



HAL
open science

Empreinte écologique et démographique

Catherine Even, Guillaume Roux, Jacques Treiner

► **To cite this version:**

Catherine Even, Guillaume Roux, Jacques Treiner. Empreinte écologique et démographique. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 28p, 2021, 978-2-7598-2662-9. hal-03479002

HAL Id: hal-03479002

<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03479002>

Submitted on 14 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Chapitre 3

Empreinte écologique et démographie

L'[empreinte écologique](#) est souvent reprise dans les médias sous la forme du «[jour de dépassement de la Terre](#)», date à laquelle l'humanité a consommé l'ensemble des ressources que la planète peut produire en une année, l'humanité vivant donc à crédit après cette date. Ainsi, le [jour de dépassement de la Terre](#) tombait le 20 décembre en 1971, le 23 septembre en 2000, le 29 juillet en 2019 avant de se décaler exceptionnellement au 22 août en 2020 en raison de la baisse de notre consommation de ressources due à la pandémie de la Covid-19. Dans ce chapitre, nous verrons, de façon plus précise, que l'[empreinte écologique](#) vise à quantifier l'interaction entre humains et [biosphère](#) au travers des flux de production et de consommation issus de celle-ci. Notre consommation globale n'est évidemment pas sans rapport avec la population humaine, qui est passée d'environ 1,13 milliards, au début de l'ère industrielle vers 1800, à 7,8 milliards en 2021. Nous aborderons ainsi les mécanismes à la base de l'évolution démographique dans la deuxième partie de ce chapitre en montrant que pour une grande part, l'accroissement récent de la population n'a fait que refléter l'accroissement de notre espérance de vie.

3.1. Une introduction à la comptabilité environnementale : l'empreinte écologique – C. Even et G. Roux

3.1.1. La « naissance » du développement durable

Historiquement, la notion d'[empreinte écologique](#) s'est inscrite dans le concept de [développement durable](#). Pour faire court et un peu caricatural, le [développement](#)

durable est attaché à la vision onusienne du développement humain³². Après la seconde guerre mondiale, la volonté d'améliorer le bien-être humain à l'échelle mondiale s'est traduite par la création d'agences soutenant la lutte contre la faim, le contrôle de la démographie, l'éducation, la santé et la paix. Le développement économique est alors vu comme le principal levier d'amélioration des conditions de vie. Pourtant, les limites environnementales en termes de pollutions et de ressources se manifestent d'autant plus que la pression **anthropique** s'accroît.

Afin de tenter de concilier développement humain et maintien des conditions de vie, une commission mondiale sur l'environnement et le développement voit le jour au début des années 1980 et publie à son issue « Notre avenir à tous » ou « rapport Brundtland » du nom de la présidente de la commission. Ce rapport a servi de base à la préparation du sommet de la Terre à Rio en 1992, qui est généralement considéré comme une avancée majeure dans la prise en compte de l'écologie au niveau international. Le « **développement durable** » ou « soutenable » y est alors défini comme suit : « Le **développement durable** est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

Deux concepts sont inhérents au développement soutenable : le concept de « besoins », et plus particulièrement les besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. Des volontés fortes s'affirment en parallèle : une volonté d'équité ou de justice intragénérationnelle, en assurant des conditions de vie décentes au sein d'une génération, mais aussi intergénérationnelle en faisant en sorte de donner aux futures générations les moyens de garantir les mêmes conditions de vie.

Dans ce contexte, un certain nombre d'économistes ont essayé, et essaient toujours, de mesurer si nos activités humaines sont ou non soutenables. Dès 1972, avec le rapport Meadows sur les limites à la croissance économique, la plupart des indicateurs font état d'une tendance rapide au dépassement. L'**empreinte écologique**, quant à elle, a été introduite par les économistes William Rees et Mathis Wackernagel au début des années 1990 pour étudier les flux de consommation de ressources et de production de déchets pour la ville de Vancouver au Canada. Ceux-ci ont jeté les bases d'une méthode de comptabilité qui s'est ensuite étoffée et popularisée auprès du grand public avec la parution de leur livre *Our Ecological Footprint* en 1996. Leur méthode a alors été reprise par les décideurs, en particulier ceux à l'ONU, très sensibles aux approches économiques. Elle est désormais promue par

32. Encyclopédie Wikipedia : page sur le **développement durable** (https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9veloppement_durable) et sur l'**empreinte écologique** (https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_empreinte_%C3%A9cologique)

l'organisation non gouvernementale *Global Footprint*³³, créée en 2003 et qui publie annuellement la date du jour du dépassement en collaboration avec le *World Wide Fund for Nature* (WWF). La date du 31 décembre correspond ainsi à une consommation soutenable de ressources au sens de l'**empreinte écologique**. L'**empreinte écologique** fait toujours, jusqu'à aujourd'hui, l'objet de travaux universitaires qui discutent les données utiles pour les calculs ainsi que les aspects méthodologiques [1-3].

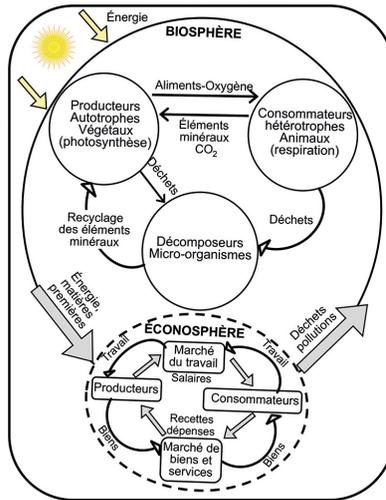


Figure 3.1: Représentation schématique de l'interaction entre **biosphère** et **écosphère** (activités humaines économiques). D'après [1].

3.1.2. Qu'est-ce que l'empreinte écologique plus précisément ?

Comme nous l'avons indiqué, il s'agit d'une approche comptable sous-tendue par une vision économique de la **biosphère** en la considérant comme pourvoyeuse d'offres en ressources naturelles, par exemple pour la production alimentaire, et capable d'assurer des services tels que l'élimination de nos déchets (voir, par exemple section 4.5). Dans ce cadre, les sociétés sont décrites par leurs activités économiques, « l'**écosphère** », extrayant des flux d'**énergie** et de matières premières de la **biosphère** et y rejetant déchets et pollutions (Fig. 3.1). L'**empreinte écologique** se propose d'établir un bilan quantitatif de ces flux annuels. La **biosphère** est capable, tous les ans, de régénérer des ressources ou d'assimiler des déchets. Prenons l'exemple d'une forêt. La quantité de bois, le stock, pousse un peu tous les ans. La gestion n'est durable que si l'on prélève au maximum ce qui est régénéré en une année. Dans le cas contraire, le stock de bois diminue avec l'éventualité de disparaître un jour. Le même raisonnement se transpose facilement à la pêche.

33. <https://www.footprintnetwork.org>

Une difficulté se pose néanmoins quand on considère la diversité des productions et des émissions liées aux activités humaines, car il devient difficile de suivre l'évolution parallèle de tous les bilans de ressources et de pollutions. Pour simplifier les analyses et essayer d'avoir un paramètre de suivi, voire de contrôle, les économistes introduisent habituellement un indice synthétique. Il s'agit d'un nombre construit pour agréger un grand nombre de quantités et censé refléter l'évolution typique d'un système. Un des indices économiques les plus connus est, par exemple, le Produit Intérieur Brut (PIB) (voir section 2.1.7). Son but est d'estimer la production économique d'un pays sur la base de données monétaires, avec plusieurs méthodes de calcul. *In fine*, il agrège de multiples contributions qui, grosso modo, correspondent aux revenus que l'on peut se partager tous les ans au niveau d'un pays.

La croissance du « gâteau à partager » est actuellement vue comme le principal levier de financement dans le développement des sociétés. Cependant, le PIB qui agrège des valeurs de nature différente, oublie nombre d'activités non monétarisées et induit parfois des biais délétères pour les sociétés, comme, par exemple, le fait que des catastrophes d'origines humaines ou naturelles sont paradoxalement susceptibles d'accroître le PIB. Il va en être de même pour l'**empreinte écologique** qui, comme indicateur agrégé, peut avoir des effets contre-productifs et omettre ou mal représenter des composantes essentielles de l'interaction entre **biosphère** et **éconosphère**. Nous reviendrons sur les limites de l'**empreinte écologique** un peu plus tard (section 3.1.6).

De manière synthétique, nous appellerons **biocapacité** l'offre en ressources naturelles renouvelables, autrement dit, la quantité des services que la **biosphère** est capable de régénérer. Le terme d'**empreinte écologique** correspondra alors à la demande en ressources naturelles renouvelables, intégrant à la fois les ressources nécessaires et la capacité à assimiler les déchets produits. Il s'agit donc de la quantité de services issus de la **biosphère** nécessaires pour faire fonctionner la sphère économique. La comparaison des deux nous dira si les activités sont soutenables ou non, comme schématisé sur la **figure 3.2**. La différence entre **biocapacité** et **empreinte écologique** définit le **déficit écologique** :

$$\text{Déficit écologique} = \text{biocapacité} - \text{Empreinte écologique}$$



Figure 3.2: Représentation schématique du **déficit écologique** comme différence entre **empreinte** et **biocapacité**. D'après https://www.youtube.com/watch?v=g_aguo7V0Q4.

3.1.3. Comment calculer l’empreinte écologique ?

Le PIB est construit sur la base de données monétaires, qu’il faut parfois corriger de l’inflation et des taux de change. Pour l’**empreinte écologique**, il va falloir agréger des données de production qui n’ont *a priori* rien à voir entre elles, et donc trouver la manière d’additionner «des choux fleurs et des carottes». La première étape de la comptabilité est donc de trouver une unité commune dans laquelle convertir les données brutes que l’on pourra alors additionner et soustraire à notre guise. Par ailleurs, la comptabilité doit se baser sur des données accessibles et régulièrement mesurées. Pour les ressources à l’échelle des pays, l’idée est d’utiliser les grands inventaires nationaux de consommation et de production (alimentaires, énergétiques...).

Les ressources, que nous utilisons, sont, pour l’essentiel, quantifiables en surfaces de sol. Par exemple, les ressources issues des forêts et de l’agriculture proviennent de la **photosynthèse**, elle-même tributaire du flux lumineux incident et donc de la surface au sol qui le reçoit. Même s’il existe évidemment des différences de **rendement** de production, une unité surfacique est donc un bon choix. C’est ainsi que l’on introduit la notion d’**hectare global**, qui va jouer le rôle de monnaie pour comptabiliser l’**empreinte écologique**. Avant de définir plus précisément ce qu’est un **hectare global**, commençons par rappeler les ordres de grandeur de différentes surfaces à avoir en tête. Tout d’abord, un hectare (noté ha) représente une superficie de 10 000 m², soit la surface d’un carré de 100 m de côté (10 000 = 100 x 100!), proche de celle d’un terrain de football, d’environ 0,7 ha.

À plus grande échelle, on exprime souvent les surfaces en km² si bien qu’il est utile de rappeler qu’un kilomètre carré vaut cent hectares (1 km² = 100 ha). En France, une exploitation céréalière gérée par une ou quelques personnes fait typiquement 100 ha. La ville de Paris intra muros fait 10 000 ha ou 100 km² ce qui correspond à un disque d’environ 5 km de rayon. La France métropolitaine fait environ 550 000 km² et comprend 100 départements, ceux-ci font donc typiquement 550 000/100 = 5 500 km². Passons à l’échelle planétaire, la Terre est une sphère de rayon R = 6 400 km environ si bien que la surface totale de la Terre ($4\pi R^2$) est de 510 000 000 km² = 510 Mkm² = 51 Gha où les lettres M et G correspondent respectivement à Mega (million ou 10⁶) et Giga (milliard ou 10⁹). Le plus grand pays, la Russie, s’étend sur une surface de 17 Mkm², les autres grands pays, le Canada, les États-Unis, la Chine, le Brésil, l’Australie et l’ensemble des pays européens (jusqu’à l’Oural) ont des surfaces de l’ordre de 7-10 Mkm².

Si on regarde maintenant la surface typique par habitant, pour les 66 millions de français, elle est d’environ 0,8 ha par personne ! La densité de population est simplement l’inverse de ce chiffre, soit 1,2 personne/ha ou 120 personne/km², ce qui est d’ailleurs proche de la moyenne mondiale. C’est sur ces 0,8 ha que nous devons tirer nos ressources renouvelables (bois, cailloux, alimentation, eau, etc.), c’est-à-dire un terrain de football par personne ! En réalité, il s’agit d’une moyenne, car nous savons

tous que la population est inégalement répartie sur le globe avec de très fortes densités en ville (2 millions de parisiens sur 100 km², soit 20 000 personnes/km²) et des densités beaucoup plus faibles à la campagne. Cela souligne la forte dépendance des villes en termes de surfaces productives.

À ce stade, il va nous falloir relier les productions aux surfaces et c'est ici qu'intervient la notion d'**hectare global**. Les surfaces directement utiles au sens économique sont appelées **surfaces bioproductives**. Les productions issues des surfaces exploitées par l'homme sont très diverses et difficilement comparables : bois, céréales, élevage, pêche, **énergie**, etc. Le point clé est donc de définir une « utilité » relative de ces différentes surfaces pour les humains. Pour l'**empreinte écologique**, nous allons considérer qu'un hectare de céréales a une plus forte utilité productive qu'un hectare de pâturage, de pêche ou de forêt, car il produit une alimentation de base pour la population ou le bétail. L'**hectare global** (en abrégé hag) permet de tenir compte de la valeur bioproductive de l'hectare considéré (ha) en le comparant à un hectare typique de référence. Autrement dit, la superficie d'une surface bioproductive, exprimée en hag, s'obtient en multipliant la surface réelle (en ha) par un facteur, appelé **facteur d'équivalence**, qui traduit son utilité relative par rapport à une surface typique de référence :

$$\text{Surface bioproductive (hag)} = \text{Facteur d'équivalence [hag/ha]} \times \text{Surface en hectares [ha]}$$

La liste des facteurs d'équivalence est rapportée dans le **tableau 3.1**. Comme nous l'avons mentionné, un champ cultivé possède un **facteur d'équivalence** supérieur à 1 et supérieur à celui de pâturages ou de forêts. Ces facteurs d'équivalence sont basés sur des calculs de l'organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture *Food and Agriculture Organisation* (FAO).

Type de surface	Facteur d'équivalence [hectare global par hectare]
Champs cultivés	2,51
Forêts	1,26
Pâturages	0,46
Pêcheries	0,37
Surfaces urbanisées	2,51

Tableau 3.1 : Facteurs d'équivalence en 2013 des surfaces qui permettent la conversion d'hectares en hectares globaux. D'après [4].

En fait, les facteurs d'équivalence dépendent du nombre total d'hectares globaux que l'on se fixe. Le choix, qui s'est imposé, a été de prendre pour nombre total d'hectares globaux le même que celui des **surfaces bioproductives** effectivement

disponibles. La [figure 3.3](#) permet de relier les nombres d'hectares globaux aux nombres d'hectares réels pour les principales [surfaces bioproductives](#). Le nombre total d'hectares définit la [biocapacité](#) mondiale de la planète, laquelle peut varier avec le temps. Par exemple, la désertification peut transformer des terres productives en terres non-productives. D'après la [figure 3.3](#), la [biocapacité](#) mondiale est de l'ordre de 12 000 millions d'ha soit 12 Ghag, soit environ 1,6 hag par habitant. Pour se donner une idée, cela représente un peu moins de 25% de la surface du globe. Rappelons que l'océan représente 71% de la surface du globe et que les terres habitables représentent moins de 20% de la surface.

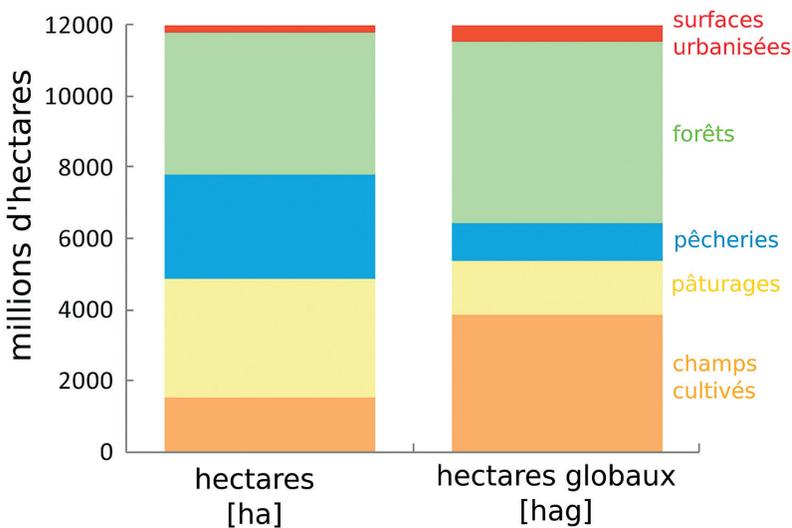


Figure 3.3 : Hectares de surfaces utiles pour l'humanité et équivalence en termes d'hectares globaux. Le nombre total est le même, mais la proportion relative tient compte de l'utilité des surfaces *via* le [facteur d'équivalence](#). D'après [4].

À l'échelle d'un pays ou de régions géographiques plus petites, la [biocapacité](#) va tenir compte du [rendement](#) local des productions. Par exemple, en France, les [rendements](#) de blé, c'est-à-dire, la production de blé par hectare, sont supérieurs à ceux de la moyenne mondiale. Nous prendrons cela en compte par un [facteur de rendement](#) sans dimension :

$$\text{biocapacité locale} = \text{Facteur de rendement} \times \text{Facteur d'équivalence} \times \text{Surface allouée}$$

On additionne ensuite toutes les contributions pour obtenir la [biocapacité](#) d'un pays. Notons que les terrains bâtis sont souvent comptés avec le même [facteur d'équivalence](#) que les champs cultivés. En fait, la plupart des terres urbanisées le sont au détriment de terres fertiles; en supprimant virtuellement les bâtis, le pays pourrait ainsi récupérer des surfaces à haute valeur bioproductive. Ceci explique le choix retenu.

Venons-en maintenant au calcul de l'**empreinte écologique**. Il s'agit de comptabiliser toutes les ressources consommées. Pour les ressources renouvelables, le comptage se fait directement, ressource par ressource. Le calcul de l'**empreinte écologique** sur le périmètre d'un pays nécessite de compter les besoins réels du pays en prenant en compte les importations et les exportations pour aboutir à la consommation nette :

$$\text{Consommation nette} = \text{Production} + \text{Importations} - \text{Exportations}$$

On utilise ensuite le même **facteur d'équivalence** que pour le calcul de la **biocapacité**, ce qui conduit à la formule :

$$\text{empreinte [hag]} = \frac{\text{consommation nette [t/an]}}{\text{rendement moyen [t/ha/an]}} \times \text{facteur d'équivalence [hag/ha]}$$

Le **rendement**, qui intervient ici dans la formule, est le **rendement** moyen mondial pour la production de la ressource considérée.

Notons qu'en l'absence d'importations et d'exportations, il peut y avoir une différence entre l'**empreinte écologique** et la **biocapacité** dans le cas où un pays n'exploite pas au maximum la production renouvelable ou, à l'inverse, s'il y a **surexploitation** comme dans le cas de la surpêche. Cela étant, assez souvent, l'**empreinte écologique** associée à la consommation d'une ressource renouvelable par les humains est très proche de la **biocapacité** lorsqu'on applique la méthode de calcul qui est présentée. Pour les terrains bâtis, l'empreinte est, en fait, exactement la même que la **biocapacité**, car on utilise le même **facteur d'équivalence**. En revanche, une différence significative peut apparaître concernant le couvert forestier, car une forêt inexploitée apparaît dans la **biocapacité** alors que l'empreinte associée à la consommation de cette ressource est nulle.

3.1.4. Calcul de l'empreinte carbone

Nous ne détaillerons pas les spécificités de calcul pour chacune des ressources renouvelables, mais nous nous concentrerons ici sur la part la plus importante de l'**empreinte écologique** actuelle, à savoir l'empreinte carbone. Celle-ci est liée à nos émissions de CO₂, considérées comme « déchets ». La grande majorité de nos émissions de CO₂ est due à l'utilisation des **énergies fossiles** : charbon, pétrole et gaz. Ces trois sources d'**énergie** ont pour point commun de contenir du carbone, d'où le nom d'empreinte carbone. Leur utilisation la plus courante consiste à les brûler, ce qui produit l'**énergie** dont on se sert, mais aussi du CO₂, qui apparaît donc comme un sous-produit de la combustion. On peut résumer de manière très simple la transformation globale par la réaction chimique suivante :



Rappelons que les trois **ressources fossiles** confondues représentent 80% de l'**énergie** primaire utilisée dans le monde : elles constituent nos sources principales d'**énergie** (voir section 2.1.6) !

Comment quantifier nos émissions de CO₂ en termes de surface ? Les **ressources fossiles**, qui se trouvent dans le sous-sol, et non en surface comme les arbres, n'occupent pas directement une surface de sol bioproductif. La seule solution consiste alors à estimer la surface bioproductive nécessaire pour assimiler le CO₂, le déchet produit par leur utilisation :

$$\text{surfaces fossiles [ha]} = \text{émissions de CO}_2 \text{ [tCO}_2\text{]} \times \frac{(1 - \text{fraction absorbée})}{\text{ration de séquestration [tCO}_2\text{/ha]}}$$

Les **surfaces bioproductives** considérées sont des espaces forestiers censés jouer le rôle de **puits de carbone**, ce qui amène, dans la formule, à retrancher des émissions de CO₂ celle qui sera absorbée par les océans. Le **ratio de séquestration** tient compte, par ailleurs, de la masse de CO₂ absorbée par hectare de sol. En 2017, il était de 3,56 tonnes.

L'empreinte carbone se calcule ensuite par la formule :

$$\text{Empreinte carbone (hag)} = \text{Surfaces fossiles (ha)} \times \text{Facteur d'équivalence forestier (hag/ha)}.$$

où le **facteur d'équivalence** forestier prend en compte le fait que toutes les forêts ne sont pas identiques. On aboutit ainsi à une formulation globale similaire à celle de l'**empreinte écologique** pour les ressources renouvelables : la quantité de déchets CO₂ se substitue à la quantité de ressources consommées, le **ratio de séquestration** remplace le **rendement** de production des ressources, un **facteur d'équivalence** intervient dans les deux cas.

3.1.5. Déficit écologique mondial

Globalement, pour l'année 2019, les résultats du calcul de l'**empreinte écologique** et de la **biocapacité** au niveau mondial se résument comme suit :

- **Biocapacité** : B = 12,2 Ghag
- **Empreinte écologique** : E = 21,2 Ghag.

L'écart relatif entre les deux valeurs, soit (E - B)/B, est de 74%. Dit autrement, l'empreinte dépasse la **biocapacité** de 74%. On est donc dans une situation de fort **déficit écologique**. On pourrait quantifier ce déficit en se disant qu'il aurait fallu 74% de surface supplémentaire pour faire face aux besoins de l'humanité, soit 1,74 planète. Faisons maintenant le lien avec le jour du dépassement de la Terre (J) dont nous avons parlé au début de ce chapitre. On utilise pour cela une simple règle de

trois : $J = B \times 365 / E = 210$. Pour l'année 2019, il s'agit donc du 210^e jour de l'année, soit le 29 juillet, qui est le jour du dépassement.

La décomposition de l'**empreinte écologique** suivant les différents types de ressource (ou de déchet) met en évidence une forte composante carbone de l'ordre de 60% (Fig. 3.4). La **biocapacité** forestière n'est pas suffisante pour compenser l'empreinte carbone qui est la principale cause du dépassement planétaire dans cette analyse. On constate, par ailleurs, que tous les secteurs d'activité économique contribuent significativement à l'**empreinte écologique** globale, laquelle a été multipliée par 3 en 50 ans.

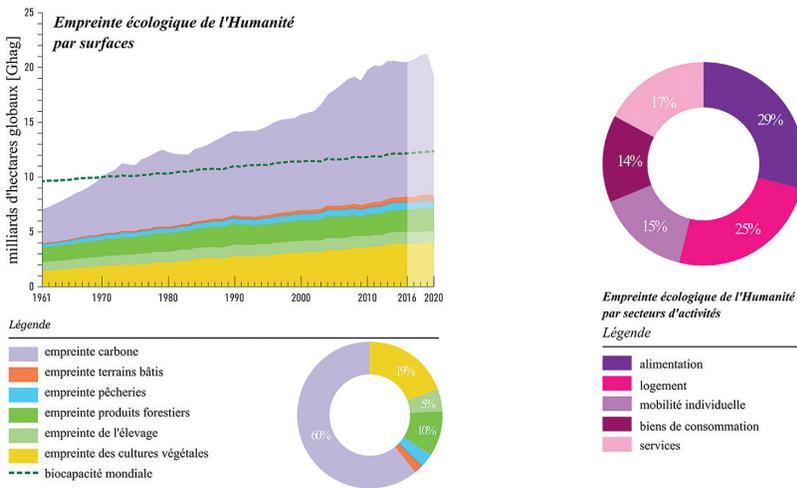


Figure 3.4 : Évolution de l'**empreinte écologique** de l'humanité depuis 1961 par type de surface (à gauche) et par secteur d'activité (à droite). D'après [5,6].

Si l'on fait maintenant le bilan au niveau des pays, la diversité rencontrée aussi bien en termes de **biocapacité** que d'**empreinte écologique** conduit à des situations de crédit (en bleu sur la figure 3.5) ou de dette écologique (en rouge sur la figure 3.5). Les grands pays avec de grands couverts forestiers bénéficient de la **biocapacité** associée qui tend à les mettre en crédit pour la plupart d'entre eux (Canada, Brésil, Russie, Australie, ...). Néanmoins, les États-Unis et la Chine ont des consommations telles, qu'ils sont en déficit malgré des ressources abondantes.

Les pays (ou régions) très développés, dont les niveaux de consommation des ressources sont élevés, sont en dette en raison à la fois de leur mode de vie et de leur population (Europe, USA, Chine). Seuls quelques pays développés mais peu peuplés sont en crédit (Scandinavie, Australie, Canada, Nouvelle-Zélande). Implicitement, il y a une forte interdépendance des économies et des ressources à l'échelle internationale, avec un poids fort des importations pour les régions comme l'Union Européenne [6].

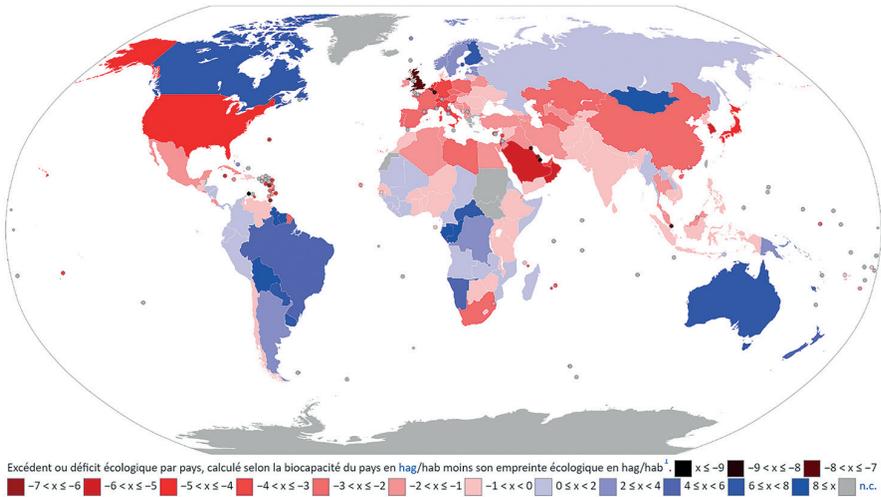


Figure 3.5 : Carte des déficits écologiques selon les pays, établie à partir des données de l'année 2013. Les pays en crédit sont en bleu, les pays en dette ont en rouge. Figure adaptée³⁴.

Bien que l'analyse présente un certain nombre de biais et de limites (voir section 3.1.6), elle fait apparaître des problématiques générales du **développement durable**, que l'on retrouve également à partir d'autres indicateurs qui mesurent l'impact humain sur l'état de la planète. Le mode de vie et de consommation associé à des revenus élevés est à l'origine d'un fort impact écologique, que cela soit moyenné à l'échelle d'un pays (figure 3.6) ou à l'échelle individuelle dans le même pays [5]. L'empreinte par habitant peut ainsi varier typiquement d'un facteur 1 à 6 suivant le PIB des pays, sans évoquer des cas extrêmes comme pour les pays du Golfe.

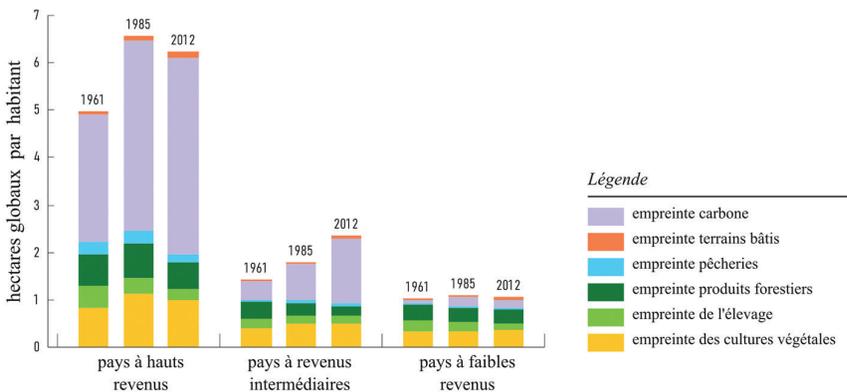


Figure 3.6 : Empreinte écologique par habitant pour des pays qui diffèrent par leurs PIB ou leurs revenus. D'après [6].

34. <https://data.footprintnetwork.org/>

3.1.6. Limites de l'analyse basée sur l'empreinte écologique

Si l'**empreinte écologique** a historiquement joué un rôle important comme indice de mesure de la **soutenabilité des économies**, elle présente néanmoins un certain nombre de biais. Par exemple, un pays peut augmenter sa **biocapacité** en convertissant de la forêt primaire en champs cultivés dont le **facteur d'équivalence** est supérieur, même si cela a un coût en termes d'empreinte carbone. Bien évidemment, dans ce choix de conversion, l'accroissement de l'empreinte carbone et la perte de **biodiversité** peuvent s'avérer être bien plus dommageables à long terme que le gain économique de productivité.

L'**empreinte écologique** ne permet pas non plus d'appréhender les liens entre les différents enjeux écologiques. Par exemple, la **biocapacité** peut être augmentée en améliorant les **rendements** agricoles par des **intrants** chimiques alors qu'ils conduisent *in fine* à de la pollution mal prise en compte dans l'**empreinte écologique**, les émissions de CO₂ restant la pollution la plus facilement quantifiable.

Enfin, les grands cycles géochimiques (eau, azote, oxygène...) interviennent simultanément dans de nombreuses composantes de l'**empreinte écologique**. Cette intrication a conduit les chercheuses et les chercheurs à proposer de nouveaux outils de quantification de la soutenabilité, notamment ceux basés sur les limites planétaires [7].

3.1.7. En guise de conclusion ?

Un dernier graphique (Fig. 3.7) permet de résumer à quel point le **développement durable**, ou soutenable, tel que défini en 3.1.1, reste aujourd'hui un défi majeur de civilisation. Ce graphique positionne simultanément les différents pays du monde selon leur **indice de développement humain** (IDH) et leur niveau d'**empreinte écologique**. Rappelons que l'IDH prend non seulement en compte le PIB du pays, mais aussi le niveau d'éducation et l'espérance de vie des habitants. On constate que les pays à fort IDH ont des développements non soutenables tandis que les pays à faible **empreinte écologique** par habitant ont des IDH à un niveau jugé non acceptable. Pour l'année 2014, date à laquelle le graphique a été établi, aucun pays ne combinait simultanément un IDH élevé et une faible **empreinte écologique**.

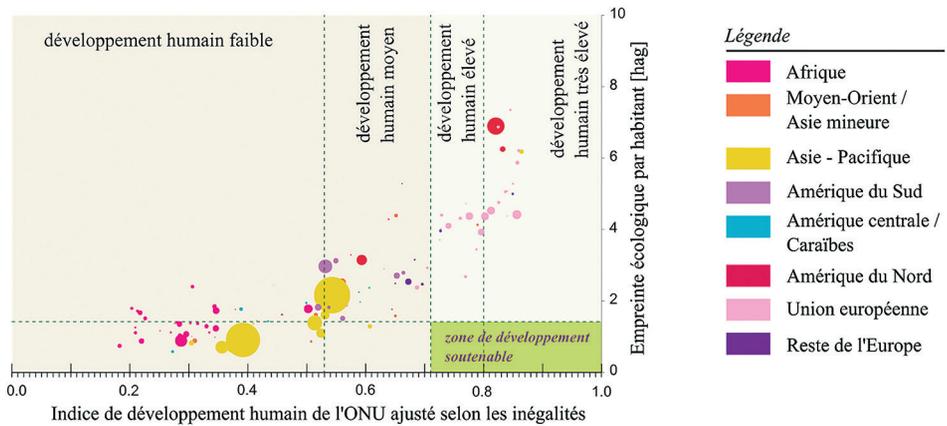


Figure 3.7 : Représentation simultanée de l'indice de développement humain (IDH) et de l'empreinte écologique des différents pays du monde. L'IDH, porté en abscisse sur le graphique, a été ajusté par l'ONU selon les inégalités. Le niveau d'empreinte écologique est porté en ordonnée. À chaque pays est associé un rond dont la taille est en rapport avec la population du pays et dont la couleur indique la région du monde où le pays se situe. D'après [6], rapport de 2014. https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_IDH_ajust%C3%A9_selon_les_in%C3%A9galit%C3%A9s.

3.2. Combien serons-nous en 2050 ? – J. Treiner et G. Roux

L'accroissement rapide de la population humaine au cours des deux derniers siècles soulève bien souvent des peurs. Celles-ci se cristallisent principalement autour des questions migratoires d'une part, et des impacts environnementaux d'autre part [8]. Ces peurs apparaissent d'autant plus paradoxales que l'accroissement de la population est généralement associé à des progrès qui ont été recherchés et soutenus : progrès médicaux, agricoles, techniques et sociétaux. Nous visons avant tout ici à présenter les motivations de l'approche démographique, ses indicateurs et les grandes lignes de l'évolution historique ancienne et récente de la population mondiale. Nous discuterons en particulier les notions de **transition démographique** ainsi que les projections onusiennes pour le XXI^e siècle. Le but est bien de comprendre les paramètres clés qui gouvernent l'évolution de la population.

3.2.1. Combien avons-nous été dans le passé ?

Des estimations ont été faites, avec plus ou moins de précisions, pour l'ensemble de la planète. La reconstruction globale, depuis la fin de la dernière époque glaciaire, est représentée en **figure 3.8**. On distingue un premier changement de régime, vers -40 000, associé à diverses améliorations techniques du Paléolithique supérieur, puis un deuxième amorcé vers -7 000, lié à la révolution néolithique et prolongé par divers progrès techniques tel le développement des premières machines (ex : les moulins), et enfin une montée quasi verticale (à cette échelle) associée à la révolution

industrielle. Notons que les trois changements de régime ont été le résultat de progrès successifs dans l'appropriation des ressources énergétiques (outils, agriculture et élevage, sciences).

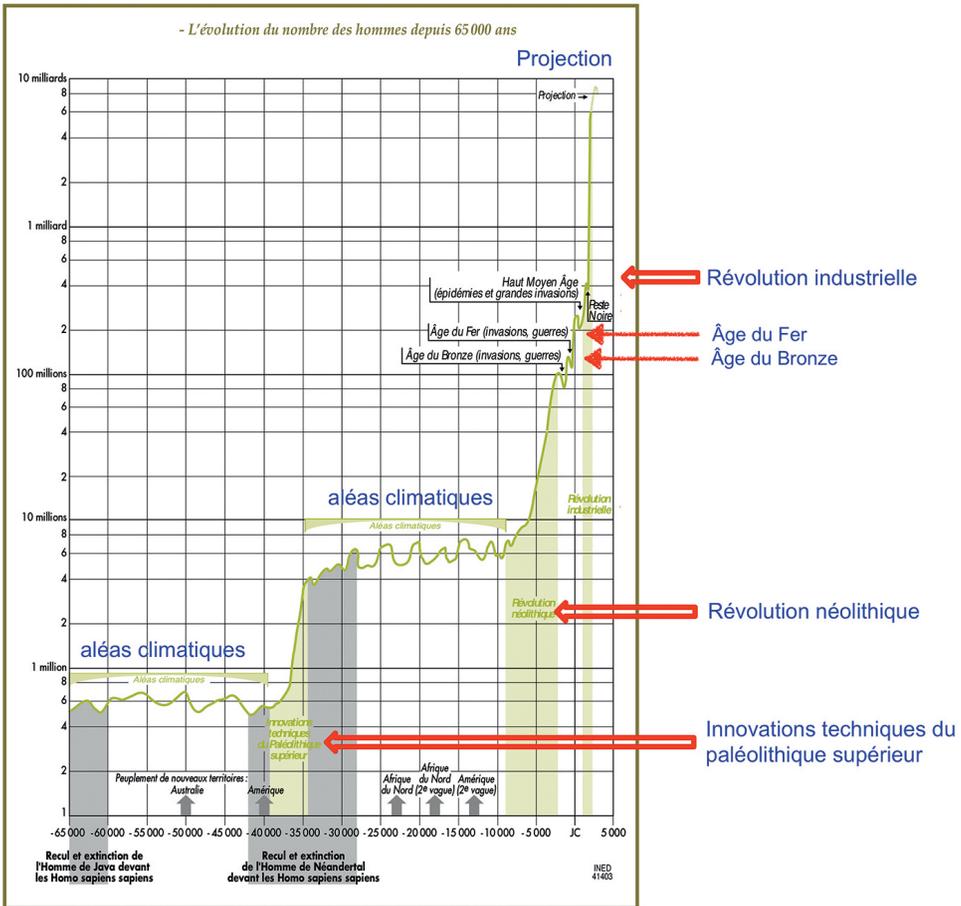


Figure 3.8 : Évolution de la population mondiale, en millions d'habitants, depuis la fin de la dernière période glaciaire. D'après J.N. Biraben, Population et Société, n° 394, oct. 2003 [9].

Il y a quelque chose de vertigineux dans la croissance quasi verticale entamée voici deux cents ans. Pour tenter d'y voir plus clair, dilatons l'échelle des temps récents. On obtient alors le graphique de la [figure 3.9](#), qui présente à la fois l'évolution récente et les projections de l'ONU jusqu'en 2100. Jusque vers 1950, on constate d'ailleurs que la croissance est plus rapide que celle d'une fonction exponentielle, qui correspondrait à une croissance constante.

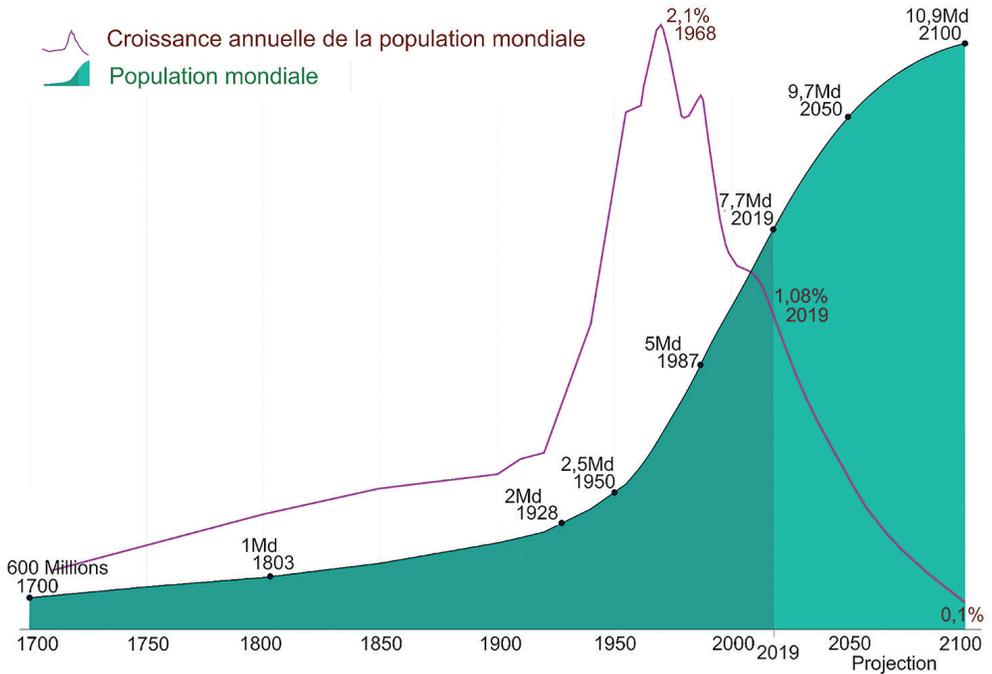


Figure 3.9: Évolution de la population mondiale, en milliards d'habitants, au cours des temps modernes³⁵.

Typiquement, une évolution exponentielle est caractérisée par un temps de doublement qui est une constante. Autour de 1960, la population était de 3 milliards et ce temps de doublement était de l'ordre de 35 ans qui correspond à une croissance de 2%. Si cette croissance avait été maintenue, la population mondiale aurait été 140 ans plus tard, en 2100, multipliée par 16, soit 48 milliards! Cette extrapolation soulevait bien des peurs à l'époque. Mais cela ne s'est pas produit. Depuis les années 1960, la croissance de la population diminue rapidement. Certes, la population continue d'augmenter, mais les projections sont aujourd'hui autour de 11 milliards en 2100. Comment expliquer cela? Pour le comprendre, regardons comment travaillent les démographes qui établissent ces projections.

3.2.2. La transition démographique

Pour asseoir leur opinion, les démographes s'appuient sur ce qui a été observé dans toute société qui passe d'un état peu développé – sur le plan scientifique, technique et éducatif – à un état de richesse relative; ce qu'ils appellent la *transition démographique*.

35. <https://ourworldindata.org/world-population-growth>

Les deux paramètres qui régulent de façon globale l'évolution d'une population sont le *taux de naissance* et le *taux de mortalité*. Ces taux sont souvent exprimés en nombre de naissances ou de décès par an pour 1000 habitants. Comment dépendent-ils de l'état de la société ?

Dans une société peu développée, ces deux taux sont élevés. Le taux de naissance est élevé, car rien ne vient entraver les possibilités naturelles de se reproduire. Ainsi, il n'était pas rare, au XIX^e siècle ou au début du XX^e siècle, qu'une femme mette au monde plus de dix enfants. Le taux de mortalité est également élevé, notamment au cours des premières années de la vie. Hygiène déficiente, soins médicaux inexistantes et environnement hostile expliquent une espérance de vie réduite. Celle-ci était typiquement de 30 à 35 ans dans l'Antiquité. La mortalité périnatale reste élevée pendant longtemps au cours de l'Histoire : naître est toujours un événement à risque. Par exemple, en France, dans les années 1875, plus de 15 % des bébés mourraient dans leur première année.

Si les taux de natalité et de mortalité sont élevés, le taux de croissance de la population, égal à leur différence, reste faible : la population reste stable ou augmente lentement.

Avec le développement de l'hygiène et de la médecine, la mise à disposition d'une eau propre, puis l'introduction d'antibiotiques et de vaccins, le taux de mortalité périnatal diminue. En 1975, toujours en France, le taux de mortalité périnatal n'était plus que de 11 pour 1 000, et en 2004 il était de 3,4 pour 1 000. Ces progrès accompagnent souvent une amélioration des conditions générales de vie qui diminue aussi les causes de mortalité à tout âge.

Qu'en est-il du taux de naissance ? Si l'abaissement du taux de mortalité relève de progrès essentiellement techniques, en revanche, avoir des enfants a une dimension culturelle, ancrée profondément. Dans une première phase, le taux de naissance reste donc élevé. En conséquence, avec un taux de mortalité qui diminue, le taux de croissance de la population augmente rapidement, et donc la population également.

Dans une deuxième phase, l'amélioration des conditions de vie, le désir de scolariser les enfants, le prolongement de la durée des études scolaires et l'augmentation de leur coût, et surtout l'élévation du niveau culturel des femmes, tous ces facteurs conduisent à vouloir contrôler la venue des enfants par l'utilisation de moyens contraceptifs : le taux de naissance se met à diminuer. Petit à petit, un nouvel équilibre s'établit, où le taux de mortalité et le taux de fécondité sont faibles. Et où par conséquent la population n'évolue plus. *La transition démographique, c'est précisément ce passage d'une situation où les taux de natalité et de mortalité sont élevés, à une situation où ils deviennent faibles.* Ces différentes tendances, schématisées sur la [figure 3.10](#), expliquent comment la période de forte croissance d'une population est en général suivie d'une stabilisation.

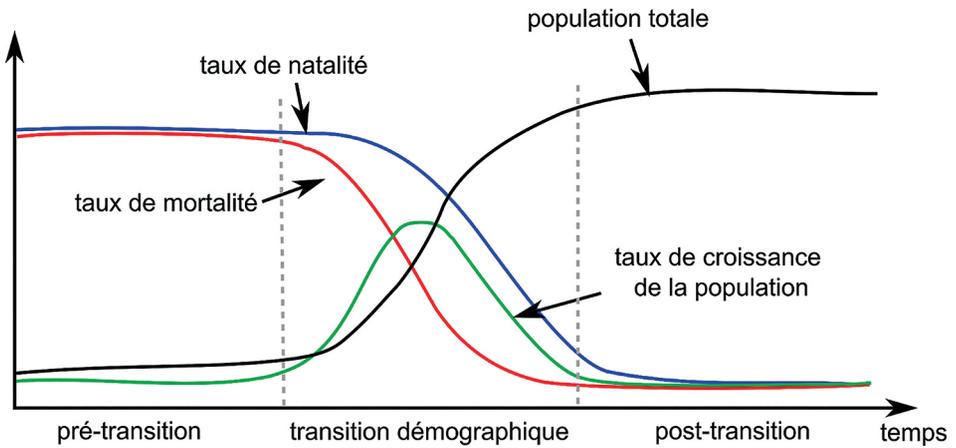


Figure 3.10: Schéma illustrant la **transition démographique** résultant des variations respectives du taux de naissance, du taux de mortalité et du taux de croissance de la population. La population totale atteint un palier après la transition. Seule l'allure des courbes importe ici³⁶.

3.2.3. Et après la transition démographique ?

La **figure 3.10** illustre un cas schématique où, après la **transition démographique**, les taux de naissance et de mortalité s'égalisent, le taux de croissance s'annule. Par conséquent, la population atteint un palier. Mais en réalité, aucun mécanisme démographique n'oblige les deux taux à s'égaliser ! Il se peut très bien que, après la transition, le taux de naissance l'emporte, auquel cas la population continue d'augmenter, ou que le taux de mortalité l'emporte, auquel cas la population passe par un maximum et diminue. Ces trois cas possibles sont en fait présents dans les dernières projections de l'ONU présentées sur la **figure 3.11**.

Il faut donc revenir à notre question initiale, et nous demander, compte tenu des connaissances que nous avons de la **transition démographique** dans les différents pays, ce que nous pouvons anticiper concernant la population mondiale. Un bon indicateur global est fourni par le *taux de fécondité*, c'est-à-dire le nombre d'enfants qu'une femme a, en moyenne, au cours de sa vie. En principe, un taux de fécondité de 2 est nécessaire pour assurer le maintien de la population à long terme. En effet, il y a en moyenne autant de femmes que d'homme, donc pour chaque femme qui meurt, un homme meurt. Pour assurer le renouvellement de la population, il faut que, en moyenne, chaque femme compense ces deux décès³⁷.

36. https://fr.wikipedia.org/wiki/Transition_démographique

37. En réalité, le taux de fécondité doit être légèrement supérieur à 2, pour tenir compte des filles qui décèdent par accident ou maladie au cours de leur jeunesse, avant d'avoir pu avoir des enfants, ou qui sont stériles, ou dont les conjoints sont stériles.

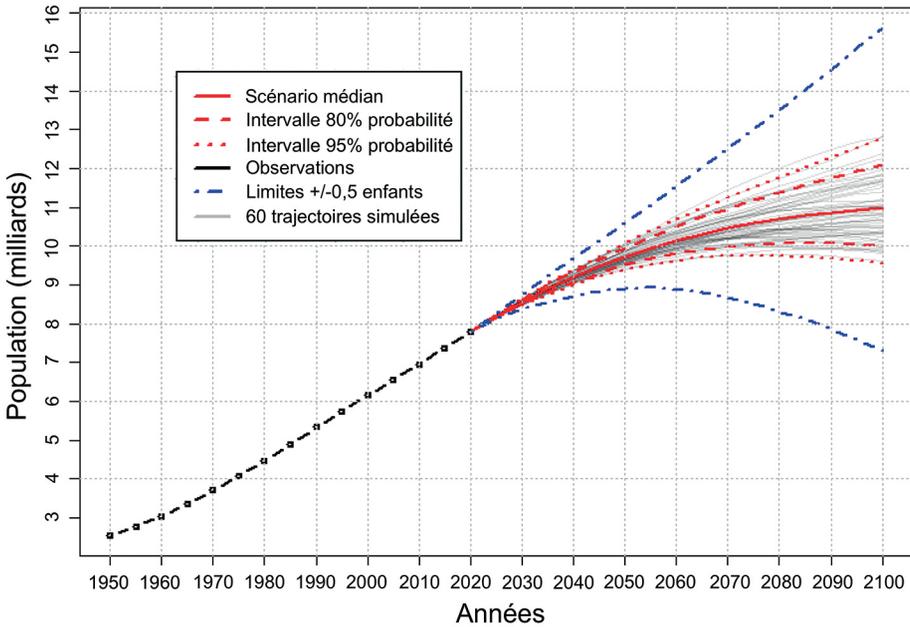


Figure 3.11: scénarios possibles pour la population mondiale. Le scénario le plus probable présente un maximum vers 2100 mais ce maximum peut se produire également plus tôt au XXI^e siècle³⁸.

Dans les sociétés traditionnelles, le taux de fécondité est largement supérieur à 2. Or, on constate que la tendance générale, dans tous les pays, est à une diminution de ce taux au cours du temps. Il peut même passer franchement en dessous de 2. C'est le cas, en Europe, pour pratiquement tous les pays. La France et l'Irlande ont fait pendant longtemps figure d'exception, mais les taux de fécondité viennent récemment d'y passer en dessous de 2. À l'échelle du monde entier, les disparités sont encore bien plus grandes. Il convient à présent d'entrer dans le détail de la structure en âge des populations.

3.2.4. La pyramide des âges

Le « bon » outil pour discuter des questions de population est la **pyramide des âges**. L'Institut National d'Études Démographiques (INED) donne accès sur son site³⁹ aux pyramides des âges de tous les pays du monde.

Commençons par examiner la pyramide d'un pays qui n'a pas fait sa **transition démographique** : l'Éthiopie (Fig. 3.12). Cette représentation indique, pour les femmes (partie droite) et pour les hommes (partie gauche), le nombre d'individus (en milliers) par tranche d'âge (ici, des tranches d'un an). Deux indicateurs supplémentaires sont

38. Site de l'ONU consacré à la population : <https://population.un.org/wpp/>

39. Simulateur de population de l'ined : https://www.ined.fr/_modules/SimulateurPopulation/?lang=fr

accessibles : le taux de fécondité : 3,95 enfants par femme en moyenne, l'espérance de vie : 67,3 ans. Cette pyramide est caractéristique d'un pays pauvre, avant la [transition démographique](#). Le taux de fécondité est élevé, mais le taux de mortalité aussi, ce qui se voit à la pente des côtés : on ne retrouve pas, à l'âge n , le nombre de vivants de l'âge $n-1$.

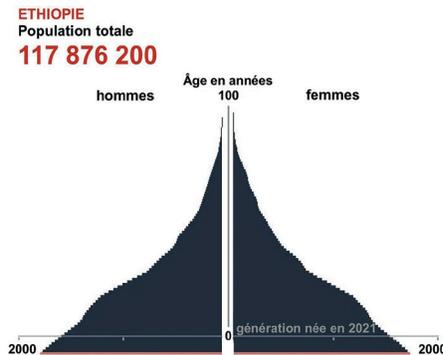


Figure 3.12: [Pyramide des âges](#) de l'Éthiopie. Source : INED.

Par comparaison, considérons le cas de l'Inde ([Fig. 3.13](#)). Le taux de fécondité est plus faible (2,16 enfants par femme), l'espérance de vie plus élevée qu'en Éthiopie (70,1 ans). De plus, on constate que, manifestement, une évolution s'est amorcée il y a une vingtaine d'années, avec plusieurs années où le taux de naissance a diminué (rétrécissement de la base de la pyramide) : c'est l'amorce de la [transition démographique](#).

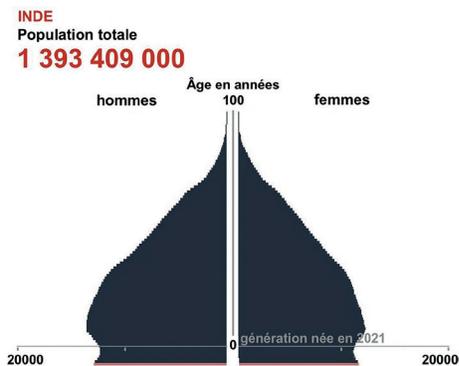


Figure 3.13: [Pyramide des âges](#) de l'Inde. Source : INED.

Voyons enfin, pour contraster, le cas d'un pays développé comme la France ([Fig. 3.14](#)). La première caractéristique, c'est que cette pyramide... n'est manifestement pas une pyramide. Il s'agit plutôt du profil d'une maison, avec des murs presque verticaux, et un toit pentu. La pointe du toit, c'est l'âge maximum atteint, puisqu'il

faut bien mourir ! Cette forme indique que le poids des seniors, dans l'ensemble de la population, est bien supérieur à ce qu'il est dans les deux exemples précédents : la population, globalement, vieillit, et tous les débats actuels concernant l'âge de la retraite et le montant des pensions sont liés à ce vieillissement. L'espérance de vie à la naissance est aujourd'hui de près de 82,9 ans, sexes confondus.

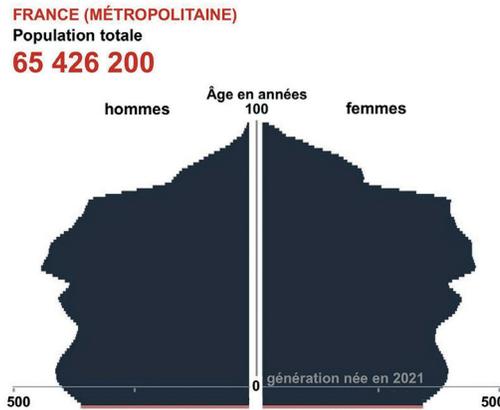


Figure 3.14 : La pyramide des âges en France aujourd'hui. Source : INED³⁸.

Les grands événements de l'histoire d'un pays se lisent sur sa « pyramide », et vous êtes invités à lire la trace des guerres et des *baby booms* sur les figures. Exemple : un baby-boom se traduit par une bosse dans la pyramide, laquelle se reproduit 25 ans plus tard, puisqu'il y a plus d'adultes capables de faire des enfants. Le taux de fécondité est actuellement de 1,84 en France métropolitaine⁴⁰, ce qui n'assure pas tout à fait le renouvellement de la population. Mais ce taux est de 2,2 dans les départements et territoires d'outre-mer.

On ne saurait trop vous inviter à consulter le site de l'INED pour explorer pays et régions du monde.

3.2.5. Le « Jeu de la population »

Comment évolue une pyramide des âges au cours du temps ? Gilles Pison, démographe et Directeur de rédaction de la revue *Population et Sociétés*⁴¹, a élaboré un outil interactif remarquable, le Jeu de la population³⁸, qui permet de visualiser les projections de population des experts de l'ONU³⁷. Prenons le cas de l'Inde. Les projections pour 2035 et 2050 aboutissent aux pyramides de la figure 3.15.

40. https://www.ined.fr/fichier/s_rubrique/29847/popu_1904_conjoncture_9.12.fr.pdf
https://www.ined.fr/fichier/s_rubrique/30029/575.population.societes.fecondite.mars2020.france.europe.fr.pdf

41. <https://www.ined.fr/fr/publications/editions/population-et-sociétés/>

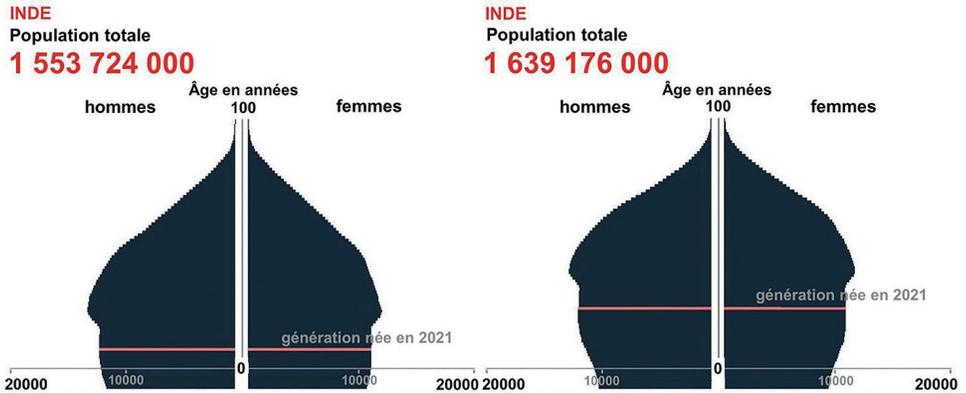


Figure 3.15: Pyramides des âges de l'Inde en 2035 (à gauche) et 2050 (à droite). Source: INED.

L'amorce de la [transition démographique](#) de la figure 3.13 se confirme au cours du siècle. Le taux de fécondité devrait passer en dessous de 2 (1,95 en 2035, 1,80 en 2050). La courbe de population totale laisse présager le passage par un maximum suivi d'une diminution, tandis que l'espérance de vie augmente et atteint 75 ans au milieu du siècle.

Qu'en est-il pour le monde dans son ensemble ? Les projections de l'ONU indiquent nettement une [transition démographique](#) globale. Bien que le résultat additionne des situations très différentes les unes des autres, la projection a tout de même un sens: elle indique que la [transition démographique](#) est attendue dans tous les pays (Fig. 3.16).

Le taux de fécondité global diminue: 2,43 en 2021, puis 2,19 en 2050 (et même 1,93 en 2100). L'espérance de vie passe de 72,9 ans en 2021 à 77,1 en 2050 (et 81,9 en 2100).

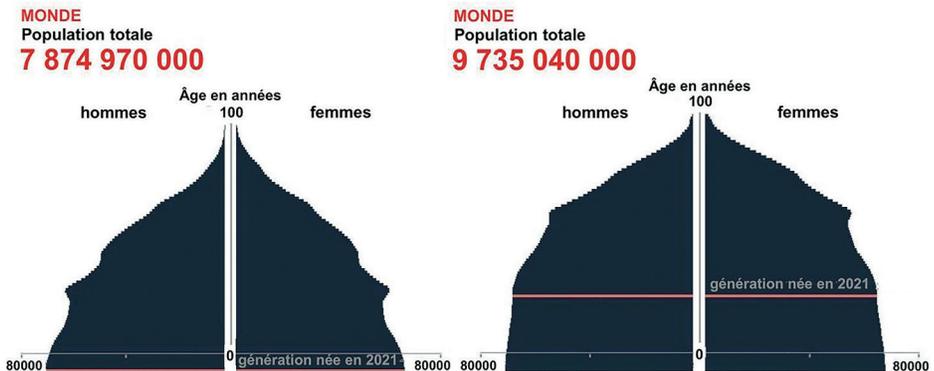


Figure 3.16: Évolution de la [pyramide des âges](#) du monde globalisé. À gauche : 2021. À droite : 2050.

Le simulateur indique également que la courbe de population globale a sa concavité dirigée vers le bas : on s'attend donc à ce qu'elle passe par un maximum au voisinage de 10 milliards d'individus, puis qu'elle diminue. Mais quelle confiance faut-il donner à ces projections ?

3.2.6. Comment ça marche ?

Le principe n'est pas très compliqué, et quand on l'a compris, on peut soi-même, sur un tableur, se faire son propre programme et explorer ses propriétés.

Le pas élémentaire consiste à faire évoluer d'un an une tranche d'âge. Il est clair que la population d'une tranche d'âge aura, l'année suivante, un an de plus – Monsieur de la Palisse le savait déjà. N'oublions pas, cependant, qu'à chaque âge, certaines personnes décèdent – accident ou maladie. Il faut donc connaître le *taux de mortalité par âge*. Les démographes, par des études statistiques, établissent ces tables de mortalité. Elles permettent, pour chaque âge, de déterminer le nombre moyen de personnes qui vont décéder dans l'année : il suffit de multiplier le taux de mortalité de la tranche d'âge en question par le nombre d'individus qu'elle contient.

Bien. Mais cela ne dit pas comment remplir la première tranche d'âge, celle correspondant aux nouveau-nés de l'année. En effet, pour cela, il faut connaître les *taux de naissance par âge*. C'est à nouveau le travail des démographes que de les mesurer statistiquement. À chaque âge, entre disons 15 ans et 50 ans, les femmes peuvent enfanter. La [figure 3.17](#) représente, par exemple, l'évolution du nombre de naissances vivantes pour 100 femmes de chaque âge, de 1991 à 2011, ainsi que celle des mortalités par âge pour 1 000 femmes de chaque âge, en 1820 et en 1990 (source : *Démographie*, H. Leridon et L. Toulemon, Economica).

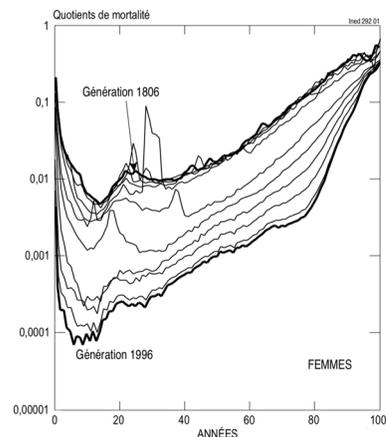
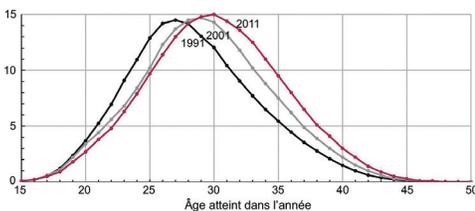


Figure 3.17 : À gauche : nombre de naissances vivantes pour 100 femmes de chaque âge en France (Source : Insee, estimation de population et statistiques de l'état civil – 2012). À droite : modifications, de 20 ans en 20 ans, de la courbe annuelle de mortalité par âge pour les hommes, de 1806 à 1996, et projection jusqu'en 2012 (Source : Ined 291 01).

Connaissant les taux de naissance par âge, le nombre total de nouveau-nés de l'année est égal à la somme de ceux mis au monde par les femmes de 15 ans, de 16 ans, de 17 ans etc. jusqu'à ceux mis au monde par les femmes de 50 ans.

Si l'on se donne la [pyramide des âges](#) d'une année prise comme origine, nous savons maintenant comment calculer son évolution future. Dans cette discussion de principe, nous ne tenons pas compte des flux sortant et entrant : émigration et immigration. Mais on voit qu'on pourrait très bien en tenir compte.

Prenons un exemple. Pour faire simple, regroupons la population en 10 classes d'âge, et supposons que les taux de naissance et de mortalité soient ceux donnés dans le [tableau 3.2](#) :

âge	taux de naissance	taux de mortalité
1	0	0,10
2	0	0,05
3	0	0,06
4	0,5	0,07
5	0,5	0,08
6	1	0,10
7	0,5	0,25
8	0	0,50
9	0	0,80
10	0	1,00

Tableau 3.2 : Données de départ pour « jouer » à la population sur un tableur.

Prenons, comme pyramide initiale, une répartition irréaliste mais qui permet des calculs simples pour commencer. Supposons qu'à tout âge, il y ait autant d'hommes que de femmes. Dans ces conditions, il suffit de calculer la pyramide des femmes. Supposons que toutes les tranches d'âges aient, pour commencer, 100 femmes. Comment se répartit cette population au bout d'un an ?

La nouvelle tranche 2 a 100 femmes, moins celles qui sont décédées dans l'année. Comme le taux de mortalité de la première tranche est de 0,1, 10 « bébés femmes » sont morts. La nouvelle tranche 2 compte donc 90 femmes. La nouvelle tranche 3 compte $100 - 5 = 95$ femmes (taux de mortalité de 0,05). La nouvelle tranche 4 compte 94 femmes, etc. Et la nouvelle tranche 1 ? Les femmes des tranches 1, 2 et 3 n'ont pas eu d'enfant. Les femmes de la tranche 4 ont eu 50 enfants, celles de la tranche 5, 50 enfants, celles de la tranche 6, 100 enfants, celles de la tranche 7, 50 enfants, et les autres n'en ont pas eu. Au total, cela fait 250 enfants, dont, par hypothèse, 125 garçons et 125 filles. La nouvelle tranche 1 compte donc 125 filles. Et c'est tout ! Nous pouvons maintenant recommencer le calcul à partir de cette nouvelle répartition. Au lieu de le faire à la main, il vaut mieux utiliser un tableur.

Le [tableau 3.3](#) rapporte les résultats obtenus pour les premières années (en arrondissant en nombres entiers).

Année 0	1	2	3	4	5
100	125	115	107	99	98
100	90	112	103	96	89
100	95	85	106	97	91
100	94	89	79	99	91
100	93	87	82	73	92
100	92	85	80	75	67
100	90	82	76	72	67
100	75	67	61	57	54
100	50	37	33	30	28
100	20	10	7	6	6

Tableau 3.3 : Évolution du nombre de femmes (ou d'hommes) calculée par tranche d'âge et pour les cinq premières années à partir du modèle simple utilisé.

On voit qu'il n'y a aucun problème à prolonger le calcul. Le simulateur de population de l'INED est bien sûr plus sophistiqué que le nôtre. Il différencie les hommes et les femmes, et surtout, il fait évoluer à la fois de taux de naissance par âge et l'espérance de vie au cours du temps. Comment ? C'est là tout l'art du démographe, qui s'appuie sur ce que l'on connaît déjà de sociétés analogues à celle qu'il étudie. Mais on voit, du même coup, en quoi ces *projections* ne sont pas des *prédictions*. En effet, les ingrédients du calcul varient au cours du temps, et il n'est pas assuré que les évolutions réelles vont suivre les anticipations. Si une guerre, une pandémie, une pénurie de ressources ou une perturbation politique majeure vient modifier dans 25 ans les taux de naissance, par exemple, le démographe d'aujourd'hui n'a aucun moyen de le savoir.

3.2.7. Pour conclure ?

Terminons par quelques interrogations. Le [tableau 3.4](#) rapporte les projections de population de l'INED pour les différentes régions du monde et pour les années 2050 et 2100.

Zones	Année 2021	2050	2100
Afrique	1,37	2,49	4,28
Amérique Latine et Caraïbes	0,66	0,76	0,68
Amérique du Nord	0,37	0,43	0,49
Europe	0,75	0,71	0,63
Océanie	0,043	0,057	0,075
Asie	4,68	5,29	4,72

Tableau 3.4 : Projections des populations (en milliards d'habitants) des diverses régions du monde. Source : INED.

On constate la forte progression de la population africaine. Pour l'Asie, un examen plus détaillé montre que la Chine passe par un maximum au cours du siècle, et que la population de l'Inde devient plus nombreuse que celle de la Chine. Ces projections prolongent les tendances actuelles, notamment en termes de transitions démographiques, de taux d'urbanisation et d'accès aux ressources permettant ces évolutions (eau, [énergie](#), minéraux, etc.).

La question des ressources énergétiques est particulièrement cruciale. Les 7,8 milliards de terriens d'aujourd'hui consomment environ 14 Gtep⁴², dont 80% sont d'origine fossile (charbon, pétrole et gaz) émettant des [gaz à effet de serre](#). Compte tenu de l'augmentation de la population mondiale et du développement des pays émergents et pauvres, la demande énergétique devrait atteindre les 20 Gtep au cours du siècle. Comment satisfaire cette demande, tout en réduisant drastiquement nos émissions de [gaz à effet de serre](#) ?

3.2.8. Annexe 1 : l'espérance de vie

L'espérance de vie *à la naissance* se calcule de la façon suivante. Reprenons notre exemple d'une population avec 10 classes d'âge, avec les taux de mortalité : 0,1, 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,1, 0,25, 0,50, 0,80 et 1 (Tab. 3.2). Ces taux correspondent à peu près à ceux de la fin du XIX^e siècle en France. On part d'un échantillon de 100 individus, et *on les fait vieillir en leur appliquant, à chaque âge, le taux de mortalité choisi*.

Ainsi, au cours de la première année, il y a 10 décès, donc il ne reste plus que 90 personnes. On leur applique le taux de mortalité de 0,05, donc environ 4 personnes vont mourir, laissant 86 personnes vivantes. Cinq, parmi elles, vont mourir l'année suivante, d'où 81 personnes restantes etc. On peut ainsi constituer le [tableau 3.5](#).

Nombre de vivants	Nombre de décès
100	10
90	4
86	5
81	6
75	6
69	7
62	15
47	23
24	19
5	5

Tableau 3.5 : Évolution fictive du nombre de vivants et du nombre de décès sur dix ans pour une classe d'âge comptant initialement 100 personnes.

42. Gtep : milliard de tonnes-équivalent pétrole (tep). 1 tep équivaut à 42 milliards de [Joules](#).

Au bout de ce parcours fictif, 10 personnes ont vécu 1 ans, 4 personnes ont vécu 2 ans, 5 personnes ont vécu 3 ans etc. On appelle espérance de vie à la naissance la *durée de vie moyenne de cette cohorte fictive*. Dans le cas présent, elle vaut :

$$\frac{1 \times 10 + 2 \times 4 + 3 \times 5 + 4 \times 6 + 5 \times 6 + 6 \times 7 + 7 \times 15 + 8 \times 23 + 9 \times 19 + 10 \times 5}{100} = 6,53 \text{ ans}$$

Si chaque tranche d'âge fictive représentait, en fait, 8 années, les dix tranches d'âge considérées couvriraient une vie humaine de 80 ans, et l'espérance de vie que nous venons de calculer ne serait que d'environ 52 ans. En réalité, cette faible valeur correspond bien aux taux de mortalité que nous avons choisis dans l'exemple et qui sont élevés. Nous avons ainsi supposé que 10% de la première tranche décédait dès les 8 premières années, soit 30 fois le taux actuel en France !

L'espérance de vie estimée *à la naissance* a toute chance de sous-estimer la durée de vie réelle, car le progrès de la médecine tend à diminuer les taux de mortalité, comme nous l'avons vu précédemment pour le taux de mortalité périnatal. Elle indique seulement ce que serait la durée de vie moyenne *si* les conditions futures demeurent identiques à ce qu'elles sont *aujourd'hui*.

On peut également définir l'*espérance de vie à un âge donné*. Que vaut, par exemple, l'espérance de vie à trois ans dans le modèle que nous avons choisi ? Le [tableau 3.5](#) indique que 81 personnes atteignent la troisième tranche d'âge. Partant de là, nous voyons que 6 personnes vont vivre 4 ans, 6 vont vivre 5 ans, 7 vont vivre 6 ans etc. L'âge moyen atteint par les personnes *qui atteignent trois ans* est donc égal à :

$$\frac{4 \times 6 + 5 \times 6 + 6 \times 7 + 7 \times 15 + 8 \times 23 + 9 \times 19 + 10 \times 5}{81} = 7,48 \text{ ans}$$

C'est, par définition, l'espérance de vie *à trois ans*. Il est normal que l'espérance de vie augmente avec l'âge, puisque les causes de mortalité aux âges précédents ont été évitées. Autrement dit : *plus on vit vieux, plus on a de chance de vivre vieux*, conclusion qui, somme toute, n'est pas déraisonnable...

3.2.9. Annexe 2 : Questions à propos du contrôle des populations et des migrations

Le grand public est généralement sensible à deux questions qui ont une teneur plus directement sociale et politique. La première de ces questions concerne les moyens de « contrôle de la population ». L'idée sous-jacente est que les populations elles-mêmes agissent plus ou moins directement et plus ou moins volontairement sur les paramètres d'évolution démographique discutés précédemment. Celles-ci font généralement en sorte de diminuer leur taux de mortalité et d'améliorer leur espérance de vie, cela étant associé à de meilleures conditions de vie. Dans les pays développés, cette lutte contre la fatalité butte aujourd'hui sur un ralentissement de

l'augmentation de l'espérance de vie [10] et la question du vieillissement en bonne santé, ainsi que sur les problématiques sociales liées au vieillissement de la population. La plupart des sociétés n'envisagent cependant pas de réduire volontairement leur espérance de vie pour réduire ou contrôler la population. L'essentiel des mesures de contrôle, historiques et actuelles, portent sur le taux de natalité et les taux d'émigration et d'immigration à l'échelle d'une région ou d'un pays.

Regardons tout d'abord la question de la natalité. Au-delà des questions médicales, les sociétés humaines ont longtemps indirectement influencé le taux de natalité par les schémas sociétaux [8]. Par exemple, reculer ou avancer l'âge du mariage joue de façon importante sur la fécondité. Il arrive que le célibat puisse être forcé. Les conditions sociales et l'existence d'une structure étatique vont également jouer un rôle important : en l'absence de système de protection sociale, faire suffisamment d'enfants peut donner l'espoir qu'au moins un s'occupera de vous pour vos vieux jours. Les états peuvent mener très directement des politiques natalistes ou dénatalistes par le biais d'impôts, subventions ou même interdictions comme dans le cas de la politique de l'enfant unique en Chine qui a été imposée pendant une trentaine d'années. Cette politique a eu de profonds impacts sociaux et démographiques, comme un fort vieillissement et un surplus d'hommes, qui ont conduit les autorités à l'assouplir significativement en 2018 puis en 2021⁴³. De fait, les conditions économiques (une crise économique a en général un impact négatif sur la natalité) et la condition des femmes (accès à la contraception, à l'éducation et à l'emploi, planning familial, égalité homme-femme, ...) jouent de façon très significative sur la fécondité depuis la deuxième moitié du XX^e siècle. Au niveau mondial, la politique de gestion de la population de l'ONU a principalement utilisé ces leviers avec une efficacité relative selon les pays [8]. La baisse de la fécondité est une tendance partagée par tous les pays, même dans des situations économiques très différentes [9].

La répartition géographique de la population joue un rôle important dans les questions démographiques. À ce titre, il a toujours existé des déplacements de populations au sein des pays et entre les frontières. Les migrations peuvent avoir des causes très variées : familiales, économiques, politiques, ou à la suite de catastrophes humanitaires (guerres, famines, catastrophes naturelles). On pourra consulter⁴⁴, à ce titre, l'exemple européen depuis l'après-guerre. Elles peuvent être voulues ou subies, ou encore bienvenues ou malvenues suivant le point de vue que l'on prend. Dans un même pays, l'immigration peut être vue comme un bénéfice en apportant des travailleurs qui redynamisent la démographie et rajeunissent la population, ou comme un problème de changement culturel. Concernant les chiffres⁴³ [11], les démographes observent que les mouvements de populations se font principalement au sein des pays, puis entre pays voisins, avant de concerner les pays du sud vers les pays du nord. Bien que le nombre et les projections ne semblent pas

43. Politique de l'enfant unique : https://fr.wikipedia.org/wiki/Politique_de_l'enfant_unique

44. Le Dessous des Cartes, Flux migratoires, une longue histoire. <https://www.arte.tv/fr/videos/091146-019-A/le-dessous-des-cartes/>

représenter en soi un problème [11], la concentration des flux sur quelques passages singuliers (Grèce, Lampedusa, Canaries, Calais ou Gibraltar pour l'Europe...) crée des difficultés de gestion qui tendent à fortement politiser la question et à en amplifier la perception.

Références

- [1] A. Boutaud, N. Gondran. 2018. *L'empreinte écologique*. Éditions La Découverte, 2^e édition.
- [2] I. El Bouazzaoui. 2008. *L'empreinte écologique : Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle « Micro » d'une organisation ou d'un projet*, Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00776465>
- [3] M. Wackernagel, B. Beyers. 2019. *Ecological Footprint. Managing our biocapacity budget*. New Society Publishers.
- [4] M. Borucke *et al.* 2013. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators* **24**(2013), 518-533, [dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.005](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.005).
- [5] D. Lin *et al.* 2018. Ecological footprint accounting for countries: Updates and results of the national footprint accounts, 2012-2018. *Resources* **7**(3), 58. <https://doi.org/10.3390/resources7030058>.
- [6] Living planet reports, 2014, 2016 & 2020, <https://www.footprintnetwork.org/living-planet-report/>.
- [7] A. Boutaud, N. Gondran. 2020. *Les limites planétaires*, Éditions La Découverte.
- [8] J. Véron. 2013. *Démographie et écologie*. Éditions La Découverte.
- [9] J.N. Biraben. 2003. *Population et Société* **394**
- [10] G. Pison. 2019. Pourquoi l'espérance de vie augmente-t-elle moins vite en France? *Population et Sociétés* **564**. <https://www.ined.fr/fr/publications/editions/population-et-societes/pourquoi-esperance-vie-augmente-moins-vite-france/>.
- [11] François Héran. 2018. L'Europe et le spectre des migrations subsahariennes. *Population et Sociétés* **558**. <https://www.ined.fr/fr/publications/editions/population-et-societes/europe-spectre--migrations-subsahariennes/>; <https://www.college-de-france.fr/site/francois-heran/index.htm>.