

Evolution de la population du globe depuis ses origines jusqu'au présent

Autor(en): **Fischer, Gaston**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **113 (1990)**

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-89331>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ÉVOLUTION DE LA POPULATION DU GLOBE DEPUIS SES ORIGINES JUSQU'AU PRÉSENT

par

GASTON FISCHER

AVEC 8 FIGURES ET 3 TABLEAUX

1. INTRODUCTION

La dégradation continue de l'environnement et la menace d'une guerre nucléaire totale sont aujourd'hui des sujets de grande actualité. Cette remarque s'applique aussi au problème de l'explosion démographique. Il est bon qu'il en soit ainsi puisqu'on estimait qu'en 1987 la population du globe avait atteint le chiffre de 5 milliards et qu'elle continuait à augmenter aussi rapidement qu'une fonction exponentielle.

Pour bien saisir la signification d'un rythme de croissance aussi rapide, il vaut la peine de commencer par décrire quelques-unes des propriétés de la fonction exponentielle simple, tant il est vrai qu'on cite souvent cette fonction avec le commentaire, explicite ou implicite, qu'elle offre les rythmes de croissance ou décroissance les plus rapides; ce qui est loin d'être vrai, comme nous allons d'ailleurs le voir.

2. CROISSANCE EXPONENTIELLE

Considérons une population $n(t)$ qui croît exponentiellement avec le temps t . On peut alors la représenter au moyen de la constante naturelle d'Euler $e=2,71828\dots$ et de la population initiale n_0 , c'est-à-dire celle au temps $t=0$:

$$n(t) = n_0 e^{t/\tau_e} = n_0 \exp(t/\tau_e) \quad (1)$$

Pour le temps initial $t=0$ on peut choisir un point arbitraire sur l'échelle des temps, par exemple l'an zéro de notre ère (l'ère chrétienne); mais à chaque temps initial différent correspondra une population initiale différente. La constante auxiliaire τ_e dans l'équation (1) est aussi un temps. Elle a deux fonctions: d'abord elle assure que l'exposant t/τ_e est un nombre sans dimension, ensuite elle représente le temps $t=\tau_e$ au bout duquel la population $n(t)$ est multipliée par le facteur e . Aux temps $t=2\tau_e, 3\tau_e, 4\tau_e$, etc., ce facteur d'augmentation sera respectivement de e^2, e^3, e^4 , etc.

La représentation de la croissance exponentielle au moyen de la constante naturelle d'Euler e offre quelques avantages de simplicité lors de développements mathématiques. Dans ce qui suit nous allons cependant souvent discuter de la croissance d'une population $n(t)$, non pas au moyen du temps τ_e au bout duquel $n(t)$ est multiplié par $e=2,71828\dots$, mais plutôt au moyen du temps de doublement τ_2 . Cela revient à utiliser des exponentielles du nombre 2 :

$$n(t) = n_0 2^{t/\tau_2} \quad . \quad (2)$$

Dans l'équation (2) la population initiale n_0 a exactement la même signification que dans l'équation (1), mais au bout des temps $t=\tau_2, 2\tau_2, 3\tau_2, 4\tau_2, \text{etc.}$, la population n_0 aura été multipliée par les facteurs 2, 4, 8, 16, etc.

Pour les équations (1) et (2) on peut aussi donner les formulations respectives suivantes, qui sont tout à fait équivalentes :

$$n(t + \tau_e) = e n(t) \quad , \quad (3)$$

$$n(t + \tau_2) = 2 n(t) \quad . \quad (4)$$

Entre les temps τ_e et τ_2 il y a d'ailleurs un facteur de proportionnalité constant

$$\tau_2 = \tau_e \ln 2 \cong 0,693 \tau_e \quad . \quad (5)$$

3. LE TEMPS DE DOUBLEMENT

Ce que les équations (2) ou (4) font bien apparaître est qu'au fil du temps, après chaque intervalle τ_2 , la population aura doublé : inexorablement elle croîtra vers des nombres astronomiques. Prenons comme exemple un temps de doublement de 20 ans, proche de celui qui pourrait s'appliquer aujourd'hui, comme nous le verrons plus loin. S'il avait toujours été aussi court, il aurait suffi de 644 ans pour passer d'un seul être humain aux 5 milliards de 1987 ! Comme l'humanité a peuplé la Terre pendant une période beaucoup plus longue, il est évident que le temps de doublement a nécessairement été plus long dans le passé. *Le caractère véritablement catastrophique de l'explosion démographique est que l'on a, aujourd'hui, tout à la fois la population la plus nombreuse et le temps de doublement le plus court. De fait à l'exception de quelques violentes perturbations causées par les grandes épidémies ou famines, l'évolution de la population du globe s'est caractérisée jusqu'à très récemment par une augmentation monotone du nombre d'individus n et un raccourcissement*

continu du temps de doublement τ_2 (voir par exemple, FISCHER, 1985 et EHRLICH, 1968).

Pour le démographe le temps de doublement τ_2 est un paramètre tout aussi important que celui de la population $n(t)$. A un instant donné t on cherche à prédire le temps de doublement sur la base du taux d'accroissement par unité (en général exprimé par millier) de population qui prévaut précisément à ce temps t . Ce taux d'accroissement peut donc aussi être considéré comme un taux de fécondité. Mathématiquement ce taux d'accroissement $\lambda(\tau)$ s'exprime par la dérivée $n'(t) = dn(t)/dt$:

$$\lambda(t) = \frac{1}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{n'(t)}{n(t)} \quad (6)$$

A l'instant présent t cette quantité ne peut pas être donnée avec précision et on se rabat alors sur une expression approchée:

$$\lambda(t) = \frac{1}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} \approx \frac{n(t) - n(t-1)}{n(t) \times 1 \text{ année}} \quad (7)$$

On fait ensuite la supposition assez naturelle que λ est approximativement constant, ce qui conduit à l'équation différentielle très simple

$$\frac{dn(t)}{dt} = \lambda n(t) \quad (8)$$

dont la solution est une loi exponentielle simple, telle qu'exprimée par les équations (1) à (4) dans lesquelles il est implicitement admis que les paramètres respectifs, τ_e ou τ_2 , sont effectivement constants puisque λ leur

est directement lié:

$$\lambda = \frac{1}{\tau_e} = \frac{\ln 2}{\tau_2} \quad (9)$$

Le temps de doublement qu'on déduit des relations (9) et (7) est un *temps de doublement prédictif*: c'est celui que le démographe prédit sur la base du taux d'accroissement du passé immédiat et de la *supposition décisive que ce taux restera constant*. Cela revient aussi à dire que le démographe choisit le taux d'accroissement le plus récent et admet ensuite que la population $n(t)$ augmente selon une exponentielle simple conforme à ce taux d'accroissement. Nous dénoterons dorénavant ce temps de doublement prédictif par τ_{2p} , car nous avons déjà vu que depuis l'an 1600 pour le moins, le temps de doublement effectif τ_2 avait semble-t-il subi un raccourcissement continu.

Ce temps effectif τ_2 , qui satisfait l'équation (4) *sans la restriction d'être un temps constant*, a donc presque toujours été plus court que le temps prédictif τ_{2p} depuis 1600. Nous verrons à la Section 11 un exemple qui illustre l'utilité de comparaisons des temps de doublement.

4. LES ESTIMATIONS DE LA POPULATION DEPUIS L'AN 1650

La population passée du globe est fort mal connue (voir, par exemple, WELLEMAYER, 1962; MEADOWS, 1972; ONU, 1966; et COALE, 1974), ce dont on ne peut s'étonner. Les estimations les plus sûres sont naturellement celles du passé le plus récent, où l'on s'accorde plus ou moins sur les chiffres des trois colonnes à la gauche de la Table 1. Si on se réfère à la figure 1, reproduite de la publication de Wellemeyer, on constate que depuis l'an 1600 environ de notre ère l'évolution de la population n'a pas subi de gros accident, comme ceux de la «Grande Peste», du milieu du XIV^e siècle (voir, par exemple, McEVEDY, 1988). On peut donc essayer de trouver une fonction arithmétique approchée qui serait en mesure de reproduire ces estimations de la population. Cela a d'ailleurs déjà été fait : un bel exemple en est l'étude à la fois très sérieuse et teintée d'humour noir de FOERSTER *et al.* (1960), dont la formule mathématique suggère ni plus ni moins que la population du globe divergera vers l'infini vendredi 13 novembre de l'an 2026 (jour présumé du jugement dernier!) :

$$n(t) = \frac{1,79 \times 10^{11}}{(2026,87 - t)^{0,99}} \quad (10)$$

Cette formule permet le calcul du temps de doublement effectif τ_2 :

$$\tau_2 = \left[1 - \frac{1}{2^{1/0,99}} \right] (2026,87 - t) = 0,5035 (2026,87 - t) \quad (11)$$

et on voit bien à la Table 1 que cette formule, proposée il y a bientôt 30 ans, réussissait très bien à reproduire les populations et les temps de doublement passés, mais qu'elle est encore admirablement bien suivie aujourd'hui, malgré la catastrophe démographique qu'elle annonce d'ici une autre trentaine d'années.

On peut s'étonner de l'exposant de 0,99 dans l'équation (10); il n'est pas vraiment nécessaire et peut avantageusement être remplacé par l'unité, ce qui conduit aux deux relations beaucoup plus simples et tout aussi bonnes qui suivent (FISCHER, 1988), comme le montre la Table 1 :

$$n(t) = \frac{2,06 \times 10^{11}}{(2026,87 - t)} \quad (12)$$

$$\tau_2 = \frac{2026,87 - t}{2} \quad (13)$$

Il vaut la peine de noter ici que les formules (10) et (12) fournissent un bel exemple de fonctions qui croissent plus vite que toute exponentielle.

TABLE 1

Population n et temps de doublement τ_2 de la population humaine du globe au cours de la période moderne. Les estimations des colonnes 2 et 3 sont tirées de WELLEMAYER (1962). Les colonnes 4 à 7 reproduisent les résultats fournis par les formules (10) à (13). Les valeurs des colonnes 8 à 10 sont celles données par nos équations (15) et (17). A la colonne 11 nous donnons des espérances de vie τ_c basées sur des estimations diverses (voir, par exemple ACSÁDI et NEMESKÉRI, 1970), tandis que la colonne 12 présente une estimation de la totalité N des êtres humains ayant vécu depuis l'origine de la race jusqu'au temps t . Le chiffre de 78 milliards pour N (1600) est dérivé de la Section 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t	n	τ_2	n	τ_2	n	τ_2	n	τ_2	τ_{2p}	τ_c	N
années de notre ère	estimé en millions	estimé en années	selon (10) millions	selon (11) années	selon (12) millions	selon (13) années	selon (17) millions	Eq. (17) années	Eqs (15/17) années	estimé en années	selon (30) milliards
1600	—	—	446	215	483	213	420	180	204,2	28	78
1650	500 ± 50	170	504	190	547	188	500	168	191,3	30	78,8
1700	—	—	580	165	630	163	603	156	178,5	32,5	79,7
1750	700 ± 40	—	684	139	744	138	738	140	165,7	35	80,8
1800	910 ± 60	110	833	114	908	113	918	120	151,7	37,5	82,0
1850	1170 ± 80	—	1066	89,1	1165	88,4	1170	94,6	132,7	40	83,3
1900	1600 ± 100	—	1481	63,9	1624	63,4	1573	65,4	100,0	42,5	85,1
1930	2000 ± 100	50	1934	48,8	2127	48,4	2004	47,9	72,5	45	86,3
1950	2500 ± 100	—	2432	38,7	2680	38,4	2502	37,3	53,6	48	87,3
1975	—	—	3590	26,1	3971	26,4	3768	25,1	33,5	52	89,0
1987	5000 ± 100	20	4658	20,1	5167	20,4	5000	20,3	25,9	54	90,0
2000	—	—	6885	13,5	7667	13,4	7498	15,8	19,2	—	—
2026.87	—	—	∞	0	∞	0	29389	8,8	10,0	—	—

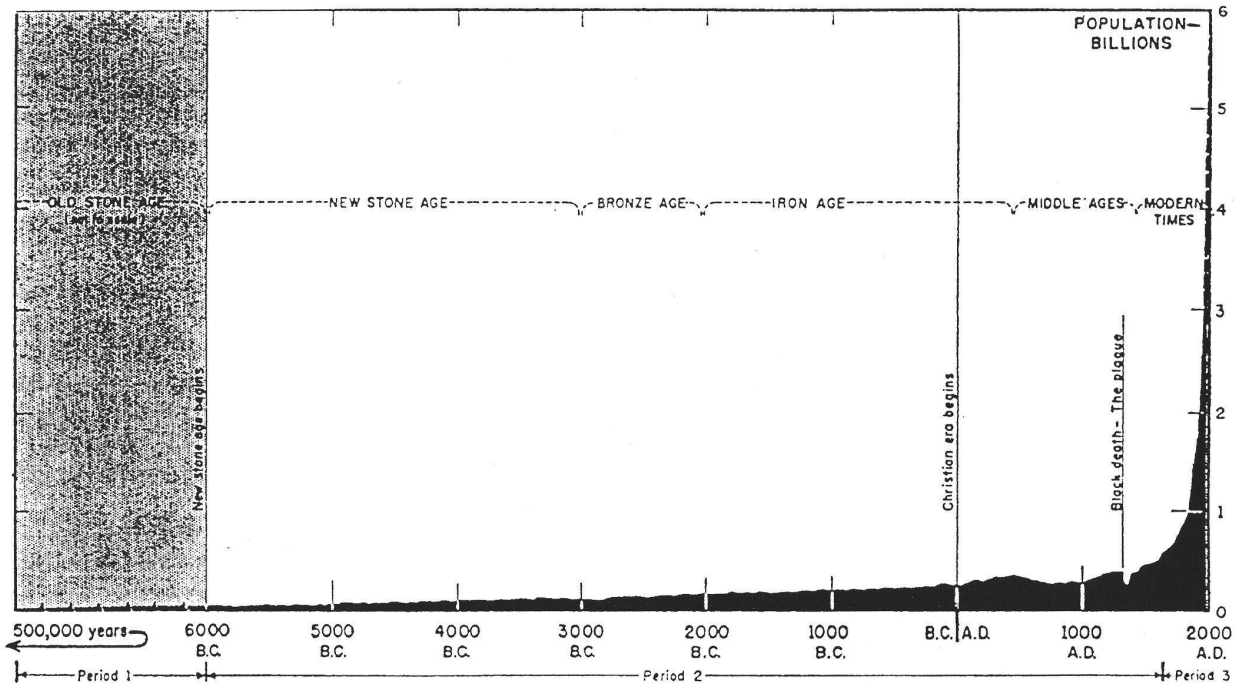


Fig. 1. Cette figure, reprise de WELLEMAYER (1962), illustre l'évolution de la population au cours des âges. Comme nous l'expliquons dans le texte, elle est probablement proche de la réalité pour les temps de notre ère (ère chrétienne, A. D. = Anno Domini), mais beaucoup moins crédible pour les périodes précédentes. L'explosion démographique, à partir de 1600 environ, en est l'élément le plus frappant.

5. PROPOS DE NOTRE ÉTUDE

Malgré le succès des formules très simples (10) à (13), nous cherchons une représentation mathématique plus sérieuse de la fonction $n(t)$, car des questions telles que les suivantes nous intéressent :

1. Est-il possible d'estimer le nombre total $N(t)$ d'être humains qui ont peuplé la Terre depuis les origines de la race humaine ?
2. En 1987 on estimait la population du globe à 5 milliards. A quelle époque du passé ce nombre total $N(t)$ atteignait-il la limite de 5 milliards ? Cette époque se trouve-t-elle dans notre ère, ou s'agit-il d'un temps beaucoup plus reculé ?

Le calcul de $N(t)$ revient à sommer les $n(t)$ annuels, divisés chaque fois par l'espérance de vie $\tau_e(t)$, qui est, elle aussi, une fonction du temps. D'autre part, comme on le voit à la figure 1, la période comprise entre le début de notre ère et l'an 1600 environ ne pourra pas être représentée par une relation mathématique simple. Sur cet intervalle de temps, qui a pourtant été crucial pour le développement de l'humanité, on devra se limiter à faire des estimations très approximatives. Par contre, pour les époques antérieures et postérieures, on peut espérer trouver une formulation simple. Mais pour pouvoir calculer $N(t)$ il faudra aussi obtenir des valeurs acceptables de l'espérance de vie $\tau_e(t)$.

6. REPRÉSENTATION MATHÉMATIQUE POUR LA PÉRIODE 1600-1987

Lorsqu'on considère la figure 1 on est bien sûr frappé par la rapidité de la croissance de $n(t)$ dans l'intervalle qui nous intéresse. D'autre part, comme le confirme la Table 1, le temps de doublement τ_2 varie lui aussi fortement sur cet intervalle. Cela nous incite à chercher, pour $n(t)$, une expression de la forme

$$n = n_0 e^{t \cdot f(t)} = n_0 \exp [t \cdot f(t)] \quad . \quad (14)$$

La fonction $f(t)$ que nous espérons trouver donnera aussitôt le temps de doublement prédictif τ_{2p} , par le truchement des équations (6) et (9) :

$$\tau_{2p}(t) = \frac{\ln 2}{f + t f'} \quad . \quad (15)$$

où f' est la dérivée de $f(t)$.

Par contre, la connaissance de $f(t)$ ne permet pas, en général, d'en déduire le temps de doublement effectif τ_2 , qu'il faudra déterminer par des comparaisons numériques satisfaisant l'équation (4), car il n'y a pas de relation analytique simple entre τ_2 et $f(t)$. Tout au plus peut-on dire qu'au raccourcissement continu du temps τ_2 correspond une augmentation

continue de la valeur de $f(t)$. Ceci nous a conduit à proposer pour $f(t)$ un simple développement en puissances de t .

Dans les équations (16) et (17) qui vont suivre nous allons exprimer le temps t en milliers d'années de notre ère. L'an 1987 sera ainsi donné par $t=1,987$. Pour $f(t)$ nous cherchons donc une fonction du type

$$f(t) = at^p + bt^q + ct^r + dt^s + \dots \quad , \quad (16)$$

et on déterminera les coefficients a, b, \dots , et les exposants entiers p, q, \dots de façon à obtenir pour $n(t)$ une fonction uniformément croissante sur l'intervalle $1,6 \leq t \leq 1,987$ et qui passe le mieux possible par les points correspondant aux deux premières colonnes de la Table 1.

L'exigence d'une croissance uniforme régulière (c'est-à-dire sans oscillations ou vagues) revient à exiger que les coefficients a, b, c, \dots soient tous positifs. Cela limite immédiatement les puissances p, q, r, \dots permises. Après une recherche très exhaustive des coefficients et puissances possibles, nous avons trouvé la fonction $n(t)$ suivante, qui permet une reproduction rigoureusement exacte des valeurs estimées de $n(t)$, en 1650, 1850 et 1987, et pratiquement parfaite en 1800, 1900, 1930 et 1950, comme on le voit à la Table 1 :

$$n(t) = 15,3 \times 10^6 \exp \left[t(1,6 + 0,16t + 0,02038t^5 + 7,287 \times 10^{-18}t^{56}) \right] \quad . (17)$$

Cette fonction, qui bien sûr ne diverge pas, peut être utilisée pour déterminer à toute époque, par calcul numérique, le temps τ_2 qu'il faut pour provoquer un doublement de $n(t)$, selon l'équation (4), mais avec un τ_2 qui est ici variable. Ce sont les valeurs que nous avons reportées à la neuvième colonne de la Table 1. A la dixième colonne de cette même table nous donnons, pour comparaison, les temps de doublement prédictifs τ_{2p} calculés par l'équation (15).

Ce qui ne peut manquer de frapper, dans l'équation (17), est le terme avec un exposant de 57 pour le temps, et ceci *dans l'exposant de la fonction exponentielle*. Ce terme caractérise à lui tout seul l'explosion démographique que nous connaissons aujourd'hui. En annulant ce terme on trouverait des populations identiques, à 1 % près, à celles de la Table 1 (colonne 8) jusqu'en 1840. Pour le présent on trouverait 2,42 milliards, la limite des 5 milliards ne serait atteinte que vers l'an 2097 et celle des 10 milliards en 2186. L'explosion démographique viendrait aussi, mais beaucoup plus tard et plus progressivement.

Les valeurs de la Table 1 (colonnes 8 et 9) que nous donnons pour l'an 2000 et au-delà sont des extrapolations de l'équation (17). On ne peut attacher aucun crédit à ces valeurs, car de sérieux phénomènes naturels (par exemple famines, sécheresses, épidémies) et artificiels (par exemple contrôle des naissances en Chine et en Inde) sont probablement à l'œuvre

pour limiter la croissance de la population. D'autre part, un temps de doublement global qui deviendrait très inférieur à 20 ans est aujourd'hui difficilement concevable.

7. LES 1600 PREMIÈRES ANNÉES DE NOTRE ÈRE

Cette période a été étudiée avec soin par WELLEMAYER (1962). Nous en présentons ici les arguments essentiels.

Si de l'an zéro à 1600 la population du globe n'a pas montré de signes d'explosion démographique, on voit bien à la figure 1 qu'elle a connu d'importantes fluctuations. Il y a eu deux phases d'augmentation assez rapide, suivies toutes deux par des coups de frein, causés surtout par des épidémies. La première phase d'augmentation, de zéro à l'an 430 environ, est généralement attribuée à l'amélioration des méthodes de production de nourriture. Cette augmentation s'est surtout faite dans les agglomérations; les premières grandes villes datent de cette période. Les conditions d'hygiène y étaient pires que dans les campagnes et les ravages causés par les épidémies de malaria, de tuberculose et de peste pouvaient être terribles. C'est à ces épidémies, ainsi qu'aux invasions de l'Europe et du Bassin méditerranéen par des populations barbares venues de l'Orient, qu'on attribue le déclin entre les années 430 et 900 environ.

Une deuxième période d'augmentation, depuis les années 800 à 1000 environ et jusqu'en 1346, fut stoppée de façon absolument brutale par la Grande Peste. Cette épidémie, probablement la plus terrible que l'humanité ait connue (McEVEDY, 1988), n'a duré que de 1346 à 1352, mais la mortalité y a été telle, qu'en l'espace de ces six années la population est tombée aux trois quarts de sa valeur (les chiffres avancés, qui ne sont que des estimations peu sûres, sont de 320 à 240 millions).

La Grande Peste aura eu le mérite d'attirer l'attention de la population sur l'importance de l'hygiène. Comme on savait alors produire de la nourriture en plus grande quantité, la reprise de la croissance a été plutôt rapide après la Grande Peste. Dès 1600, en tout cas, les conditions pour une explosion démographique future étaient réunies, mais notre propos n'est pas d'analyser ces causes. Nous avons consacré quelques lignes à la période 0-1600, car il nous paraissait nécessaire d'expliquer, même sommairement, les fluctuations de la population pendant cette période. Ce qui nous importe est qu'on place les estimations de la population du globe, aux alentours de 1600, dans la fourchette de 400 à 450 millions, tandis qu'autour du début de notre ère on la situe de 200 à 300 millions.

8. LA POPULATION AVANT NOTRE ÈRE

Avant notre ère la population était très disséminée et probablement moins susceptible aux grandes épidémies. Son évolution était surtout contrôlée par la nourriture disponible. Le passage de l'époque où l'homme ne vivait que de chasse et cueillette à celle où il a commencé à cultiver, voici quelque 7000 ans, s'est fait si progressivement qu'il n'a pas entraîné de bouleversement de l'évolution de la population: c'est en tout cas ce que suggère le graphique de la figure 1, reproduit de WELLEMAYER (1962).

L'auteur de ce graphique a établi son estimation de la population du globe en divisant l'histoire de l'humanité en trois grandes périodes: de l'origine à 6000 ans av. J.-C., de 6000 av. J.-C. à 1650 et de 1650 au présent. Pour la première période il a fixé l'origine à 600 000 ans dans le passé. Il a aussi admis une croissance exponentielle, avec un temps de doublement τ_2 et une espérance de vie τ_ε qui auraient été constants sur toute cette période. En choisissant $\tau_\varepsilon = 20$ ans et pour « *taux de naissance* » initial un être humain par an, cela revient à dire qu'il y avait, 598 000 ans avant notre ère, vingt êtres humains. De telles suppositions nous paraissent hautement déraisonnables car elles signifient:

1. que le temps de doublement τ_2 avait une valeur uniforme et très élevée d'environ 33 000 ans durant cette très longue période (soit $\tau_e \cong 47\,600$ ans) — il vaut la peine de noter qu'en admettant la croissance simplement exponentielle de l'équation (18), WELLEMEYER (1962) admet implicitement l'identité des temps de doublement effectifs et prédictifs, soit $\tau_2 = \tau_{2p}$ —
2. et que, si on l'extrapole encore un peu plus loin, il y avait un couple procréateur initial voici 700 000 ans environ.

Nous retiendrons cependant qu'avec ces suppositions l'auteur précité estime la totalité N des humains qui ont vécu depuis l'origine jusqu'à 6000 ans av. J.-C. à environ 12 milliards (voir la Table 2). En effet, avec pour $n(t)$ la loi

$$n(t) = n_0 2^{t/\tau_2} \quad , \quad (18)$$

où $t \leq -6000$ ans, $\tau_2 = 33\,000$ ans, et $n_0 = 5.67 \times 10^6$, il vient

$$N(t) = \frac{n_0}{\tau_\varepsilon} \int_{t_0}^t 2^{t/\tau_2} dt = \frac{n_0 \tau_2}{\tau_\varepsilon \ln 2} \left[2^{t/\tau_2} - 2^{t_0/\tau_2} \right] \quad (19)$$

qui, avec $\tau_\varepsilon = 20$ et $t_0 = -700\,000$, donne pour $t = -6000$ ans

$$N(-6000) = 11,9 \times 10^9 \text{ êtres humains.} \quad (20)$$

Il vaut la peine de noter que la position exacte choisie pour l'origine temporelle, t_0 , n'a pas d'incidence sur le résultat de l'intégration, pourvu que les limites d'intégration satisfassent environ $t_0 \leq 6t$. On peut donc, en général, remplacer t_0 par $-\infty$ dans l'équation (19).

TABLE 2

Estimations de la population humaine du globe n , du temps de doublement τ_2 et de la somme N des êtres qui ont vécu depuis les origines jusqu'à l'époque T . L'échelle des temps est donnée en milliers d'années comptées positivement en direction du passé; $T=2$ correspond ainsi au début de notre ère. Les colonnes 2 à 4 sont déduites d'une représentation mathématique proposée par WELLEMAYER(1962) qui nous paraît sujette à caution. Les colonnes 5 à 10 correspondent à nos estimations, basées sur les équations (22) à (26), pour les limites extrêmes $\alpha=3/2$ et $\alpha=2$ (voir les fig. 2 et 3). Les symboles $E3$, $E6$, etc. signifient qu'il faut multiplier les nombres par, respectivement, 10^3 , 10^6 , etc.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	n	τ_2	N	n	τ_2	N	n	τ_2	
milliers d'années	selon (18)	admis pour (18), années	selon (19) $\tau_c = 20$	selon (22) $\alpha = 3/2$	selon (24) $\alpha = 3/2$ années	selon (20) $\alpha = 3/2$ $\tau_c = 10$	selon (22) $\alpha = 2$	selon (24) $\alpha = 2$ années	selon (26) $\alpha = 2$ $\tau_c = 10$
2				250 E6	740	100 E9	250 E6	586	50,0 E9
4				88,4	1 480	70,7	62,5	1 170	25,0
6				48,1	2 220	57,7	27,8	1 760	16,7
8	5,00 E6	33 000	11,9 E9	31,3	2 960	50,0	15,6	2 340	12,5
10	4,79	33 000	11,4	22,4	3 700	44,7	10,0	2 930	10,0
20	3,88	33 000	9,25	7,91	7 400	31,6	2,5	5 860	5,0
40	2,55	33 000	6,08	2,80	14 800	22,4	625 E3	11 700	2,50
60	1,68	33 000	3,99	1,52	22 200	18,3	278	17 600	1,67
80	1,10	33 000	2,62	988 E3	29 600	15,8	156	23 400	1,25
100	724 E3	33 000	1,72	707	37 000	14,1	100	29 300	1,0
200	88,6	33 000	211 E6	250	74 000	10,0	25,0	58 600	500 E6
400	1,33	33 000	31,6	88,4	148 000	7,07	6,25	117 000	250
600	20 E0	33 000	47,3 E3	48,1	222 000	5,77	2,78	176 000	167
800	0,3	33 000	709 E0	31,3	296 000	5,0	1,56	234 000	125
1000	0	33 000	11	22,4	370 000	4,47	1,00 E3	293 000	100

9. REPRÉSENTATION MATHÉMATIQUE DE LA POPULATION
AVANT NOTRE ÈRE

Les temps qui nous concernent dans cette section sont ceux qui précèdent notre ère. Du point de vue d'un observateur d'aujourd'hui, on peut même dire plus simplement que notre intérêt se porte vers le passé lointain. Dans cette perspective il s'est avéré utile d'introduire une nouvelle coordonnée de temps, qui mesure ce dernier en milliers d'années en direction du passé, à partir d'aujourd'hui, ou plus précisément à partir de l'an 2000 de notre ère. Si on appelle T cette nouvelle coordonnée, alors les seuls temps qui nous intéressent ici sont ceux pour lesquels $T \geq 2$, c'est-à-dire ceux qui précèdent l'ère chrétienne. $T=1000$ signifie, par exemple, un million d'années avant le présent. La relation entre T et les années t de notre ère est d'ailleurs très simple :

$$T = \frac{2000 - t}{1000} \quad (21)$$

Dans ce qui suit nous cherchons une relation pour la population avant notre ère, $n(T)$, qui satisfasse aux conditions de plausibilité suivantes :

1. en l'an zéro de notre ère, soit pour $T=2$, nous supposons que $n(T)=250$ millions ;
2. $n(T)$ doit conduire à des temps de doublement effectifs inférieurs à 1000 ans pour $T=2$ et qui croissent avec T , c'est-à-dire qui augmentent en direction du passé ;
3. malgré des temps de doublement courts au voisinage de $T=2$, il faut que $n(T)$ fournisse encore des nombres respectables au voisinage de $T=100$;
4. lors de la sommation ou intégration depuis les origines pour le calcul de la totalité $N(T)$ des êtres humains qui ont jamais vécu, il faut que la position de l'origine temporelle soit sans importance ; ainsi la naissance de la race humaine telle que nous la connaissons aujourd'hui aura pu se faire graduellement, sur un nombre important d'individus, mais ni ce nombre, ni le moment exact de la transition n'auront d'incidence notable sur $N(T)$ pour $T < 100$.

Ces quatre conditions sont parfaitement satisfaites par la relation extrêmement simple suivante,

$$n(T) = (2)^{\alpha-2} \cdot 10^9 / T^\alpha, \quad \text{où } 3/2 \leq \alpha \leq 2. \quad (22)$$

Le paramètre α donne une fourchette de limites raisonnables. En effet, cette relation permet de donner pour le temps de doublement effectif τ_2 une forme analytique, puisqu'en termes de T ,

$$\frac{2n}{n} = \left[\frac{T}{T - \tau_2} \right]^\alpha, \quad (23)$$

d'où pour le temps de doublement effectif τ_2 :

$$\tau_2 = \frac{2^{1/\alpha} - 1}{2^{1/\alpha}} T \quad (24)$$

Pour le temps de doublement prédictif τ_{2p} on a, par les équations (6) et (9)

$$\tau_{2p} = \frac{\ln 2}{\alpha} T \quad (25)$$

et l'on voit sans peine que pour tout α positif

$$\tau_{2p} > \tau_2 \quad (26)$$

comme nous l'avons prédit à la Section 3.

Pour la somme $N(T)$ à partir du temps originel T_0 , on trouve

$$N(T) = (2)^{\alpha-2} \cdot 10^9 \int_T^{T_0} \frac{dT}{\tau_\varepsilon(T) T^\alpha} \quad (27)$$

Ici encore, on voit aisément que lorsque les limites d'intégration satisfont $T_0 > 10T$, la borne T_0 est sans importance et peut être remplacée par $+\infty$.

Nous discuterons plus bas des valeurs qui nous paraissent être les plus judicieuses pour l'espérance de vie τ_ε . Pour $T \geq 2$ nous proposons la valeur constante de 10 ans, et non pas de 20 ans comme WELLEMAYER (1962). Avec cette valeur constante de $\tau_\varepsilon = 10$ ans, qui doit être exprimée en milliers d'années comme T , on trouve pour $N(T)$ depuis les origines de l'humanité:

$$N(T) = \frac{(2)^{\alpha-2} \cdot 10^9}{(\alpha-1) \tau_\varepsilon T^{\alpha-1}} = \frac{(2)^{\alpha-2} \cdot 10^{11}}{(\alpha-1) T^{\alpha-1}} \quad (28)$$

Par les équations (18) à (26) on peut alors calculer toutes les valeurs données à la Table 2 et reportées graphiquement dans les figures 2 à 4.

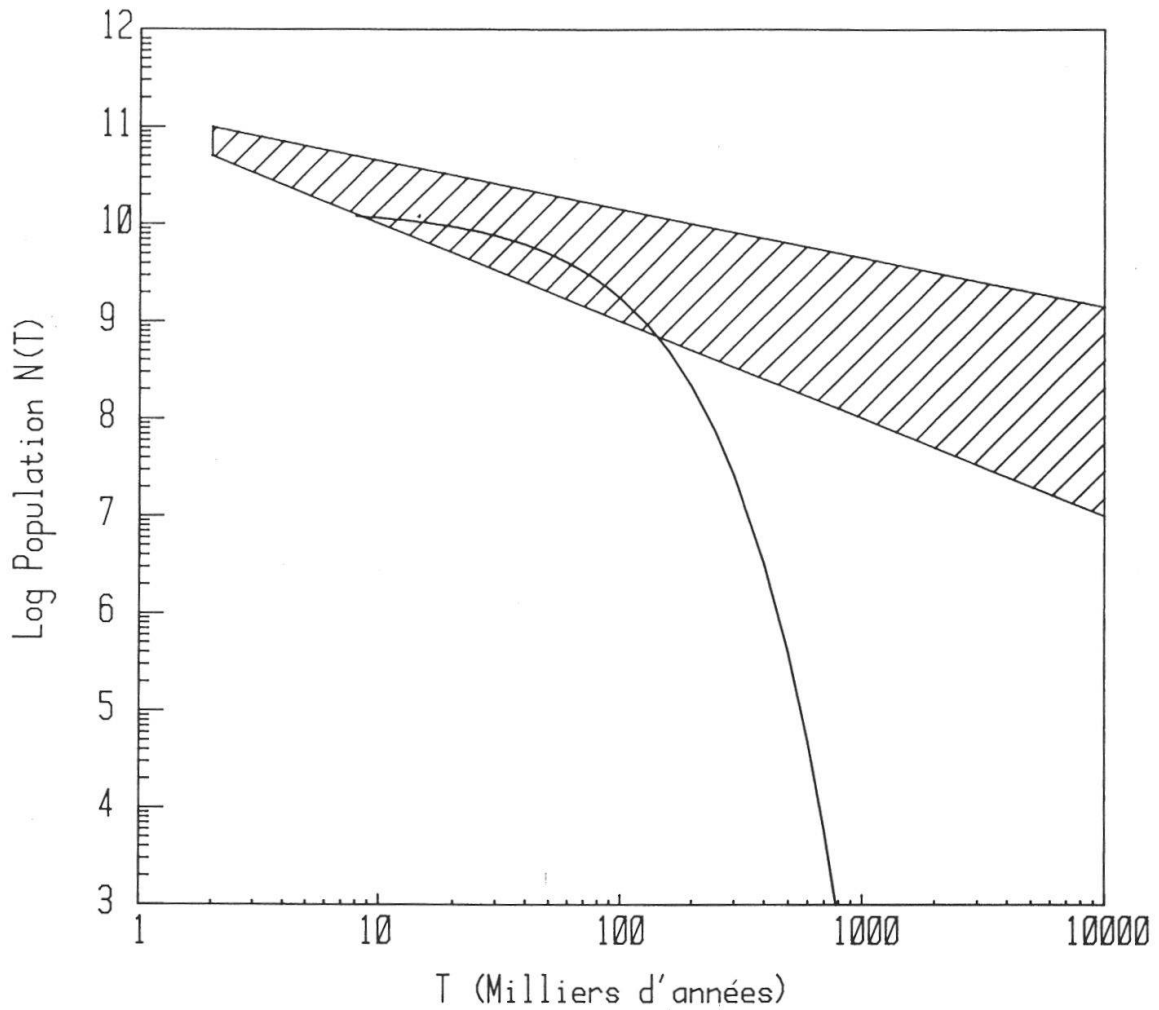


Fig. 2. Population humaine du globe avant notre ère, selon la fourchette des valeurs proposées par l'équation (22), comprises dans la zone hachurée. L'abscisse représente le temps en milliers d'années avant l'an 2000. La courbe isolée correspond aux thèses de WELLEMAYER (1962) pour sa période de 600 000 à 6000 ans avant notre ère; elle devrait rejoindre la limite gauche de la zone hachurée, soit 250 millions, admise pour l'an zéro ($T=2$); ce comportement paraît peu probable.

10. ESTIMATIONS DE L'ESPÉRANCE DE VIE ET DE LA SOMME DES POPULATIONS

Pour l'époque contemporaine le recensement de la population du globe n'est pas chose aisée et il est bien évident qu'on doit admettre pour le chiffre de 5 milliards en 1987 une marge d'erreur assez appréciable. L'espérance de vie τ_e est encore plus difficile à cerner et lorsqu'on considère des périodes passées on ne peut qu'avancer des chiffres encore moins sûrs.

Pour la période de 1600 à aujourd'hui nous nous sommes basés sur des données diverses (voir, par exemple, ACSÁDI et NEMESKÉRI, 1970); elles sont reportées à la colonne 11 de la Table 1. De l'an 0 à 1600 nous avons

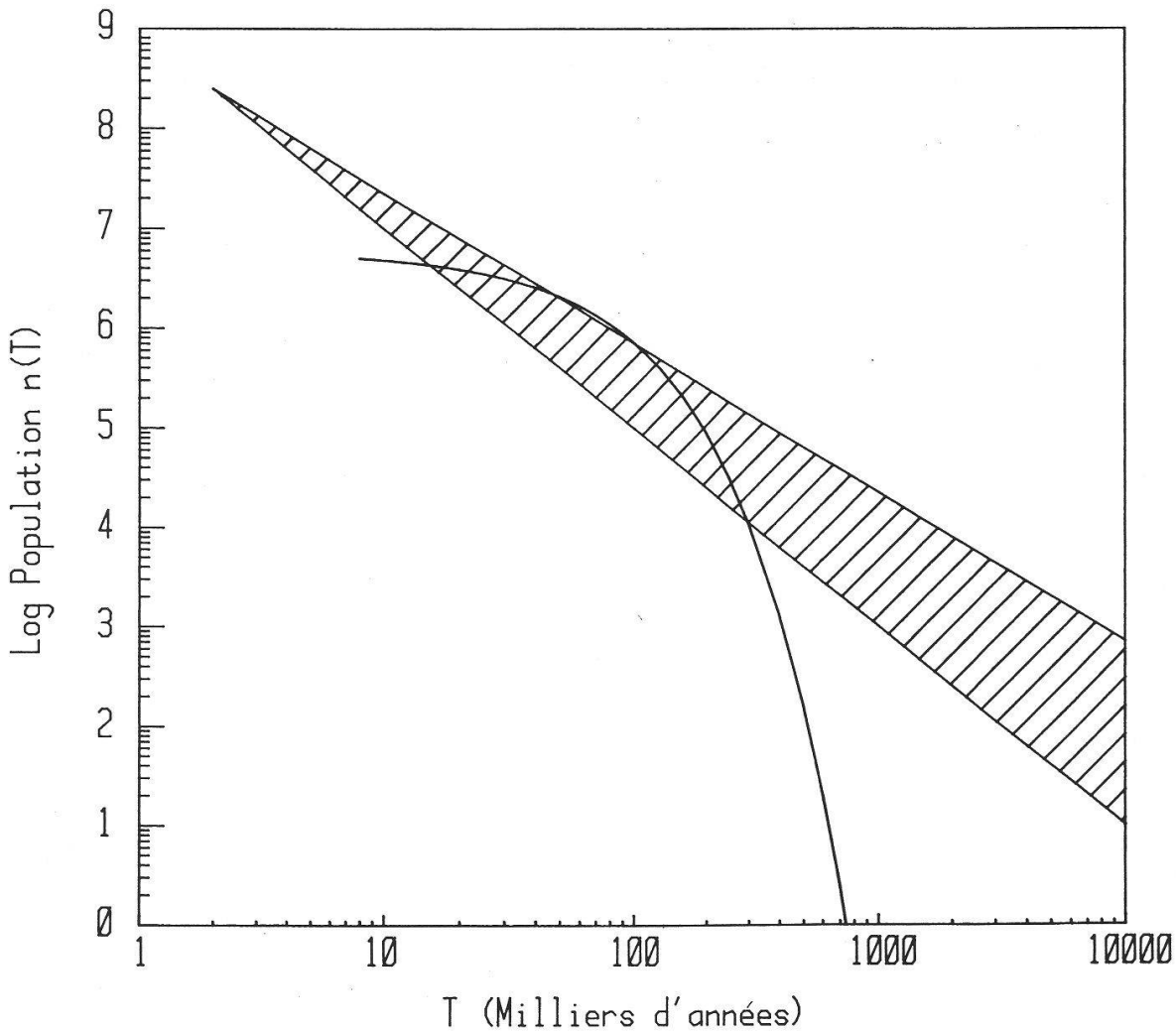


Fig. 3. Somme de la population humaine ayant vécu jusqu'à une date donnée avant notre ère, selon l'équation (28) qui propose la fourchette de la zone hachurée. L'abscisse donne le temps en milliers d'années avant l'an 2000. La courbe isolée correspond aux thèses de WELLEMAYER (1962). Nos données admettent une espérance de vie τ_c de 10 ans sur tout l'intervalle considéré ($T > 2$). Il se pourrait que τ_c ait augmenté un peu de $T=10$ à $T=2$, ce qui infléchirait légèrement vers le bas la zone hachurée sur cette période.

vu, à la Section 7, que la population y a beaucoup fluctué. Ces fluctuations ayant été causées par des épidémies, des guerres et des famines, il est évident que l'espérance de vie a aussi connu de fortes variations durant cette période. A notre avis, l'espérance de vie moyenne pour toute cette période et pour toute la Terre n'a probablement été que de 20 ans. Comme la population moyenne durant cet intervalle a été d'environ 350 millions, on peut estimer la contribution ΔN à la population totale N de cette période à 28 milliards :

$$\Delta N = \frac{350 \times 10^6 \times 1600}{20} = 28 \times 10^9 \quad . \quad (29)$$

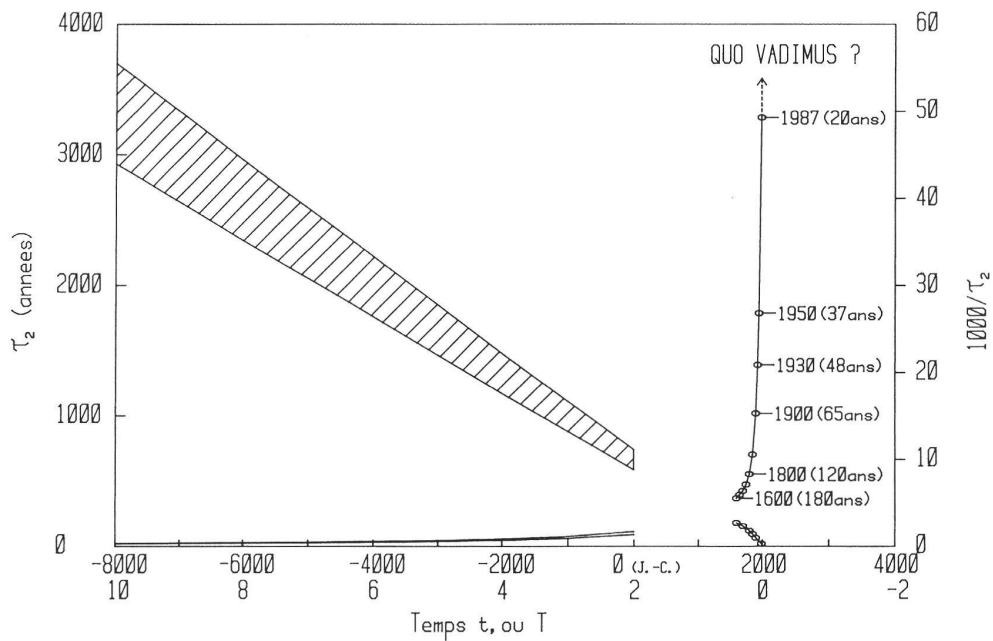


Fig. 4. Temps de doublement effectif τ_2 de la population humaine du globe au cours des âges. L'échelle de gauche donne τ_2 en milliers d'années et se rapporte à la fourchette des valeurs comprises dans la zone hachurée. De l'an zéro à 1600 les valeurs de τ_2 fluctuent énormément et ne peuvent pas être évaluées. De 1600 à 1987 ces valeurs sont représentées par le petit bout de courbe dans le prolongement de la zone hachurée. L'échelle de droite est 1000 fois l'inverse de τ_2 , soit la fréquence de doublement en 1000 ans; elle correspond à la courbe qui longe l'abscisse pour se redresser brusquement sur la droite du diagramme. Cette courbe est aussi interrompue entre 0 et 1600, bien que les deux segments paraissent bien être dans le prolongement l'un de l'autre. Il vaut la peine de noter qu'une valeur de $1000/\tau_2 = 10$ signifie que la population double 10 fois en 1000 ans. Une droite parallèle à l'abscisse correspondrait à une croissance exponentielle pure. Une population stable, c'est-à-dire $n(t) = \text{constant}$, exigerait un temps de doublement infiniment long, soit une courbe confondue avec l'abscisse. Pour stabiliser $n(t)$ il ne suffit donc pas de stabiliser la courbe des valeurs de $1000/\tau_2$, il faut absolument que cette courbe retourne sur l'abscisse plutôt que de s'emballer comme elle le fait. Ce diagramme est probablement la représentation la plus frappante du fait de l'explosion démographique.

Avant notre ère, au-delà d'un passé de 10 000 ans, soit $T > 10$, nous pensons que l'espérance de vie n'était que d'une dizaine d'années. WELLEMAYER (1962) a postulé 20 ans, mais ce chiffre nous paraît beaucoup trop élevé. A notre avis, dans ces temps reculés il faut admettre une *mortalité à la naissance* et une *mortalité infantile* énormes. Il est certain que peu d'individus atteignaient l'âge de la procréation. Nous pensons qu'un τ_e de l'ordre de 10 ans est plus vraisemblable. C'est en tout cas le chiffre que nous avons choisi pour estimer les sommes de population indiquées aux colonnes 7 et 10 de la Table 2. Il est probable que pour l'intervalle de zéro à -8000 ans, soit $2 \leq T \leq 10$, l'espérance de vie ait augmenté, pour passer progressivement de 10 à 20 ans. Cela aurait pour conséquence d'infléchir vers le bas le domaine hachuré de la figure 3 sur cet intervalle. En définitive, nous pensons qu'au début de notre ère, soit pour $T=2$, la somme de population était de l'ordre de 50 milliards. Avec les 28 milliards de la période 0-1600 on obtient les 78 milliards admis pour 1600 à la colonne 12 de la Table 1.

Malgré notre désaccord avec WELLEMAYER (1962) pour le passé extrême ($T \geq 8$), nos chiffres ne sont pas très différents, ce qui confirme la faible incidence sur N de l'évolution de la population dans le passé lointain. Pour $T=8$ il donne $N \cong 12$ milliards; mais avec une espérance de vie de seulement 10 ans au lieu de 20, son estimation serait d'environ 24 milliards, chiffre qui s'accorde très bien avec notre fourchette de 12,5 à 50 milliards, des colonnes 7 et 10 de la Table 2.

Nous sommes pourtant à nouveau en désaccord avec WELLEMAYER (1962) pour la période moderne, soit de 1650 à nos jours. Pour l'intervalle 1650-1962 cet auteur donne une valeur de $\Delta N = 23$ milliards, qu'il justifie dans son appendice par des taux annuels de naissance de 25 millions en 1650 et de 110 millions en 1962. Ces chiffres sont manifestement trop élevés, puisque avec $\tau_e = 30$ ans on obtient pour 1650 une population de 750 millions, au lieu de 500 millions (voir la Table 1). Avec $\tau_e = 50$ ans on aurait en 1962 une population de 5,5 milliards, au lieu de 2,97 milliards environ. Cela explique son estimation d'un ΔN de 23 milliards pour la période 1650-1962, alors que nous n'arrivons qu'à 9,5 milliards environ.

Pour calculer les accroissements de population ΔN de la colonne 12 à la Table 1, nous avons simplement multiplié la population moyenne sur l'intervalle de temps, par exemple 1600-1650, par la durée de cet intervalle et divisé par le τ_e du début de la période. Ainsi

$$\Delta N(1600 - 1650) = \frac{460 \times 10^6 \times 50}{28} = 821 \times 10^6 \quad . \quad (30)$$

On aurait trouvé pratiquement les mêmes valeurs par des intégrations numériques plus soignées.

11. L'ÉVOLUTION DÉMOGRAPHIQUE GLOBALE PRÉSENTE

Ayant évoqué les aspects véritablement catastrophiques de l'évolution démographique présente, il nous a paru utile de voir si les derniers recensements de la population du globe n'indiquent pas un ralentissement de sa croissance, voire même des tendances vers une stabilisation de son nombre. Plusieurs facteurs suggèrent qu'un tel ralentissement devrait être perceptible, entre autres les efforts de la Chine et de l'Inde en vue de limiter leur population, le fléchissement naturel observé dans les pays développés et les famines récentes dans les pays aux abords des zones tropicales. Une diminution de la croissance et finalement une contraction de la population a même été postulée récemment dans une étude très fouillée de BOURGEOIS-PICHAT (1988).

Pour essayer d'appréhender ces tendances présentes nous avons cherché à obtenir les données les plus sûres possible en nous adressant au Bureau démographique des Etats-Unis (PRB pour Population Reference Bureau). Le PRB a fourni une table de valeurs annuelles de la population du globe qui couvre l'intervalle de 1750 à l'an 2100 et est donc une combinaison de données effectives, plus ou moins bien vérifiables, et de projections basées sur l'évolution anticipée. Cette table est apparemment mise à jour continuellement et celle qui nous a été soumise se rapporte au 1^{er} février 1989. Comme nous allons le voir, ce que les données de la Table 3 (colonne 5) font surtout apparaître, sont les difficultés à établir un recensement valable, même pour des périodes d'un passé vieux déjà de 10 à 40 ans. En effet, on voit clairement à la figure 5, que les données de la Table 3 impliquent des variations brusques du taux d'accroissement, surtout en 1950. Cela devient encore plus apparent à la figure 6, où nous avons reporté l'accroissement annuel $\Delta n = n(t) - n(t-1)$. Manifestement ces données suggèrent que la fertilité a soudain doublé en 1950, ce qui n'est tout simplement pas plausible. Les courbes des figures 5 et 6 correspondent quant à elles à notre équation (17) et nous pensons que jusqu'en 1975 au moins elles sont plus proches de la réalité que les valeurs fournies par le PRB.

Sur la base des données de population $n(t)$ on peut calculer les temps de doublement prédictifs τ_{2p} à l'aide des équations (7) et (9), pour obtenir les valeurs reportées à la colonne 7 de la Table 3 et aux figures 7 et 8. Une fois encore ces valeurs sont manifestement déraisonnables. Les courbes en trait continu, par contre, correspondent respectivement au temps de doublement prédictif (fig. 7) et à la fréquence de doublement (fig. 8) fournis par nos équations (15) et (17) et jusqu'en 1975 en tout cas elles paraissent beaucoup plus crédibles.

Les courbes en tirets des figures 7 et 8 sont les temps et les fréquences de doublement effectifs calculés à partir de notre équation (17). Ces temps sont toujours inférieurs à τ_{2p} , comme nous devons nous y attendre lorsque le taux de croissance de la population est lui-même en train de croître, ce qui paraît avoir été le cas jusqu'au milieu des années 70.

TABLE 3

Evolution récente de la population du globe et des temps de doublement prédictifs et effectifs selon notre équation (17) et selon les données du PRB au 1^{er} février 1989.

1	2	3	4	5	6	7	8
t	n	n(t)-n(t-1)	τ_{2p}	n	n(t)-n(t-1)	τ_{2p}	τ_2
année	Eq. (17) milliards	Eq. (17) millions	Eqs (15/17) années	selon PRB milliards	selon PRB millions	selon PRB années	Eq. (17) années
1900	1.5728E+00	1.08E+01	1.00E+02	1.628E+00	1.0E+01	1.13E+02	6.54E+01
1901	1.5838E+00	1.10E+01	9.92E+01	1.639E+00	1.1E+01	1.03E+02	6.48E+01
1902	1.5950E+00	1.12E+01	9.83E+01	1.650E+00	1.1E+01	1.04E+02	6.42E+01
1903	1.6063E+00	1.13E+01	9.75E+01	1.661E+00	1.1E+01	1.05E+02	6.36E+01
1904	1.6178E+00	1.15E+01	9.66E+01	1.672E+00	1.1E+01	1.05E+02	6.30E+01
1905	1.6295E+00	1.17E+01	9.57E+01	1.683E+00	1.1E+01	1.06E+02	6.24E+01
1906	1.6414E+00	1.19E+01	9.49E+01	1.695E+00	1.2E+01	9.79E+01	6.18E+01
1907	1.6535E+00	1.21E+01	9.40E+01	1.706E+00	1.1E+01	1.08E+02	6.13E+01
1908	1.6658E+00	1.23E+01	9.31E+01	1.717E+00	1.1E+01	1.08E+02	6.06E+01
1909	1.6783E+00	1.25E+01	9.22E+01	1.729E+00	1.2E+01	9.99E+01	6.01E+01
1910	1.6910E+00	1.27E+01	9.13E+01	1.741E+00	1.2E+01	1.01E+02	5.95E+01
1911	1.7040E+00	1.30E+01	9.04E+01	1.752E+00	1.1E+01	1.10E+02	5.89E+01
1912	1.7172E+00	1.32E+01	8.95E+01	1.764E+00	1.2E+01	1.02E+02	5.83E+01
1913	1.7306E+00	1.34E+01	8.86E+01	1.776E+00	1.2E+01	1.03E+02	5.77E+01
1914	1.7443E+00	1.37E+01	8.77E+01	1.788E+00	1.2E+01	1.03E+02	5.71E+01
1915	1.7582E+00	1.39E+01	8.67E+01	1.800E+00	1.2E+01	1.04E+02	5.65E+01
1916	1.7724E+00	1.42E+01	8.58E+01	1.812E+00	1.2E+01	1.05E+02	5.60E+01
1917	1.7868E+00	1.45E+01	8.49E+01	1.824E+00	1.2E+01	1.05E+02	5.54E+01
1918	1.8016E+00	1.47E+01	8.39E+01	1.836E+00	1.2E+01	1.06E+02	5.48E+01
1919	1.8166E+00	1.50E+01	8.30E+01	1.849E+00	1.3E+01	9.86E+01	5.42E+01
1920	1.8319E+00	1.53E+01	8.20E+01	1.861E+00	1.2E+01	1.07E+02	5.36E+01
1921	1.8475E+00	1.56E+01	8.11E+01	1.881E+00	2.0E+01	6.52E+01	5.31E+01
1922	1.8635E+00	1.60E+01	8.01E+01	1.901E+00	2.0E+01	6.59E+01	5.25E+01
1923	1.8798E+00	1.63E+01	7.92E+01	1.921E+00	2.0E+01	6.66E+01	5.19E+01
1924	1.8964E+00	1.66E+01	7.82E+01	1.942E+00	2.1E+01	6.41E+01	5.13E+01
1925	1.9134E+00	1.70E+01	7.73E+01	1.963E+00	2.1E+01	6.48E+01	5.07E+01
1926	1.9307E+00	1.73E+01	7.63E+01	1.984E+00	2.1E+01	6.55E+01	5.02E+01
1927	1.9485E+00	1.77E+01	7.54E+01	2.005E+00	2.1E+01	6.62E+01	4.96E+01
1928	1.9666E+00	1.81E+01	7.44E+01	2.026E+00	2.1E+01	6.69E+01	4.90E+01
1929	1.9851E+00	1.85E+01	7.34E+01	2.048E+00	2.2E+01	6.45E+01	4.85E+01
1930	2.0040E+00	1.89E+01	7.25E+01	2.070E+00	2.2E+01	6.52E+01	4.79E+01
1931	2.0234E+00	1.94E+01	7.15E+01	2.092E+00	2.2E+01	6.59E+01	4.73E+01
1932	2.0433E+00	1.98E+01	7.06E+01	2.113E+00	2.1E+01	6.97E+01	4.68E+01
1933	2.0636E+00	2.03E+01	6.96E+01	2.135E+00	2.2E+01	6.73E+01	4.62E+01
1934	2.0844E+00	2.08E+01	6.86E+01	2.158E+00	2.3E+01	6.50E+01	4.56E+01
1935	2.1057E+00	2.13E+01	6.77E+01	2.180E+00	2.2E+01	6.87E+01	4.51E+01
1936	2.1275E+00	2.18E+01	6.67E+01	2.203E+00	2.3E+01	6.64E+01	4.45E+01
1937	2.1499E+00	2.24E+01	6.58E+01	2.226E+00	2.3E+01	6.71E+01	4.40E+01
1938	2.1729E+00	2.29E+01	6.48E+01	2.249E+00	2.3E+01	6.78E+01	4.34E+01
1939	2.1964E+00	2.35E+01	6.39E+01	2.272E+00	2.3E+01	6.85E+01	4.29E+01
1940	2.2205E+00	2.42E+01	6.29E+01	2.296E+00	2.4E+01	6.63E+01	4.23E+01
1941	2.2453E+00	2.48E+01	6.20E+01	2.317E+00	2.1E+01	7.65E+01	4.18E+01
1942	2.2708E+00	2.55E+01	6.10E+01	2.338E+00	2.1E+01	7.72E+01	4.13E+01
1943	2.2969E+00	2.61E+01	6.01E+01	2.360E+00	2.2E+01	7.44E+01	4.07E+01
1944	2.3238E+00	2.69E+01	5.91E+01	2.382E+00	2.2E+01	7.50E+01	4.02E+01
1945	2.3514E+00	2.76E+01	5.82E+01	2.403E+00	2.1E+01	7.93E+01	3.97E+01
1946	2.3798E+00	2.84E+01	5.73E+01	2.426E+00	2.3E+01	7.31E+01	3.91E+01
1947	2.4090E+00	2.92E+01	5.64E+01	2.448E+00	2.2E+01	7.71E+01	3.86E+01
1948	2.4390E+00	3.01E+01	5.55E+01	2.470E+00	2.2E+01	7.78E+01	3.81E+01
1949	2.4700E+00	3.09E+01	5.45E+01	2.493E+00	2.3E+01	7.51E+01	3.75E+01
1950	2.5018E+00	3.19E+01	5.36E+01	2.516E+00	2.3E+01	7.58E+01	3.70E+01

TABLE 3 (suite)

1	2	3	4	5	6	7	8
t	n	n(t)-n(t-1)	τ_{2p}	n	n(t)-n(t-1)	τ_{2p}	T_2
année	Eq. (17) milliards	Eq. (17) millions	Eqs (15/17) années	selon PRB milliards	selon PRB millions	selon PRB années	Eq. (17) années
1951	2.5347E+00	3.28E+01	5.27E+01	2.561E+00	4.5E+01	3.94E+01	3.65E+01
1952	2.5685E+00	3.38E+01	5.18E+01	2.607E+00	4.6E+01	3.93E+01	3.60E+01
1953	2.6034E+00	3.49E+01	5.10E+01	2.654E+00	4.7E+01	3.91E+01	3.55E+01
1954	2.6393E+00	3.60E+01	5.01E+01	2.702E+00	4.8E+01	3.90E+01	3.50E+01
1955	2.6764E+00	3.71E+01	4.92E+01	2.751E+00	4.9E+01	3.89E+01	3.45E+01
1956	2.7147E+00	3.83E+01	4.83E+01	2.803E+00	5.2E+01	3.74E+01	3.40E+01
1957	2.7543E+00	3.96E+01	4.75E+01	2.855E+00	5.2E+01	3.81E+01	3.35E+01
1958	2.7952E+00	4.09E+01	4.66E+01	2.909E+00	5.4E+01	3.73E+01	3.30E+01
1959	2.8374E+00	4.22E+01	4.58E+01	2.963E+00	5.4E+01	3.80E+01	3.25E+01
1960	2.8811E+00	4.37E+01	4.50E+01	3.019E+00	5.6E+01	3.74E+01	3.20E+01
1961	2.9263E+00	4.52E+01	4.41E+01	3.080E+00	6.1E+01	3.50E+01	3.15E+01
1962	2.9731E+00	4.68E+01	4.33E+01	3.141E+00	6.1E+01	3.57E+01	3.10E+01
1963	3.0215E+00	4.84E+01	4.25E+01	3.204E+00	6.3E+01	3.53E+01	3.06E+01
1964	3.0717E+00	5.02E+01	4.17E+01	3.268E+00	6.4E+01	3.54E+01	3.01E+01
1965	3.1237E+00	5.20E+01	4.09E+01	3.334E+00	6.6E+01	3.50E+01	2.96E+01
1966	3.1776E+00	5.39E+01	4.01E+01	3.403E+00	6.9E+01	3.42E+01	2.92E+01
1967	3.2335E+00	5.59E+01	3.93E+01	3.473E+00	7.0E+01	3.44E+01	2.87E+01
1968	3.2916E+00	5.81E+01	3.86E+01	3.545E+00	7.2E+01	3.41E+01	2.82E+01
1969	3.3518E+00	6.03E+01	3.78E+01	3.618E+00	7.3E+01	3.44E+01	2.78E+01
1970	3.4145E+00	6.26E+01	3.71E+01	3.693E+00	7.5E+01	3.41E+01	2.73E+01
1971	3.4796E+00	6.51E+01	3.63E+01	3.767E+00	7.4E+01	3.53E+01	2.69E+01
1972	3.5473E+00	6.77E+01	3.56E+01	3.842E+00	7.5E+01	3.55E+01	2.64E+01
1973	3.6177E+00	7.05E+01	3.49E+01	3.918E+00	7.6E+01	3.57E+01	2.60E+01
1974	3.6911E+00	7.34E+01	3.42E+01	3.996E+00	7.8E+01	3.55E+01	2.56E+01
1975	3.7675E+00	7.64E+01	3.35E+01	4.076E+00	8.0E+01	3.53E+01	2.51E+01
1976	3.8472E+00	7.97E+01	3.28E+01	4.148E+00	7.2E+01	3.99E+01	2.47E+01
1977	3.9302E+00	8.31E+01	3.21E+01	4.222E+00	7.4E+01	3.95E+01	2.43E+01
1978	4.0169E+00	8.67E+01	3.14E+01	4.296E+00	7.4E+01	4.02E+01	2.39E+01
1979	4.1074E+00	9.05E+01	3.08E+01	4.373E+00	7.7E+01	3.94E+01	2.35E+01
1980	4.2020E+00	9.46E+01	3.01E+01	4.450E+00	7.7E+01	4.01E+01	2.30E+01
1981	4.3008E+00	9.88E+01	2.95E+01	4.525E+00	7.5E+01	4.18E+01	2.26E+01
1982	4.4042E+00	1.03E+02	2.89E+01	4.601E+00	7.6E+01	4.20E+01	2.22E+01
1983	4.5125E+00	1.08E+02	2.82E+01	4.678E+00	7.7E+01	4.21E+01	2.18E+01
1984	4.6258E+00	1.13E+02	2.76E+01	4.757E+00	7.9E+01	4.17E+01	2.15E+01
1985	4.7446E+00	1.19E+02	2.70E+01	4.837E+00	8.0E+01	4.19E+01	2.11E+01
1986	4.8692E+00	1.25E+02	2.64E+01	4.916E+00	7.9E+01	4.31E+01	2.07E+01
1987	5.0000E+00	1.31E+02	2.59E+01	4.997E+00	8.1E+01	4.28E+01	2.03E+01
1988	5.1373E+00	1.37E+02	2.53E+01	5.078E+00	8.1E+01	4.35E+01	1.99E+01
1989	5.2817E+00	1.44E+02	2.47E+01	5.161E+00	8.3E+01	4.31E+01	1.96E+01
1990	5.4335E+00	1.52E+02	2.42E+01	5.246E+00	8.5E+01	4.28E+01	1.92E+01
1991	5.5933E+00	1.60E+02	2.36E+01	5.330E+00	8.4E+01	4.40E+01	1.88E+01
1992	5.7616E+00	1.68E+02	2.31E+01	5.415E+00	8.5E+01	4.42E+01	1.85E+01
1993	5.9390E+00	1.77E+02	2.26E+01	5.501E+00	8.6E+01	4.43E+01	1.81E+01
1994	6.1262E+00	1.87E+02	2.21E+01	5.589E+00	8.8E+01	4.40E+01	1.78E+01
1995	6.3239E+00	1.98E+02	2.16E+01	5.678E+00	8.9E+01	4.42E+01	1.74E+01
1996	6.5327E+00	2.09E+02	2.11E+01	5.764E+00	8.6E+01	4.65E+01	1.71E+01
1997	6.7536E+00	2.21E+02	2.06E+01	5.852E+00	8.8E+01	4.61E+01	1.68E+01
1998	6.9874E+00	2.34E+02	2.01E+01	5.940E+00	8.8E+01	4.68E+01	1.64E+01
1999	7.2351E+00	2.48E+02	1.97E+01	6.030E+00	9.0E+01	4.64E+01	1.61E+01
2000	7.4978E+00	2.63E+02	1.92E+01	6.122E+00	9.2E+01	4.61E+01	1.58E+01

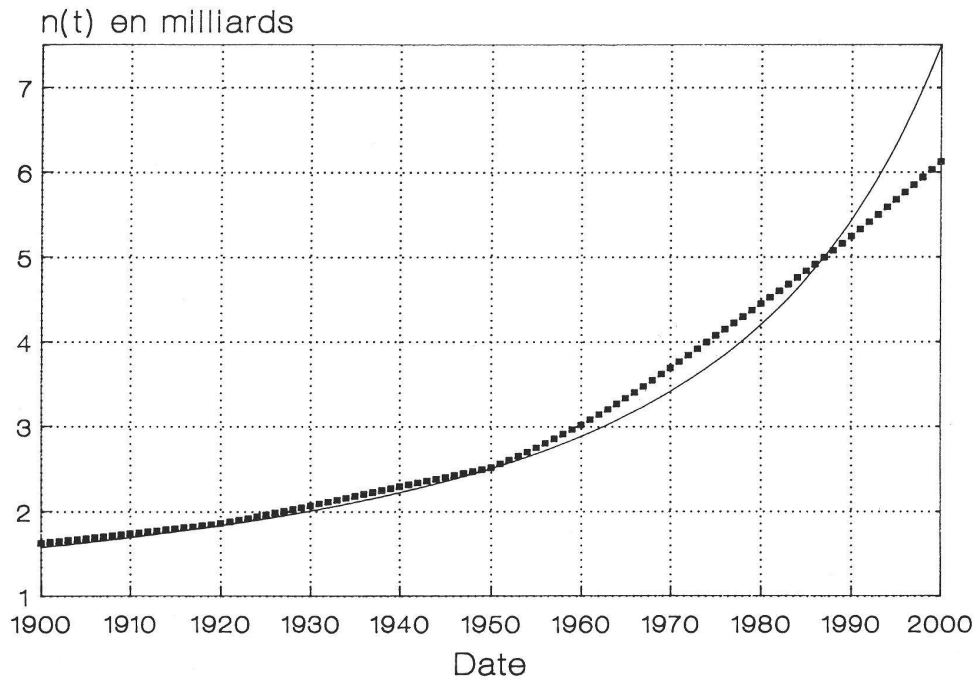


Fig. 5. Evolution de la population du globe au cours du siècle présent. La courbe correspond à notre équation (17) et les points aux valeurs de la Table 3 fournies par le PRB (Bureau démographique des Etats-Unis), selon les estimations au 1^{er} février 1989 (colonne 5 de la Table 3).

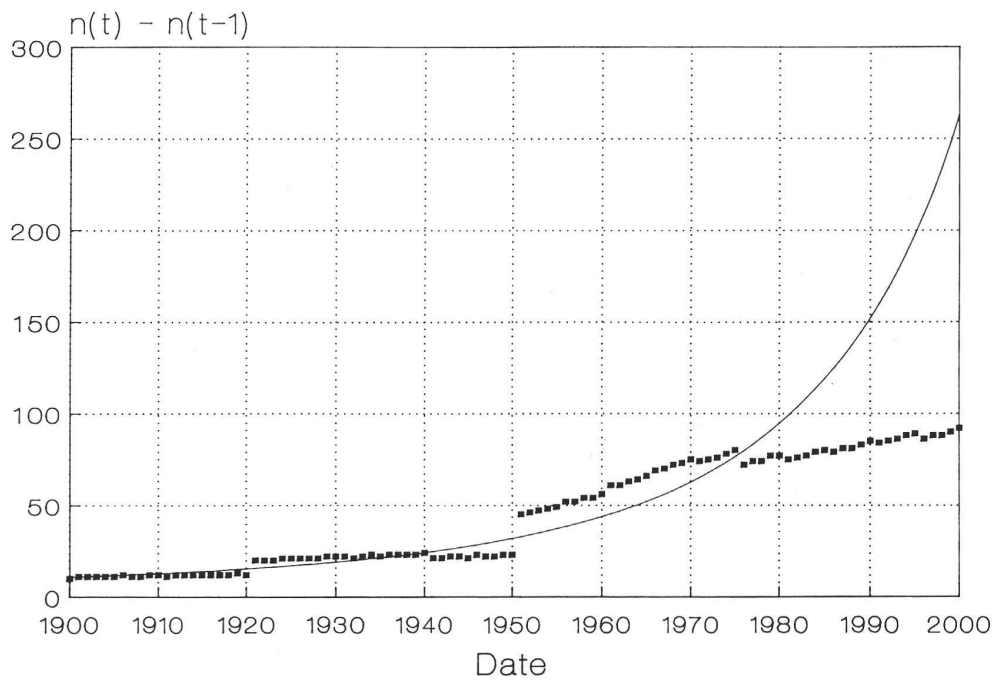


Fig. 6. Accroissements annuels de la population du globe exprimés en millions. La courbe provient de notre équation (17), les points sont dérivés des valeurs fournies par le PRB (colonne 6 de la Table 3).

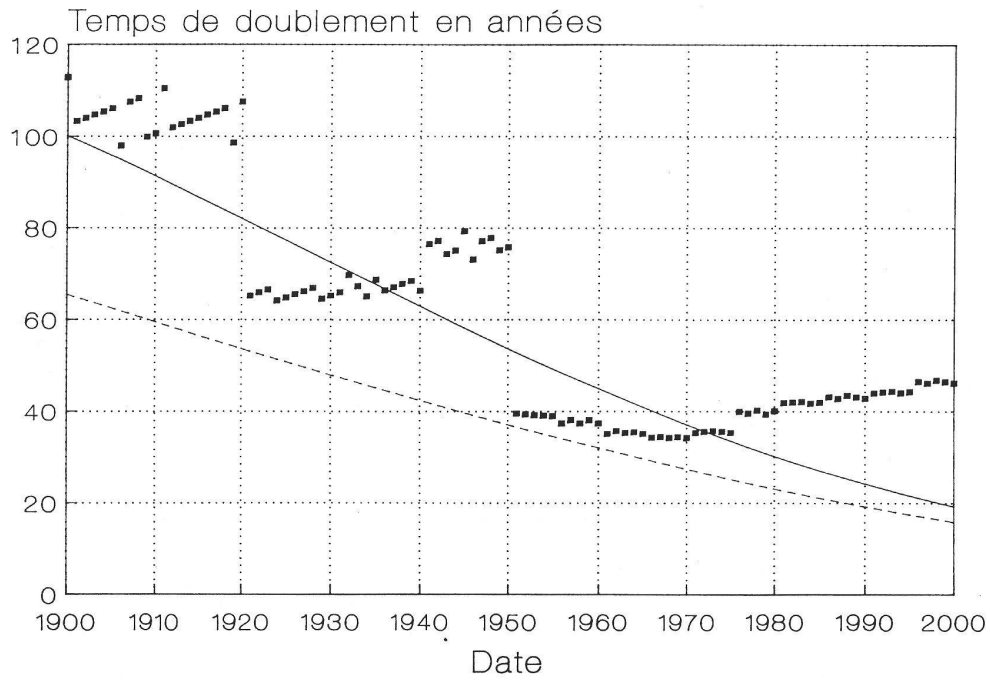


Fig. 7. Temps de doublement pour la population de la Terre. Le trait continu est le temps de doublement prédictif τ_p dérivé de notre équation (17). Le trait en tirets est le temps de doublement effectif τ_2 dérivé de cette même équation. Les points sont les temps de doublement prédictifs τ_{2p} découlant des données du PRB (colonne 7 de la Table 3). A cause de leur grande dispersion les valeurs du PRB mettent en doute le temps de doublement de 45 ans environ qu'elles impliquent pour le présent; ce temps pourrait aujourd'hui encore être nettement plus court.

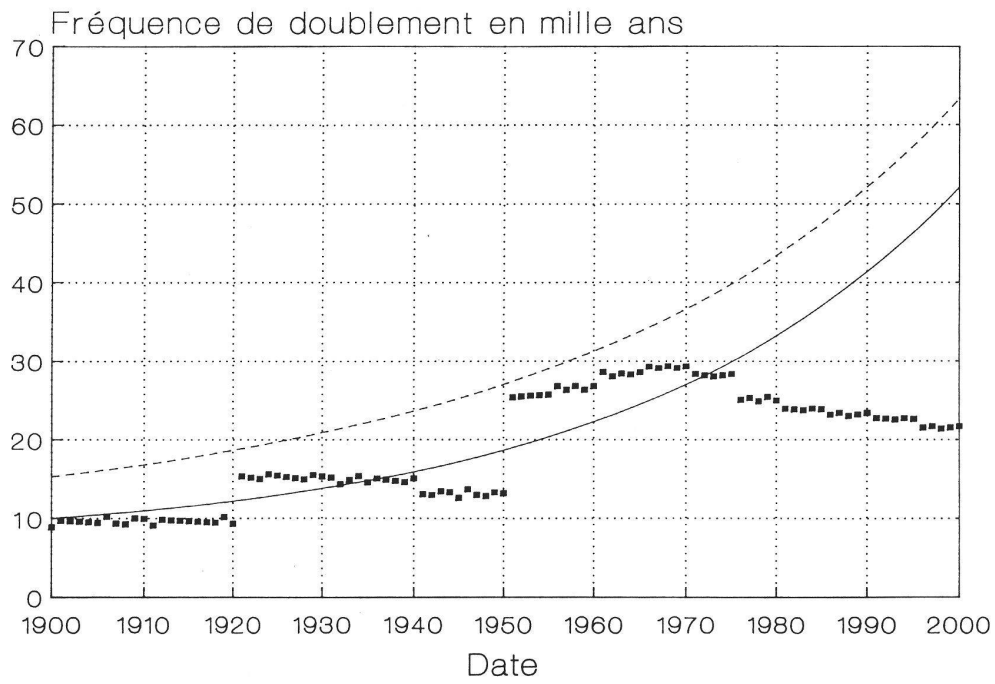


Fig. 8. Fréquence de doublement de la population du globe par milliers d'années. Ce diagramme est semblable à celui de la figure 4 à laquelle nous renvoyons, mais seulement pour l'intervalle de temps de 1900 à l'an 2000. La courbe continue représente des fréquences prédictives, celle en tirets des fréquences effectives, toutes deux dérivées de l'équation (17). Les points découlent des données du PRB pour la population $n(t)$, soit les colonnes 5 à 7 de la Table 3.

Nous venons de voir que les données du PRB doivent être mises en question. Cela ne met nullement en cause l'institution du PRB, mais démontre bien les difficultés qui se présentent à l'établissement d'un recensement global de la population humaine. Il n'en est pas moins vrai, cependant, que l'évolution démographique depuis 1975 pourrait montrer des signes de fléchissement par rapport à notre équation (17). Il est même possible que, présentement, le taux d'accroissement de la population soit en train de diminuer, auquel cas le temps de doublement effectif τ_2 deviendrait plus long que le temps prédictif τ_{2p} , c'est-à-dire que les deux courbes de la figure 7 devraient non seulement se redresser, mais que la courbe en tirets pourrait passer au-dessus de celle en trait continu. Pour la fréquence de doublement, représentée à la figure 8, les deux courbes pourraient se rabattre à partir de 1975, celle en tirets passant même au-dessous du trait continu.

Même si l'on admet pour le présent un temps de doublement qui se met progressivement à croître, mais qui reste dans la fourchette de 40 à 50 ans, la population de la Terre atteindra 10 milliards dans les années 2030 à 2040. Pour espérer atteindre une population stable ou décroissante il est absolument impératif que le temps de doublement tende vers l'infini, ce qui revient à dire que les courbes de la figure 8 doivent absolument retomber sur l'abscisse.

12. CONCLUSIONS

Nous avons cherché à décrire l'évolution de la population humaine du globe par une formulation mathématique aussi simple que possible. Pour la période moderne de 1600 à 1987 nous avons trouvé une expression $n(t)$ qui rend extrêmement bien compte des estimations les plus sûres que l'on connaisse. Notre équation (17) conduit donc aussi à un excellent accord avec les temps de doublement connus. L'explosion démographique que la population humaine connaît aujourd'hui est parfaitement rendue.

La période intermédiaire du début de l'ère chrétienne a connu une population plutôt stable à long terme, mais sujette à de violentes fluctuations à court terme. Ce comportement a été bien décrit par WELLEMAYER (1962) et nous l'avons simplement repris sans chercher à le décrire par des équations mathématiques compliquées.

Pour la période avant notre ère nous pensons avoir trouvé une représentation qui satisfait les critères de plausibilité auxquels l'évolution de la population du globe est nécessairement soumise. Ainsi, la fonction $n(t)$ doit-elle être comprise dans une fourchette de valeurs qui laisse ouverte la question de savoir à quel moment *Homo sapiens* a effectivement pris la relève de ses progéniteurs.

Nos estimations du nombre total d'êtres humains que la Terre a connu depuis les origines de l'espèce indiquent clairement que le chiffre de 5 milliards a été atteint bien avant notre ère, dans un passé qui va probablement très au-delà de 20 000 ans.

Cette étude nous a aussi contraints d'aborder les questions de l'évolution de l'espérance de vie τ_e au cours des âges. Nous sommes d'avis qu'au-delà d'un passé de 10 000 ans τ_e était inférieur à l'âge de procréation. Aujourd'hui τ_e est voisin de 50 ans et son augmentation récente contribue à l'explosion démographique.

Le temps de doublement τ_2 , par contre pourrait avoir cessé de décroître et ne pas suivre les figures 4 et 7. Selon notre équation il atteindrait aujourd'hui la limite de 20 ans environ. Il est bien clair, cependant, que ce temps ne peut pas descendre indéfiniment. Il vaut aussi la peine de reprendre un argument du début de cette étude, afin de bien faire apparaître l'urgence du problème démographique: avec un temps de doublement qui aurait toujours été de 20 ans, il aurait suffi d'un seul couple d'humains vivant en 1364 pour engendrer les 5 milliards de descendants que la Terre connaît à présent!

Remerciements

L'auteur tient à remercier son institution qui lui a permis de faire cette étude, ainsi que Simone Wüthrich, Jeanine Langenegger et Ji Ma pour leur assistance technique et le professeur Alain Robert pour sa lecture soigneuse du premier manuscrit.

Résumé

L'auteur cherche à donner une représentation mathématique de l'évolution de la population humaine depuis ses origines. Pour le passé récent, de 1600 à 1987, une formulation précise peut être proposée, qui reproduit les meilleures estimations connues avec une très grande exactitude. La période intermédiaire, du début de l'ère chrétienne à 1600 est difficile à cerner, caractérisée qu'elle est par une certaine stabilité à long terme, mais aussi par de violentes fluctuations à court terme, causées par divers fléaux tels qu'épidémies, invasions sur de grandes échelles et famines. Une représentation mathématique précise n'y serait pas justifiée. Les estimations que l'on peut faire pour la période précédant notre ère sont, elles aussi, peu sûres, mais des critères de plausibilité peuvent être invoqués pour proposer une fourchette de valeurs acceptables, de façon à laisser ouverte la question de savoir à quel moment de l'histoire il faut situer l'apparition d'*Homo sapiens*.

BIBLIOGRAPHIE

- ACSÁDI, G. et NEMESKÉRI, J. — (1970). History of human life span and mortality. *International Publications Service*.
- BOURGEOIS-PICHAT, J. — (1988). Du XX^e au XXI^e siècle: l'Europe et sa population après l'an 2000. *Population* 43^e année, N^o 1, pp. 9-43.
- COALE, A. J. — (1974). The history of the human population. *Scientific American*, vol. 231, pp. 41-51 (September 1974).

- EHRlich, P. R. — (1968). *The population bomb*. Sierra Club-Ballantine Books, Inc., *New York*, N. Y.
- FISCHER, G. — (1985). Existe-t-il d'autres civilisations dans l'Univers avec lesquelles nous pourrions entrer en contact. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 108: 183-189.
- (1988). Lettre à l'éditeur. *Population and Environment*, vol. 10, N° 2, p. 128. Voir aussi les autres lettres aux pp. 122 à 132.
- VON FOERSTER, J., MORA, P. M. et AMIOT, L. W. — (1960). Doomsday: Friday, 13 November, A. D. 2026. *Science*, vol. 132, pp. 1291-1295.
- McEVEDY, C. — (1988). La peste bubonique. *Pour la Science*, N° 126, pp. 72-77 (avril 1988); traduction de: The bubonic plague. *Scientific American*, vol. 258, pp. 74-79 (February 1988).
- ONU — (1966). World population prospects as assessed in 1963 / *Population Studies*, N° 41.
- RAPPORT MEADOWS — (1972). Halte à la croissance? (Enquête sur le Club de Rome et Rapport sur les limites de la croissance). *Paris*.
- WELLEMAYER, F. — (1962). How many people have ever lived on Earth? *Population Bulletin*, vol. 18, pp. 3-19.