

TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUE, DÉMOGRAPHIQUE, ET ÉCONOMIQUE : DEUX ESSAIS DE MODÉLISATION

Séminaire de recherche de la Chaire Énergie & Prospérité

16.11.2018

Victor COURT

University of Sussex (Business School, SPRU) | Chair Energy & Prosperity



■ Outlines

- 1 A simple phenomenological model of the world population dynamics
- 2 Energy, knowledge, and demo-economic development in the long-run

■ Motivation

- Surpopulation est un enjeu dans le débat sur le changement climatique (Ripple et al., 2017).
- Population exogène dans les Integrated Assessment Model (IAM), basée sur modèle de l'ONU.
- **Besoin d'un modèle de population endogène pouvant être ajouté à n'importe quel IAM, en particulier le modèle GEMMES de l'AFD.**

	Advantages	Flaws
<i>Carrying capacity type models</i>	Tractable problem with closed-form solutions	Need to define the carrying capacity of the Earth
<i>Complex World3 type models</i>	Realist 5-years age structure	Opacity regarding driving mechanisms
<i>Cohort-component UN type models</i>	Realist sex and 5-years age structure	Need for three age-specific exogenous time series
<i>Present article</i>	Realist 5-years age structure, GWP is the only exogenous driver, model remains comprehensible	Possible difficulty to obtain closed-form solutions

Table – Avantages et inconvénients de différent modèles de population humaine mondiale.

■ Modèle théorique (1/3)

La population mondiale, N , est divisée en n groupes, N_i , tel que

$$N = \sum_{i=1}^n N_i.$$

Les données de l'ONU distingue 14 groupes d'âge ($N_1, \dots, N_{14}$) à une fréquence de cinq ans, que nous pouvons agréger en quatre cohortes ($C_1, \dots, C_4$).

- $C_1 := \sum_{i=1}^3 N_i$, les jeunes inactifs de 0 à 14 ans;
- $C_2 := \sum_{i=4}^{10} N_i$, la population active en âge de procréer de 15 à 49 ans;¹
- $C_3 := \sum_{i=11}^{13} N_i$, la population active âgée de 50 à 64 ans; et
- $C_4 := N_{14}$, la population retraitée du marché du travail à partir de 65 ans.

1. On ignore donc le fait que certains individus, en particulier masculins, peuvent avoir des enfants après 49 ans.

■ Modèle théorique (2/3)

La dynamique de chaque groupe i suit,

$$\dot{N}_i = I_i - O_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

où

- I_i , le flux entrant de population du groupe d'âge i (naissances ou transfère depuis le groupe d'âge précédent);
- O_i , est le flux sortant de population du groupe d'âge i (morts ou transfère vers le groupe d'âge suivant).

Soit $N^d = \sum_{i=1}^{14} N_i^d$, le nombre total de décès et N_i^d le nombre de décès dans le groupe i . Intuitivement, le nombre global de naissances, I_1 , est

$$I_1 := \dot{N} + N^d.$$

Il est alors facile d'obtenir le transfert de population du groupe 1 au groupe 2, $T_{1,2}$, comme suit

$$T_{1,2} := I_1 - \dot{N}_1 - N_1^d.$$

■ Modèle théorique (3/3)

Par conséquent, nous identifions l'Eq. 1 pour la dynamique du groupe d'âge N_1 comme suit

$$\dot{N}_1 = I_1 - \underbrace{O_1}_{=T_{1,2}+N_1^d}.$$

La logique est similaire pour les groupes $N_2, \dots, N_{13}$ pour lesquels $I_i := T_{i-1,i}$, et $O_i := T_{i,i+1} + N_i^d$. Et en toute logique, le flux sortant du dernier grouper n'est caractérisé que par $O_{14} := N_{14}^d$.

Par conséquent, en faisant les hypothèses :

- d'une stricte parité entre les sexes dans la population;
- d'une répartition uniforme des individus par âge au sein de chacun des quatorze groupes d'âge (mais bien sûr par d'un groupe à l'autre);
- **et sous réserve de posséder le taux de natalité (de la cohorte C_2) et les taux de mortalités de chaque groupe d'âge;**

nous sommes en mesure de déterminer chaque variable de l'Eq. 1 pour les quatorze groupes d'âge, et par conséquent nous pouvons calculer la population mondiale totale N .

■ Détermination des taux de natalité et mortalité : faits

- Taux de natalité dépendent de :
 - i éducation (Becker et al., 2010, Murphy, 2015);
 - ii demande de capital humain (Galor and Mountford, 2008);
 - iii secularisation (Peri-Rotem, 2016);
 - iv schéma matrimonial, âge de mariage notamment (Carmichael et al., 2016);
 - v émancipation des femmes (Diebolt and Perrin, 2013, Murphy, 2015);
 - vi inégalités de richesse (Cummins, 2013).
- Taux de mortalité dépendent de :
 - i niveau et qualité de la nutrition (De Onis, 2000);
 - ii réductions de la prévalence des maladies contagieuses et infectieuses par hygiène personnelle et mesures de santé publiques (Luby, 2017);
 - iii réductions de la prévalence des maladies chroniques et dégénératives par avancées de la médecine (Lee, 2003);
 - iv pollution locale de l'air (Di et al., 2017);
 - v fréquence des conflits armés (Guha-Sapir and van Panhuis, 2003).

■ Détermination des taux de natalité et mortalité : choix de modélisation

- Nous choisissons le **produit mondial brut par habitant (PMB/hab ou GWP/capita en anglais)** comme variable *de corrélation* de l'évolution du taux de natalité et des taux de mortalité par group d'âge.
- Malgré les inconvénients bien connus qui entourent le PMB en tant qu'indicateur de richesse (ou de prospérité), nous faisons l'hypothèse que cet indicateur demeure une bonne approximation des facteurs explicatifs énumérés ci-avant pour déterminer l'évolution des taux de natalité et de mortalité.
- L'approche proposée ici est donc phénoménologique (plutôt que micro-fondée), car elle repose sur des relations qui émergent des données observées à long terme au niveau mondial.

■ Taux de natalité en fonction du PMB/habitant

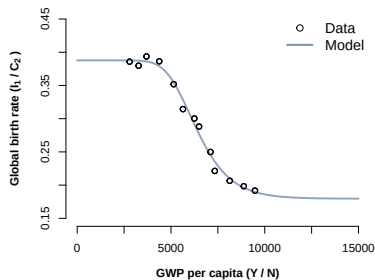


Figure – Taux de natalité mondial en fonction du PMB/hab, 1950–2015.

$$BR := \overline{BR} + \frac{\underline{BR} - \overline{BR}}{(1 + \exp(-\delta(Y/N - \phi)))^{\frac{1}{\nu}}} \quad (2)$$

où,

- $\overline{BR}$ et $\underline{BR}$ représentent respectivement les asymptotes supérieure et inférieure;
- δ est un paramètre de pente;
- ϕ est la valeur de PMB/hab qui détermine le point d'inflexion; et
- ν est un paramètre qui contrôle la courbure de la fonction à l'approche des asymptotes.

■ Taux de mortalité en fonction du PMB/habitant

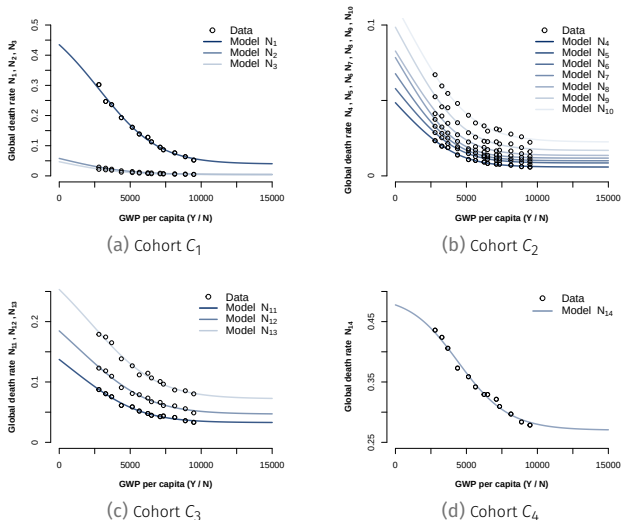


Figure – Taux de mortalité mondial de chaque groupe d'âge en fonction du PMB/hab, 1950–2015.

■ Modèle vs. données historiques

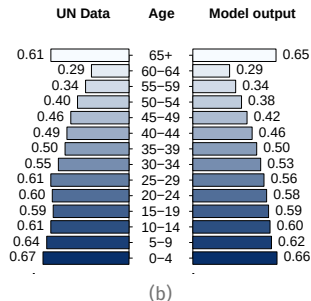
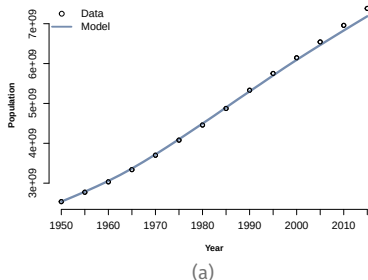
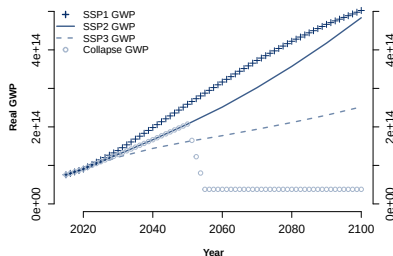
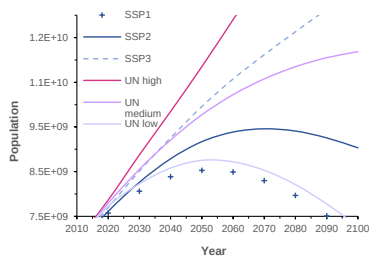


Figure – (a) Niveau de population, 1950–2015; (b) pyramides des âges en 2015 (en milliards).

■ Trajectoires de PMB exogènes



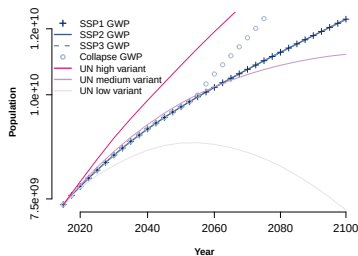
(a)



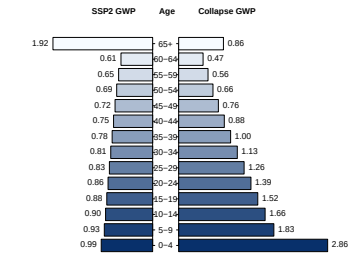
(b)

Figure – (a) Quatre scénarios du PMB exogènes, et (b) trajectoires démographiques originales des scénarios SSP par rapport aux variantes de l'ONU, et 2015–2100.

■ Résultats de simulation



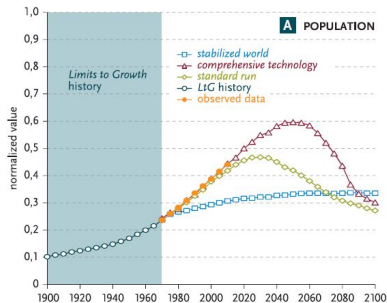
(a)



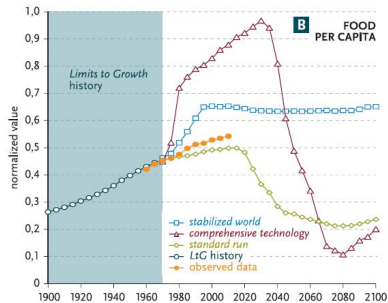
(b)

Figure – (a) Projections démographiques mondiales du modèle pour les quatre scénarios de PMB exogènes par rapport à trois variantes de l'ONU, 2015-2100; (b) pyramides des âges en 2100 pour les scénarios SSP2 et Collapse (en milliards).

■ Retour sur *World3*



(a)



(b)

Figure – Résultats du modèle *World3* de Meadows et al. (1972) pour les variables population (a), et nourriture par personne (b), 1900–2100. Source : Turner (2012).

■ Résultats de simulation : pourcentage de population active

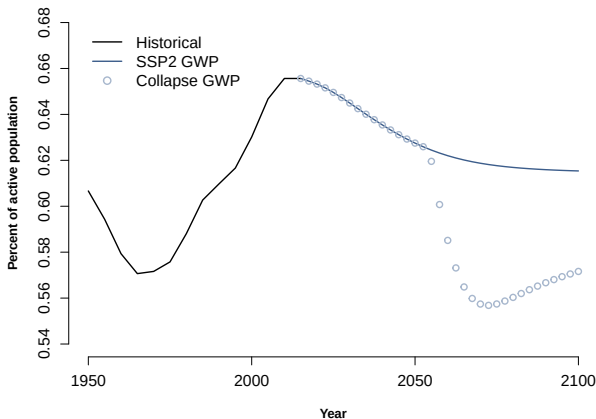


Figure – Pourcentage de population active historique et pour les scénarios de PMB SSP2 et *Collapse*.

■ Besoin d'inclure un changement de régime en période de décroissance économique?

- Comme notre modèle a été calibré dans le cadre d'un PMB en constante augmentation, nous pouvons être plus confiants dans les résultats qu'il produit dans le cadre des trois scénarios *SSP* que dans le cadre du scénario *Collapse*.
- Revue de la littérature sur l'impact des récessions économiques passées sur les taux de natalité et de mortalité :
 - i Il est impossible d'attribuer une tendance à la baisse de la fécondité à une récession, car dans tous les pays étudiés, les taux de natalité étaient en baisse depuis longtemps avant les épisodes de décroissance économique.
 - ii De même, l'effet néfaste des récessions sur la santé n'est pas assez important pour inverser les progrès accumulés du système de santé (pas d'augmentation statistiquement significatives des taux de mortalité agrégés), sauf dans le cas d'un effondrement des institutions (cf. exemple de l'URSS).
- Il semble donc justifié de considérer que c'est le **niveau** du PIB/habitant, plutôt que son **taux de changement** à la hausse ou à la baisse, qui détermine à la fois les taux de natalité et de mortalité.
- Par conséquent, notre modèle de population mondiale ne nécessite pas d'ajustement supplémentaire.

■ Ajout d'une fonction de surmortalité associée au changement climatique

Nous adoptons la formulation de Pottier et al. (2018) :

$$\widetilde{DR}_i = DR_i \underbrace{\left[1 + \underbrace{\sum_{j \in J} \alpha_{i,j}}_{\text{Multiplicateur induit par le changement climatique}} \underbrace{\left(\frac{T}{T^0} \right)^\theta}_{\text{Anomalie de température}} \right]}_{\text{Anomalie de température}} . \quad (3)$$

Multiplicateur induit par le changement climatique

où,

- T^0 est l'anomalie de température de calibration, c'est-à-dire le changement de température de +2,5°C en 2050 pour le scénario A1b utilisé dans l'étude de l'OMS ;
- $\alpha_{i,j}$ est l'augmentation relative de la probabilité de décès due au risque j pour le groupe d'âge i à T^0 ;
- T est l'anomalie de température globale effective par rapport à l'ère préindustrielle ;
- θ est un paramètre spécifiant la dépendance de la probabilité de mourir par rapport à la température.

■ Calibration de la fonction de surmortalité associée au changement climatique

	Sous-nutrition	Malaria (paludisme)	Dengue	Maladies diarrhéiques	Vagues de chaleur	Total
Décès supplémentaires dans le monde en 2030	95,176 (-119,807 to 310,156)	60,091 (37,608 to 117,001)	258 (136 to 331)	48,114 (21,097 to 67,702)	37,588 (26,912 to 48,390)	241,227 (-34,054 to 543,580)
Décès supplémentaires dans le monde en 2050	84,697 (-29,203 to 163,989)	32,695 (22,786 to 40,817)	282 (195 to 342)	32,955 (14,914 to 49,151)	94,621 (70,775 to 126,684)	245,250 (79,467 to 380,983)

Table – Décès supplémentaires dans le monde en 2030 et 2050 imputables au changement climatique. Source : OMS/WHO (2014, p. 7 et p. 12, respectivement).

	Sous-nutrition	Malaria (paludisme)	Dengue	Maladies diarrhéiques	Vagues de chaleur
0-4	1	1/14	1/14	1/3	0
5-9	0	1/14	1/14	1/3	0
10-14	0	1/14	1/14	1/3	0
15-19	0	1/14	1/14	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60-64	0	1/14	1/14	0	0
>65	0	1/14	1/14	0	1

Table – Proportion des décès supplémentaires fournis par l'OMS (2014) attribuée à chaque groupe d'âge.

■ Trajectoires d'accroissement de température

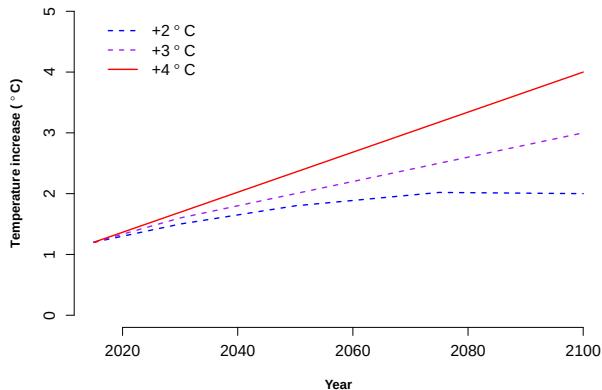
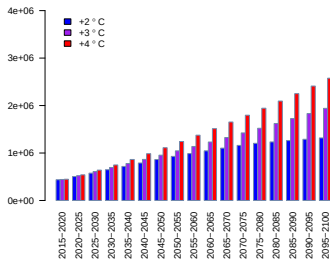
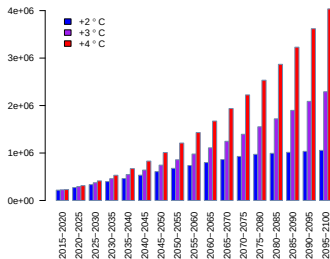


Figure – Trois scénarios prospectifs de changement de température (par rapport à l'ère préindustrielle).

■ Résultats de simulation avec PMB de type SSP2



(a) $\theta = 1$



(b) $\theta = 2$

Figure – Décès provoqués par le changement climatique tous les cinq ans avec PMB de type SSP2.

■ Résultats de simulation avec PMB de type *Collapse*

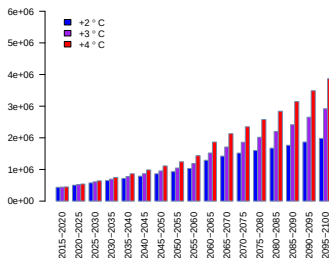
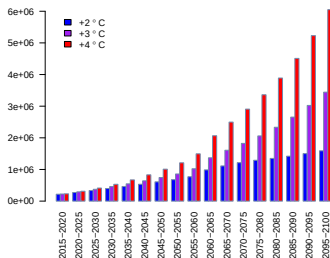
(a) $\theta = 1$ (b) $\theta = 2$

Figure – Décès provoqués par le changement climatique tous les cinq ans avec le PMB exogène *Collapse*.

■ Conclusion (1/2)

En utilisant le produit mondial brut comme seule variable d'entrée exogène pour déterminer le taux de natalité et les taux de mortalité spécifique par âge, notre modèle reproduit assez fidèlement la dynamique démographique mondiale sur la période 1950-2015.

Pour tout scénario prospectif d'augmentation du PMB, notre modèle produit des résultats cohérents d'augmentation de la population

- L'une des implications de ce résultat de simulation est que les Nations Unies et le GIEC ne tiennent pas compte de la relation historique qui a prévalu entre le PMB et la population de 1950 à 2015, et assument donc des possibilités futures de découplage entre développement économique et fécondité qui n'ont jamais été observées au cours des soixante-cing dernières années.

■ Conclusion (1/2)

Dans le cas d'un effondrement brutal de la production économique, la population devient relativement plus importante et plus jeune. Ce résultat peut sembler contre-intuitif, en particulier si l'on pense aux résultats du modèle *World3* de Meadows et al. (1972). Mais les résultats d'effondrement de la population de *World3* sont dus au manque de ressources non renouvelables et à des niveaux de pollution, qui, combinés, entraînent une décroissance drastique de la production alimentaire.

L'ajout d'une fonction de surmortalité associée au changement climatique et sa calibration sur l'étude de l'OMS (2014) donne des décès supplémentaires en 2100 dus au changement climatique qui varient de 1 million par période de cinq ans dans un scénario $+2^\circ$ à 6 millions par période de cinq ans dans un scénario $+4^\circ$.

- Ce résultat pourrait donner lieu à deux interprétations très différentes : (i) les estimations de morts additionnels dus au changement climatique par l'OMS (2014) sont extrêmement prudentes, ou (ii) les résultats de l'étude Meadows et al. (1972) sont irréalistes car sinon ils impliqueraient un besoin de multiplication par un facteur 100 à 1000 des résultats de l'OMS (2014).

■ The Great Divergence

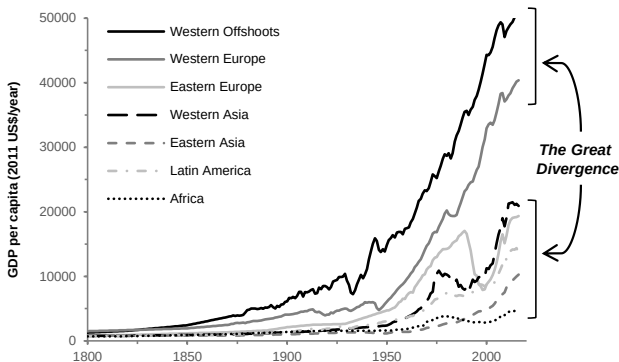


Figure – The Great Divergence across regional GDP per capita, 1800–2016.

Data source : ?.

- Malthusian regime : limited growth and relatively comparable levels of income per capita.
- Modern regime : only some countries experience sustained growth, resulting in expanding inequality across regions.

■ Unified Growth Theory : a framework to analyze this puzzle

- Need to identify the **deep-rooted** factors that might explain these observed patterns of comparative development :
 - ▶ What are the causes of the **occurrence** and the **persistence** of the Great Divergence ?
 - ▶ Why was Britain the **first region** experiencing such an economic take-off ?

- In other words : need to identify the **key underlying mechanisms** that prompted the industrial revolution.

- **Unified Growth Theory** (UGT) is an ongoing research area dedicated to the analysis of the **transition from limited to sustained economic growth** and the associated demographic transition. It aims at capturing within a single framework :

*“the **fundamental micro-foundations that are consistent with the process of economic development** over the [long-run, boosting] confidence in growth theory” (Galor, 2005)*

■ Unified Growth Theory : a flourishing literature

- Different mechanisms have been explored so far, such as :
 - ▶ a (population) scale effect on technological change (Galor and Weil, 2000);
 - ▶ the Darwinian selection of child quality-oriented individuals (Galor and Moav, 2002) or entrepreneurial-oriented individuals (Galor and Michalopoulos, 2012);
 - ▶ improvements in gender equality (Lagerlöf, 2003), or regarding child labor (Doepke, 2004);
 - ▶ increasing life expectancy rate and consequent improvement in life expectancy at birth (Cervellati and Sunde, 2005), or health (Hazan and Zoabi, 2006);
 - ▶ increase in agricultural productivity (Strulik and Weisdorf, 2008), markets' size (Desmet and Parente, 2012), or general scientific knowledge (O'Rourke et al., 2013).

- Limitation of previous UGT studies :
 - ▶ No explicit role for energy and resources : **an Industrial Revolution without coal and the steam engine ?**
 - ▶ **Without energy, UGT has little to say about the current and future state of the world under climate change.**

■ Coal + steam engine as land and labor savings

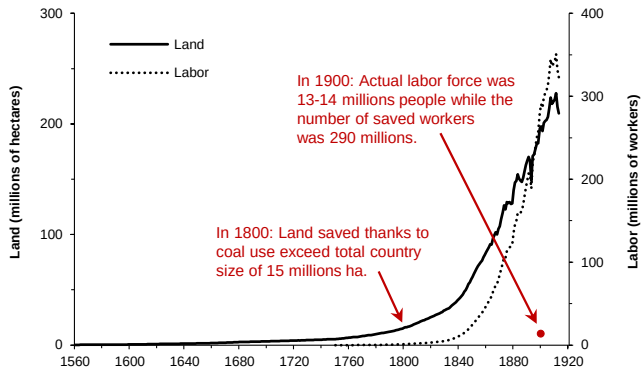


Figure – Land (millions of hectares, left vertical axis) and labour (millions of workers, right vertical axis) saved by the use of coal in England and Wales, 1560–1913 (Malanima, 2016).

- Need to account for the **provision of mechanical energy** associated with (if not fostering) the development process, and its relation to structural change.

■ Incentives for factors substitution and DTC

- Allen (2009), Pomeranz (2000) : (i) Wood scarcity and (ii) expensive labour relatively to coal and capital : price incentive for factor substitution and directed technical change (DTC).

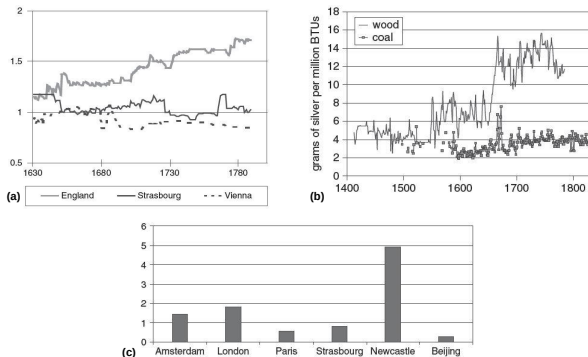


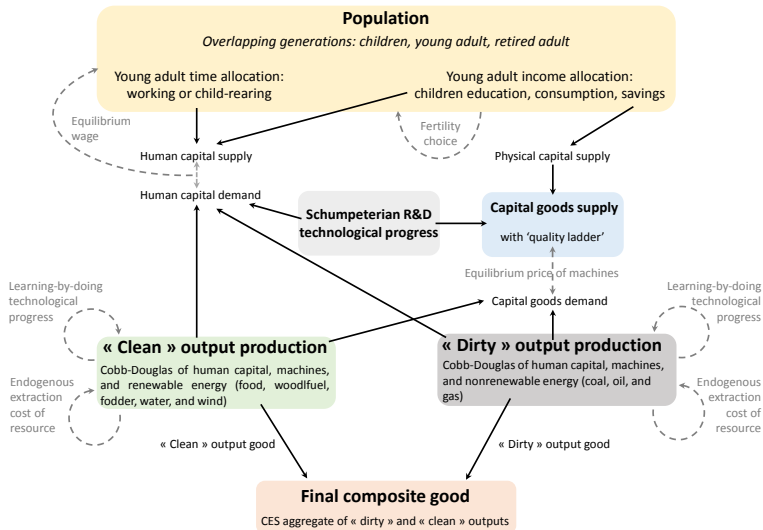
Figure – (a) Wage relative to the price of capital in three European cities, 1630-1790; (b) Real prices of wood and coal in London, 1400-1825; (c) Wage to energy relative price ratio in six cities, early 1700s.

Data source : Allen (2009)

■ Overview of the paper

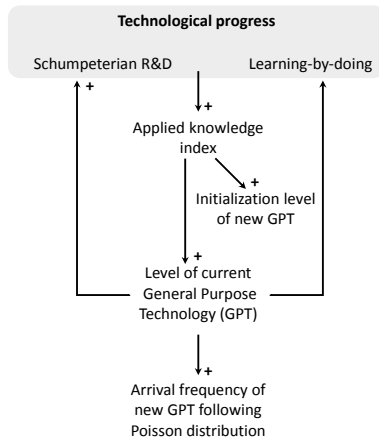
- Contribution : **provide a unified theoretical framework to quantify the role of energy use as a potential transition mechanism from limited to sustained growth.**
 1. Design a *General Equilibrium (GE) UGT framework explicitly featuring a transition between energy resources*;
 2. Analytical results for a simplified version of the model;
 3. Numerical analysis of the British industrial revolution : replication of stylized facts and quantification of the energy-growth relationship;
 4. Comparative dynamics of Western Europe and Eastern Asia (in progress).
- Main results :
 - ▶ Conventional UGT results : (i) quantity-quality trade-off (demographic transition), (ii) associated economic transition from stagnation to growth;
 - ▶ Underlying transition mechanism : **an energy transition triggered by DTC that allows to exploit previously untapped energy resources.**
 - ▶ Whenever energy inputs are sufficiently high substitutes, the **energy transition and industrial revolution are strongly associated** but extraction technologies have **substantial influence on their timings.**

■ The structure of the model



■ Technological progress and sequence of GPTs

- GPTs improve the *efficiency* of innovation, but not production levels *per se*.
- Following Schaefer et al. (2014), we assume the endogenous arrival (Poisson process) of GPTs' vintages ($G_{v,t}$) as a result of non-profit motivated activities.
- Endogenous vintage dynamics shaped by *total knowledge* accumulation, Q_t
- GPTs' stochastic arrivals imply a need for Monte-Carlo approach.



■ Simulation on the English case with counterfactual scenarios

- Complexity of the full unified growth model : *numerical analysis*.
- Focus on **the economic take-off of England** for the period 1560-1960 with 20-year period steps and three scenarios :

Baseline	Double Cost	Half GPT
Set to fit historical data	Doubling the extraction cost of the exhaustible resource	Halving the speed of GPT vintage's diffusion

Table – Set of scenarios considered.

■ Calibration strategy

- Data sources : Fouquet (2014), Fouquet and Broadberry (2015), Kander et al. (2013), Lee and Lee (2016), Warde (2007), ?
- Additional assumption : symmetry in learning-by-doing and R&D technological progress, leaving two sources of heterogeneity : (i) **resource extraction costs**, and (ii) **initial resource stocks**.
- Up to 31 parameters in the numerical version of the model : ***calibration relying on the literature and best fit algorithm (in progress)***.
 1. Preferences calibrated to match historical data (best-fit) and a targeted savings' rate;
 2. GPT dynamics' parameters calibrated to match their historical frequency;
 3. Resource extraction costs, learning-by-doing and R&D parameters then set to fit historical energy flows and GDP.

■ Baseline calibration (in progress)

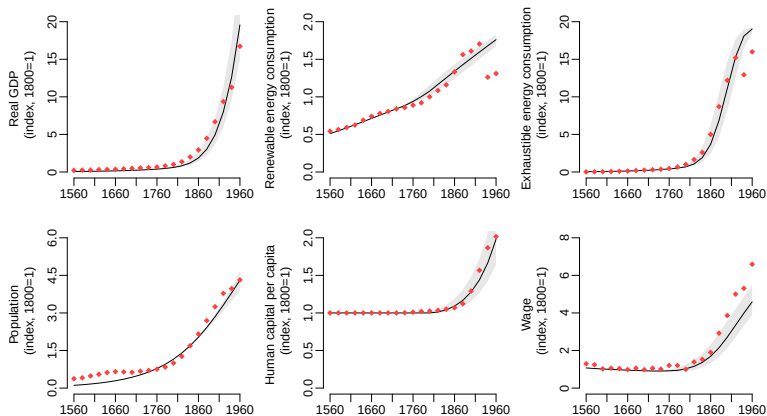


Figure – Comparison of *baseline* calibration (black solid line is the median, grey shade is the 90% confidence interval) with historical data (red diamonds), 1560–1960.

Data source : Fouquet (2014), Fouquet and Broadberry (2015), Kander et al. (2013), Lee and Lee (2016), Warde (2007).

■ Counter-factual analysis : graphics

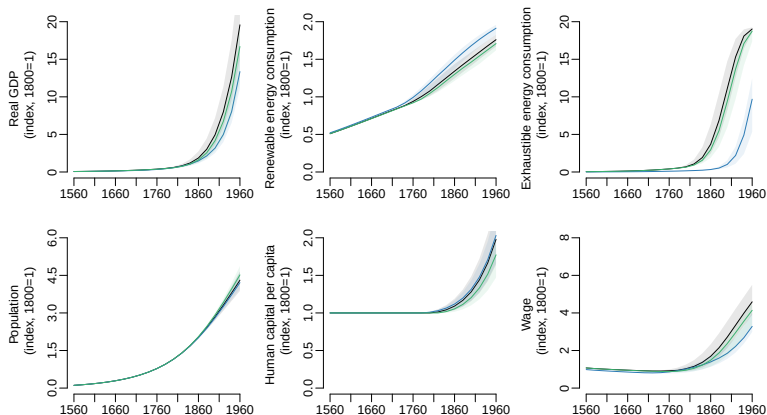


Figure – Comparison of *baseline* calibration (black) with counter-factual simulations *double cost* (blue), and *low diffusion* (green), 1560–1960; solid lines are the medians, shaded areas represent 90% confidence intervals.

■ Counter-factual analysis : key figures

Change w.r.t. Baseline	Renewable energy flow, 1900 (%)	Exhaustible energy flow, 1900 (%)	Real GDP, 1900 (%)
Double cost	11	-91	-37
Low diffusion	-4	-16	-18

Table – Changes in key variables between the average trajectories of the counter-factual scenarios and the *baseline* calibration.

Change w.r.t. Baseline	CAGR, 1800-1850 (pp)	CAGR, 1850-1900 (pp)
Double cost	-0.31	-0.37
Low diffusion	-0.15	-0.03

Table – Percentage point changes in GDP's compound annual growth rate (CAGR) between the average trajectories of the counter-factual scenarios and the *baseline* calibration.

■ Conclusion

- Research : **investigate the relationship between energy resource and economic transitions during the Industrial Revolution.**
- Rely on a UGT approach explicitly encompassing energy resources and associated technologies.
- Novel transition mechanism in UGT : **an energy transition triggered by DTC that allows to exploit previously untapped energy resources**
- Extraction technologies and underlying learning process have ***substantial influence on the timing*** (doubling costs $\approx$ 50 years delay).
- Next steps : improve the numerical analysis (this paper) and apply this framework to a prospective analysis of the coming energy transition (coming paper).

Thank you for your attention.

■ Bibliography

Allen, R. C. (2009). *The British Industrial Revolution in Global Perspective*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Becker, S. O., Cinnirella, F., and Woessmann, L. (2010). The trade-off between fertility and education : evidence from before the demographic transition. *Journal of Economic Growth*, 15 :177–204.

Carmichael, S. G., de Pleijt, A., Zanden, J. L. v., and De Moor, T. (2016). The European Marriage Pattern and Its Measurement. *Journal of Economic History*, 76(01) :196–204.

Cervellati, M. and Sunde, U. (2005). Human Capital Formation, Life Expectancy, and the Process of Development. *American Economic Review*, 95(5) :1653–1672.

Cummins, N. (2013). Marital fertility and wealth during the fertility transition : rural France, 1750–1850. *Economic History Review*, 66(2) :449–476.

De Onis, M. (2000). Measuring nutritional status in relation to mortality. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(10) :1271–1274.

Desmet, K. and Parente, S. L. (2012). The evolution of markets and the revolution of industry : a unified theory of growth. *Journal of Economic Growth*, 17(3) :205–234.

Dì, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., and Schwartz, J. D. (2017). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376(26) :2513–2522.

Diebolt, C. and Perrin, F. (2013). From Stagnation to Sustained Growth : The Role of Female Empowerment. *American Economic Review*, 103(3) :545–549.

Doepke, M. (2004). Accounting for Fertility Decline During the Transition to Growth. *Journal of Economic Growth*, 9 :347–383.

Fouquet, R. (2014). Long run demand for energy services : income and price elasticities over 200 years. *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(2) :186–207.

Fouquet, R. and Broadberry, S. (2015). Seven Centuries of European Economic Growth and Decline. *Journal of Economic Perspectives*, 29(4) :227–244.

■ Bibliography (cont.)

Galor, O. (2005). From Stagnation to Growth : Unified Growth Theory. In Aghion, P. and Durlauf, S., editors, *Handbook of Economic Growth*, Vol. 1A, volume 1A, chapter 4. Elsevier B.V., Amsterdam, NL.

Galor, O. and Michalopoulos, S. (2012). Evolution and the growth process : Natural selection of entrepreneurial traits. *Journal of Economic Theory*, 147 :759–780.

Galor, O. and Moav, O. (2002). Natural Selection and the Origin of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 117(4) :1133–1191.

Galor, O. and Mountford, A. (2008). Trading Population for Productivity : Theory and Evidence. *Review of Economic Studies*, 75(4) :1143–1179.

Galor, O. and Weil, D. N. (2000). Population, Technology, and Growth : From Malthusian Stagnation to the Demographic Transition and Beyond. *American Economic Review*, 90(4) :806–828.

Guha-Sapir, D. and van Panhuis, W. G. (2003). The importance of conflict-related mortality in civilian populations. *Lancet*, 361(9375) :2126–2128.

Hazan, M. and Zoabi, H. (2006). Does longevity cause growth ? A theoretical critique. *Journal of Economic Growth*, 11 :363–376.

Kander, A., Malanima, P., and Warde, P. (2013). *Power to the People : Energy in Europe Over the Last Five Centuries*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Lagerlöf, N.-P. (2003). Gender Equality and Long-Run Growth. *Journal of Economic Growth*, 8 :403–426.

Lee, J.-W. and Lee, H. (2016). Human capital in the long run. *Journal of Development Economics*, 122 :147–169.

Lee, R. (2003). The Demographic Transition : Three Centuries of Fundamental Change. *Journal of Economic Perspectives*, 17(4) :167–190.

Luby, S. P. (2017). Clean water, clean hands or new vaccines ? *Journal of Infection*, 74 :S18–S22.

Malanima, P. (2016). Energy consumption in England and Italy, 1560–1913. Two pathways toward energy transition. *Economic History Review*, 69(1) :78–103.

■ Bibliography (cont.)

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., and Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York, NY.

Murphy, T. E. (2015). Old habits die hard (sometimes) : Old habits die hard (sometimes) : can département heterogeneity tell us something about the French fertility decline? *Journal of Economic Growth*, 20(2) :177–222.

O'Rourke, K. H., Rahman, A. S., and Taylor, A. M. (2013). Luddites, the industrial revolution, and the demographic transition. *Journal of Economic Growth*, 18(4) :373–409.

Peri-Rotem, N. (2016). Religion and Fertility in Western Europe : Trends Across Cohorts in Britain, France and the Netherlands. *European Journal of Population*, 32(2) :231–265.

Pomeranz, K. (2000). *The Great Divergence : China, Europe, and the Making of the Modern World Economy*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Pottier, A., Fleurbaey, M., Mèjean, A., and Zuber, S. (2018). Integrated assessment of climate and population change : a first pass. *Working Paper*.

Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Galetti, M., Alamgir, M., Crist, E., Mahmoud, M. I., and Laurance, W. F. (2017). World Scientists' Warning to Humanity : A Second Notice. *BioScience*, 67(12) :1026–1028.

Schaefer, A., Schiess, D., and Wehrli, R. (2014). Long-term growth driven by a sequence of general purpose technologies. *Economic Modelling*, 37 :23–31.

Strulik, H. and Weisdorf, J. (2008). Population, food, and knowledge : a simple unified growth theory. *Journal of Economic Growth*, 13(3) :195–216.

Turner, G. M. (2012). On the Cusp of Global Collapse? Updated Comparison of 'The Limits to Growth' with Historical Data. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 21(2) :116–124.

Warde, P. (2007). Energy Consumption in England & Wales, 1560–2000. Technical report, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Studi sulle Società del Mediterraneo.

■ Bibliography (cont.)

WHO (2014). Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. Technical report, World Health Organization, Geneva, CH.