

ÉNERGIE, EROI ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE DANS UNE PERSPECTIVE DE LONG TERME

Thèse menée sous la direction de Pierre-André Jouvét et Frédéric Lantz

Soutenue le 18 novembre 2016 à l'IFPEN par

Victor Court

Objectif de la présentation et définitions

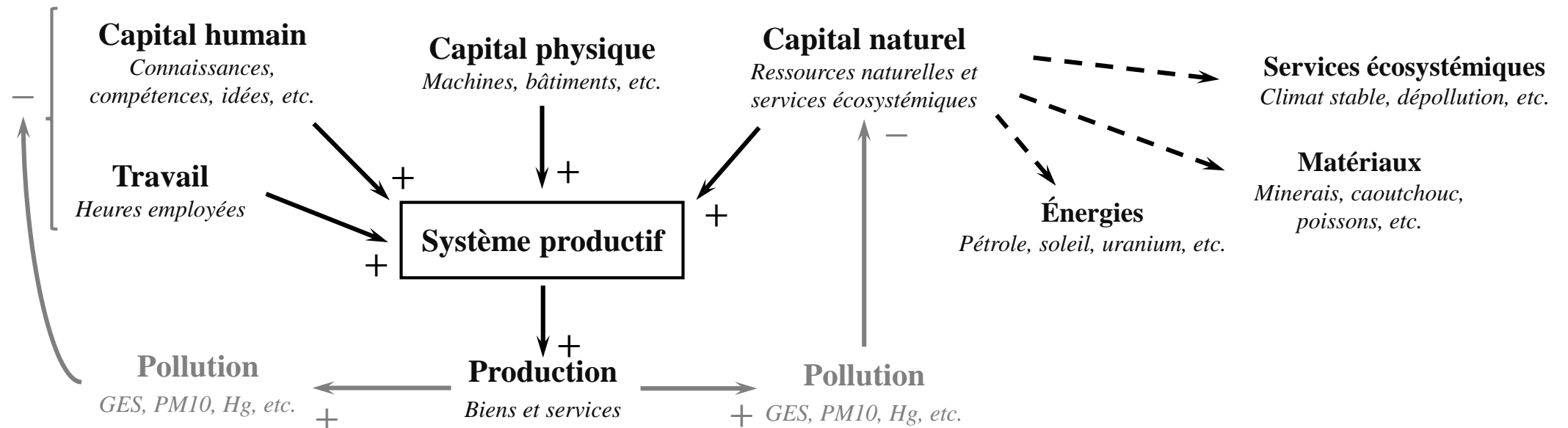
- Résumé de l'évolution de la problématique générale au cours de la thèse (et des différentes sous-questions qui ont été traitées).
 - Justifie le plan de la thèse.
 - Répond de façon anticipé à certaines questions.
 - Légitime les perspectives de recherche.
- « Croissance économique » : taux de croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) qui, par définition, mesure la valeur totale de la *production de richesse*.
- Croissance économique \neq Développement économique \neq Bien-être des individus.
- Recherche d'une explication du phénomène de croissance économique sans porter de jugement normatif sur son intérêt pour l'homme.

- Plan :
 - Facteurs de production, spécificité de l'énergie, et EROI.
 - Le EROI comme déterminant de la croissance économique.
 - Causes lointaines et proches de croissance économique.
 - La capacité de consommation d'exergie utile comme cause fondamentale de la croissance économique.
 - Perspectives de recherche.

- Plan :
 - **Facteurs de production, spécificité de l'énergie et EROI.**
 - Le EROI comme déterminant de la croissance économique.
 - Causes lointaines et proches de croissance économique.
 - La capacité de consommation d'exergie utile comme cause fondamentale de la croissance économique.
 - Perspectives de recherche.

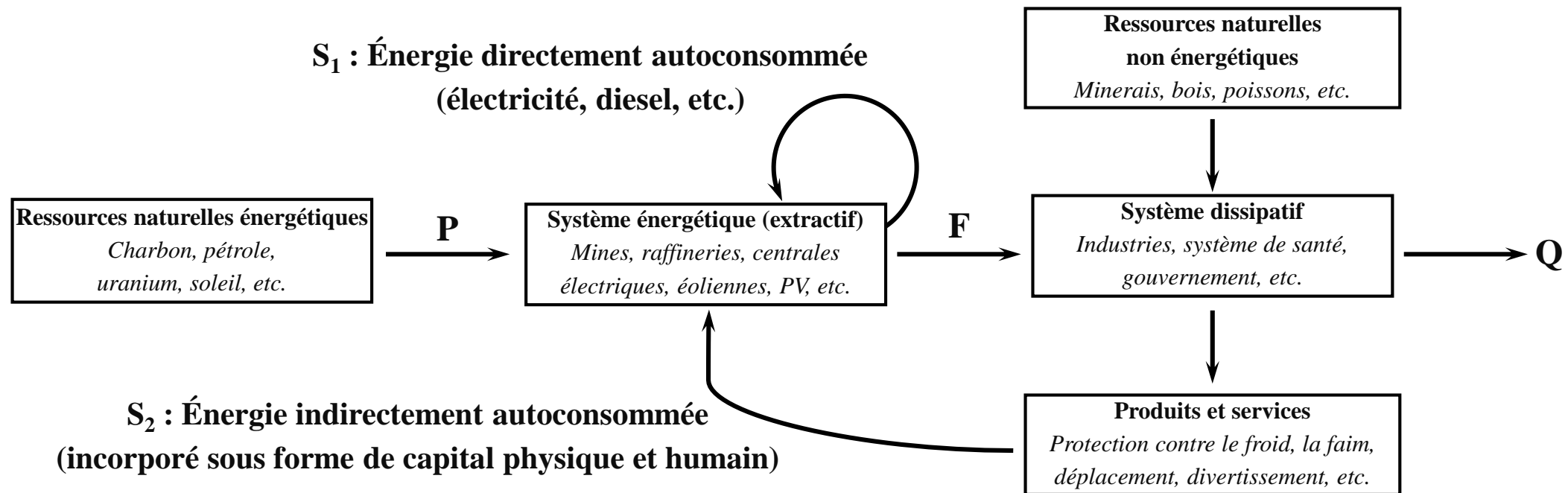
Facteurs de production

- Le production dépend de la disponibilité du travail et de l'accumulation de capital physique (Idées : fin du XVIII^{ème}; Modèles : 1950s).
 - Le niveau de capital humain est primordial (Idées : 1970s; Modèles : 1990s).
 - L'environnement représente un capital naturel qui fournit des ressources (matériels et énergétiques) et des services écosystémiques (climat stable, dépollution, etc.). (Idées : 1960s; Modèles : 1970s).
- ⇒ **Insuffisant : Il est indispensable de discerner les ressources naturelles non énergétiques (matériaux) des ressources naturelles énergétiques.**



La spécificité de l'énergie et le EROI

- Une société transforme des ressources naturelles non énergétiques en produits et services.
- Pour cela, de l'énergie est nécessaire, cette dernière étant la marque du changement du système.
- Une ressource énergétique n'a d'intérêt que si $F > S_1 + S_2$, c'est-à-dire si : $EROI = \frac{F}{S_1+S_2} > 1$.
- **Le EROI représente l'*accessibilité* de l'énergie pour un couple « ressource énergétique primaire + système extractif associé ».**



- Plan :

- Facteurs de production, spécificité de l'énergie et EROI.
- **Le EROI comme déterminant de la croissance économique.**
- Causes lointaines et proches de croissance économique.
- La capacité de consommation d'exergie utile comme cause fondamentale de la croissance économique.
- Perspectives de recherche.

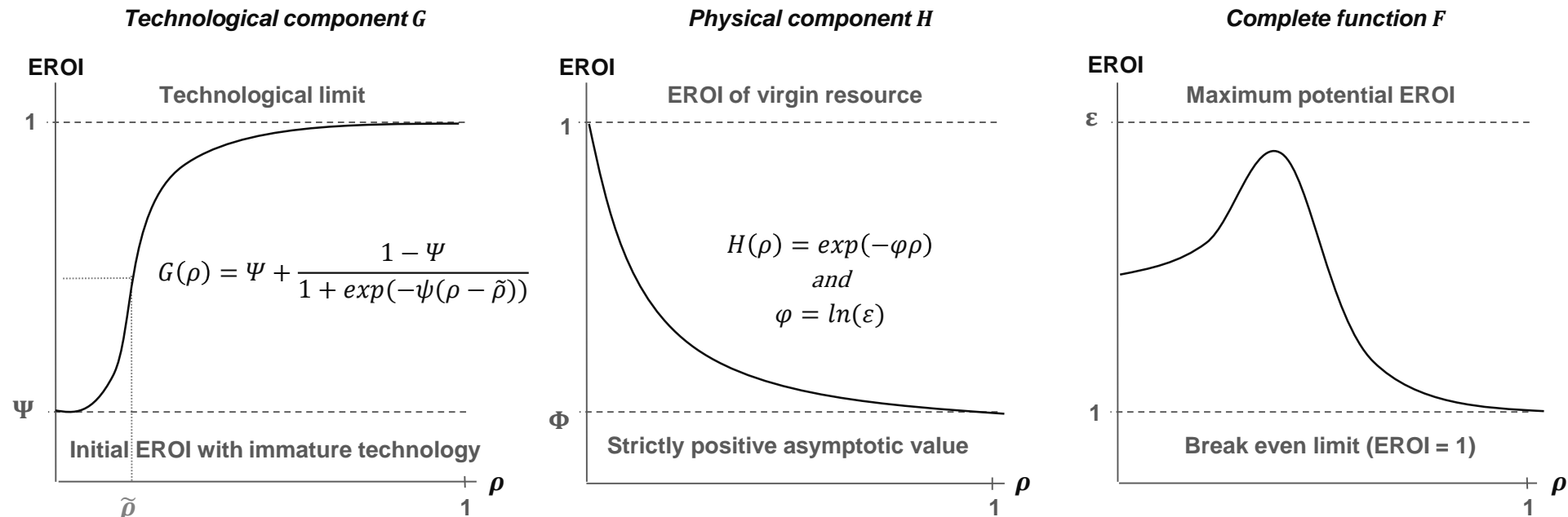
Est-ce que la dynamique des EROIs des systèmes énergétiques explique la croissance économique ?

- Les systèmes énergétiques pré-industriels, basés sur la conversion de l'énergie solaire en nourriture et en bois de chauffe, ont des EROIs autour de 10-20.
- Les énergies fossiles conventionnelles ont des EROIs bien plus élevés autour de 40-80.
 - ⇒ **Le passage de la biomasse (énergétiquement peu dense) à faible EROI, aux énergies fossiles (énergétiquement très denses) à EROIs élevés, semble être un élément clef pour rendre possible un régime élevé de croissance économique (déclenché par l'industrialisation).**
- Les EROIs des fossiles conventionnels semblent décliner sur les dernières décennies.
- Les fossiles non conventionnels et les renouvelables modernes ont pour l'instant des EROI plus faibles, autour de 5-20.
 - ⇒ **Quelles conséquences en terme de prospective économique dans le cadre de la transition énergétique ?**

Approche dynamique du EROI

- Pour une ressource donnée, le EROI est le résultat de la lutte qui s'opère entre le progrès technique et l'épuisement physique.
- Ratio d'exploitation de la ressource, $\rho \in [0,1]$: production cumulée divisé par le niveau de ressource ultimement récupérable pour une ressource non renouvelable :

$$\Rightarrow \mathbf{EROI}(\rho) = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{F}(\rho) = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{G}(\rho) \mathbf{H}(\rho).$$

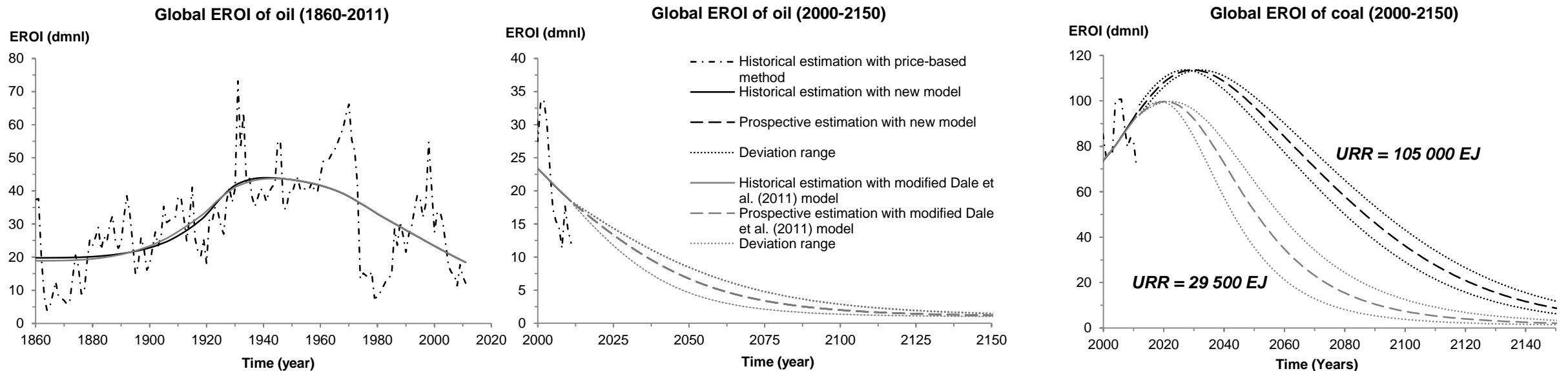


EROI des énergies fossiles dans le long terme

- Estimations des EROIs du charbon, du pétrole et du gaz au niveau mondial depuis le début de leur production (1800, 1860, et 1890 respectivement) jusqu'à aujourd'hui et développements prospectifs.

⇒ **EROI maximum passé pour le pétrole et le gaz, mais pas pour le charbon.**

⇒ **Court, V., Fizaine, F., 2016. Estimations of the global energy-return-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas in the very long-term. *Ecological Economics*, under revision.**



EROIs et épuisement qualitatif des métaux

- Le manque de recul historique empêche une telle analyse pour les énergies renouvelables (et les énergies fossiles non conventionnelles).
- On peut toutefois penser que les renouvelables (hors hydro) sont en phase d'EROIs croissants.
- La transition énergétique par les renouvelables modernes nécessite de plus grandes quantités de métaux (rares et communs) par unité d'énergie produite.
- L'extraction croissante de métaux implique de les puiser dans des gisements de moins en moins concentrés : épuisement qualitatif.
- Le coût énergétique d'extraction des métaux augmente avec leur épuisement qualitatif.
 - ⇒ **Estimations de la sensibilité des EROIs des technologies modernes de production d'électricité à l'épuisement qualitatif des métaux.**
 - ⇒ **Fizaine, F., Court, V., 2015. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: a sensitivity analysis using the EROI. *Ecological Economics*, 110, pp.106–118.**

Dépense énergétique et croissance économique

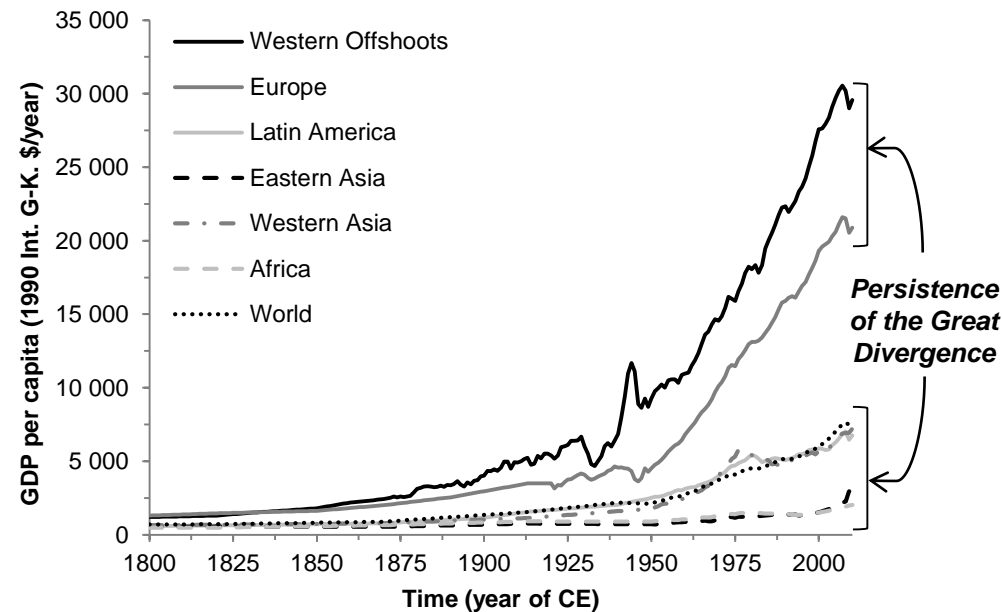
- Les fluctuations de court terme des EROIs des différents systèmes énergétiques (et du EROI sociétal agrégé) ne sont pas mesurables et donc ne permettent pas de rendre compte des évolutions de court terme de la croissance économique.
- Passage par la notion de « dépense énergétique » qui est le poids financier de l’approvisionnement énergétique en pourcentage du PIB.
 - ⇒ **Estimations réalisées pour les USA, la Grande-Bretagne et l’économie mondiale.**
 - ⇒ **Les dépenses énergétiques commence à jouer un rôle de « limite à la croissance » à partir de 7-8%.**
 - ⇒ **Pour les USA où les données sont plus robustes, la croissance est (statistiquement) nulle au-delà de 11% de dépenses énergétiques.**
 - ⇒ **Fizaine, F., Court, V., 2016. Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy*, 95, pp. 172–186.**

- Plan :

- Facteurs de production, spécificité de l'énergie et EROI.
- Le EROI comme déterminant de la croissance économique.
- **Causes lointaines et proches de croissance économique.**
- La capacité de consommation d'exergie utile comme cause fondamentale de la croissance économique.
- Perspectives de recherche.

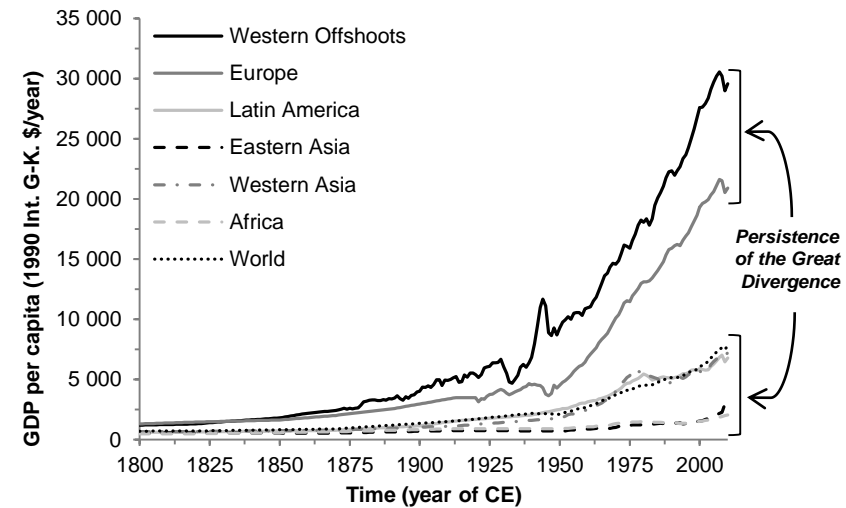
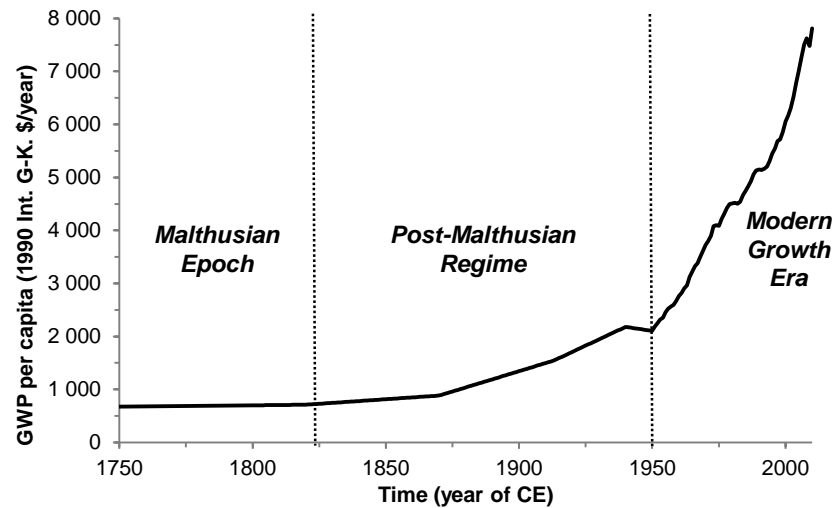
Les causes lointaines

- Les écarts actuels de développement se maintiennent depuis la *Grande Divergence* qui fut initiée par des dates d'industrialisation différentes pour chaque région du monde.
- On distingue généralement quatre hypothèses de causes « ultimes / fondamentales » que je requalifie de « lointaines / profondes » :
 - ⇒ **Biogéographie, culture, institutions, et chance (ou contingence).**



Les causes proches et la Théorie Unifiée de la Croissance (UGT)

- Les modèles théoriques s'intéressent plutôt au régime de croissance moderne, c.à.d. pour des pays industrialisés (post-WWII) avec des taux de croissance élevés et soutenus.
 - ⇒ **Revue de toutes les théories de la croissance invoquant des causes « proches » : accumulation du capital physique et humain, et progrès technique.**
 - ⇒ **Étude des intérêts et limites de la Théorie Unifiée de la Croissance (UGT) de O. Galor.**



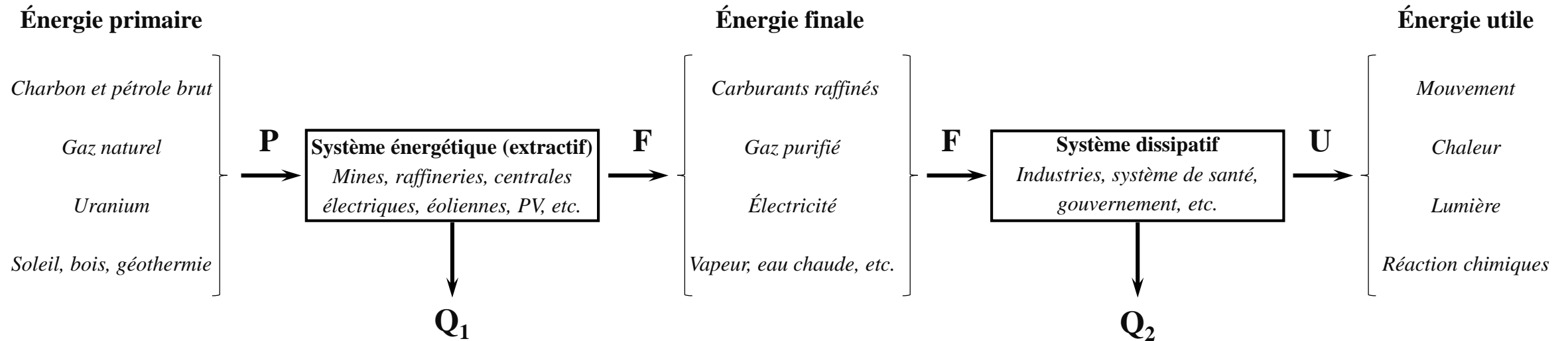
- *Le rôle de l'énergie est complètement omis de ces raisonnements.*

- Plan :

- Facteurs de production, spécificité de l'énergie et EROI.
- Le EROI comme déterminant de la croissance économique.
- Causes lointaines et proches de croissance économique.
- **La capacité de consommation d'exergie utile comme cause fondamentale de la croissance économique.**
- Perspectives de recherche.

Énergie et exergie : du primaire à l'utile

- Ce qui intéresse les individus, ce sont les services délivrés par le système dissipatif.



- Mais l'énergie ne peut pas être consommée car par définition elle se conserve (dans un système fermé, 1^{er} loi de la thermo).
- La croissance économique est assurée par la consommation du contenu exergétique de l'énergie car l'**exergie** est la part de l'énergie qui peut générer du travail au sens physique (dans un système fermé, 2^{ème} loi de la thermo).
- Au cours de n'importe quel processus physique, l'énergie est conservée mais l'exergie est détruite (de manière irréversible).

Capacité de consommation d'exergie utile et croissance

- La croissance économique est fondamentalement causé par :
 - ⇒ **L'accessibilité (c.à.d. le EROI) des stocks et flux d'exergie primaire de l'environnement .**
 - ⇒ **L'efficacité agrégé de conversion de l'exergie primaire en exergie utile.**
- Sur cette idée, la fin de la thèse propose un modèle de croissance endogène de long terme :
 - ⇒ Calibration sur données mondiales : Production, consommation d'exergie renouvelable et non-renouvelable, progrès technique agrégé correspondant aux gains d'efficacité de conversion de l'exergie primaire en exergie utile.
 - ⇒ Synthèse de l'approche mais sans réel mécanisme explicatif du « décollage » et sans prise en compte de la transition démographique donc ça n'est pas un modèle d'UGT.
 - ⇒ **Court, V., Jouvét, P-A., Lantz, F., 2016. Long-term endogenous economic growth and energy transitions. *The Energy Journal*, under revision.**

- **Plan :**

- Facteurs de production, spécificité de l'énergie et EROI.
- Le EROI comme déterminant de la croissance économique.
- Causes de croissance économique lointaines et proches.
- La capacité de consommation d'exergie utile comme cause fondamentale de la croissance économique.
- **Perspectives de recherche.**

Perspective de recherches

- Réflexions supplémentaires sur les relations de rétrocontrôle entretenues entre les causes (proches, lointaines et profondes) et les conséquences de la croissance.
- Les chapitres 1 à 3 doivent faire l'objet d'une synthèse : papier de 25-30 pages à publier. (*Journal of Economic History*, *Economic History Review*).
- Intégrer le rôle de l'énergie dans la Théorie Unifiée de la Croissance (UGT).
- L'UGT doit faire appel à un modèle à génération imbriquée pour traiter de la dynamique de la population en parallèle (mais pas nécessairement en même temps) de celle du produit économique.

⇒ Quelques années de recherche en perspective pour arriver à une théorie plus robuste.

Merci pour votre attention