fonctionnelle).

L'ACV est :

- une procédure, c'est-à-dire une suite d'étapes standardisées ;
- un modèle mathématique de transformations permettant de faire correspondre des flux à leurs impacts environnementaux. »

2. À quoi sert une ACV ? Quelles sont ses paramètres importants pour y parvenir ?

1. Disponible en ligne ici : <https://www.autoactu.com/documents/telecharger/analyse-du-cycle-vie-comparative-renault-zoe-et-clio-v>

Réponse : L'ACV permet de comparer les impacts écologiques de plusieurs produits manufacturés. Pour cela, il faut des paramètres équivalents entre les produits comparés. On définit l'unité fonctionnelle, qui est la quantité d'utilisation du produit. Cela peut être une distance parcourue pour une voiture ou bien un nombre de trous pour une perceuse ou une durée portée pour un vêtement. Ensuite, il faut définir précisément le périmètre de l'étude, à savoir ce que l'on prend en compte dedans.

3. Quel est l'avantage de l'ACV sur l'empreinte carbone?

Réponse : L'empreinte carbone ou bilan de gaz à effet de serre ne tient compte que des rejets de gaz à effet de serre. L'ACV permet de quantifier une gamme plus vaste d'empreintes environnementales et sanitaires.

4. Quelle est l'unité fonctionnelle considérée dans cette étude comparative? Quelle est le périmètre? Quelles sont les impacts écologiques considérés? Au regard de ce que vous connaissez sur les limites planétaires, en manque-t-il?

Réponse : L'unité fonctionnelle utilisée dans cette étude comparative est : « Transporter des personnes sur 150 000 kilomètres, pendant 10 ans, en respectant les normes en vigueur ».

Le périmètre est : construction, usage et fin de vie.

Les impacts écologiques considérés sont :

- Réchauffement climatique (empreinte carbone)
- Épuisement des ressources fossiles
- Épuisement des ressources minérales
- Eutrophisation (phosphate)
- Acidification (SO₂)
- Création d'ozone photochimique

Il manque l'empreinte eau, l'impact sur la biodiversité, les pollutions diverses (« entités nouvelles »), l'impact sur l'usage des sols (bétonisation) et la production d'aérosols.

5. Quelles sont, selon vous, les limites d'une telle étude?

Réponse : Le périmètre n'est pas hyper clair notamment sur la fin de vie des composants. Les calculs et la méthodologie exacts ne sont pas accessibles = faire confiance aux résultats obtenus. C'est une étude de l'entreprise elle-même, est-elle biaisée? Certains impacts ne sont pas pris en compte : consommation d'eau, atteinte à la biodiversité, etc.

Exercice 6.4 – Plein d'énergie

Source : G. Blanc

On cherche à déterminer le débit d'énergie que l'on peut mettre dans les deux modèles de voiture thermiques et électriques, Clio et Zoé. Les données relatives à ces voitures sont disponibles en annexe C.

1. D'après vous quel est le débit (en L/s) typique d'une pompe à essence dans une station service?

Réponse : Je dirais entre 0,5 et 1 L/s.

2. Combien de temps faut-il pour remplir le réservoir de la Clio ?

Réponse : Sachant qu'il a un volume de 42 L, il faut entre 42 et 84 s pour le remplir.

3. Quel est le débit d'énergie correspondant ?

Réponse : Comme 1 L d'essence contient 29,8 MJ, le débit d'énergie est entre 14,9 et 29,8 MJ/s

4. Avec une borne de recharge de 50 kW, quel est l'intensité du courant nécessaire pour recharger la Zoé ?

Réponse : Comme la tension aux bornes de la batterie est : $U = 400 \text{ V}$, avec : $I_{\text{él}} = P/U$, cela donne : $I_{\text{él}} = 50 \cdot 10^3 / 400 = 125 \text{ A}$.

5. Combien de temps cela prend-il pour « faire le plein », c'est-à-dire pour recharger la batterie complètement ?

Réponse : Comme la quantité d'énergie que peut contenir la batterie est de 52 kWh, il faut : $52/50 = 1,04 \text{ h}$, soit $1,04 \times 3600 / 84 = 44,6$ fois plus de temps pour un plein d'essence.

6. À cause de l'effet Joule, quelle sera la température dans le fil de cuivre si celui-ci a un rayon de 1 cm ?

Réponse : D'après l'équation B.1, on a :

$$\Delta T = \frac{1}{2\pi^2 l} \cdot \frac{\frac{e}{\kappa} + \left(1 - \frac{e}{r_f}\right) \cdot \frac{1}{h + 4\epsilon\sigma T_0^3}}{\sigma_{\text{él}} r_f^3} \cdot I_{\text{él}}^2$$

soit :

$$\Delta T = \frac{1}{2\pi^2 \times 1} \cdot \frac{\frac{10^{-3}}{0,15} + (1 - 0,1) \cdot \frac{1}{10 + 4 \times 0,95 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times 293^3}}{5,7 \cdot 10^7 \times (10^{-2})^3} \times 125^2$$

soit :

$$\Delta T = 0,0507 \times \frac{6,67 \cdot 10^{-3} + 0,9 \times \frac{1}{15,42}}{5,7 \cdot 10^1} \times 15625 = 0,0507 \times 1,04 \cdot 10^{-3} \times 15625 = 0,9 \text{ °C}$$

7. Si on suppose que la gaine fond à 100 °C, en deçà de quel rayon du fil cela se produit-il ?

Réponse : À l'aide de l'équation B.2, on a :

$$r_f = \left[\frac{1}{2\pi^2 l} \cdot \frac{\frac{e}{\kappa} + \left(1 - \frac{e}{r_f}\right) \cdot \frac{1}{h + 4\epsilon\sigma T_0^3}}{\sigma_{\text{él}}(T_f - T_0)} \cdot I_{\text{él}}^2 \right]^{1/3}$$

avec $T_f - T_0 = 80^\circ\text{C}$. Soit :

$$r_f = \left[5,07 \cdot 10^{-2} \times \frac{\frac{10^{-3}}{0,15} + 0,9 \times \frac{1}{10 + 4 \times 0,95 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times 293^3}}{5,7 \cdot 10^7 \times 80} \cdot 125^2 \right]^{1/3}$$

$$r_f = \left[5,07 \cdot 10^{-2} \times \frac{6,5 \cdot 10^{-2}}{4,56 \cdot 10^9} \cdot 125^2 \right]^{1/3} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,24 \text{ mm}$$

8. Quel serait le rayon minimum du fil de cuivre pour que la température de la gaine ne dépasse pas celle de l'air de $0,1^\circ\text{C}$?

Réponse : En reprenant le calcul précédent :

$$r_f = \left[5,07 \cdot 10^{-2} \times \frac{\frac{10^{-3}}{0,15} + 0,9 \times \frac{1}{10 + 4 \times 0,95 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times 293^3}}{5,7 \cdot 10^7 \times 0,1} \cdot 125^2 \right]^{1/3}$$

$$r_f = \left[5,07 \cdot 10^{-2} \times \frac{6,5 \cdot 10^{-2}}{5,7 \cdot 10^6} \cdot 125^2 \right]^{1/3} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 2,1 \text{ cm}$$

Soit un « fil » de 4,2 cm de diamètre!

9. Discutez de la difficulté de faire le plein d'une voiture électrique aussi rapidement que pour une voiture thermique.

Réponse : On voit qu'il y a une limite physique (l'effet Joule) à la taille du « tuyau » acheminant l'électricité pour recharger la batterie. Un tel fil ne peut pas être très gros pour des raisons de maniabilité.

Ces limites peuvent être en partie contournées en augmentant la tension, ce qui diminue l'intensité du courant pour une même puissance, avec des matériaux conducteurs de haute conductivité. Idéalement, il faudrait un matériau supraconducteur, dans lequel il n'y a pas d'effet Joule, mais il y a d'autres limites physiques.

Exercice 6.5 – Un weekend de vacances

Source : G. Blanc

Lors d'un grand weekend de départ en vacances, comme celui du 14 juillet, on peut compter jusqu'à 10000 véhicules par heure sur certaines autoroutes (en moyenne sur l'année, c'est environ 30000 véhicules par jour sur les autoroutes). Si besoin, des données relatives aux modèles de voitures étudiés sont disponibles en annexe C.

Supposons que tous ces véhicules soient des voitures thermiques style Clio et qu'il faut 3 min pour faire le plein d'une voiture.

Réponse : 40 201 stations et 118 009 points de recharge (situation au 01/01/2024); source : <https://www.bison-fute.gouv.fr/recharge-electrique.html>.

Exercice inspiré d'une conférence sur les batteries : Tarascon 2023.

1. Combien faut-il de pompes à essence pour absorber le flux de voitures?

Réponse : Il y a 10000 voitures par heure, il faut 3 min pour faire un plein, donc il faut 333 pompes pour faire tous les pleins.

2. Cela représente combien de stations services sachant qu'il y a environ 30 pompes par station service sur les autoroutes?

Réponse : Il faut 11 stations services pour faire le plein de l'ensemble des voitures.

3. Comme il y a environ une station service tous les 50 km, au bout de quelle distance l'ensemble du flux de voiture aura pu faire le plein? Comparez avec l'autonomie de la Clio.

Réponse : Cela fait 550 km. La Clio a 900 km d'autonomie, cela représente donc 60 % de son autonomie.

Supposons maintenant que le flux des 10000 véhicules par heure soient des voitures électriques de type Zoé, et qu'il faut environ 1 h pour faire le plein de la batterie.

4. Combien faut-il de bornes de recharge pour absorber le flux de voitures?

Réponse : Il y a 10000 voitures par heure, il faut 1 h pour faire le plein, il faut donc 10000 bornes.

5. Si on considère que l'autonomie de la Clio est environ de 400 km, on peut donc échelonner les recharges sur la moitié de cette autonomie, soit 200 km. Combien faudrait-il de bornes de recharge par station service?

Réponse : Avec une station service tous les 50 km, cela fait 5 stations sur 200 km (avec les extrémités de l'intervalle!). Comme il faut 10000 bornes, cela fait 2000 bornes par station.

6. Quelle est la puissance électrique nécessaire par station? Cela représente combien de réacteurs nucléaires? Combien d'éoliennes (sachant qu'en moyenne une éolienne a une puissance installée de 2 MW et que le facteur de charge est environ de 24 %)? Quelle surface de panneaux photovoltaïques (sachant que la puissance électrique délivrée est d'environ $22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ rendement inclu)?

Réponse : Une borne ayant une puissance de 50 kW, cela fait 100 MW par station. Soit un réacteur nucléaire (1 GW) tous les 500 km environ.

Ou bien $100 / (2 \times 0,24) = 208$ éoliennes.

Ou encore $100 \cdot 10^6 / 22 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 4,5 \text{ km}^2$.

7. Est-ce réaliste? Qu'en concluez-vous sur les départs en vacances des prochaines décennies?

Réponse : La physique montre qu'il n'est pas réaliste de poursuivre une organisation de la société où une grande partie de la population se retrouve simultanément sur la route, avec des véhicules électriques. Cela signifie qu'il faudra réorganiser cela, en échelonnant les départs sur plusieurs jours, en étalant les vacances, en développant les modes de transports alternatifs (comme le train), en favorisant les vacances à proximité (et à vélo, par exemple).

8. Sachant qu'il y a 369 stations services² en France en 2023, en supposant que chaque station est équipé du nombre de bornes obtenu à la question 5, en supposant en outre que chaque borne est équipé d'un « fil » tel que calculé à l'exercice 6.4 à la question 8, quel est le volume total de cuivre nécessaire?

Réponse : On considère un cylindre de cuivre de $l = 1$ m de long et de $r_f = 2,1$ cm de rayon, ce qui fait un volume de $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ pour une borne.

Il y a 2000 bornes par station et 369 stations, soit 738000 bornes (au passage, il y a en 2024, 295000 bornes³).

Cela nécessite donc : $738000 \times 1,4 \cdot 10^{-3} = 1033 \text{ m}^3$ de cuivre.

9. Sachant que la masse volumique du cuivre est de $9000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, à quelle masse ce volume correspond-il?

Réponse : Cela fait : $1033 \times 9000 = 9,3 \cdot 10^6 \text{ kg} = 9300 \text{ t}$.

10. Sachant que les réserves mondiales de cuivre estimées en 2020⁴ sont de 870 millions de tonnes, quelle fraction de cette quantité les stations de recharge françaises représentent-elles?

Réponse : Cela fait : $9300/870000000 = 1,1 \cdot 10^{-5}$.

On peut s'amuser ainsi encore longtemps, mais si tous les pays font pareil, qui sait si ça passe?

11. Quelles sont les limites, selon vous, de ces estimations?

Réponse : Il y a des technologies plus malignes pour éviter de trop gros fils de cuivre, le nombre de bornes estimé est grossier (mais néanmoins à peine deux fois plus élevé que le nombre de bornes disponibles en 2024).

La finitude des ressources diverses (cuivre, mais pas seulement, en gros tout ce qui n'est pas « renouvelable ») est une réalité que l'humanité ferait bien mieux d'utiliser avec parcimonie.

6.3 Le vélo

2. https://www.autoroutes.fr/FCKeditor/UserFiles/File/ASFA_ChiffresCles_2023.pdf

4. <https://copperalliance.org/fr/sustainable-copper/about-copper/cu-demand-long-term-availability/>

Exercice 6.6 – Le col d'Izoard

Source : G. Blanc

Le col d'Izoard est un col routier culminant à 2363 m d'altitude qui se trouve dans les Alpes, dans le département des Hautes-Alpes, entre le Queyras et le Briançonnais. Il est fermé en hiver. L'été, il fait le bonheur des cyclistes routiers, et parfois accueille le Tour de France. La figure 6.1 montre le profil d'ascension du col par tranches de 0,5 km de distance. La figure 6.2 montre la route en question sur un extrait de carte.

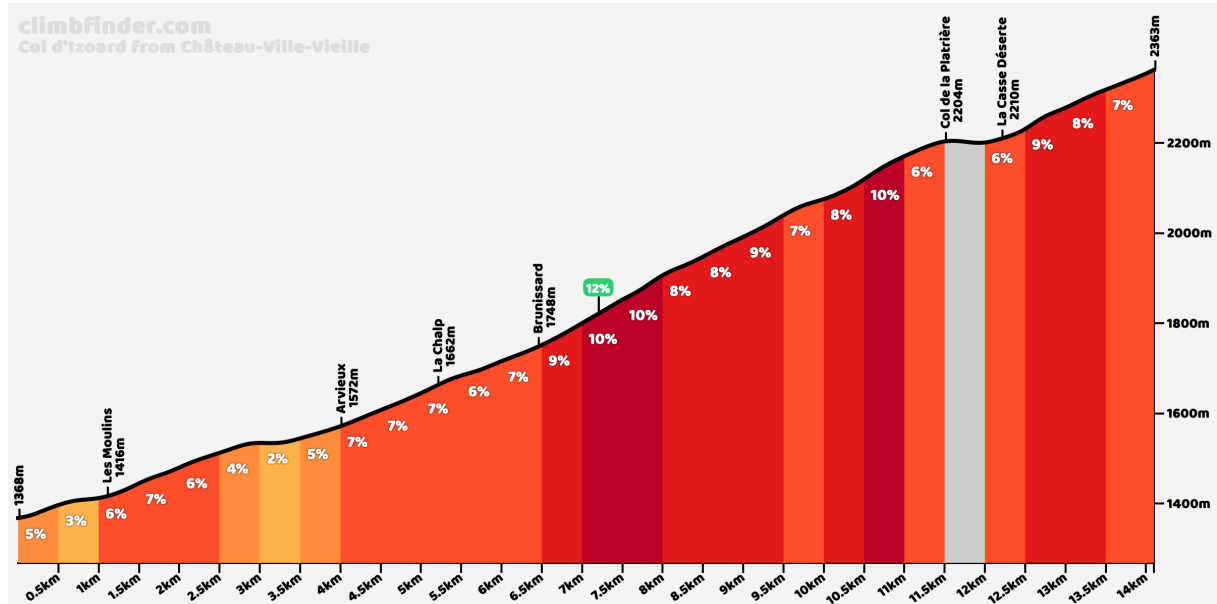


FIGURE 6.1 – Profil de la montée au col d'Izoard, côté Queyras.

1. À l'aide de la figure 6.1 estimez le pourcentage moyen de la pente entre le départ et l'arrivée au col? Quelle est l'angle moyen d'inclinaison?

Réponse : La longueur étant de 14 km, pour $2363 - 1368 = 995$ m de dénivelé, cela fait un pourcentage de $995 / 14000 = 7,1 \%$.

L'inclinaison α est donnée par :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{995}{14000}\right) = 4^\circ$$

Le record d'ascension du col d'Izoard par un cycliste du Tour de France est détenu par Warren Barguil (60 kg) en 2017. Il est de 38 min. On fait l'hypothèse que la masse totale du cycliste et du vélo est de 70 kg; que le coefficient de trainée⁵ vaut $SC_x = 0,272 \text{ m}^2$; le coefficient de roulement⁶ vaut $C_{rr} = 5 \cdot 10^{-3}$.

2. Quelle est la vitesse moyenne de Warren Barguil sur l'ascension du col d'Izoard?

5. Source : <https://www.sci-sport.com/dossiers/methodes-d-evaluation-de-l-aerodynamisme-en-cyclisme-002.php>; la valeur retenue est la moyenne des mesures de la figure 21.

6. Source : <https://www.sci-sport.com/dossiers/methodes-d-evaluation-de-l-aerodynamisme-en-cyclisme-002.php>; calculé pour une pression dans les pneus de 600 kPa d'après la formule de la figure 3.



FIGURE 6.2 – Carte IGN de la montée au col d'Izoard côté Queyras, le « départ » étant au niveau du croisement situé en bas à droite au-dessus du « Monument aux Morts ». L'échelle est 1 : 34 012. ©Géoportail

Réponse :

$$v = \frac{14000}{38 \times 60} = 6,14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 22,1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

3. Quelles sont les forces qui s'appliquent sur le système constitué du cycliste et de son vélo? Faites un schéma et donnez l'expression de ces forces. Vous pouvez vous aider de l'annexe A.

Réponse :

- Le poids $P = m \cdot \vec{g}$
- La réaction de la piste cyclable, perpendiculaire
- La force de trainée (frottements fluides) F_T (voir équation (A.1), p. 153)
- La résistance au roulement F_R (voir équation (A.2), p. 153)
- La force motrice (musculaire) interne au système F_M

4. Quel est l'énergie motrice E_M que doit fournir le cycliste pour faire cette ascension en supposant que sa vitesse est constante sur l'ensemble de la distance parcourue?

Réponse : Le poids travaille (sa composante parallèle à la trajectoire), mais la réaction de la piste, perpendiculaire au déplacement, ne travaille pas.

D'après le théorème de l'énergie cinétique, on a :

$$\Delta E_c = \Sigma W_F$$

Où W_F est le travail de la force F sur la distance L . Or, la vitesse étant constante, $\Delta E_c = 0$.
Et :

$$\Sigma W_F = W_M - W_T - W_R - W_P = E_M - F_T \cdot L - F_R \cdot L - P \cdot L \cdot \sin \alpha$$

où α est la pente. D'où :

$$\frac{E_M}{L} = F_T + F_R + P \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x + C_{rr} \cdot m \cdot g + m \cdot g \sin \alpha$$

Soit :

$$\frac{E_M}{L} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x + m \cdot g \cdot (C_{rr} + \sin \alpha) \quad (6.1)$$

Numériquement :

$$E_M = 14000 \times \left[\frac{1}{2} \times 1,29 \times 6,14^2 \times 0,272 + 70 \times 9,8 \times (5 \cdot 10^{-3} + \sin 4^\circ) \right]$$

$$E_M = 14000 \times [6,6 + 52,2] = 823 \text{ kJ}$$

5. Quelle est la puissance moyenne correspondante?

Réponse :

$$P_m = \frac{E_M}{\Delta t} = \frac{823 \cdot 10^3}{38 \times 60} = 380 \text{ W}$$

Un-e cycliste amateur-e fait cette même ascension du col d'Izoard. Elle/il met deux heures. La masse totale est la même.

6. Quelle est la puissance moyenne qu'il/elle développe?

Réponse : La vitesse moyenne est alors :

$$v = \frac{14000}{3600 \times 2} = 1,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$E_M = 14000 \times \left[\frac{1}{2} \times 1,29 \times 1,94^2 \times 0,272 + 70 \times 9,8 \times (5 \cdot 10^{-3} + \sin 4^\circ) \right]$$

$$E_M = 14000 \times [0,66 + 52,2] = 740 \text{ kJ}$$

$$P_m = \frac{E_M}{\Delta t} = \frac{740 \cdot 10^3}{3600 \times 2} = 103 \text{ W}$$

Exercice 6.7 – L'efficacité énergétique du vélo

Source : G. Blanc

Considérons un-e cycliste de 60 kg avec un vélo de 15 kg qui roule sur une piste cyclable horizontale à la vitesse typique pour se rendre à son jardin de 20 km/h.

Le coefficient ⁷ $SC_x = 0,4 \text{ m}^2$. Le coefficient ⁸ $C_{rr} = 0,008$.

1. Combien faut-il d'énergie pour parcourir une distance L ?

Réponse : D'après la réponse 6.1 à la question 4 de l'exercice 6.6, avec l'angle $\alpha = 0$, on a :

$$\frac{E_M}{L} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x + m \cdot g \cdot C_{rr}$$

La vitesse est de $20/3,6 = 5,56 \text{ m/s}$. Ce qui donne :

$$\frac{E_M}{L} = \frac{1}{2} \times 1,29 \times 5,56^2 \times 0,4 + 75 \times 9,8 \times 0,008 = 7,98 + 5,88 = 13,86 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$$

2. Sachant que l'énergie dépensée ⁹ pour marcher sur un chemin plat à une vitesse de 5 km/h est environ de 200 J/m, avec la même énergie, soit 200 J, quelle distance peut-on parcourir en vélo (à l'horizontale) ?

Réponse : Comme il faut 13,9 J pour parcourir 1 m en vélo, avec 200 J, on a de quoi faire 14,4 m. Le rayon d'action du vélo est donc 14,4 fois plus élevé !

3. Quelle est l'énergie dépensée par le/la cycliste pour redémarrer d'un arrêt ? En déduire pourquoi les cyclistes rechignent à s'arrêter aux feux rouges, et pourquoi le code de la route évolue en ajoutant un « cédez-le-passage cycliste » sur certains feux rouges ¹⁰.

Réponse : Pour passer de 0 km/h à 20 km/h = 5,56 m/s, il faut dépenser une énergie (cinétique) :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - 0$$

soit :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 0,5 \times 75 \times 5,56^2 = 1157 \text{ J}$$

Cela équivaut à un détour de $1157/13,9 = 83 \text{ m}$!

Cela explique donc pourquoi il est énergétiquement difficile de s'arrêter en permanence, notamment en ville avec les successions de feux rouges.

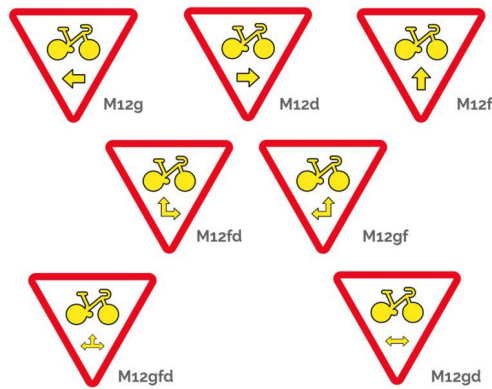
C'est pourquoi le code de la route, fait essentiellement pour les voitures, s'adapte avec la transition cyclable, en ajoutant des panneaux (figure ci-dessous) permettant aux cyclistes de passer quand même à certains feux rouges.

7. Pour un-e cycliste « traditionnel-e » bras tendus : http://sportech.online.fr/sptc_idx.php?pge=spfr_esy.html.

8. Pour une route d'asphalte en bon état : http://sportech.online.fr/sptc_idx.php?pge=spfr_esy.html.

9. Voir : https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/2004/12000/energy_expenditure_of_walking_and_running.20.aspx; la formule donnant la puissance est : $W = 1,5 \cdot m + 1,5 \cdot v^2 \cdot m$. La valeur obtenue est multipliée par le temps mis pour parcourir 1 m à 5 km/h à savoir 0,72 s.

10. Voir : <https://www.fub.fr/velo-ville/amenagements/amenagements-types/cedez-passage-cycliste-feu-rouge>



Ils permettent en effet aux cyclistes de s'engager à une intersection, sans s'arrêter au feu, s'il n'y a pas de danger. Le feu rouge devient ainsi un cédez-le-passage pour la ou les directions indiquées. Les piétons, tout comme les véhicules de la voie ayant le feu vert restent bien entendu prioritaires.

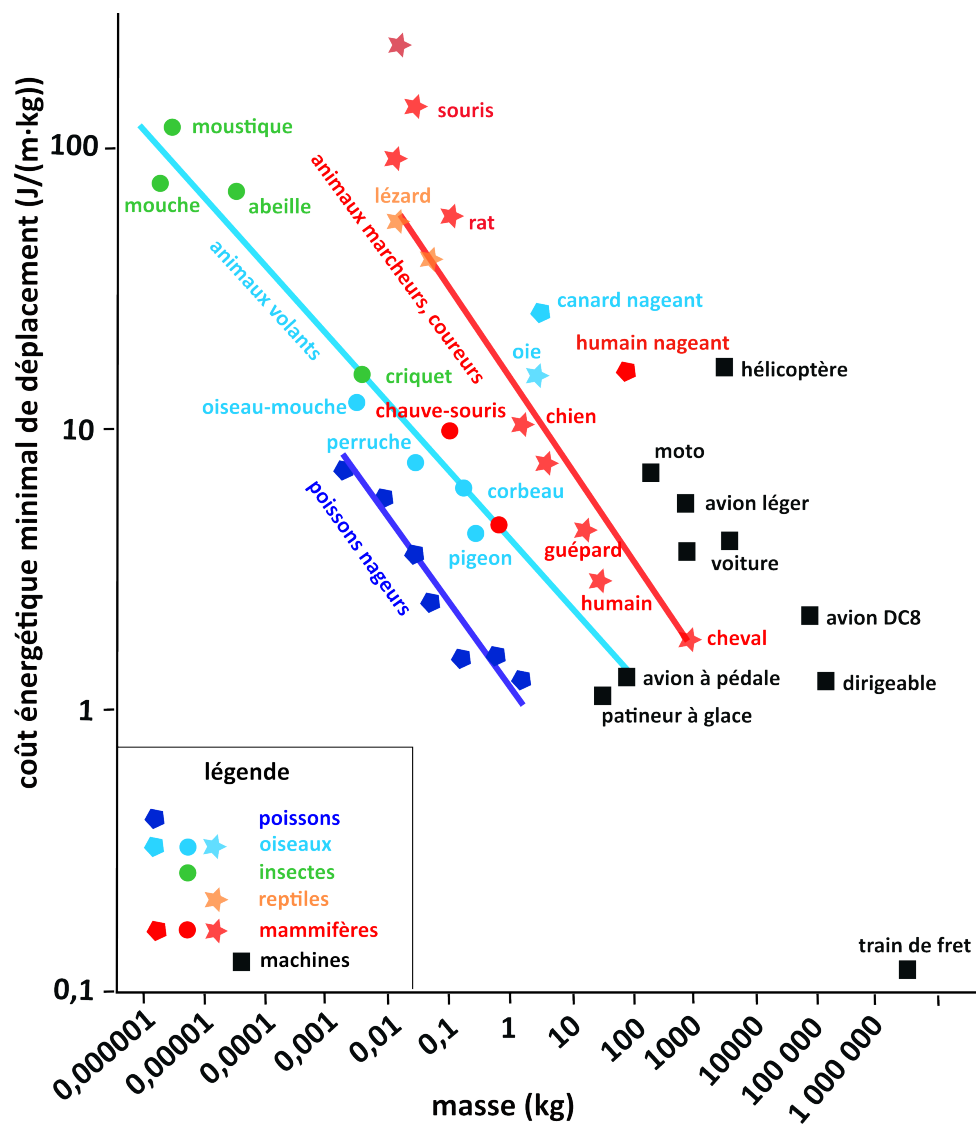
Cet ajout au code de la route n'est évidemment pas pour améliorer le confort des cyclistes en minimisant l'énergie qu'ils/elles dépensent ! Il s'agit surtout d'améliorer la sécurité des cyclistes : en leur permettant de s'insérer dans la circulation de manière décalée par rapport au flux de voitures, cela évite des accidents, notamment lors des virages de certains poids lourds.

4. Quel est le « cout énergétique minimal de déplacement » du vélo, c'est-à-dire l'énergie qu'il faut pour déplacer une masse « utile » (c'est-à-dire sans compter la masse du vélo lui-même) donnée sur une distance donnée ?

Réponse : Nous avons vu qu'il fallait 13,9 J pour déplacer 75 kg sur 1 m. La charge utile déplacée ici est la masse du/de la cycliste, à savoir 60 kg.

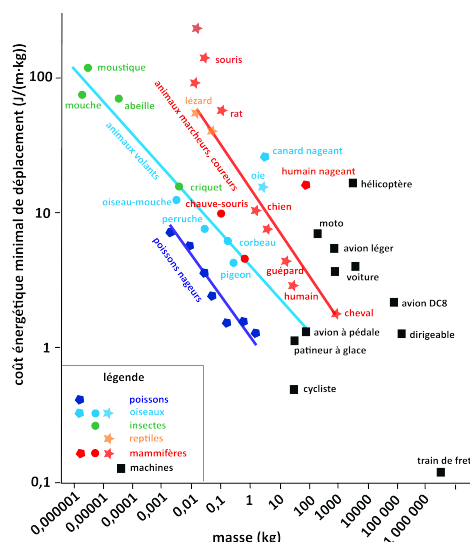
Il faut donc $13,9/60 = 0,23$ J pour déplacer 1 kg de cycliste sur 1 m.

5. Placez le vélo sur le diagramme ci-dessous, où des scientifiques (Tucker 1975) ont fait des mesures pour différents animaux et différents outils de déplacement construits par les humains.



Qu'en concluez-vous?

Réponse :



On en conclut que le vélo c'est top!

Au passage, on a la valeur pour le piéton, soit 200 J/m, ce qui donne $200/60 = 3,33$ J pour déplacer 1 kg de piéton sur 1 m.

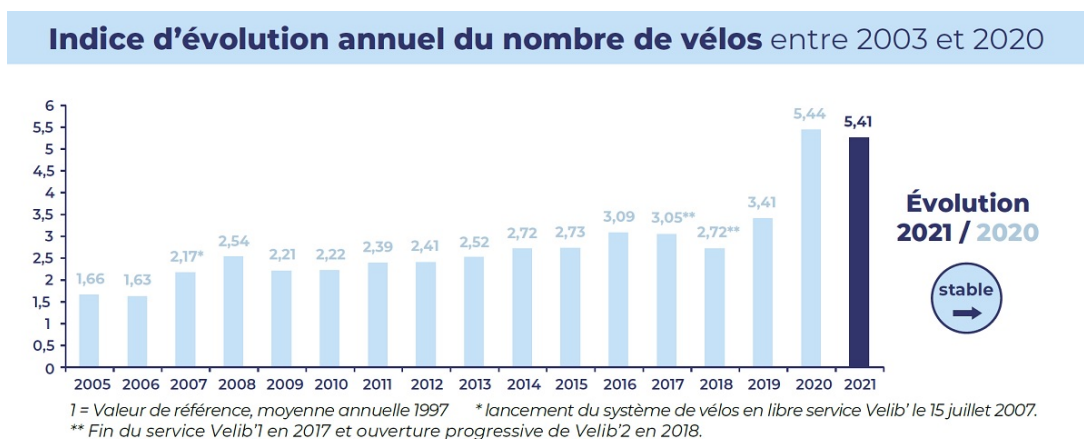
6. Pourquoi, selon vous, en est-il ainsi?

Réponse : C'est grâce aux roues que la bicyclette est efficace d'un point de vue énergétique. Grâce à leur inertie mise à profit dans le pédalage. Sur une piste horizontale, le/la cycliste doit seulement compenser les frottements. Contrairement au piéton, qui, s'il/elle arrête de marcher... s'arrête, le/la cycliste continue d'avancer! De même, le/la cycliste doit dépenser un (petit) surplus d'énergie (potentielle) pour monter son vélo en haut d'une pente, mais il/elle bénéficie à la descente, contrairement au/à la marcheur-se.

Exercice 6.8 – Une transition écologique locale?

Source : G. Blanc

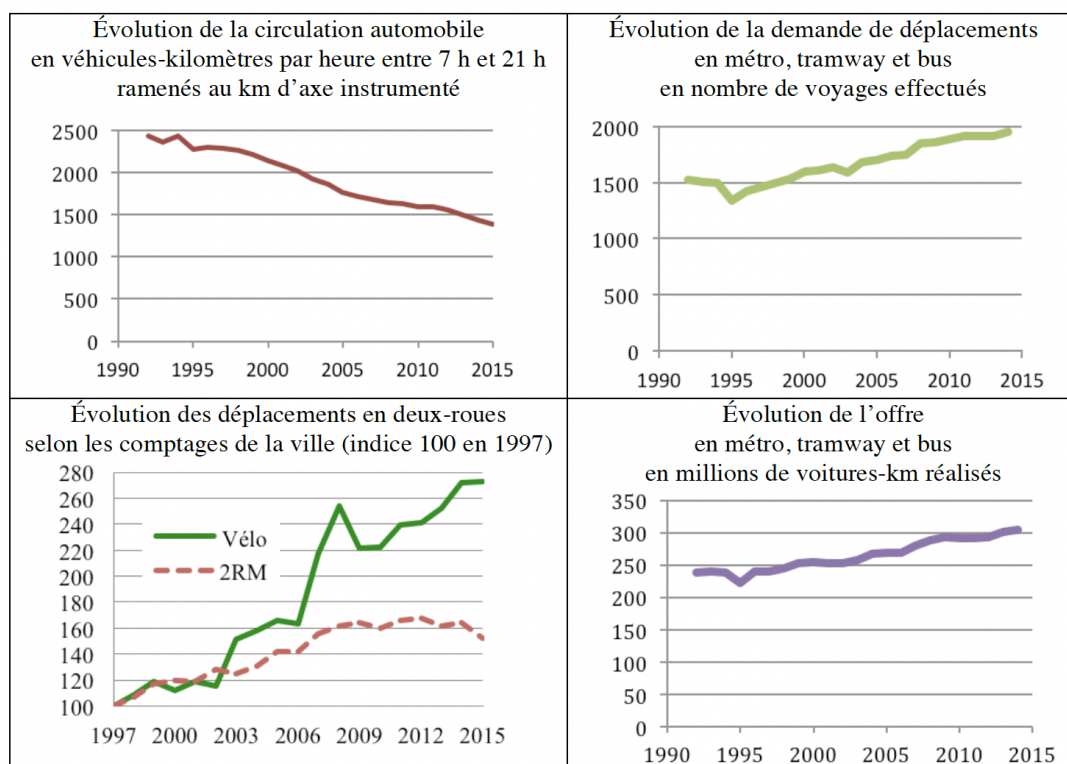
La figure suivante montre l'indice d'évolution annuel du nombre de vélos entre 2003 et 2020 à Paris¹¹ :



11. Elle est tirée du site : <https://www.paris.fr/pages/bilan-des-deplacements-a-paris-en-2021-21167>.

La figure suivante est tirée de Heran 2017 :

Figure 2. Évolution des déplacements à Paris *intra muros* selon les modes



Source : les *Bilans des déplacements à Paris* et Omnil, 2012a.

1. Commentez ces graphiques. Qu'y voyez-vous?

Réponse : La part modale de la voiture diminue à partir des années 1990 à Paris au profit du vélo et des transports en commun. Le vélo a connu un boom avec le covid en 2020/2021.

2. Peut-on parler de « transition écologique » à propos de ce report de mode de déplacement de la voiture vers le vélo et les transports en commun à Paris? Quels bénéfices peut-on s'attendre à en tirer?

Réponse : Il y a une augmentation des trajets à vélo d'un facteur 2,8 entre 1997 et 2015 et encore d'un facteur 2 entre 2015 et 2021, soit un facteur 5,6 en 24 ans. Entre *sim* 1990 et 2015, les déplacements en voiture ont chuté d'un facteur ~ 2, dans le même temps (1990-2015) les déplacements en transport en commun augmentent de 30 %. C'est donc vraiment le vélo qui explose!

On peut donc parler de transition écologique, dans la mesure où les déplacements à vélo sont beaucoup moins polluants (GES, particules fines, microparticules de plastiques et caoutchouc, etc.), qu'ils encombre moins l'espace commun (densité de cyclistes beaucoup plus importante par unité de surface de voirie), et qu'ils permettent aux personnes qui s'en servent de faire de l'activité physique, ce qui réduit les risques de nombreuses maladies.

Chapitre 7

Regards sur la technologie

Exercice 7.1 – Ecotopia

Source : G. Blanc

Le texte suivant est extrait du roman *Écotopia* (en édition de poche Folio SF, 2021) écrit par l'écrivain états-unien Ernest Callenbach et publié en 1975. Ce roman évoque les trois états de l'ouest américain, Californie, Oregon, Washington qui font sécession d'avec les États-Unis pour créer un nouvel état, l'Écotopia. Cet état se veut respectueux de son environnement, et tente de vivre en équilibre avec celui-ci. Vingt ans après la sécession, un journaliste américain, William Weston, est autorisé à pénétrer en Écotopia. Le roman est construit autour de son carnet de bord et des articles qu'il envoie régulièrement à son journal. Les quelques lignes ci-dessous sont extraites d'un article pour son journal, intitulé « La télévision écotopienne ».

1 Les objets qu'on trouve dans les magasins sont assez vieillots. J'ai vu peu d'appareils ména-
2 gers fabriqués en Écotopia qui ne sembleraient pas très primitifs aux téléspectateurs américains.
3 Ils seraient en effet conçus pour être réparés facilement par leur utilisateur. En tout cas, il leur
4 manque cette pureté de ligne à laquelle nous sommes habitués – certaines pièces en dépassent
5 selon des angles bizarres, les boulons et autres modes d'assemblage sont clairement visibles, par-
6 fois des éléments sont même fabriqués en bois.

7 J'ai néanmoins remarqué que les Écotopiens réparent bel et bien leurs objets personnels. En
8 fait, il n'y a pas de magasin de réparation dans les rues. Curieux corollaire, les garanties sont ici
9 inexistantes. Les gens trouvent normal que les produits manufacturés soient costauds, durables
10 et réparables – moyennant quoi ils sont aussi frustes comparés aux nôtres. Cette petite révolu-
11 tion n'a pas été facile : j'ai entendu maintes anecdotes comiques sur des objets au design ridicule
12 produits juste après l'Indépendance, les procès intentés à leurs fabricants et autres tribulations.
13 Une loi impose aujourd'hui de soumettre tous les prototypes de nouveaux objets à un jury de
14 dix citoyens ordinaires (on n'utilise pas le terme de « consommateur » dans une conversation po-
15 lie). L'autorisation de fabriquer tel ou tel produit est seulement accordée si tous les jurés peuvent
16 réparer les pannes probables avec des outils de base.

17 Le matériel vidéo et tous les équipements électroniques font exception à la règle. Ils sont obli-
18 gatoirement construits à partir de modules standardisés, lesquels doivent être disponibles en ma-
19 gasin, de même que le matériel de test, pour que les utilisateurs puissent identifier puis rempla-
20 cer les composants défectueux. L'électronique est désormais si miniaturisée qu'en cas de panne
21 il faut parfois la recycler. Les Écotopiens ont produit des appareils remarquablement miniaturi-
22 sés : ainsi, des chaînes stéréo pas plus grandes qu'une assiette, d'ingénieux dispositifs de contrôle
23 pour des systèmes de chauffage solaire et certains processus industriels, des radiotéléphones à
24 courte distance qui tiennent dans un écouteur minuscule. Toutes ces prouesses témoignent de la
25 priorité nationale accordée à la compacité, à la légèreté et aux économies d'énergie.

1. Quelles sont les similitudes (s'il y en a) et les différences entre cette description et ce que vous connaissez des « objets » dans la société actuelle?

Réponse : Similitudes : l'exception à la règle avec les objets électroniques qui ont tendance à dominer la société actuelle.

Différences : la plupart des objets consommés actuellement ne sont pas réparables ou pas facilement réparables. Les objets électroniques également (pièces de rechange difficile d'accès, peu disponibles).

2. D'après vous, ce qui est décrit dans le texte est-il souhaitable pour la société, dans le cadre des crises environnementales actuelles?

Réponse : Ce qui est décrit dans le texte permet de diminuer la consommation d'objets, en les faisant durer plus longtemps et en permettant de les réparer facilement. Cela va dans le sens des préconisations de J. Hickel pour engager une trajectoire de décroissance, en diminuant notamment l'obsolescence programmée. Dans ce cadre, ce type de fonctionnement pour les objets utilisés par la société est en adéquation avec la nécessaire diminution de la consommation de ressources. Il est donc souhaitable pour la société.

3. Pensez-vous que le système décrit succinctement dans la première partie du texte soit réaliste? Serait-ce acceptable pour les citoyens?

Réponse : Ce système est tout à fait réaliste, puisque c'est à peu près ce qui a existé au milieu du XX^e siècle! Notre société sait fabriquer des objets réparables et durables. C'est le capitalisme et la course au profit qui a petit à petit opéré un glissement vers des objets peu durables et non réparables.

Difficile de prévoir l'acceptabilité par les citoyens. Mais il faut éviter les changements trop brutaux : plutôt s'engager progressivement dans cette trajectoire.

4. Comment feriez-vous pour mettre un tel système en place dans la société?

Réponse : Pour aller vers ce type de fonctionnement, on peut agir au niveau individuel en choisissant dans nos achats des objets solides, avec des garanties longues, et, dans la mesure du possible, réparables – ils sont généralement plus chers...

Au niveau d'un État, l'action passe par la législation, interdire l'obsolescence programmée, limiter la publicité, etc.

Exercice 7.2 – Time for the Planet

Source : G. Blanc

Le texte suivant est issu du site web de l'entreprise « Time for the Planet » qui finance des innovations susceptibles de limiter le réchauffement climatique ou d'en atténuer les conséquences. Il résume une innovation qui a été financée par l'entreprise dont le nom est *Leviathan Dynamics*.

Résumé du projet

Les gaz HFC (hydrofluorocarbures) ont une durée de vie plutôt plus courte que d'autres gaz à effet de serre, cependant leur potentiel de réchauffement global (PRG à 100 ans) correspond en moyenne à 2 800 fois celui du dioxyde de carbone (CO₂)!

Essentiellement issus des industries du froid et des systèmes de climatisation, ces gaz HFC représentent 2 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales.

Leviathan Dynamics apporte la solution pour s'affranchir intégralement de ces gaz désastreux pour l'environnement, en utilisant tout simplement l'eau comme fluide réfrigérant.

La solution présente même un double avantage puisque ses performances thermodynamique (COP) offrent un gain de 30 % de consommation, réduisant ainsi les besoins en électricité associés à leur fonctionnement.

Le projet en détails

Quel est le problème résolu ?

Avec le réchauffement climatique, les besoins en froid sont grandissant. Or, les technologies actuelles utilisent des réfrigérants fluorés qui sont des gaz à effets de serre très puissants pour faire du froid. Les alternatives connues à ces réfrigérants posent d'autres problèmes environnementaux et sécuritaires et sont, de ce fait, mal acceptées. Conscient que le froid est indispensable aux activités humaines, nous avons développé une technologie qui permet de répondre à ce besoin pour l'industrie dans un premier temps et pour le confort par la suite et ce, tout en limitant l'impact du froid sur le réchauffement climatique.

Comment est-il résolu ?

Nous utilisons le plus naturel des réfrigérants, l'eau, dans un cycle à compression mécanique de vapeur innovant. Cela nous permet de proposer des machines qui n'utilisent pas de réfrigérants qui aggravent le réchauffement climatique tout en réduisant de 30 % la consommation énergétique des machines.

Qui sont les clients potentiels ?

Dans un premier temps, ce sont les industriels qui utilisent des groupes froids toute l'année. Nous nous intéressons particulièrement au secteur de la plasturgie, des industries mécaniques, du numérique et de la chimie. Dans ce type d'application, nous permettons une réduction de la consommation énergétique de 30 % sur le fonctionnement nominal et de 50 % sur une année complète.

En quoi cette solution est-elle différente ?

Les principales innovations sont : 1/ le développement d'une technologie de compresseur centrifuge haute vitesse multi-étage très compacte qui est adapté à la vapeur d'eau sous vide 2/ l'utilisation d'un cycle thermodynamique à échange direct qui permet une amélioration de l'efficacité énergétique de l'ordre de 30 %.

1. Pourquoi a-t-on besoin de produire du froid en permanence et partout ? En quoi cela est-il problématique pour le réchauffement climatique ?

Réponse :

Le froid est nécessaire pour conserver les aliments (le réfrigérateur est un élément essentiel dans une famille !). La manière la plus commune de produire du froid est d'utiliser une machine thermodynamique avec une source chaude (extérieur), une source froide (le réfrigérateur) et un moteur (généralement électrique) qui fournit de l'énergie mécanique pour compresser un gaz dit réfrigérant. Ce gaz est généralement un HFC, qui a un pouvoir réchauffant sur le climat très important (plusieurs milliers de fois le CO₂ pour une quantité identique). Le circuit contenant ce gaz est idéalement hermétique, mais en réalité ce n'est jamais le cas, il y a toujours des fuites. Ce sont ces fuites, petites à l'échelle d'un seul réfrigérateur, mais conséquentes au total, qui posent problème.

2. La technologie proposée est-elle « low-tech » ? Pourquoi ?

Réponse : Il s'agit d'une technologie high-tech car pour utiliser la vapeur d'eau comme fluide réfrigérant il faut un compresseur complexe, donc high-tech.

3. Leviathan Dynamics s'attaque au problème du réchauffement climatique : selon vous est-ce que les autres limites planétaires pourraient être affectées par cette technologie ?

Réponse :

Les appareils proposés ici devront être fabriqués avec des matériaux et des matières premières extraites du sol. La fabrication n'est pas mentionnée dans ce court extrait, mais cela consomme forcément de l'énergie et des ressources non renouvelables. Tout comme le fonctionnement qui consommera toujours de l'énergie.

Un autre écueil possible est un effet rebond : oubli d'une nécessaire sobriété dans notre consommation de froid.

4. Quelle peut-être la place de technologies comme celle présentée ici dans l'atténuation des crises écologiques ?

Réponse :

Nous aurons toujours besoin de froid, les technologies low-tech non consommatrices d'énergie (sous-sol, réfrigérateur en argile humide à évaporation, etc.) ne permettront jamais d'atteindre des températures comme celles de congélation auxquelles nous sommes habitués. De fait, ce genre de technologie est un progrès par rapport à la technologie actuelle, si elle fonctionne à grande échelle (humanité), ce sera un élément indispensable d'une transition écologique.

5. En quoi, selon vous, l'innovation (dans un sens général) peut être importante dans l'atténuation de ces crises ?

Réponse :

L'innovation est nécessaire quand elle est pensée par rapport à ses bénéfices et aux besoins auxquelles elle répond : technologie appropriée. Elle ne l'est quand elle est produite « parce qu'on sait faire » sans besoin a priori, en créant ainsi potentiellement un nouveau besoin. Une technologie comme celle présentée ici peut être une petite brique d'une immense transition de la société pour résoudre le problème des crises écologiques = vivre ensemble dans les limites planétaires.

Exercice 7.3 – Conquête spatiale... ou pas ?

Source : G. Blanc

Le texte suivant est extrait d'un court roman de science-fiction, « La vague montante », écrit par une autrice américaine, Marion Zimmer Bradley et publié en 1955.

La vague montante raconte l'histoire d'un petit équipage de vaisseau interstellaire qui, après quelques générations occupées à le réparer suite à un atterrissage non maîtrisé sur une planète de l'étoile Théta Centauri, revient vers sa planète natale, la Terre. Le récit débute à proximité de l'orbite de Mars. L'équipage s'attend à entrer dans un Système Solaire complètement colonisé par les humains, à trouver des vaisseaux spatiaux en tous sens, à capter des signaux radios partout et en permanence. Il n'en est rien. Une fois en orbite autour de la Terre, l'équipage rallie la surface à l'aide d'une navette qui se pose dans un champ. Un homme à l'apparence de paysan vient à leur rencontre nullement surpris de les voir. La désillusion est grande : le concept de nations n'existe plus, l'humanité semble vivre dans des villages, le fédéralisme et l'autogestion régissent la prise de décision collective, la science semble avoir disparu au profit d'une économie primitive fondée sur la commune et l'agriculture, et le véritable progrès est celui de l'épanouissement humain.

L'équipage du vaisseau spatial s'installe un peu malgré lui dans ce village. Un jour, l'un de ses membres tombe gravement malade. L'inquiétude est grande, car le matériel nécessaire pour le sauver ne semble pas exister. Il n'en est rien, l'équipement nécessaire est en fait disponible...

Réponse : Tiré en partie du site Babelio : <https://www.babelio.com/livres/Bradley-La-vague-montante/534093>

Les deux extraits de dialogues suivants sont entre Brian, de l'équipage du vaisseau et Frobisher du village à côté duquel la navette a atterri.

Extrait n° 1 pp. 64-65

1 – Dire qu'à présent, murmura Brian, vous auriez dû avoir complètement colonisé toutes les
2 planètes, et atteint les étoiles les plus proches!

3
4 La voix du vieil homme perdit ses inflexions aimables :

5
6 – Vous dites parfois des choses bien surprenantes, Monsieur Kearns. Vous ne dites pas « vous
7 auriez pu » coloniser les planètes – ce qui, évidemment, aurait pu se faire – mais « vous auriez dû ».
8 Et voulez-vous bien me dire pourquoi, je vous prie? Celle-ci mise à part, les planètes ne sont pas
9 exactement faites pour la vie humaine, et je n'aimerais vraiment pas avoir à vivre sur une autre
10 planète que celle-ci!

Extrait n° 1 pp. 123-124

11 – Mais quand le *Starward* a quitté la Terre, chacun possédait son hélicoptère personnel!

12
13 – Sa voiture d'enfant personnelle! répliqua Frobisher. Quand je dois aller quelque part, j'y vais
14 à pied, comme un homme! Ces barbares stupides et primitifs, entassés dans leurs villes qui res-
15 semblaient à des caves mécaniques, tapis derrière du verre et de l'acier, et n'ayant plus pour voir
16 le monde environnant que les yeux des écrans de télévision ou les fenêtres de leurs appareils aé-
17 riens! Et pour fabriquer tout ça, être entassés dans d'autres caves, avec des odeurs puantes, des
18 écrous et des boulons, ne jamais voir ce qu'on fabrique, pas de fierté ni de talent! Ce sont eux
19 qui vivaient comme des animaux! Des masses d'individus pour de la production en masse, et la
20 production de quoi? Des choses dont ils n'avaient pas besoin, pour gagner encore plus d'argent
21 et produire d'autres choses aussi inutiles! Des brontosaurus! Maintenant, nous avons quelques
22 personnes qui construisent des avions ou en conçoivent, parce qu'elles seraient malheureuses
23 si elles ne le faisaient pas. Mais ce sont des artisans. Et nous avons toujours besoin d'un certain
24 nombre d'avions, pas beaucoup, réservés à des fins qui en valent la peine. Mais nous ne forçons
25 personne à se consacrer à la production massive d'avions sous le simple prétexte que la chose est
26 possible!

Répondez aux questions suivantes en argumentant votre raisonnement. Pour la plupart des ques-
tions, il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, seule la qualité de l'argumentation compte tenu
des connaissances acquises est importante.

1. Quelles différences notoires percevez-vous entre la société décrite dans cet extrait et notre so-
ciété?

Réponse :

Dans notre société, l'abondance d'avions fabriqués crée artificiellement le besoin de les
utiliser, et d'en fabriquer toujours plus.

Dans la société décrite, un petit nombre d'avions existe pour des usages spécifiques (ur-
gences...).

Notre société est asservie à la technologie : nous ne pouvons pas vivre sans internet, par
exemple. Celle décrite ici si. Sa technologie n'est qu'un outil à disposition des humains
pour leur épanouissement, ce n'est pas une fin en soi.

2. Comment définiriez-vous la notion de technologie? Pour quel(s) objectif(s) est-elle généralement mise en œuvre? Donnez des exemples.

Réponse :

Une technologie est une application des connaissances scientifiques sur un sujet donné. Contrairement aux connaissances scientifiques qui ne sont ni « bonnes » ni « mauvaises », une technologie n'est jamais neutre.

Elle peut être mise en œuvre pour améliorer les conditions de vie humaines (engrais), pour gagner une guerre (bombe atomique)... Mais elle n'est jamais exempte de dommages collatéraux (engrais et réchauffement climatique et pollutions à l'azote).

3. Peut-on imaginer vivre dans la société d'aujourd'hui sans smartphone et sans internet? Est-ce possible, selon vous? Pensez-vous que baser l'ensemble du fonctionnement d'une société sur quelques technologies (électricité, internet...) soit judicieux?

Réponse :

Il y a des individus qui le font, mais c'est difficile : toutes les démarches administratives sont désormais dématérialisées. L'utilisation d'internet demande en outre des appareils complexes (ordinateurs) qui sont chers et susceptibles de tomber en panne (plus qu'un stylo, en tout cas!).

La résilience (c'est-à-dire la capacité de la société à absorber des chocs, des catastrophes, etc.) d'un réseau reposant sur des technologies susceptibles de tomber en panne n'est pas forcément très grande.

4. L'imaginaire de notre société nous pousse vers la conquête spatiale par l'intermédiaire de films, séries, de livres, de bandes dessinées, de récits qui mettent en valeur les astronautes sous la forme de « héros ». En quoi la vie de l'astronaute français Thomas Pesquet à bord de la station spatiale internationale serait-elle enviable? Pensez-vous que l'humanité doit poursuivre son exploration de l'espace?

Réponse : La vie des astronautes dans la station spatiale est présentée comme une aventure enviable. Mais quand on y réfléchit, la station spatiale est une boîte de conserve dans un milieu hostile (le vide spatial), où chaque problème peut devenir grave et vital (voir l'histoire de la conquête spatiale – Apollo 13 –, toute la kyrielle de films et de romans sur le sujet), on y respire de l'air en boîte, on a peu d'intimité (voir par exemple la BD « Dans la combi de Thomas Pesquet » de Marion Maigne (2017). Comme le coût d'une telle infrastructure est d'environ 27 millions de dollars par jour¹, on peut se demander légitimement si c'est justifié. On peut imaginer que le seul côté enviable est de voir la Terre de là-haut... Et d'expérimenter sur soi la microgravité...

Quant à poursuivre l'exploration de l'espace compte tenu du coût en argent et du coût environnemental que cela engendre, peut-être faudrait faire une pause le temps que la planète retrouve son souffle. Même si les satellites d'observation (de la Terre notamment) en orbite ont un intérêt scientifique indéniable. En revanche, l'utilisation commerciale de l'espace (vols touristiques pour ultra-riches, satellites de télécommunication par milliers, etc.) est plus que discutable.

5. Comment verriez-vous l'utilisation de la technologie par l'humanité dans un futur lointain?

Réponse : Une utilisation raisonnée de technologies « appropriées » pour rendre des services, dont le pour (utilité) et le contre (cout économique, environnemental et sanitaire) seraient soigneusement pesés. Des technologies comme « outils » au service de l'humanité et non comme une fin en soi.

Ce n'est pas parce qu'on sait faire quelque chose qu'il faut le fabriquer. Le marché économique ne devrait pas être le seul mode de décision pour fabriquer un objet.

6. Selon vous, l'épanouissement de l'humanité passe-t-il par la technologie? Qui sont les « barbares » dans les extraits de texte? Qui pourraient-ils être dans notre société?

Réponse : L'imaginaire de la société actuelle est un imaginaire de technologie. Les livres, les films hollywoodiens sont là pour nous le rappeler à chaque instant. Il est très difficile de s'en extraire et faire abstraction aux promesses de l'ordinateur quantique ou de l'IA. Mais le déploiement massif des technologies tel qu'il est fait aujourd'hui est une menace pour la survie de l'humanité et même pour son essence même, son « humanité », justement. Les relations sociales sont distendues par les technologies actuelles (smartphones, réseaux sociaux, etc.).

Il est probable que pour ces raisons, l'épanouissement de l'humanité dans le futur doive s'extraire de cette dépendance à la technologie, pour aller vers des relations plus humaines. Et envers les non-humains.

Les « barbares » de l'extrait sont les humains d'avant, qui étaient dépendants de la technologie. Dans notre société, ces mêmes « barbares » pourraient être les milliardaires technophiles tels Elon Musk qui, par le pouvoir que leur confère leur richesse, emmènent l'humanité vers des voies très discutables (obstruction du ciel nocturne par des satellites, téléphonie mobile accessible en tout point de la planète, espace orbital à portée de fusée, transhumanisme, etc.)

Exercice 7.4 – Résilience

Source : G. Blanc

Le diagramme suivant est un diagramme de Kiviat² qui essaye de représenter un outil technologique donné selon différents critères :

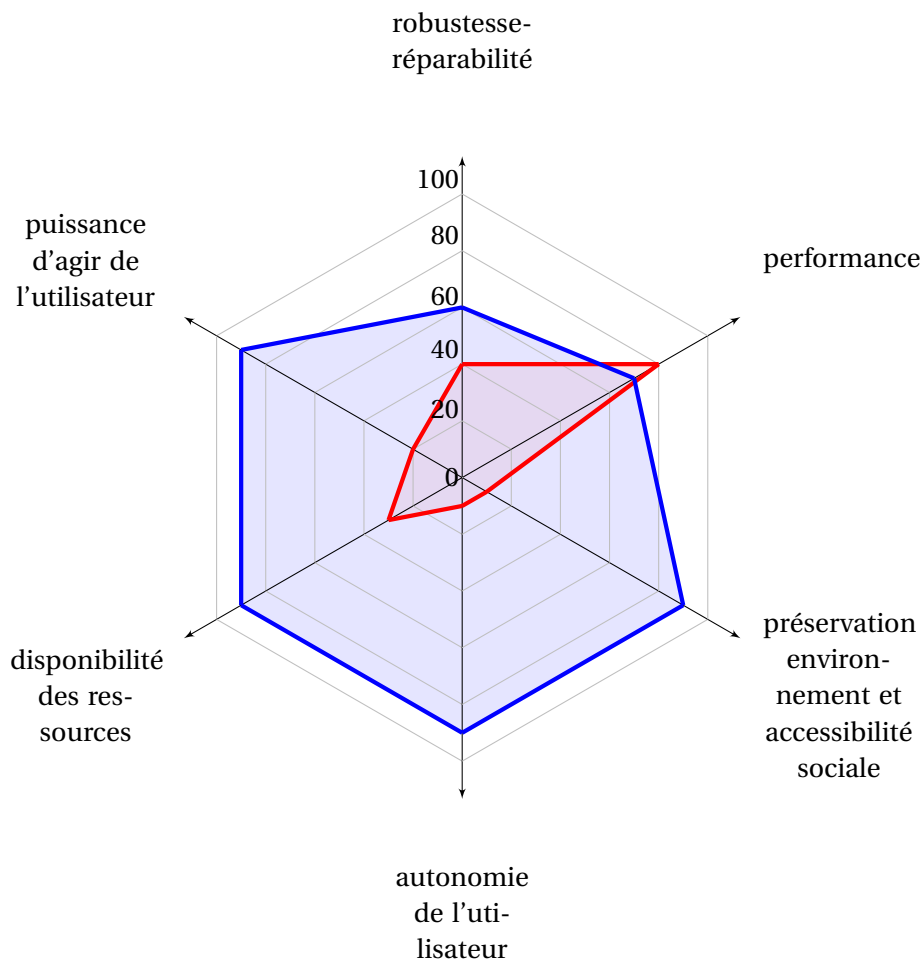
- la robustesse et la réparabilité : sa capacité à durer dans le temps, à être réparé facilement (avec peu de connaissances, des pièces défectueuses facilement disponibles, etc.) ;
- la puissance d'agir de l'utilisateur : si l'utilisateur se sent en contrôle, s'il comprend son outil ;
- la disponibilité des ressources : les ressources en matière et énergie pour construire l'outil et le déployer à grande échelle sont-elles disponibles de manière pérennes (par exemple issue de filières du recyclage) ;
- l'autonomie de l'utilisateur : l'utilisateur·ice comprend-il/elle ce que l'outil fait ?
- préservation environnement et accessibilité sociale : quelle est l'empreinte environnementale de l'outil, est-il accessible (cout, complexité, etc.) à tout le monde ?
- performance : quantification du rendement, des résultats obtenus par l'outil.

Le chercheur Romain Couillet³ évoque le concept de résilience d'un outil qu'il définit à partir de la combinaison de ces différents critères. Dans le diagramme ci-dessous, la surface colorée entre les courbes bleue et rouge permet de quantifier cette résilience. L'objet coloré en rouge a ainsi une

2. Également dénommé diagramme en radar, en étoile ou en toile d'araignée.

3. Notamment dans une conférence disponible ici : <https://polaris.imag.fr/romain.couillet/docs/videos/TalkINRAE.mp4>; le concept de résilience d'un outil est évoqué à partir de 22 min.

faible résilience, malgré un niveau de performance élevé. Au contraire, l'objet en bleu a un niveau de performance moindre, mais une résilience beaucoup plus élevée. On pourrait définir la résilience d'un outil comme sa capacité à s'adapter à des crises ou catastrophes, à surmonter une panne, un problème.



1. Selon vous, quels sont les deux outils ou technologies représentées dans le diagramme ci-dessus, en rouge et bleu ?

Réponse : Pour Romain Couillet la techno en rouge c'est l'IA, celle en bleu, c'est un outil « low-tech ».

Attention : ce genre de représentation a ses limites. La surface dépend de la proximité de tel ou tel item.

2. Choisissez deux (ou plus) outils ou technologies existantes actuellement, et essayez, de tracer leurs diagrammes de résilience.

Réponse : On peut représenter le vidéo-projecteur de nos salles d'enseignement au regard du tableau « noir » et de la craie... Qui ont le mérite de rarement tomber en panne !

La vidéoprojection nécessite d'avoir :

- une prise électrique accessible – donc de l'électricité !
- un ordinateur à connecter ;

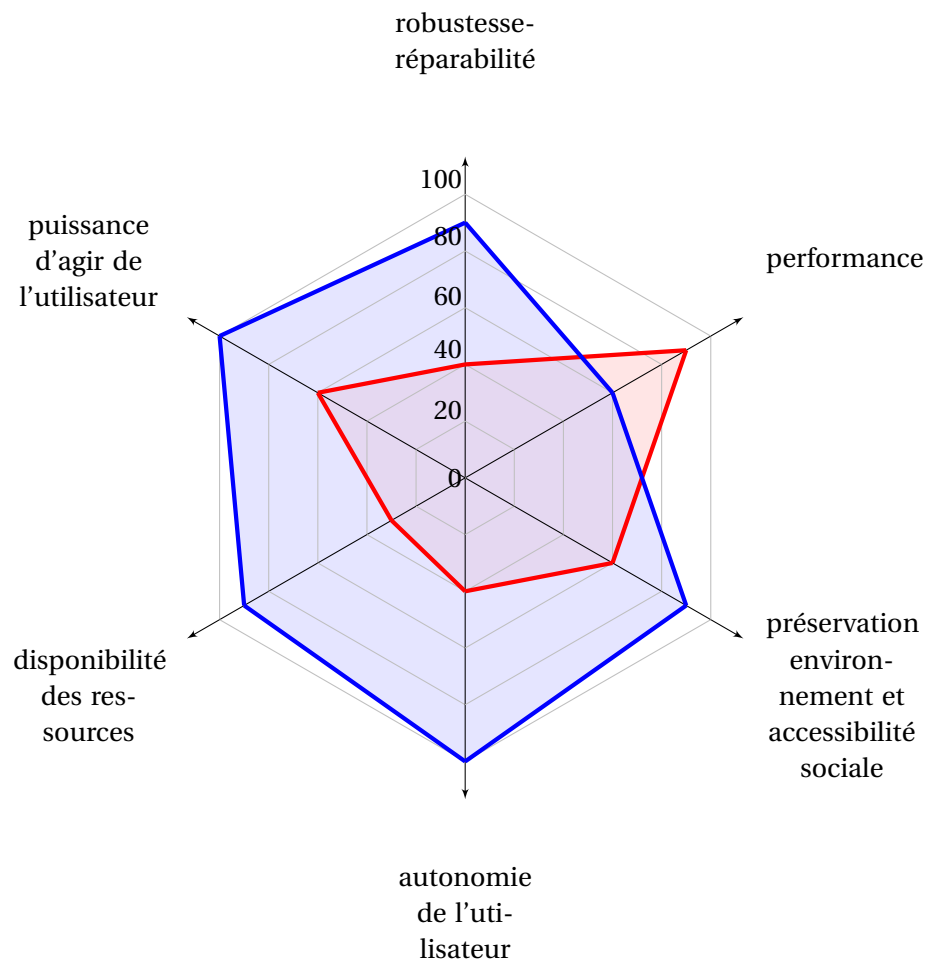
- un écran qui se déroule potentiellement à l'aide d'un interrupteur;
- un vidéoprojecteur;
- probablement un connecteur entre l'ordinateur et le vidéoprojecteur;
- éventuellement une télécommande pour le vidéoprojecteur, surtout si celui-ci est installé au plafond.

Cela fait toute une chaîne d'outils sophistiqués qu'il faut avoir (sans connecteur, point de projection!) qui doit fonctionner simultanément, ce qui, quand c'est le cas, relève finalement du miracle, tout au moins à l'université.

La craie et le tableau nécessitent beaucoup moins d'objets et leur fonctionnement ne pose pas de problème (à part la poussière que cela engendre, les problèmes de santé afférents, et les problèmes d'allergie pour certaines personnes).

On ne fait pas tout à fait les mêmes choses avec un vidéoprojecteur et avec une craie, mais en termes d'objectifs (enseigner), est-ce vraiment différent?

Dans le diagramme de Kiviat ci-dessous, la craie serait en bleu et le vidéoprojecteur en rouge.



Exercice 7.5 – Regards sur la technologie nucléaire

Source : G. Blanc

Le texte ci-dessous est un article publié dans le quotidien *Le Monde*⁴ le 20 décembre 1945 par C.-G. B. intitulé « Entrons avec confiance dans l'ère atomique »

M. Joliot-Curie a offert à l'Académie de médecine, pour sa première séance solennelle après la victoire, une causerie agréablement réconfortante. Comme les grands spécialistes qui savent mieux que les autres apaiser les inquiétudes, et qui étaient hier nombreux de l'autre côté de la barricade, il a montré, science à l'appui, que nous pouvons aborder l'ère atomique avec confiance. Elle s'est ouverte, sans doute, sur l'éclatement d'une bombe. Mais cet effroyable engin de guerre ne doit pas compromettre l'avenir de l'énergie nucléaire.

D'abord les connaissances actuelles, déjà profondes, sur la constitution de la matière permettent d'affirmer que la rupture explosive d'une quantité même importante de noyaux atomiques ne peut pas se propager aux autres éléments de notre planète. Cette assertion élimine la crainte qu'un imprudent ou un fou ne transforme un jour la terre en un ersatz de soleil.

Quant au malaise entretenu par l'appréhension d'une course aux armements nucléaires, M. Joliot-Curie estime qu'il en sortira un courant d'idées favorable à la paix et au progrès. L'inquiétude répandue sur le monde par les bombes d'Hiroshima et de Nagasaki ne peut que créer une émulation dont le bien de l'humanité tirera un large profil. Le plus sûr moyen de courir à la catastrophe serait d'arrêter le développement de la science.

Tandis que ce développement nous apportera dans un proche avenir de nouvelles sources d'énergie, des centaines de milliers de ces kilowatts qui, tout le monde en est maintenant convaincu, sont inséparables du bien-être. L'économie mettra évidemment son nez dans le bilan des centrales atomiques, mais déjà le courant électrique produit par la libération de l'énergie nucléaire revient au même prix que s'il était fourni par un moteur à essence. Et les sous-produits de la désintégration atomique seront des radioéléments artificiels, en quantité importante, pour les applications biologiques et médicales, et d'autres peut-être.

Il est d'ailleurs impossible de prévoir, dès maintenant, tous les emplois bienfaisants de l'énergie atomique. Le biologiste britannique Julian Huxley proposait, l'autre jour, à New-York, le bombardement de la banquise arctique. L'énorme quantité de chaleur dégagée ferait fondre les glaces et le climat de tout l'hémisphère nord s'en trouverait adouci. M. Joliot-Curie pense que d'autres bombes atomiques, non moins pacifiques, pourraient être utilisées pour modifier les conditions météorologiques, pour créer des nuages, faire pleuvoir. Cela se traduirait par une amélioration du rendement agricole et du rendement hydro-électrique.

Que le monde fasse confiance aux physiciens, l'ère atomique commence seulement.

1. Dans quel contexte historique intervient cet article? Pouvez-vous dire qui est M. Joliot-Curie dont il est question dans cet article? La phrase : « Elle s'est ouverte, sans doute, sur l'éclatement d'une bombe » fait références à quel évènement? Est-elle exacte?

Réponse : Cet article est publié fin 1945, donc à la sortie de la 2^e Guerre Mondiale, après l'armistice européenne (mai) et la capitulation du Japon (août).

Jean Frédéric Joliot, dit Frédéric Joliot-Curie, né le 19 mars 1900 à Paris et mort le 14 août 1958 dans la même ville, est un physicien et chimiste français. Gendre de Pierre et Marie Curie, il a obtenu le prix Nobel de chimie en 1935 conjointement avec son épouse Irène Joliot-Curie. Il a été professeur au Collège de France, directeur de l'Institut du radium et membre de l'Académie des sciences. Il a joué un rôle majeur comme haut-commissaire dans les débuts de l'exploitation de l'énergie atomique en France dans l'immédiat de

4. https://www.lemonde.fr/archives/article/1945/12/20/entrons-avec-confiance-dans-l-ere-atomique_1857827_1819218.html

l'après Seconde Guerre mondiale. (wikipedia)

La bombe en question est la première bombe atomique larguée par les américains le 6 août 1945 sur la ville d'Hiroshima au Japon. Et celle larguée trois jours plus tard, le 9 août, sur la ville de Nagasaki. Elles tuèrent instantanément 70000 personnes et plus de 200000 supplémentaires dans les années suivantes.

2. Quels sont les éléments des prédictions faites dans le texte qui se sont révélées à peu près exactes, selon vous? Pourquoi?

Réponse :

La fission de noyaux atomique n'engloutit pas la planète. Parce que la plupart des noyaux atomiques de la matière constituant la planète sont stables.

L'énergie nucléaire génère effectivement des centaines de milliers de kW (250 GW électriques consommés / an en 2022). Mais cela ne représente que 10 % de l'électricité mondiale. Et 4 % de l'énergie primaire.

Le coût de l'électricité nucléaire est effectivement faible. Mais tout n'est pas inclus dans le prix du kWh (coût sanitaire des accidents, coût du démantèlement des centrales, etc.).

Les sous-produits de la fission n'ont pas vraiment d'applications médicales, en revanche beaucoup de radionucléides, produits spécifiquement pour ça en ont.

3. Quels sont les éléments des prédictions faites dans le texte qui se sont révélées fausses, selon vous? Pourquoi? Que pensez-vous du rêve de contrôle du climat global de la planète à l'aide de l'énergie nucléaire?

Réponse : Le doux rêve d'un nucléaire bienfaiteur de l'humanité porté globalement par le texte a été largement mis à mal par les faits : course à l'armement, dissuasion, Guerre Froide, énergie nucléaire, certes, mais avec Tchernobyl et Fukushima, plus des déchets dangereux qui s'entassent...

Ce qui est étonnant c'est le futur du nucléaire comme bienfaiteur de l'humanité qui est dessiné ici à partir d'un événement terriblement destructeur utilisant le même principe physique.

Le rêve prométhéen de contrôle du climat montre qu'il ne faut pas laisser l'avenir de l'humanité dans les mains des scientifiques, en particulier des physiciens!!

L'idée d'utiliser l'énergie nucléaire pour faire fondre la banquise est justement glaçante! De fait c'est en train de se passer, et la perspective n'est pas du tout réjouissante pour l'humanité, même si seule la banquise fond (auquel cas le niveau des mers ne va pas augmenter) : modification du climat à grande échelle (albedo, courants marins), radioactivité un peu partout, instabilité de la fonte (une banquise « chaude » ne doit pas être très stable dans un climat des années 1940)

4. Qu'est-ce que le « solutionnisme technologique »?

Réponse : Il s'agit de la croyance générale que l'innovation technologique pourra, dans le futur, fournir des solutions aux problèmes environnementaux générés par l'humanité. Le problème des solutions technologiques est qu'elles ont toujours des effets néfastes, par exemple en impactant d'autres limites planétaires (et généralement le vivant).

5. En quoi le développement actuel de l'énergie nucléaire peut-il s'apparenter à un solutionnisme technologique? Avoir à notre disposition une énergie « propre » (ou décarbonée) en très grande quantité est-il souhaitable pour l'humanité?

Réponse : L'énergie nucléaire est une énergie fortement décarbonée, elle est donc vue comme une solution évidente pour le réchauffement climatique. Mais c'est sans compter quelques écueils, comme le fait qu'avec la technologie actuelle il y a pour environ 100 ans de réserves d'uranium, comme le fait que déployer de nouvelles installations prend du temps (10 à 20 ans)... Plus la probabilité non négligeable d'accident majeur et le problème des déchets dangereux, qui sont des épées de Damoclès pour le vivant. De ce point de vue, elle peut être considérée comme du solutionnisme technologique.

Par ailleurs, quand bien même ce serait la solution au problème des énergies fossiles, disposer d'une grande quantité d'énergie propre ne résoudrait pas nos problèmes écologiques. L'éradication du vivant perdurerait.

6. Quels autres exemples (au moins deux) de solutionnisme technologique pouvez-vous citer et commenter?

Réponse : La capture et le stockage du CO₂ dans l'atmosphère : on sait faire à trop petite échelle (il manque un facteur 1000), et en plus cela laisse planer l'espoir que si on peut se débarrasser du CO₂ a posteriori, alors on peut continuer ainsi.

Toutes les technologies d'énergies décarbonées : il faut les faire mais ne pas compter uniquement dessus.

Les projets de géoingénierie de modification du climat à grande échelle.

Les idées de pollinisation par drones.

Dessalinisation de l'eau de mer.

Etc.

Exercice 7.6 – La technologie peut-elle nous sauver?

Source : G. Blanc

Le texte ci-dessous est un ensemble d'extraits d'un article paru dans le quotidien *Le Monde*⁵ le 22 mars 2023.

Le « solutionnisme technologique », cette foi en l'innovation qui évite de penser le changement (extraits)

Si l'expression est récente, l'idée selon laquelle l'innovation technologique serait capable de résoudre les crises sociales ou écologiques est née avec la révolution industrielle. En occultant les causes, elle dépolitise le débat.

5. https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/03/22/le-solutionnisme-technologique-cette-foi-en-l-innovation-qui-evite-de-penser-le-changement_6166463_3232.html

1 Histoire d'une notion. Géolocaliser les chasseurs grâce à une application et éviter ainsi les
2 balles perdues quand on se promène en forêt; capter les émissions carbone à l'aide de ventila-
3 teurs géants; soutenir nos corps fatigués avec des exosquelettes pour travailler plus longtemps...
4 Les propositions ne manquent pas dans l'actualité pour illustrer l'idée selon laquelle l'innovation
5 technologique serait capable de résoudre les problèmes sociaux et écologiques qu'elle a souvent
6 contribué à créer.

7 [...]

8 Si l'expression [solutionnisme technologique] est récente, les travaux d'une nouvelle généra-
9 tion d'historiens des sciences et techniques montrent que la fascination à l'égard de l'innovation
10 technologique est bien antérieure à la création de l'Internet. « *Le technosolutionnisme est ancré*
11 *dans une vision du monde portée par deux siècles de théorie économique selon laquelle le mar-*
12 *ché et l'innovation pourraient nous permettre de dépasser les limites environnementales* », affirme
13 l'historien François Jarrige.

14 Dès le XIX^e siècle et les débuts de l'industrialisation, alors que les fumées noires des fabriques
15 suscitent les protestations des riverains, ingénieurs et pouvoirs publics rivalisent de promesses
16 techniques de dépollution plutôt que de réduire la production des substances toxiques. « Les
17 fourneaux fumivores, censés avaler les fumées, représentent une des premières formes de tech-
18 nosolutionnisme dans le domaine environnemental », note l'historien.

19 Un siècle plus tard, c'est encore l'innovation technologique que mobilisent les constructeurs
20 dans les années 1970 pour répondre à l'explosion de la pollution automobile, en pariant cette
21 fois sur l'amélioration des moteurs et des filtres. Une façon d'éviter de questionner les usages et
22 l'explosion du nombre de véhicules motorisés individuels.

23 Alors que les indicateurs écologiques sont désormais au rouge et qu'il n'est plus possible d'igno-
24 rer les limites planétaires, le projet technosolutionniste continue pourtant de susciter l'enthousiasme
25 de ses partisans. « La technologie ne s'oppose pas à l'écologie, elle en est la clé », se réjouit
26 ainsi l'essayiste transhumaniste Laurent Alexandre, pour qui « la science est aujourd'hui notre
27 seule chance de salut ».

28 De fait, le technosolutionnisme est l'autre nom de l'écomodernisme, qui prétend résoudre la
29 crise écologique par l'amélioration des modèles de production et l'intensification de la maîtrise
30 humaine des processus naturels. De la fusion nucléaire aux projets de géo-ingénierie – ces tech-
31 niques inventées pendant la guerre du Vietnam, qui consistent à modifier le fonctionnement du
32 système terrestre pour capter les rayonnements solaires ou faire tomber la pluie –, de nombreuses
33 solutions sont envisagées. En 2015, dix-neuf universitaires et scientifiques affirmaient dans un «
34 manifeste écomoderniste » leur « *conviction que le savoir et la technologie, appliqués avec sagesse,*
35 *pourraient permettre que ce soit un bon, voire un remarquable anthropocène* ».

36 Une forme de climatoscepticisme

37
38
39 Ces promesses négligent pourtant des réalités physiques incontournables, dont l'épuisement
40 des ressources et le temps incompressible du développement technologique, alors même que
41 s'accroissent les catastrophes écologiques. « *Il semble qu'à tout moment, les humains pourront,*
42 *grâce à la puissance de leurs techniques, effacer leur problématique empreinte de la Terre* », souligne
43 le professeur en sciences de l'environnement Nathanaël Wallenhorst, alors même que « *le système*
44 *Terre est caractérisé par son inertie* ».

45 L'optimisme technologique ignore aussi l'effet rebond lié au progrès technique, théorisé par
46 l'économiste britannique William Stanley Jevons dès 1865. Sans régulation, une innovation en-
47 traîne une augmentation de la consommation. « *A chaque fois qu'on a voulu substituer une énergie*
48 *à une autre, par exemple le pétrole et l'électricité au charbon, elles se sont additionnées* », rappelle
49 l'historien François Jarrige.

50 Le technosolutionnisme appartient aux « *mythologies écologiques propagées pour que rien ne*
51 *change* », affirme le géographe Renaud Dutermie, et peut s'apparenter, de ce fait, à une forme
52 de climatoscepticisme. A quoi bon limiter nos consommations si une rupture technologique va
53 bientôt nous sauver? Tabler sur les véhicules électriques est un bon moyen de ne pas questionner
54 nos mobilités, comme miser sur les robots et les capteurs agricoles évite d'interroger notre modèle
55 d'agriculture, tout en assurant de nouveaux marchés à l'industrie. En dépolitisant les réponses à
56 apporter aux crises, cette quête sans fin est aussi une façon de contourner le débat démocratique
57 sur la façon de les affronter.

1. En vous aidant du texte, quelle définition pouvez-vous donner du technosolutionnisme?

Réponse : Croire que d'hypothétiques technologies pourront résoudre les problèmes écologiques engendrés par la technosphère et se reposer sur ça.

2. Donnez **tous** les exemples de technosolutionisme cités dans le texte.

Réponse : ℓ. 1 : géolocalisation des chasseurs

ℓ. 2 : capture des émissions de carbone

ℓ. 3 : exosquelette pour travailler plus

ℓ. 16 : dépolluer plutôt que de réduire

ℓ. 21 : amélioration des moteurs de voiture

ℓ. 30 : fusion nucléaire

ℓ. 30 : géoingénierie

ℓ. 53 : voiture électrique

ℓ. 54 : robots et capteurs pour l'agriculture

3. Quelles sont les « réalités physiques incontournables » (ℓ. 39) dont parle le texte? Pourquoi le technosolutionisme est une croyance infondée?

Réponse : Ce sont les ressources limitées (ℓ. 40), le temps (ℓ. 40) de conception et les frontières planétaires (ℓ. 41).

Croyance parce que fabriquer des objets techniques consomme de l'énergie et des ressources, et qu'il faut du temps pour mettre au point une technologie.

4. Pourquoi cette croyance dans le technosolutionisme est problématique?

Réponse : Parce que croire que la technologie va nous sauver évite de changer les usages et de baisser les consommations, et donc éviter de résoudre le problème.

Chapitre 8

Les inégalités

Exercice 8.1 – Climat et inégalités

Source : K. Jean

Dans sa Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), la France vise la neutralité carbone en 2050. Elle vise également un objectif intermédiaire : la réduction de 50 % de son empreinte carbone en 2030. En 2021, on estimait qu'en France l'empreinte carbone moyenne par habitant était d'environ 10 tCO₂e.

1. Expliquez ce que représente l'unité tCO₂e.

Réponse : Tonne équivalent CO₂, une unité qui permet de prendre en compte simultanément les différents gaz à effet de serre en considérant leurs pouvoirs de réchauffement global (PRG) respectifs, ramené à la référence CO₂.

Le graphique de la figure 8.1 représente les rejets de gaz à effet de serre par personne, en fonction du niveau de richesse (émissions moyennes pour les 50 % de la population au niveau de vie le plus bas, puis les émissions moyennes pour les 40 % suivant, et enfin celles des 10 % les plus riches) dans différentes régions du monde, dont l'Europe.

2. En faisant l'hypothèse que les chiffres pour l'Europe s'appliquent à la France, commentez la partie du graphique relative à l'Europe au vu de l'objectif climatique de la France pour 2030.

Réponse : Si on considère que les efforts doivent être équitablement répartis, alors tous les habitants devraient être à 10/2 ~ 5 tCO₂e. Les 50 % les plus pauvres en France et en Europe ont déjà atteint les objectifs, les 40 % du milieu doivent réduire de moitié, et les 10 % les plus riches doivent diviser par 3 leurs émissions.

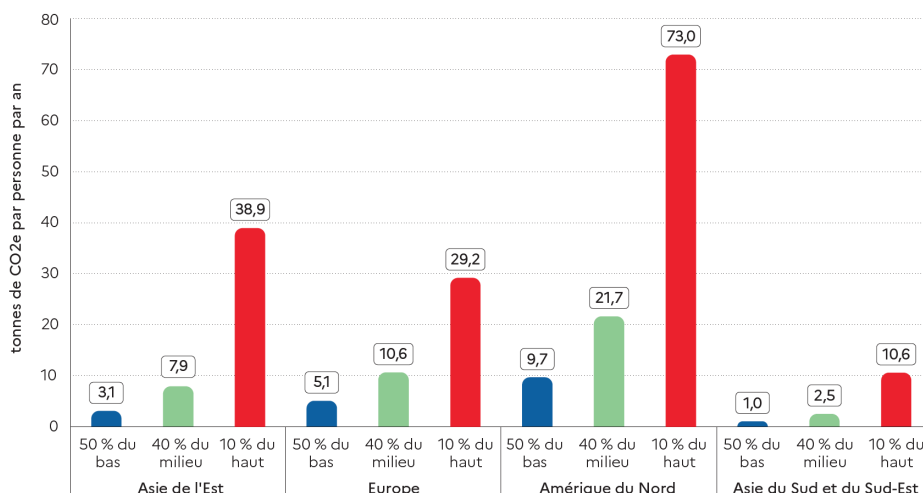
La figure 8.2 est issue d'un article de Pottier et al. (Revue de l'OFCE, 2020). Elle représente les niveaux d'émissions en tCO₂e par ménage¹ et par an, en fonction du niveau de vie des ménages.

3. La valeur moyenne de l'empreinte carbone donnée par ménage est-elle compatible avec celle par personne?

Réponse : $22,1/2,16 = 10,23$; donc c'est à peu près OK!

1. La taille d'un ménage en France en 2021 est en moyenne de 2,16 personnes (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381486>). Définition de l'INSEE : « Un ménage, au sens statistique du terme, désigne l'ensemble des occupants d'un même logement sans que ces personnes soient nécessairement unies par des liens de parenté (en cas de colocation, par exemple). Un ménage peut être composé d'une seule personne. »

Graphique 15. Émissions par tête dans différentes régions du monde, 2019



Interprétation : L'empreinte carbone individuelle inclut les émissions domestiques, les investissements publics et privés aussi bien que les imports et exports de carbone intégrés dans les biens et services échangés avec le reste du monde. Les estimations sont basées sur une combinaison systématique de données fiscales, d'enquêtes sur les ménages et de tableaux d'entrée-sortie. Les émissions sont divisées également entre les membres d'un même ménage. **Sources et séries :** wir2022.wid.world/methodology et Chancel (2021).

FIGURE 8.1 – Émissions de gaz à effet de serre par personne dans différentes régions du monde en 2019 en fonction du niveau de richesse.

Graphique 2. Inégalités d'empreinte carbone : au-delà de la vision moyenne et verticale

Moyenne nationale : 22,1 tCO_{2e} par ménage et par an ;
médiane nationale : 18,9 tCO_{2e} par ménage et par an

(a) Premier quartile, médiane et troisième quartile par décile de niveau de vie

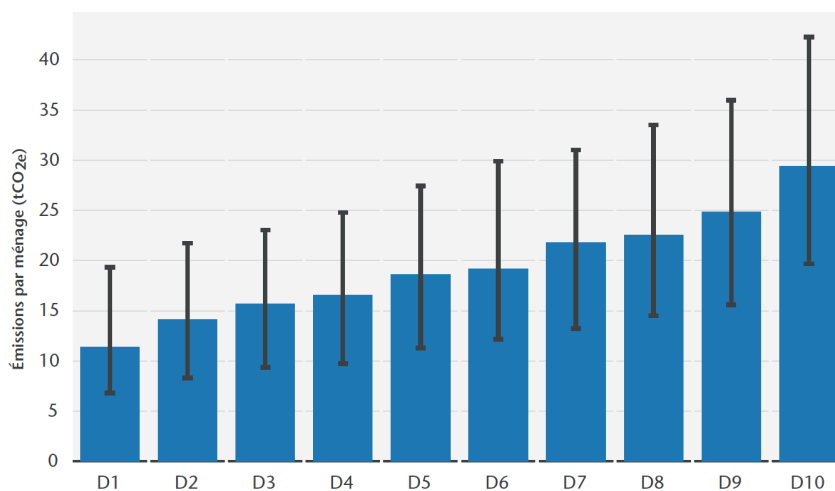


FIGURE 8.2 – Inégalités d'empreinte carbone : émissions de gaz à effet de serre en France, par ménage en fonction des déciles de niveau de vie. D1 : les 10 % des ménages les moins riches, D10 : les 10 % des ménages les plus riches.

- Commentez les éléments importants (tendance, dispersion) qui ressortent de ce graphique. Qu'est-ce engendre la dispersion pour un décile de niveau de vie, selon vous?

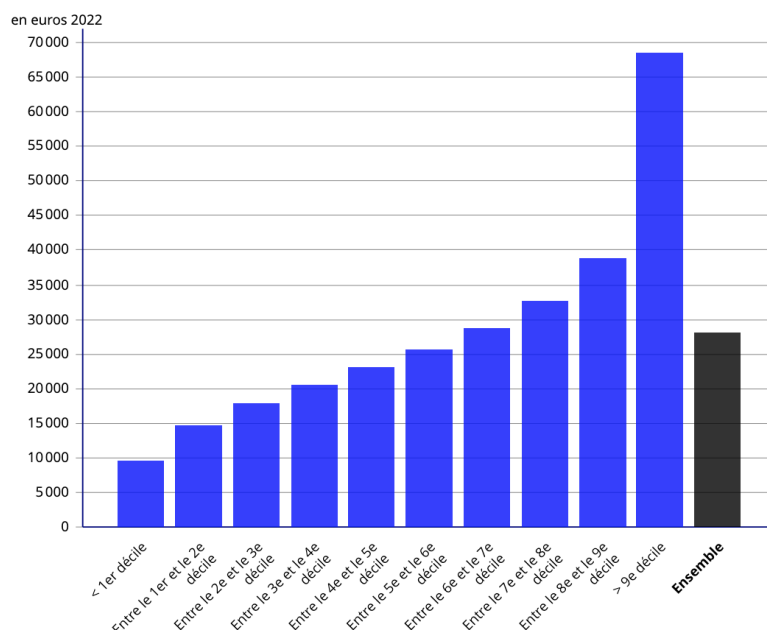
Réponse :

- (a) Les niveaux d'émissions moyens augmentent avec la richesse.
- (b) On observe également une forte dispersion au sein des déciles de richesse : autrement dit un individu très pollueur du 1er décile ("les pauvres") peut polluer autant qu'un individu très peu pollueur du dernier décile ("les riches").

La dispersion reflète le mode de vie en fonction d'un niveau de vie donné.

Pour info, la figure suivante donne le niveau de vie moyen par décile par individu en 2022 :

Niveau de vie moyen par décile en 2022



Dans le 1^{er} décile, un individu émet 0,55 kgCO₂e par euro de niveau de vie; dans le dernier décile, c'est 0,20 kgCO₂e par euro de niveau de vie, soit environ un facteur 0,36. En revanche, le niveau de vie est plus élevé dans le 10^e décile d'un facteur environ $68000/9000 = 7,55$. Donc les rejets de GES sont plus élevées d'un facteur $7,55 \times 0,36 = 2,7$. Or sur la figure 8.2 on a un rapport $29,5/11,5 = 2,6$.

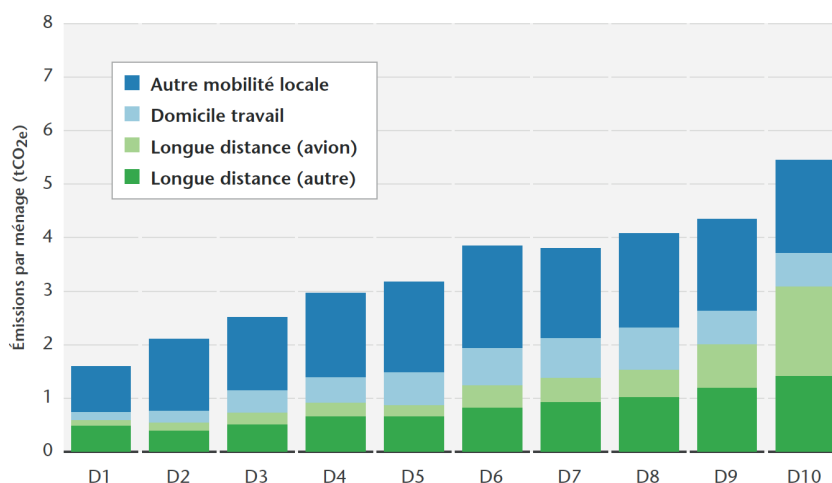
5. Sur la base de ce graphique, qu'est-ce qui, selon vous, est prépondérant pour expliquer les émissions de gaz à effet de serre d'un foyer : son niveau de richesse; ou pour un niveau de richesse donné, son mode de vie?

Réponse : Cela signifie que les 2 éléments d'analyses (niveaux de richesse et modes de vie) déterminent les émissions (et pas seulement l'un des 2) : le niveau de richesse structure les émissions, mais au sein d'un décile de richesse, les modes de vies engendrent des dispersions très importantes.

La figure 8.3 présente plus spécifiquement les niveaux d'émissions de GES liés au transport pour la population française, toujours en fonction du décile de richesse.

6. Commentez les variations d'émissions de GES liés aux transports en fonction du niveau de vie. Vous pourrez notamment utiliser la notion de « déplacements contraints »; de quoi s'agit-il, selon vous?

Graphique 3. Inégalités d'émissions liées au transport : moyenne par décile de niveau de vie, segmentée selon les types de mobilité
Moyenne nationale : 3,4 tCO₂e par ménage et par an



Sources : Insee, ENT D 2008, calculs des auteurs.

FIGURE 8.3 – Inégalités d'émissions liées au transport : émissions de gaz à effet de serre liées au transport en France par ménage en fonction des déciles de niveau de vie. Les couleurs indiquent le mode de transport.

Réponse : Les émissions liées à la mobilité locale varient peu, et de façon non linéaire (différence entre D1 et tous les autres) avec le niveau de vie. Les trajets domicile-travail varient peu également. Ces 2 catégories représentent vraisemblablement des déplacements contraints (domicile-travail, par exemple), pas facile à réduire ou à modifier. Les émissions liées aux trajets longues distance (avion ou autre) augmentent avec le niveau de vie. Il s'agit vraisemblablement ici, au moins en partie, de trajets non contraints (vacances, loisirs).

7. Quel sont les types de déplacements qui vous semblent être à cibler prioritairement par des mesures de réductions des émissions de gaz à effet de serre? Justifiez brièvement votre réponse.

Réponse : Les trajets longues distances, qui sont vraisemblablement des trajets non contraints (loisirs), plus facilement régulables et décarbonables (report de l'avion/voiture vers le train), et qui en plus permettrait des mesures de transition justes (impacterait moins les individus les plus pauvres).

8. Quels changements structurels dans la société faudrait-il faire pour diminuer les émissions liées aux déplacements contraints?

Réponse : Les déplacements contraints sont les déplacements quotidiens liés au travail et à la logistique (faire les courses, emmener les enfants à l'école, etc.). Réduire les émissions liées à ces déplacements implique de réduire la distance de ces déplacements, à savoir mettre les logements à proximité des lieux de travail, des commerces et des écoles. Faire en sorte qu'il existe des infrastructures cyclables pour que la voiture laisse naturellement la place au vélo. Et/ou mettre en place des transports en commun (bus, tramway...).

Exercice 8.2 – Indice de Gini

Source : G. Blanc

1. Calculez l'indice de Gini pour une équipe pédagogique à l'université composée de deux doctorant-es, deux maitres-ses de conférences classe normale échelon 1, deux maitres-ses de conférences classe normale échelon 4, un-e maitre-se de conférence classe normale échelon 9, un-e professeur-e des universités 2^e classe, un-e professeur-e des universités 1^{re} classe et un-e professeur-e des universités classe exceptionnelle.

On donne les salaires mensuels nets correspondants en euros (grille de 2025) :

Doctorant·e	1421,38
Maitres-se de conférences classe normale échelon 1	1727,49
Maitres-se de conférences classe normale échelon 4	2370,55
Maitre-se de conférence classe normale échelon 9	3123,95
Professeur-e des universités 2 ^e classe	3352,25
Professeur-e des universités 1 ^{re} classe	3820,27
Professeur-e des universités classe exceptionnelle	5022,67

Réponse : On ordonne par ordre croissant les revenus des différentes classes. On détermine la fraction P_k de personnes cumulées par classe k et la fraction R_k de richesse cumulée par classe k . Avec $P_0 = 0$ et $R_0 = 0$. Cela permet d'obtenir le tableau suivant :

Nombre par classe de salaire	Nombre cumulé	Fraction P_k	Revenu par classe (€)	Revenu cumulé (€)	Fraction R_k	$P_{k+1} - P_k$	$R_{k+1} - R_k$
2	2	0,22	1421	1421	0,07	0,22	0,07
1	3	0,33	1727	3148	0,15	0,11	0,22
2	5	0,55	2370	5518	0,26	0,22	0,41
1	6	0,66	3123	8641	0,41	0,11	0,67
1	7	0,77	3352	11993	0,58	0,11	0,99
1	8	0,88	3820	15813	0,76	0,11	1,34
1	9	1	5022	20835	1	0,12	1,76

L'indice de Gini est donné par :

$$\mathcal{G} = 1 - \sum_{k=0}^{c-1} (P_{k+1} - P_k) \cdot (R_k + R_{k+1}) \quad (8.1)$$

Soit :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G} &= 1 - (0,22 \times 0,07 + 0,11 \times 0,22 + 0,22 \times 0,41 + 0,11 \times 0,67 + 0,11 \times 0,99 + 0,11 \times 1,34 \\
 &\quad + 0,12 \times 1,76) \\
 &= 1 - 0,671 = 0,329
 \end{aligned}$$

2. Calculez l'indice de Gini pour une équipe pédagogique composée de 8 doctorant-es et un-e

professeur·e des université classe exceptionnelle.

Réponse : Même principe, ce qui donne le tableau suivant :

Nombre par classe de salaire	Nombre cumulé	Fraction P_k	Revenu par classe (€)	Revenu cumulé (€)	Fraction R_k	$P_{k+1} - P_k$	$R_{k+1} - R_k$
8	8	0,88	1421	1421	0,22	0,88	0,22
1	9	1	5022	6443	1	0,12	1,22

L'indice de Gini est :

$$\mathcal{G} = 1 - (0,88 \times 0,31 + 0,2 \times 1,31) = 1 - 0,34 = 0,66$$

3. Calculez l'indice de Gini pour une équipe pédagogique composée de 8 doctorant·es et deux maître·se de conférence classe normale échelon 9.

Réponse : Même principe, ce qui donne le tableau suivant :

Nombre par classe de salaire	Nombre cumulé	Fraction P_k	Revenu par classe (€)	Revenu cumulé (€)	Fraction R_k	$P_{k+1} - P_k$	$R_{k+1} - R_k$
8	8	0,8	1421	1421	0,31	0,8	0,31
2	10	1	3124	4545	1	0,2	1,31

L'indice de Gini est :

$$\mathcal{G} = 1 - (0,8 \times 0,31 + 0,2 \times 1,31) = 1 - 0,51 = 0,49$$

4. Quelle est l'équipe la plus égalitaire?

Réponse : L'équipe la plus égalitaire est celle qui a le plus petit indice de Gini, à savoir celle de la question 1. Celle avec les 8 étudiants et le prof est la plus inégalitaire.

Annexes

Annexe A

Frottements

L'intensité de la force de frottement fluide¹ d'un objet (voiture, vélo, etc.) ayant une vitesse v importante (écoulement à grand nombre de Reynolds, turbulent, typique du déplacement des véhicules dans l'air) dans un fluide de masse volumique ρ est donnée par :

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x \quad (\text{A.1})$$

où S est la surface de la voiture perpendiculaire au mouvement et C_x le coefficient de trainée (avec $SC_x = S \times C_x$) et ρ est la masse volumique du fluide.

Dans l'air, on a : $\rho_{\text{air}} = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

L'intensité de la force de résistance au roulement des pneus sur la route est donnée par :

$$F_R = C_{rr} \cdot m \cdot g \quad (\text{A.2})$$

où C_{rr} est le coefficient de résistance au roulement², m la masse du véhicule et $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur.

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Frottement_fluide

2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Résistance_au_roulement

Annexe B

Température d'un conducteur électrique cylindrique

Un fil électrique est constitué d'un cœur cylindrique en cuivre (de conductivité électrique $\sigma_{\text{él}} = 5,7 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$), de rayon r_f ; il est entouré d'une gaine plastique, de conductivité thermique $\kappa = 0,15 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, de rayon intérieur r_f et de rayon extérieur r_g .

Lorsqu'il est parcouru par un courant continu, d'intensité $I_{\text{él}}$, on constate l'existence d'un transfert thermique latéral dont le flux thermique a pour expression, selon la loi de Joule : $P_f = R_{\text{él}} I_{\text{él}}^2$ où $R_{\text{él}} = l / (\sigma_{\text{él}} \pi r_f^2)$ est la résistance électrique du conducteur ohmique et l la longueur du fil.

Résistance thermique du fil pour la conduction La résistance thermique est donnée par le rapport entre la différence des températures et le flux (ou l'intensité) thermique.

D'après la loi de Fourier : $\vec{J}_Q = -\kappa \vec{\text{grad}} T$ (où $\vec{J}_Q$ est le vecteur courant thermique volumique dans la gaine) exprimé en coordonnées cylindriques ($\vec{e}_r$ vecteur unitaire radial, $\vec{e}_\theta$ vecteur unitaire ortho-radial, $\vec{e}_z$ vecteur unitaire longitudinal), et en raison de la symétrie cylindrique (pas de composantes sur $\vec{e}_z$ et $\vec{e}_\theta$), il vient : $\vec{J}_Q = -\kappa dT/dr \vec{e}_r$.

Par définition, le flux thermique est donné par :

$$I_Q = \int_S \vec{J}_Q \cdot \vec{n} dS$$

où $S = 2\pi r_f \cdot l$ est la surface du cylindre et $\vec{n}$ est le vecteur unitaire normal à la surface.

Si on choisit $\vec{e}_z$ selon la hauteur du cylindre, il vient, en décomposant sur la surface latérale ($\vec{n} \parallel \vec{e}_r$) et les deux disques ($\vec{n} \perp \vec{e}_r$) :

$$I_Q = \int_{S_{\text{lat}}} -\kappa \frac{dT}{dr} dS = -\kappa \frac{dT}{dr} \cdot S$$

D'où :

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{I_Q}{2\pi l \kappa} \frac{1}{r}$$

Ce qui donne, en intégrant :

$$T = -\frac{I_Q}{2\pi l \kappa} \ln r + \text{Cte} \quad \text{soit, entre } r_f \text{ et } r_g : T_g - T_f = -\frac{I_Q}{2\pi l \kappa} \ln \left(\frac{r_g}{r_f} \right)$$

avec les conditions aux limites : $T = T_f$ pour $r = r_f$ et $T = T_g$ pour $r = r_g$.

On en déduit la résistance thermique de la gaine :

$$R_Q^{\text{cond}} = \frac{T_g - T_f}{I_Q} = \frac{\ln \left(\frac{r_g}{r_f} \right)}{2\pi l \kappa}$$

Résistance thermique du fil pour la convection Il faut tenir compte de la convection, et ajouter en série à la résistance précédente une résistance « convective. »

Le fil électrique étant situé dans l'air extérieur à la température $T_0 = 20^\circ\text{C}$, on définit une résistance thermique R_Q^{conv} (en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) associée à la convection thermique dans l'air (pour une longueur l de fil). On prendra $h = 10 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ comme valeur du coefficient de transfert convectif de l'air.

Le flux thermique convectif I_c est proportionnel à la différence de température entre la surface extérieure de la gaine T_g et la température de l'air T_0 ainsi qu'à la surface de contact S : $I_c = h(T_g - T_0)S$ d'où la résistance thermique associée :

$$R_Q^{\text{conv}} = \frac{T_g - T_0}{I_c} = \frac{1}{hS} = \frac{1}{2\pi r_e l h}$$

Résistance thermique du fil pour le rayonnement Le rayonnement de la gaine dissipe un flux d'énergie donnée par la relation de Stefan-Boltzmann : $I_r = \epsilon \sigma (T_g^4 - T_0^4)S$, où ϵ est l'émissivité du plastique constituant la gaine (pour le PVC constituant la gaine des câbles, $\epsilon = 0.95$) et $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Comme on a $T_g \sim T_0$, on peut effectuer un développement limité de $T_g^4 - T_0^4$, en posant $\Delta T = T_g - T_0$ soit $T_g^4 - T_0^4 = T_0^4[(\Delta T + T_0)/T_0 - 1]^4 = T_0^4[(\Delta T/T_0 + 1) - 1]^4 = T_0^4[(1 + 4 \cdot \Delta T/T_0 + o(\Delta T/T_0)) - 1] \approx 4T_0^3 \Delta T$, ce qui donne : $I_r \approx 4\epsilon \sigma S T_0^3 (T_g - T_0)$. D'où la résistance associée :

$$R_Q^{\text{ray}} = \frac{T_g - T_0}{I_r} = \frac{1}{4\epsilon \sigma S T_0^3}$$

Résistance thermique globale Le rayonnement participant conjointement à la convection à l'évacuation de la chaleur de la surface de la gaine, les deux résistances thermiques s'associent en parallèle. La résistance équivalente est donc : $R_g = 1/(1/R_Q^{\text{conv}} + 1/R_Q^{\text{ray}})$. R_g s'ajoute avec la résistance pour la conduction dans la gaine.

La résistance globale équivalente est donc :

$$R_Q^{\text{glob}} = R_Q^{\text{cond}} + \frac{1}{\frac{1}{R_Q^{\text{conv}}} + \frac{1}{R_Q^{\text{ray}}}}$$

Température du fil La puissance thermique générée par effet Joule P_J dans le fil électrique est évacuée vers l'extérieur, le flux de chaleur à travers la gaine étant donné par : $I = (T_f - T_0)/R_{\text{glob}}$, avec $R_{\text{glob}} = R_Q^{\text{cond}} + 1/(1/R_Q^{\text{conv}} + 1/R_Q^{\text{ray}})$.

En régime permanent, on a : $P_J = I$, donc : $l/(\sigma_{\text{el}} \pi r_f^2) I_{\text{el}}^2 = (T_f - T_0)/R_{\text{tot}}$ d'où : $T_f - T_0 = l R_{\text{tot}} / (\sigma_{\text{el}} \pi r_f^2) \cdot I_{\text{el}}^2$ Soit :

$$T_f - T_0 = \frac{R_Q^{\text{cond}} + \frac{1}{\frac{1}{R_Q^{\text{conv}}} + \frac{1}{R_Q^{\text{ray}}}}}{\sigma_{\text{el}} \pi r_f^2} \cdot I_{\text{el}}^2 = \frac{\frac{\ln(r_g/r_f)}{2\pi l \kappa} + \frac{1}{2\pi r_g l h + 4\epsilon \sigma 2\pi l T_0^3}}{\sigma_{\text{el}} \pi r_f^2} \cdot I_{\text{el}}^2$$

Si on suppose que l'épaisseur de la gaine e est petite devant le rayon du fil électrique ($e \ll r_f$), alors :

$$\ln(r_g/r_f) = \ln\left(\frac{e + r_f}{r_f}\right) = \ln\left(1 + \frac{e}{r_f}\right) \approx \frac{e}{r_f}$$

Soit :

$$T_f - T_0 = \frac{\frac{e}{r_f} \cdot \frac{1}{2\pi l \kappa} + \frac{1}{2\pi(r_f + e) l h + 4\epsilon \sigma 2\pi(r_f + e) l T_0^3}}{\sigma_{\text{el}} \pi r_f^2} \cdot I_{\text{el}}^2$$

Et :

$$\frac{1}{r_f + e} \approx \frac{1}{r_f} \left(1 - \frac{e}{r_f}\right)$$

Soit :

$$T_f - T_0 = \frac{\frac{e}{r_f} \cdot \frac{1}{2\pi l \kappa} + \frac{1}{r_f} \left(1 - \frac{e}{r_f}\right) \cdot \frac{1}{2\pi l h + 4\epsilon \sigma 2\pi l T_0^3}}{\sigma_{\text{el}} \pi r_f^2} \cdot I_{\text{el}}^2$$

Soit :

$$T_f - T_0 = \frac{1}{2\pi^2 l} \cdot \frac{\frac{e}{\kappa} + \left(1 - \frac{e}{r_f}\right) \cdot \frac{1}{h+4\epsilon\sigma T_0^3}}{\sigma_{\text{él}} r_f^3} \cdot I_{\text{él}}^2 \quad (\text{B.1})$$

d'où :

$$r_f = \left[\frac{1}{2\pi^2 l} \cdot \frac{\frac{e}{\kappa} + \left(1 - \frac{e}{r_f}\right) \cdot \frac{1}{h+4\epsilon\sigma T_0^3}}{\sigma_{\text{él}} (T_f - T_0)} \cdot I_{\text{él}}^2 \right]^{1/3} \quad (\text{B.2})$$

Annexe C

Données voitures

C.1 Voiture thermique

La voiture Renault Clio (SCe 65 Evolution) ¹ consomme de l'essence SP95-E10.
On donne :

- Masse à vide = 1044 kg
- Carburant = essence
- Puissance maximale = 49 kW (65 ch)
- Consommation = 5,3-5,4 L/100 km
- Rejets CO₂ = 120-121 g/km
- Volume réservoir = 42 L
- Coefficient de trainée ² $SC_x = 0,64 \text{ m}^2$
- Coefficient de roulement $C_{rr} = 0,01$
- Pouvoir calorifique inférieur de l'essence SP95-E10 ³ $= 39,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Masse volumique de l'essence SP95-E10 $= 754 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Rendement typique d'un moteur thermique de voiture = 30 %

C.2 Voiture électrique

La voiture électrique Renault Zoé E-Tech ⁴ a les caractéristiques suivantes :

- Masse à vide = 1502 kg
- Capacité batterie = 52 kWh (lithium-ion)
- Autonomie = 395 km (WLTP = norme internationale)
- Autonomie à 20 °C et à 50 km/h = 377 km
- Puissance maximale = 80 kW (109 ch)
- Coefficient de trainée ⁵ $SC_x = 0,75 \text{ m}^2$
- Rendement typique d'un moteur électrique = 100 %

La batterie de la voiture Zoé est une batterie au lithium-ion ⁶

1. <https://www.renault.fr/vehicules-hybrides/cli-e-tech/comparateur-specifications.html>
2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Renault_Clio_V
3. https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique_inf%C3%A9rieur
4. <https://www.renault.fr/vehicules-electriques/zoe/fiche-technique.html>
5. <https://www.challenges.fr/assets/referentiel/file/5385744.pdf>
6. <https://www.renault.fr/vehicules-electriques/zoe/batterie-recharge.html> ; <https://www.renault.fr/vehicules-electriques/zoe/batterie-recharge.html> ; <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/renault-zoe-des-batteries-lithium-ion-pour-plus-de-puissance-et-dautonomie/> ; <https://www.guillaumedarding.fr/technique-batterie-li-ion-5031187.html>

- elle a 192 cellules
- sa masse est de 230 kg (masse totale des cellules dont 8 kg lithium, 18 kg nickel, 6 kg de manganèse, 6 kg de cobalt)
- tension = 400 V

Les différentes bornes de recharge ont les puissances suivantes :

- Domicile = 3,7 kW ou 7,4 kW
- Supermarchés = 22 kW
- Autoroutes = 50 kW

Références

- Blanc G. & Noûs C., Physique et Enjeux de Société (OPUS | Université Paris Cité 2023), URL <https://opus.u-paris.fr/catalog/download/5/19/1252>.
- Charney J.G. (1979), Carbon Dioxide and Climate : A Scientific Assessment, Technical report, URL <https://nap.nationalacademies.org/read/12181/chapter/1>.
- Cho S., Park S.J., Lee Y.J., Lee Y.J., Lee Y.A., Kim H.Y., Kim S.J., Chung S. & Moon M.W. (2025), Capillary Skimming of Floating Microplastics via a Water-Bridged Ratchet, *Advanced Science*, **12**(1), p. 2408623, ISSN 2198-3844, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/advs.202408623>.
- Dufresne J.L. & Treiner J. (2011), L'effet de Serre Atmosphérique : Plus Subtil Qu'on Ne Le Croit !, *La Météorologie*, (72), pp. 31–41.
- Dugast C. & Soyeux A. (2019), Faire sa part? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'état, Technical report, Carbone 4, URL <http://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2019/06/Publication-Carbone-4-Faire-sa-part-pouvoir-responsabilite-climat.pdf>.
- Eriksen M., Cowger W., Erdle L.M., Coffin S., Villarrubia-Gómez P., Moore C.J., Carpenter E.J., Day R.H., Thiel M. & Wilcox C. (2023), A Growing Plastic Smog, Now Estimated to Be over 170 Trillion Plastic Particles Afloat in the World's Oceans—Urgent Solutions Required, *PLOS ONE*, **18**(3), p. e0281596, ISSN 1932-6203, URL <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0281596>.
- Fthenakis V.M. & Kim H.C. (2011), Photovoltaics : Life-cycle Analyses, *Solar Energy*, **85**(8), pp. 1609–1628, ISSN 0038-092X, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002345>.
- Heran F. (2017), À Propos Du Report Modal. Les Enseignements Du Cas Parisien, *Les Cahiers Scientifiques du Transport / Scientific Papers in Transportation*, **71** | **2017**, pp. 99–124, URL <https://hal.science/hal-04153642>.
- IPCC (2021), Climate Change 2021 : The Physical Science Basis, Technical report, URL https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Kandel R., Le réchauffement climatique (Presses Universitaires de France 2019), URL <https://shs.cairn.info/le-rechauffement-climatique--9782130817031>.
- Savoca M.S., Czapanskiy M.F., Kahane-Rapport S.R., Gough W.T., Fahlbusch J.A., Bierlich K.C., Segre P.S., Di Clemente J., Penry G.S., Wiley D.N., Calambokidis J., Nowacek D.P., Johnston D.W., Pyenson N.D., Friedlaender A.S. et al. (2021), Baleen Whale Prey Consumption Based on High-Resolution Foraging Measurements, *Nature*, **599**(7883), pp. 85–90, ISSN 1476-4687, URL <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03991-5>.
- Tarascon J.M. (2023), Les batteries dans le contexte du développement durable, URL <https://www.youtube.com/watch?v=2VNb96P10Jo>.
- Tucker V.A. (1975), The Energetic Cost of Moving About : Walking and Running Are Extremely Inefficient Forms of Locomotion. Much Greater Efficiency Is Achieved by Birds, Fish—and Bicyclists, *American Scientist*, **63**(4), pp. 413–419, URL <http://www.jstor.org/stable/27845576>.
- Vernier N. & Even-Baudouin C., Thermodynamique (2020), dunod edition.