

## 18. Autres sujets en énergie

### 18.1 – *L'économie biophysique*

Yvan Dutil, Ph.D., phys.

Ministère de la Santé et des services sociaux

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Groupe t3e, Département de génie mécanique*

# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- La situation selon les sources d'énergie
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Qu'est-ce que l'économie biophysique ?***
- Le retour sur l'investissement énergétique
- La situation selon les sources d'énergies
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- C'est la seule économie dans le monde réel des affaires, des dirigeants politiques et des universités.
- Une version ou des versions modernisées de cette science qui autrefois devait « décrire » les rapports économiques et qui aujourd'hui semble « régir ou conditionner » ces rapports.
- Certes, quelques variantes affirment leur différence en se qualifiant de :
  - keynésienne, autrichienne, schumpetérienne, développementale, comportementale, institutionnelle ou même hétérodoxe.

# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- Quel est le problème avec l'économie telle que nous la connaissons?
  - L'économie croit pouvoir totalement s'affranchir de l'environnement en le transformant, en le domestiquant, voire en l'asservissant, grâce au développement d'idéologies, grâce aux progrès techniques.
  - En s'excluant de la nature, l'humain fausse sa perception, sa pensée, ses valeurs, son rôle, son analyse de la situation et perturbe profondément l'habitat.
  - L'économie néoclassique est une vision où les conséquences négatives des systèmes de productions sont considérées comme des "externalités", comme si l'environnement et la population humaine y vivant n'étaient pas inclus dans le système économique.

# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- Quel est le problème avec l'économie telle que nous la connaissons?
  - La méthodologie comptable actuelle ne peut pas gérer de façon appropriée la hausse des coûts des ressources.
    - EXEMPLE 1: Dépenser 150-200 \$ par baril dans les gisements brésiliens en mer pour livrer le même baril de pétrole qui coûte à l'Arabie saoudite 10-20 \$ résultera en une **hausse artificielle** du PIB du Brésil.
    - EXEMPLE 2: Dépenser pour répandre des produits chimiques ou des ordures sur un territoire ou pour le modifier mécaniquement afin d'y faire des cultures, faire passer des routes ou autres infrastructures, construire des villes a un coût qui devrait induire un effet **négatif** sur le PIB mais qui a contrario compte dans le PIB.

# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- Quel est le problème avec l'économie telle que nous la connaissons?
  - La méthodologie comptable actuelle ne peut pas gérer de façon appropriée la hausse des coûts des ressources.
    - EXEMPLE 3: Prélever des ressources naturelles à un taux non soutenable par la nature contribue positivement au PIB alors que le prélèvement même devrait induire un effet **négatif** sur le PIB.
  - En réalité, ces hausses des coûts des ressources devraient être comptabilisées comme ***une contrainte pour le reste de l'économie***, baissant notre utilité globale.

# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- Quel est le problème avec l'économie telle que nous la connaissons?
  - Mesurer l'autre partie non liée aux ressources produit le bon résultat.
  - La part du coût des ressources a augmenté d'un étonnant 4 % du PIB global entre 2002 et 2012.
  - Ainsi, elle a réduit de 0,4 % par année la croissance de la partie non liée aux ressources.
  - En mesurant de façon conservatrice, les hausses des coûts ont été de 7 % par année depuis 2000.
  - Si cette tendance se maintient dans un monde où l'économie croît à moins de 4 %, et à moins de 1,5 % dans les pays riches, il est facile de voir comment la contrainte va s'intensifier.



# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- Quel est le problème avec l'économie telle que nous la connaissons?
  - La hausse des prix pourrait même s'accélérer avec l'épuisement des ressources les moins chères.
  - Si les coûts des ressources augmentent de 9 % par année, les États-Unis atteindront une situation où toute la croissance générée par l'économie sera requise pour simplement obtenir les ressources nécessaires pour faire fonctionner le système.
  - On atteindrait ainsi une croissance négative au bout de seulement 11 ans.
  - Si, par contre, notre productivité en matière de ressources augmente, ou si la demande diminue, les hausses des coûts pourraient augmenter de 5 % par année et nous laisser 31 ans pour nous organiser avant l'effondrement.

# Qu'est-ce que l'économie néoclassique ?

- Quel est le problème avec l'économie telle que nous la connaissons?
  - En résumé
    - chaque récession depuis 1970 a été précédée par une hausse importante du prix du pétrole (le PIB de l'activité associée à la production et à la distribution du pétrole a augmenté, mais celui de l'ensemble de la société, ou des sociétés n'ayant pas de pétrole, a chuté, et davantage).
    - Cette hausse de prix peut être associée plus ou moins directement à la baisse de l'ÉROI des approvisionnements (sauf pour les décisions de l'OPEP).
  - Qu'est-ce que l'ÉROI ou ÉROEI?
    - Une notion fondamentale de l'économie biophysique

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

*Quand l'énergie sera plus chère, ce sera rentable !*

*On ne saurait se tromper davantage!*

**Lire :** "On Road to Zero Growth," the latest Quarterly Letter from Jeremy Grantham, founder and chief investment strategist for the \$100 billion GMO money managers.

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- L'économie biophysique vise à intégrer les lois physiques dans l'analyse économique.
  - Lois de la thermodynamique
- Ce sont les transferts d'énergie et de matière qui déterminent les flux économiques.
  - Une vision ancrée dans le monde réel.

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

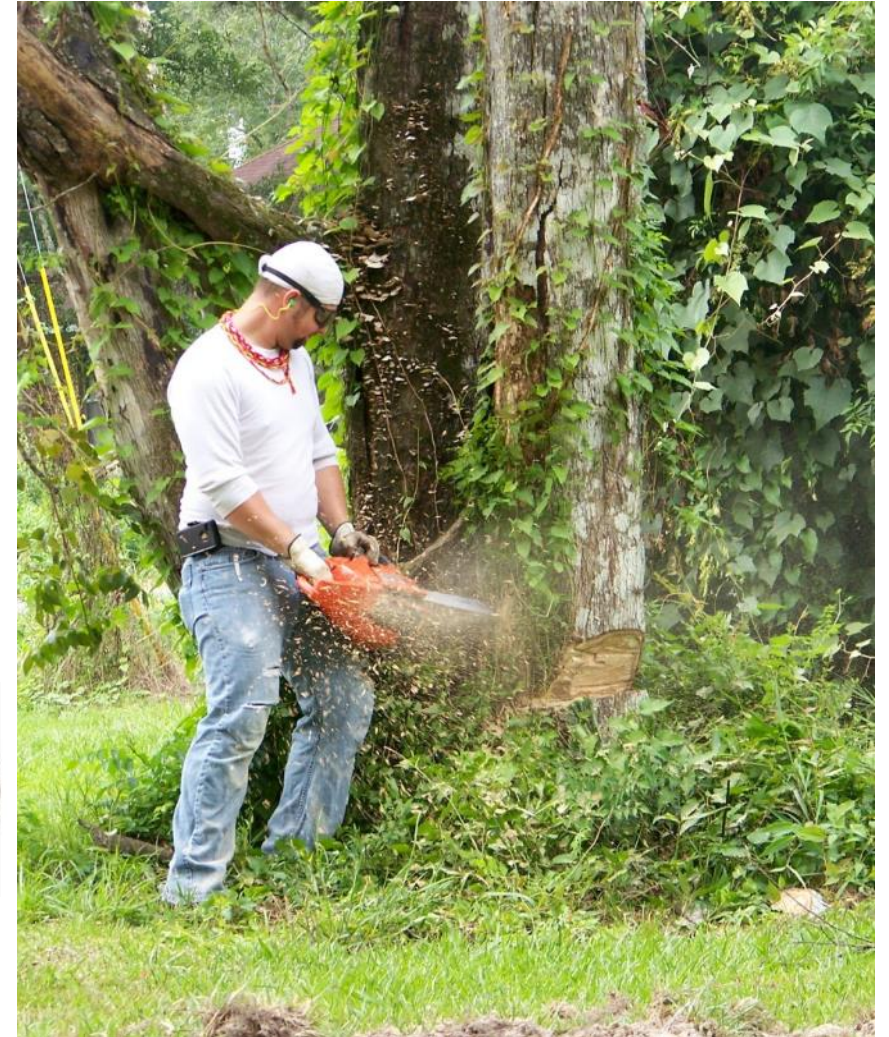
- Ce **n'est pas une variante** de l'économie mainstream ni même une économie « verte » ou simplement « écologique ».
- Ce que les économistes néo-classiques avaient rejeté hors de leur champ de vision, probablement inconsciemment, l'économie biophysique cherche à l'inclure.

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- Une idée qui a été longuement murie.
  - Physiocrates vers 1750
  - Podolinsky (1883)
  - Frederick Soddy (1922, 1926)
  - Les Technocrates (1918-1940)
  - Howard T. Odum (1971)
  - Nicholas Georgescu-Roegen (1971)
  - Charles Hall
  - Bernard C. Beaudreau

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- D'où vient la productivité :
  - Le bucheron (Travail)
  - La scie à chaîne (Capital)
  - Carburant + Nourriture (**Énergie**)
- Quelle est la valeur d'un jour de travail physique ?
  - A.  $8\text{h} \times 55\$/\text{h} \approx 440\$$
  - B.  $120\text{W} \times 8\text{ h} \approx 1\text{ kWh}$ 
    - 100 ml d'essence,  $\approx 25\text{ cents}$
    - HQ à  $0,10\$/\text{kWh}$ ,  $\approx 10\text{ cents}$



# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- Le principe de base est simple :
  - L'énergie est à la base de tout processus économique
  - L'énergie nécessaire pour produire de l'énergie doit être (le plus possible) inférieure à l'énergie produite.
  - Exemple : La proie doit fournir plus d'énergie que l'énergie utilisée pour la chasse, sinon le prédateur meurt !
  
- C'est vrai pour tout !

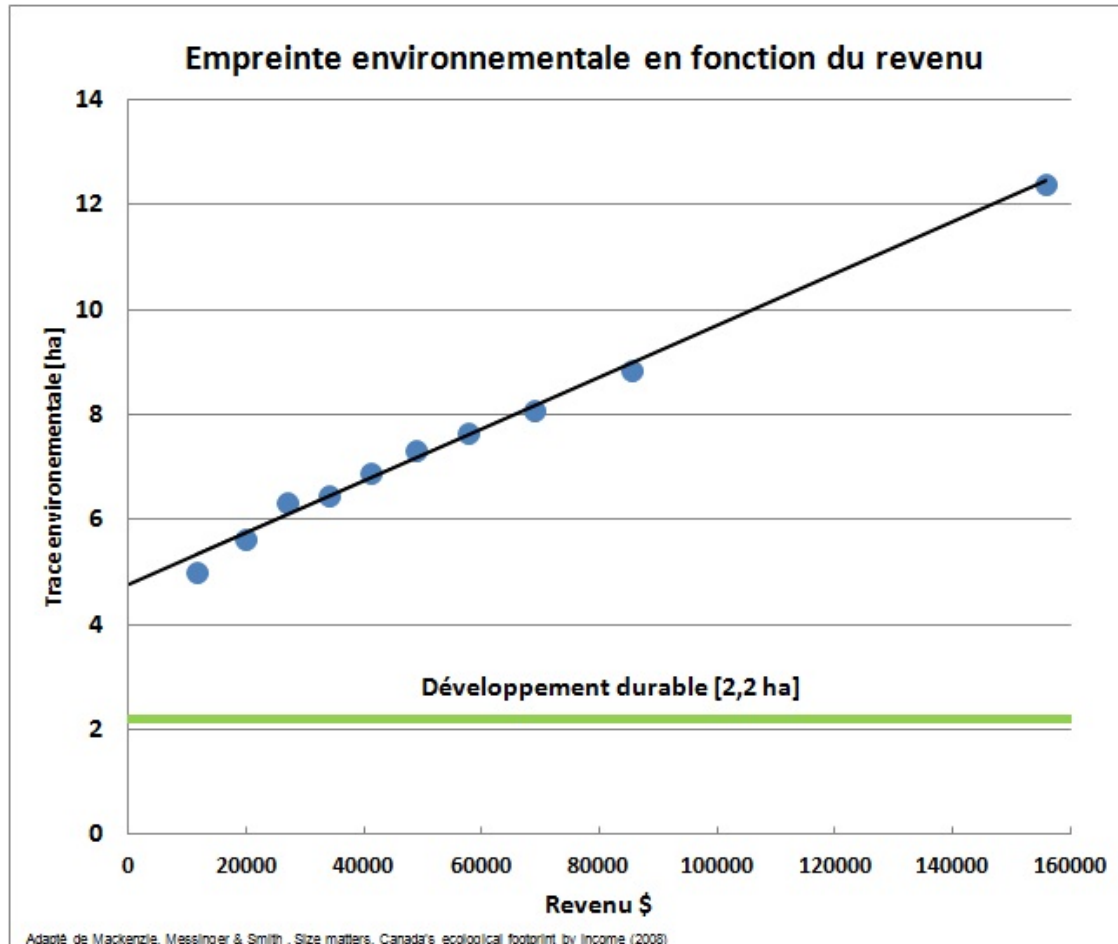


# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- Interrelation entre l'énergie et l'économie :
  - Paradoxe de Jeavons (effet rebond)
    - En 1865, William Stanley Jeavons publie *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*
    - Paradoxe : l'augmentation d'efficacité augmente la consommation
  - Variante : Postulat de Khazzoom-Brookes
    - Années 1980 : Daniel Khazzoom et Leonard Brookes
    - L'argent sauvé par les économies d'énergie est dépensé ailleurs, ce qui déplace la consommation.

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- Un lien entre argent et environnement :

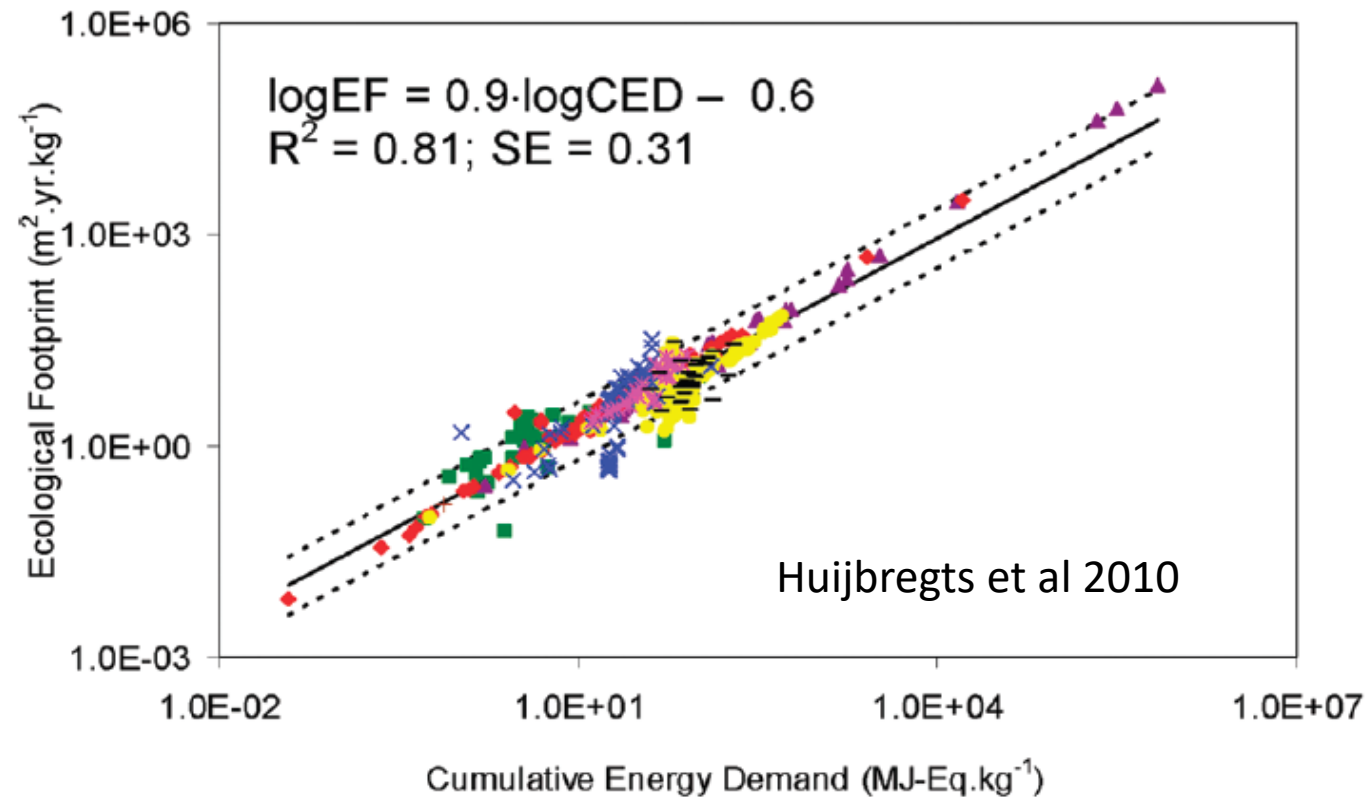


Analyse de cycle de vie par matrice économique entrée-sortie

[http://www.ciraig.org/en/open\\_io\\_canada/](http://www.ciraig.org/en/open_io_canada/)

# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- Énergie et écologie
  - L'empreinte écologique est directement proportionnelle au contenu énergétique.



# Qu'est-ce que l'économie biophysique ?

- Quelle est la différence entre économie biophysique et économie écologique?
  - C'est la même chose lorsque l'économie écologique étudie l'interdépendance et l'évolution entre les sociétés humaines et les écosystèmes dans le temps et l'espace.
    - Économie (classique), justice (acceptation) sociale, et préservation de l'environnement.
  - C'est différent lorsque l'économie écologique devient l'économie « verte » basée sur des notions économiques qui n'acceptent pas le principe de décroissance (soutenable ou non).

# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- ***Le retour sur l'investissement énergétique***
- La situation selon les sources d'énergies
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

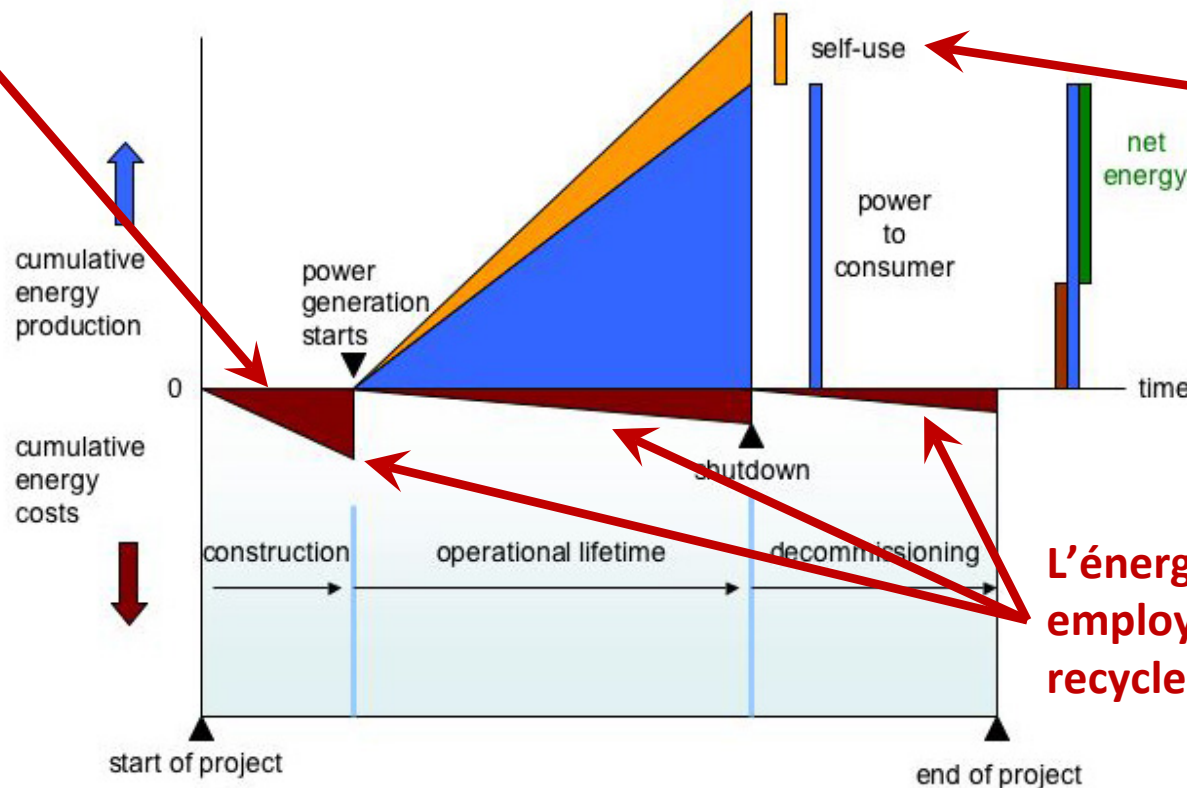
# Le retour sur l'investissement énergétique

- Trois indices servent à décrire les performances énergétiques.
  - L'énergie nette :
    - $E_{nette} = E_{produite} - E_{investie}$
  - Le retour sur l'investissement énergétique (en général sur la vie utile du projet):
    - $EROI = \frac{E_{produite}}{E_{investie}}$
  - Temps de retour sur l'investissement énergétique (en général sur 1 an):
    - $EPBT = \frac{E_{investie}}{E_{produite,t}}$  *Important quand la durée de vie n'est pas précisée.*

# Le retour sur l'investissement énergétique

- L'analyse est produite sur l'ensemble du cycle de vie
  - Les frontières du problème sont importantes.

**Il y a une dette énergétique en début de projet.**

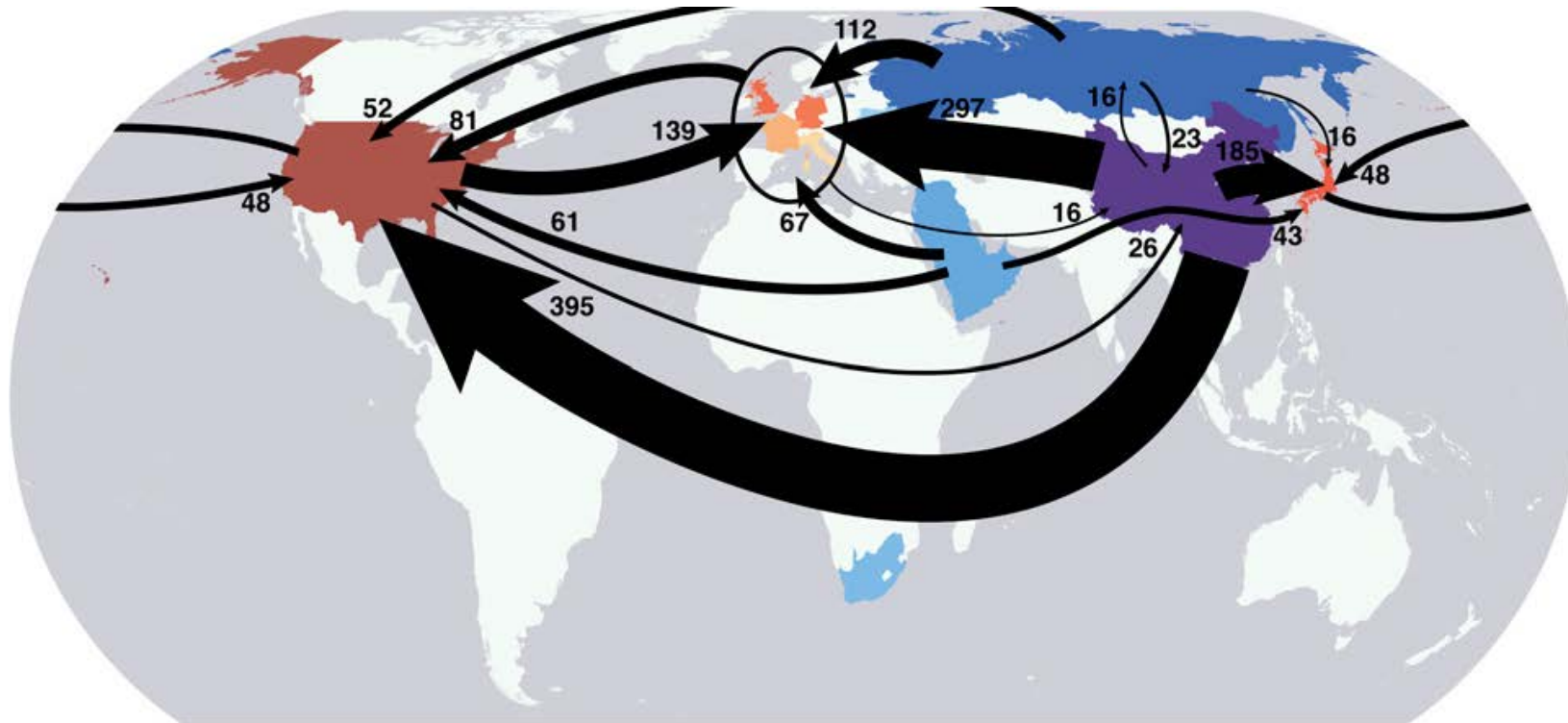


**L'énergie produite tient compte de l'énergie employée pour la produire (en jaune)**

**L'énergie investie tient compte de l'énergie employée pour construire, opérer et recycler/disposer après usage.**

# Le retour sur l'investissement énergétique

- Un autre problème de frontière :
  - Le commerce international ou interrégional



Davis & Caldeira 2010



# Le retour sur l'investissement énergétique

- Un retour sur l'investissement énergétique élevé est essentiel.
  - Chasseur-cueilleur EROI  $\approx 10$
  - Pré-agriculture EROI  $\approx 40$
  - Agriculture de subsistance EROI  $\approx 5-12$
  - Minimum pour une civilisation moderne EROI  $> 10$

Révolution industrielle  
charbon et pétrole EROI = 50-100

# Le retour sur l'investissement énergétique



EROI = 10



EROI = 5-12



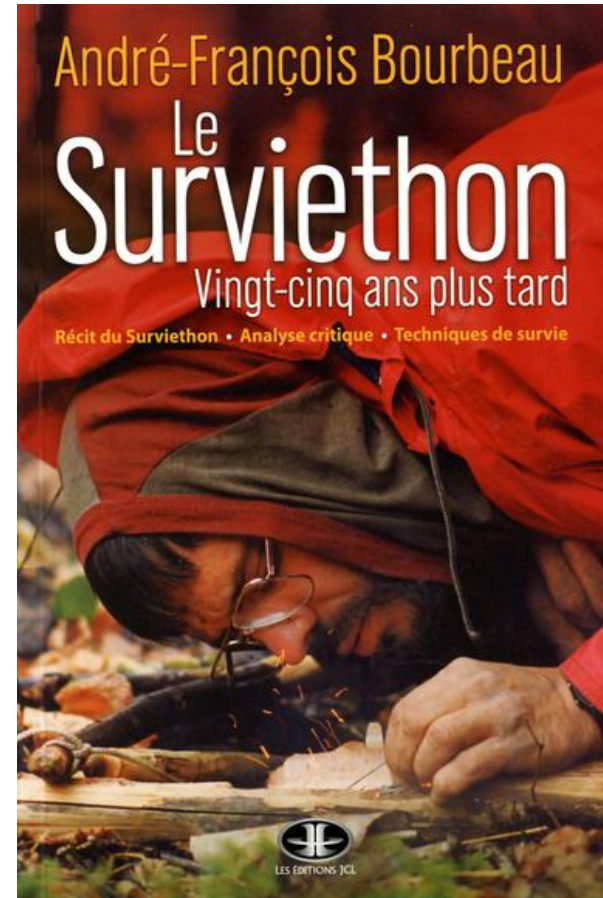
EROI = 40



EROI < 1

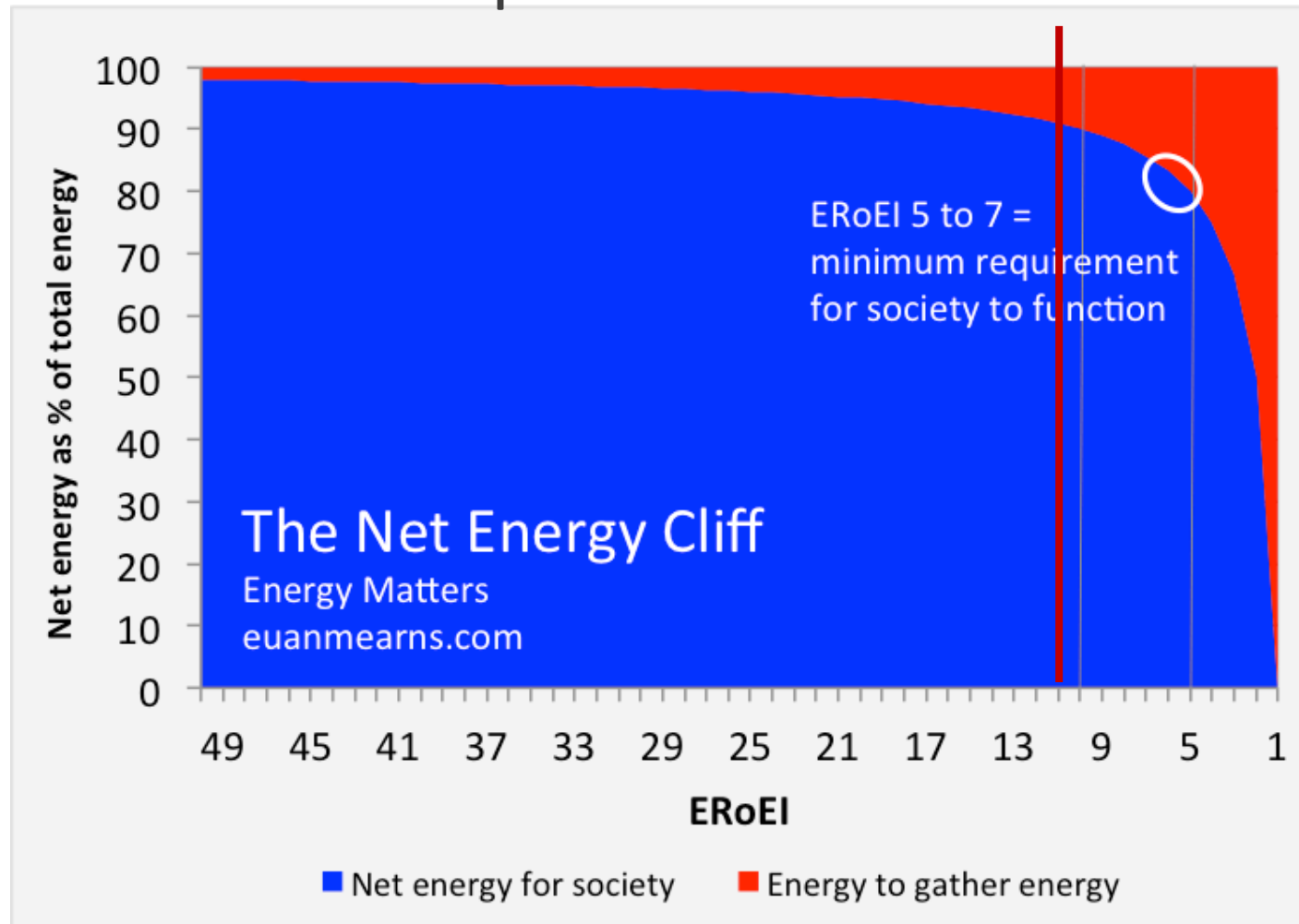
# Le retour sur l'investissement énergétique

- EROI minimum
- Expérience de survie
  - EROI = 3,3-3,6
  - Minimum 7h de chasse-cueillette.
- Loi du EROI minimum
  - EROI = 3
  - Production, transport, etc.



# Le retour sur l'investissement énergétique

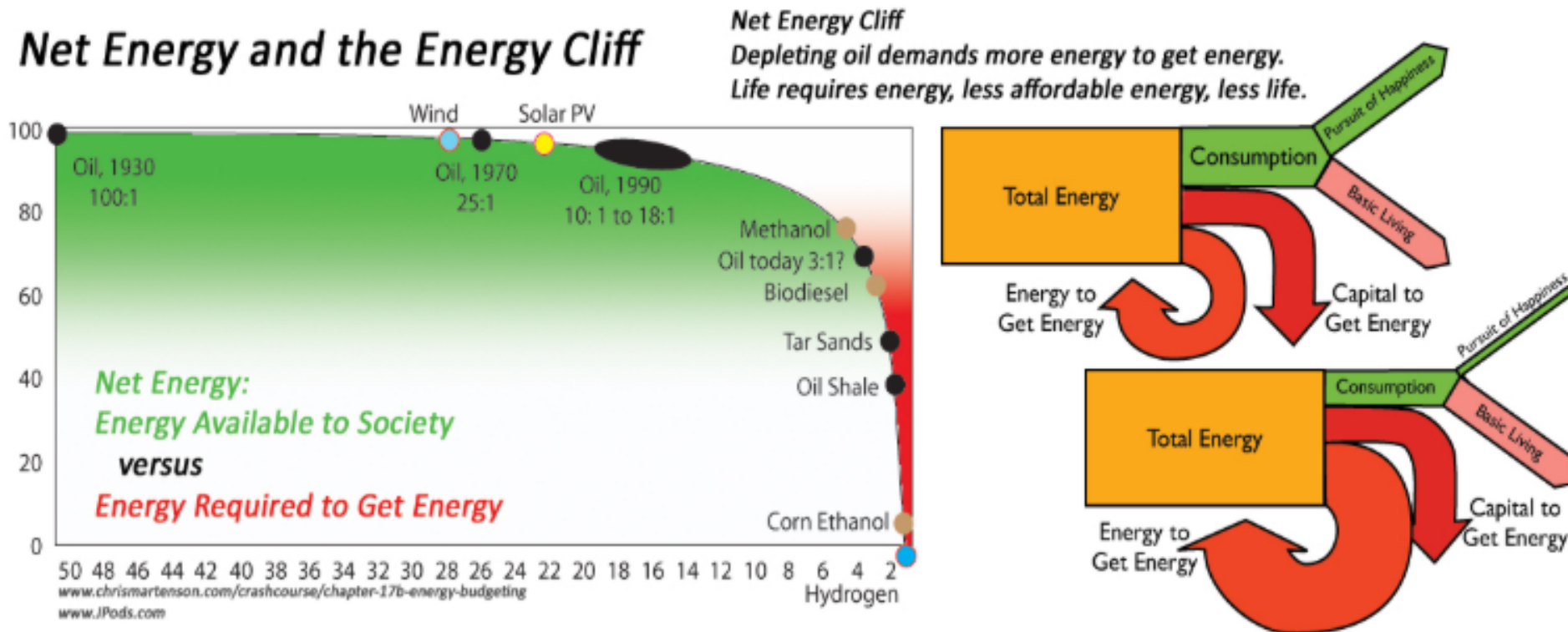
- L'énergie nette décroît rapidement avec le EROI.



Situation globale au tournant de 2020

# Le retour sur l'investissement énergétique

- L'énergie nette décroît rapidement avec le EROI.

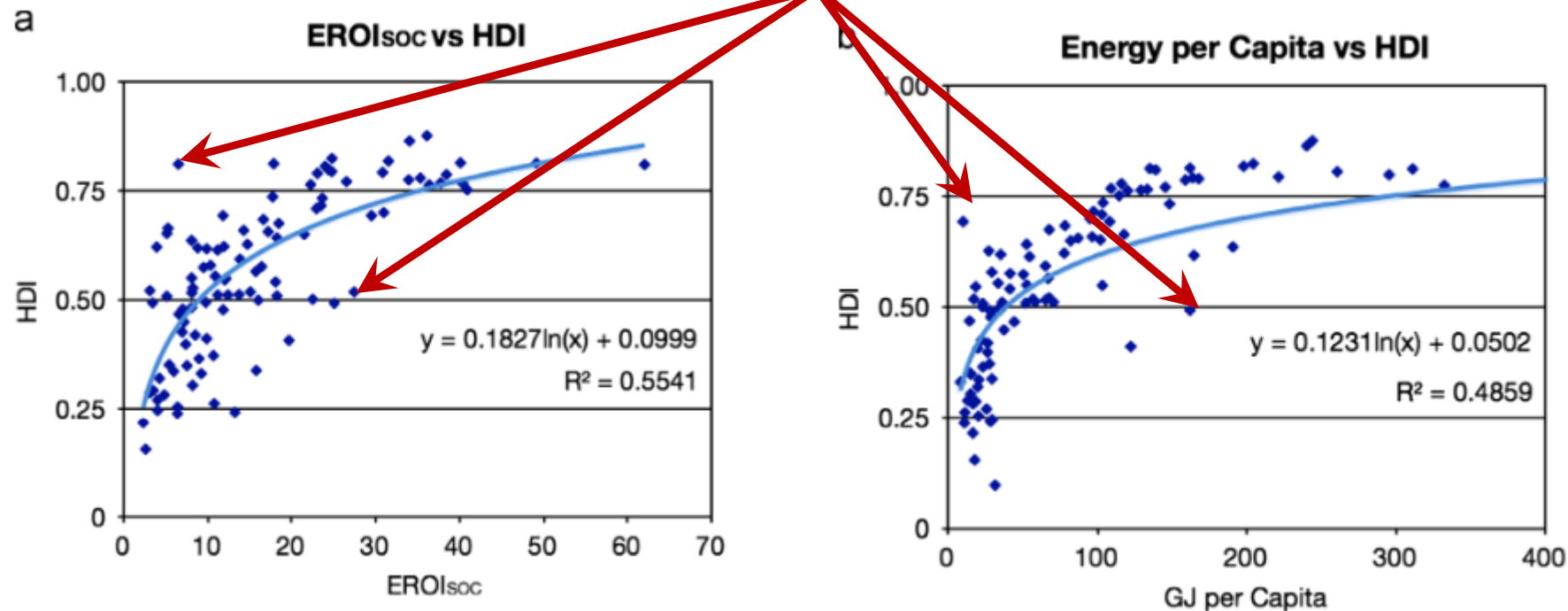


**En clair: Lorsqu'il faut davantage d'énergie pour produire l'énergie, la qualité de vie diminue.**

# Le retour sur l'investissement énergétique

- L'influence potentielle de l'EROI sur la société (Lambert et al. (2014))

L'EROI n'explique pas tout, même si on discerne des tendances

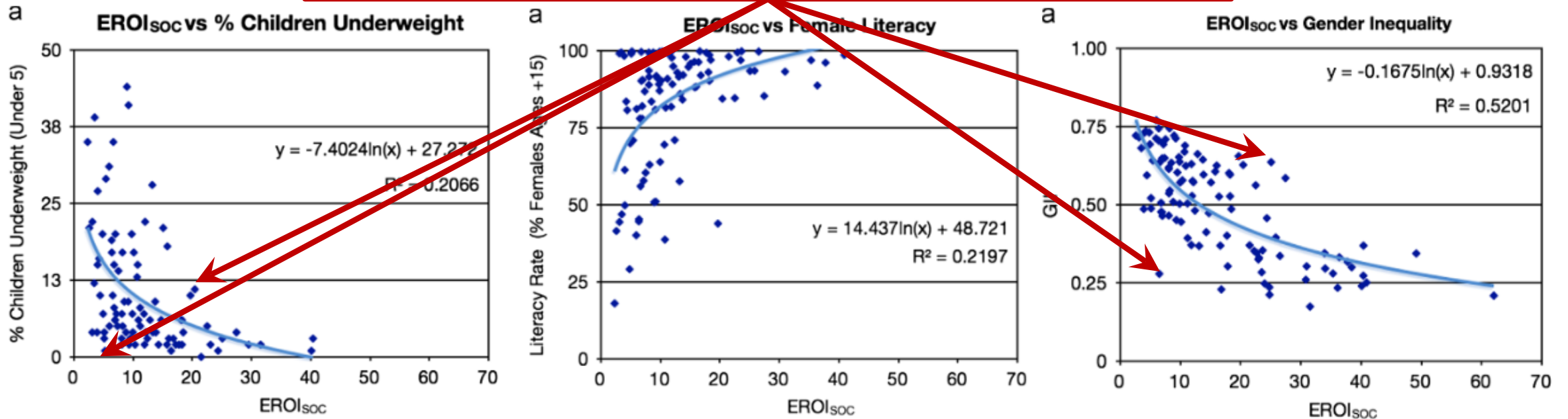


**HDI: Human Development index**

# Le retour sur l'investissement énergétique

- L'influence potentielle de l'EROI sur la société (Lambert et al. (2014))

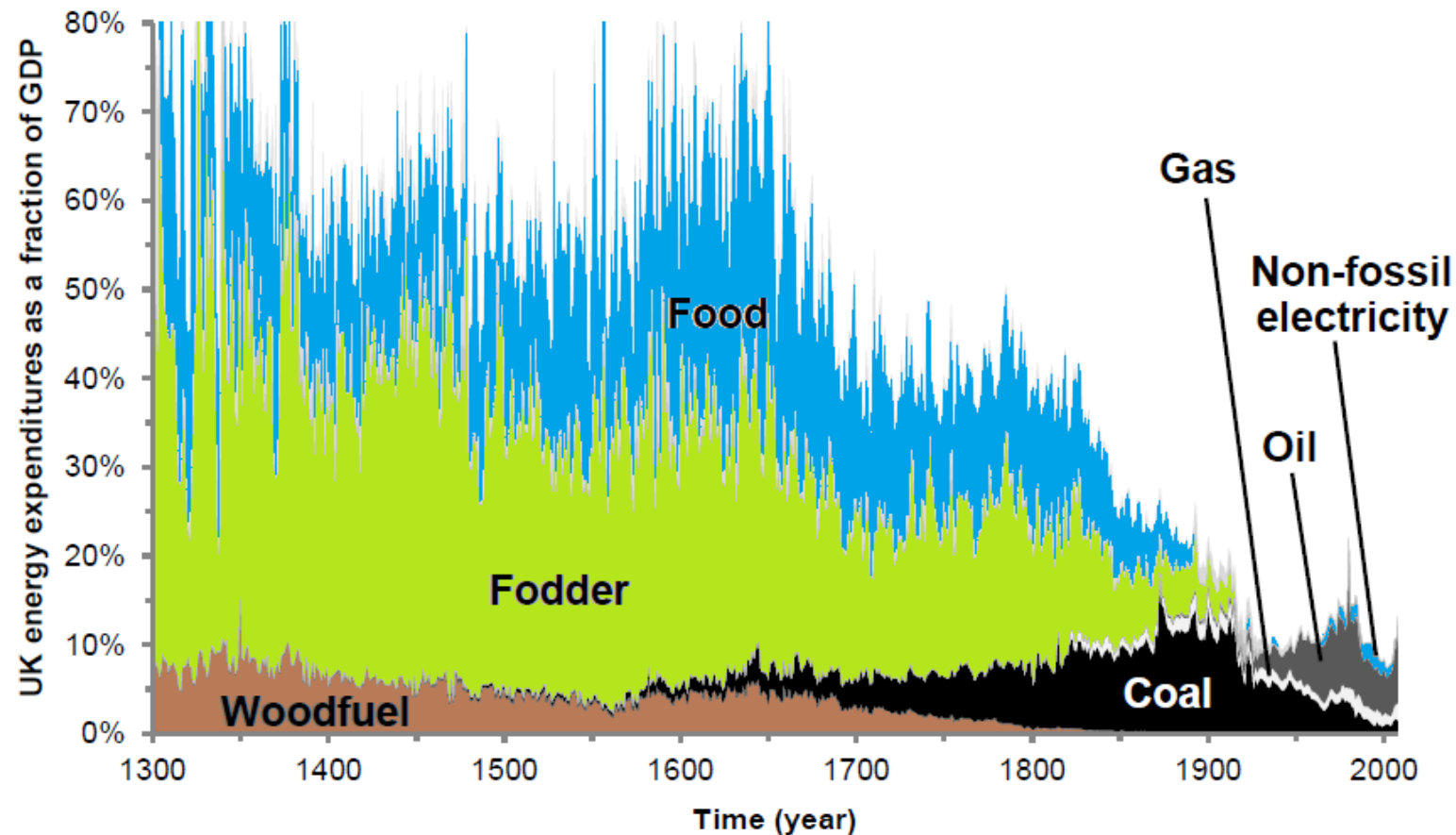
L'EROI n'explique pas tout, même si on discerne des tendances



Un EROI qui diminue **semble pouvoir être corrélé** avec: la malnutrition qui augmente, l'alphabétisation des femmes qui diminue et l'inégalité des genres qui augmente. On remarque qu'il semble exister des seuils au-delà desquels les indices varient moins, environ EROI 20.

# Le retour sur l'investissement énergétique

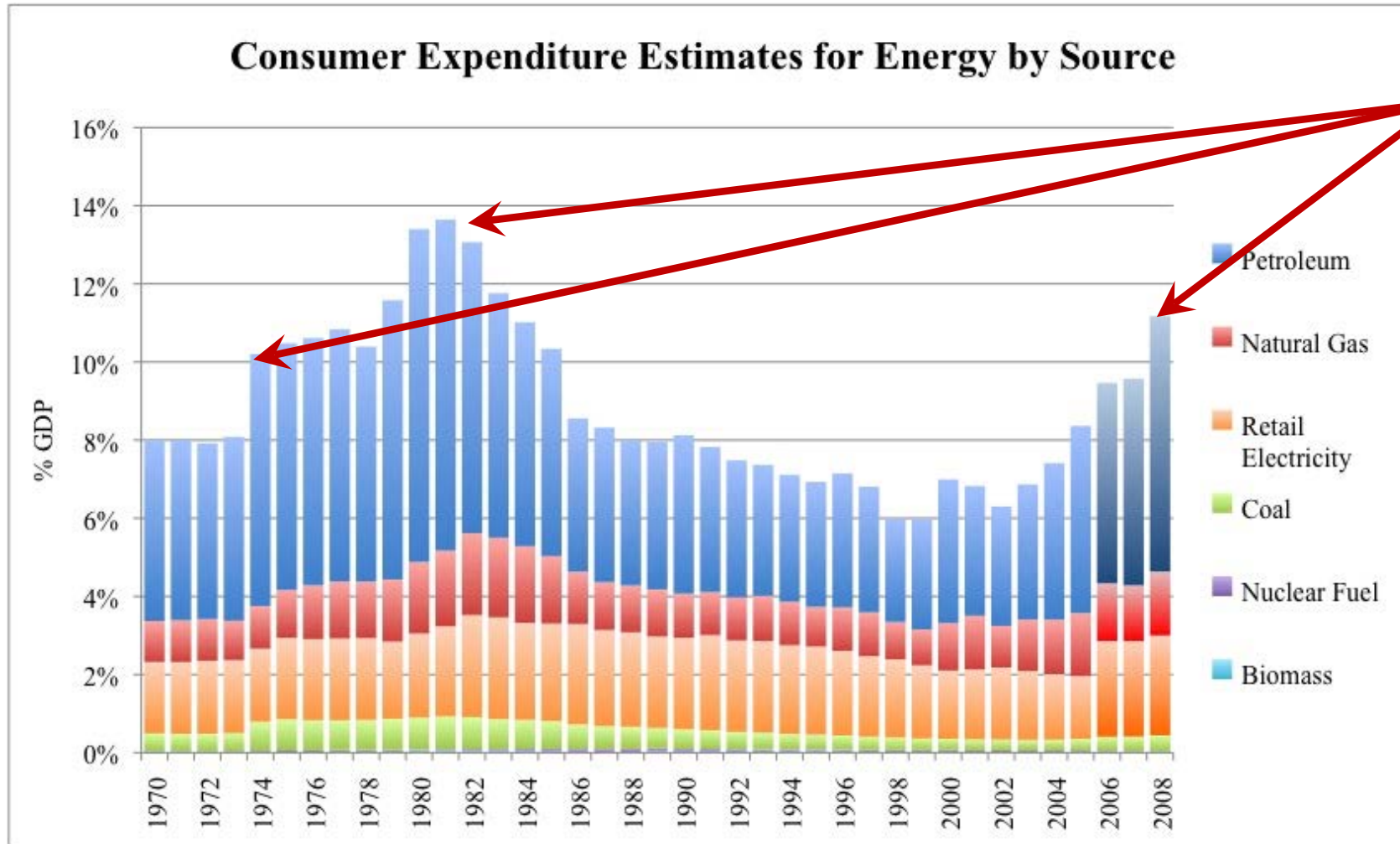
- Évolution du panier énergétique : Grande-Bretagne 1300-2008



Fizaine & Court (2016)



# Le retour sur l'investissement énergétique



Chaque récession est caractérisée par une hausse de la portion du PIB consacrée à l'énergie

Hall, Balogh, Murphy 2009

# Le retour sur l'investissement énergétique

- Énergie et économie au Québec
  - En 2018,
    - PIB 435 G\$
    - 36,4 G\$ de dépenses pour l'énergie
    - Consommation de 2,2 EJ =  $2,2 \times 10^{18}$  J
  - Coût de l'énergie moyen
    - 60,4 MJ/\$ ou 16,5 \$/GJ



$$\text{EROI} = 435 \text{ G\$} / 36,4 \text{ G\$} = 12 \quad \leftarrow$$

$$\text{Intensité énergétique, IE} = 2,2 \text{ EJ} / 435 \text{ G\$} = 5,06 \text{ MJ} / \$(\text{PIB}) \quad \leftarrow$$

# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- ***La situation selon les sources d'énergies***
  - *Les énergies fossiles*
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

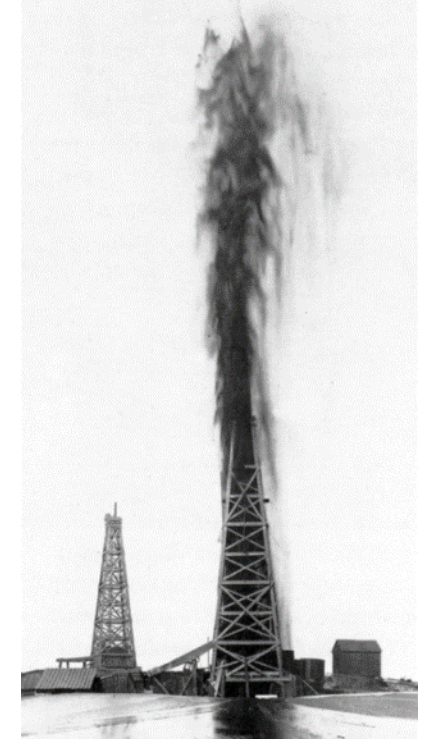
# Les énergies fossiles

- Pour les carburants fossiles, le retour sur l'investissement diminue avec le temps
  - Les gisements sont plus petits.
  - Les gisements sont plus profonds.
  - Les gisements sont plus loin.



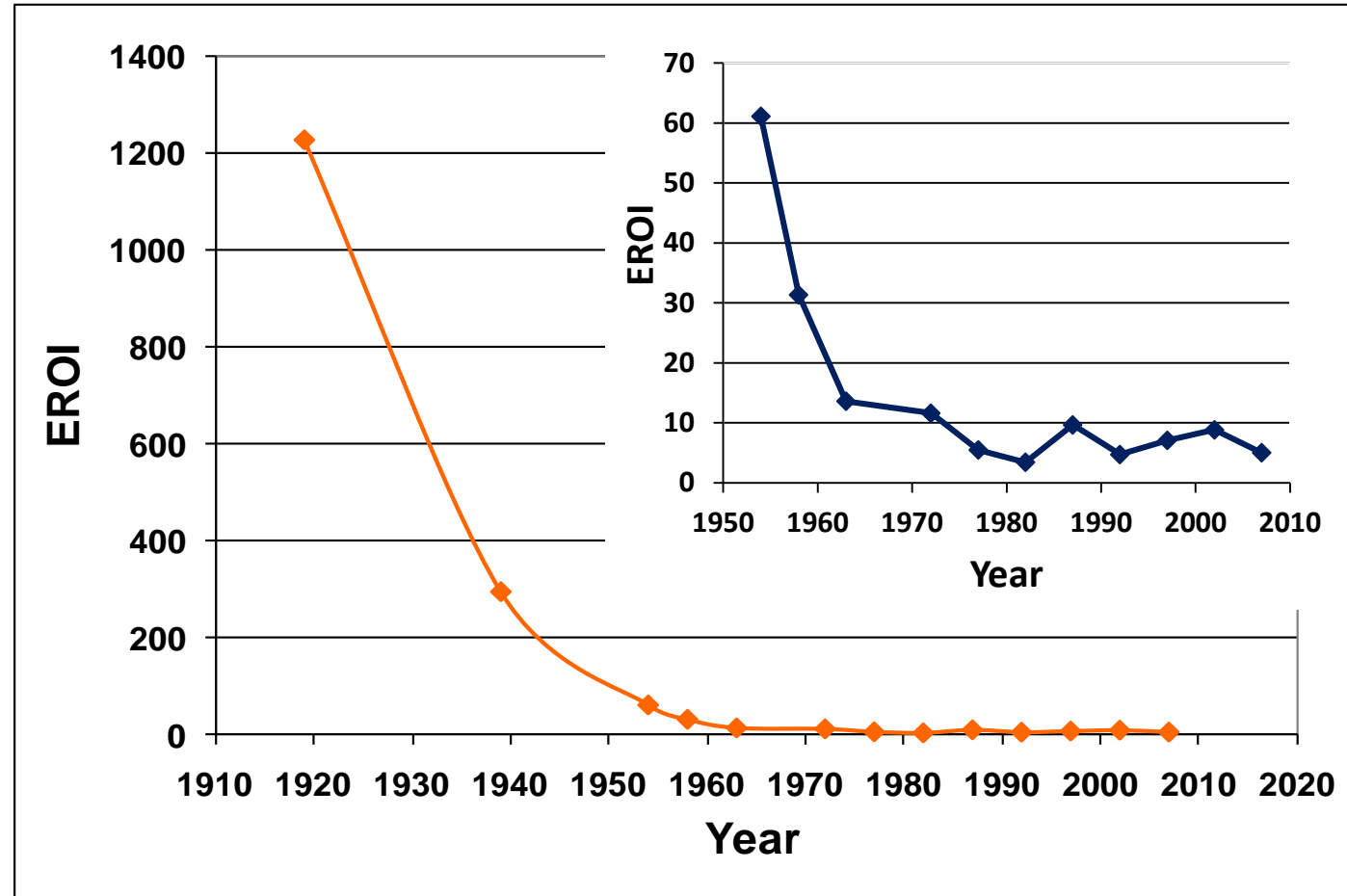
# Les énergies fossiles

- Une difficulté croissante :
  - Le puits de Lakeview en 1910
    - EROI > 35 000
  - Aujourd'hui
    - EROI = 10-20



# Les énergies fossiles

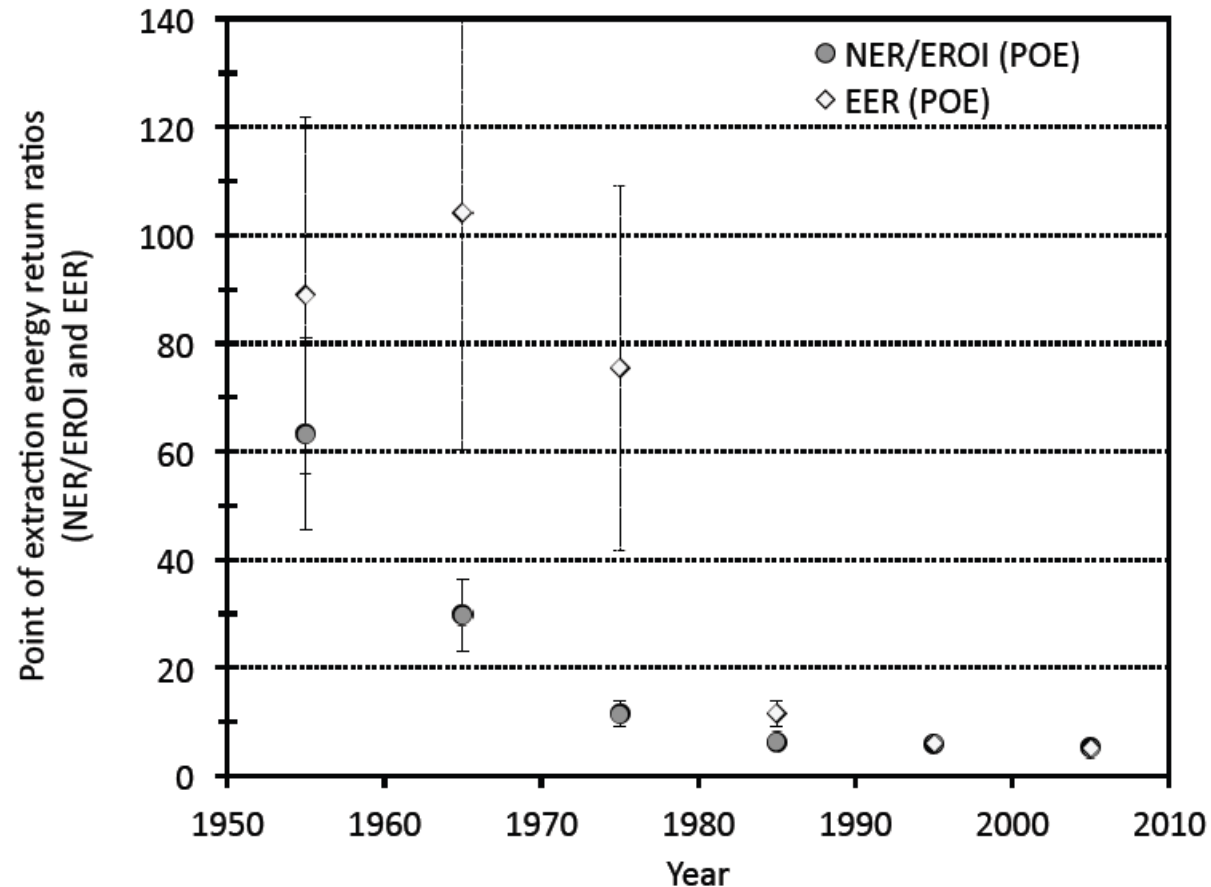
- EROI des activités de recherche de gaz et de pétrole É.-U. :



Guilford, Hall 2011

# Les énergies fossiles

- Production de pétrole en Californie



Brandt, Dale 2011

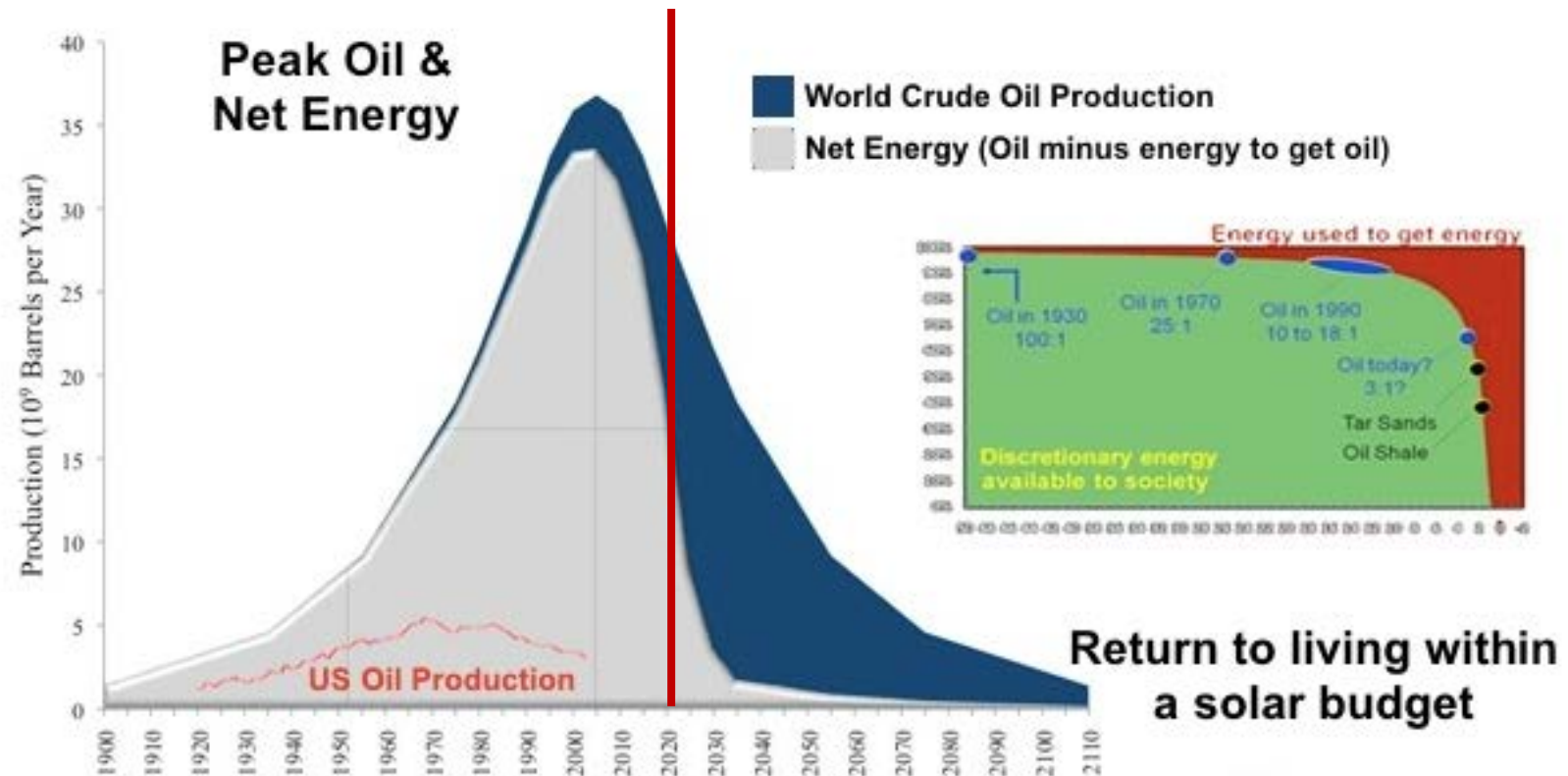
# Les énergies fossiles

- Le pic de production et la production nette de pétrole

## NOTE:

Cette représentation ne correspond pas nécessairement à une prédiction précise.

Elle illustre simplement la manière dont la chute de l'EROI vient accentuer l'éventuelle baisse de production.



Situation globale au tournant de 2020

<https://www.jpods.com/node/212>

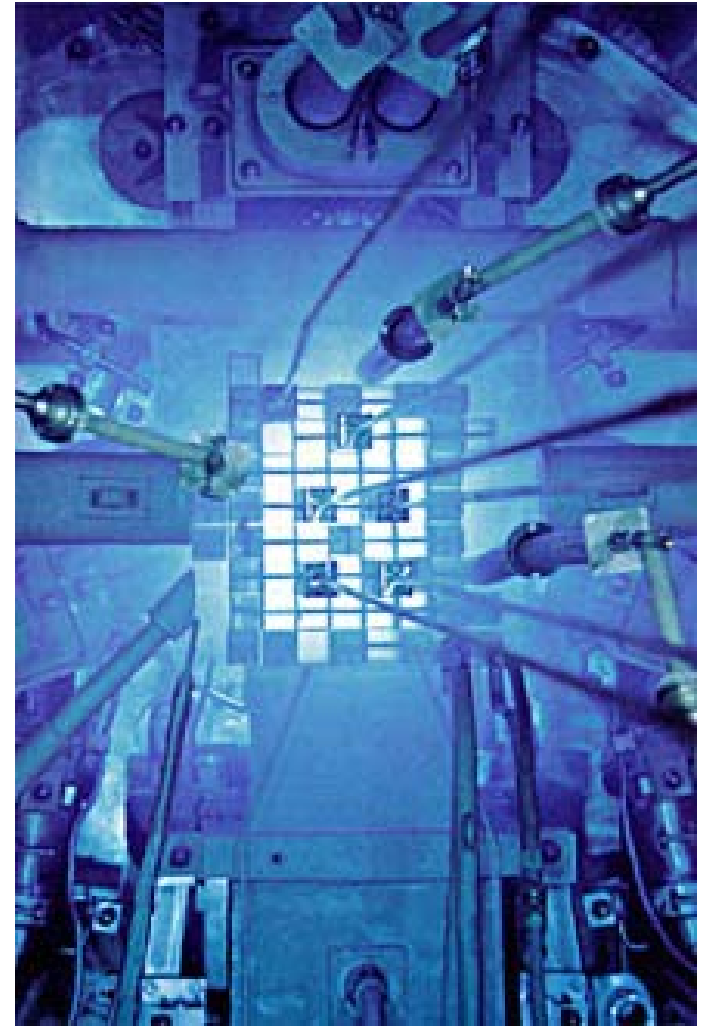


# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- ***La situation selon les sources d'énergies***
  - Les énergies fossiles
  - ***Le nucléaire***
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

# Le nucléaire

- L'analyse est complexe et controversée.
- Méta-analyse de Lenzen (2008)
  - Première et deuxième générations
  - EROI entre 1,4 et 10, typique 5
  - Résultats sensibles aux paramètres
  - Le traitement du combustible nucléaire, en amont comme en aval, domine le bilan énergétique.
- Analyses récentes EROI  $\approx$  50



# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- ***La situation selon les sources d'énergies***
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - ***Les énergies renouvelables***
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

# Les énergies renouvelables

- L'hydroélectricité :
  - extrêmement efficace en terme de production d'énergie.
    - Avec réservoir: EROI = 50-205
    - Au fil de l'eau: EROI = 10-267
  - La très grande durée de vie des barrages aide beaucoup (50-100 ans).
  - Très dépendant du site

# Les énergies renouvelables

- L'hydroélectricité :
  - Projet de la Romaine
    - Coût : Barrage 6,5 G\$ + Lignes électriques 1,5 G\$
    - Intensité énergétique de l'industrie de la construction : 22,3 MJ/\$ ([www.eiolca.net](http://www.eiolca.net))
    - $8 \text{ G\$} \times 22,3 \text{ MJ/\$} = 178,4 \times 10^{15} \text{ J}$
    - Production annuelle :  $8 \text{ TWh/an} = 28,8 \times 10^{15} \text{ J/an}$

$$EROI = \frac{28,8 \times 10^{15} \text{ J an}^{-1} \times 50 \text{ ans}}{178,4 \times 10^{15} \text{ J}} = 8,1$$

# Les énergies renouvelables

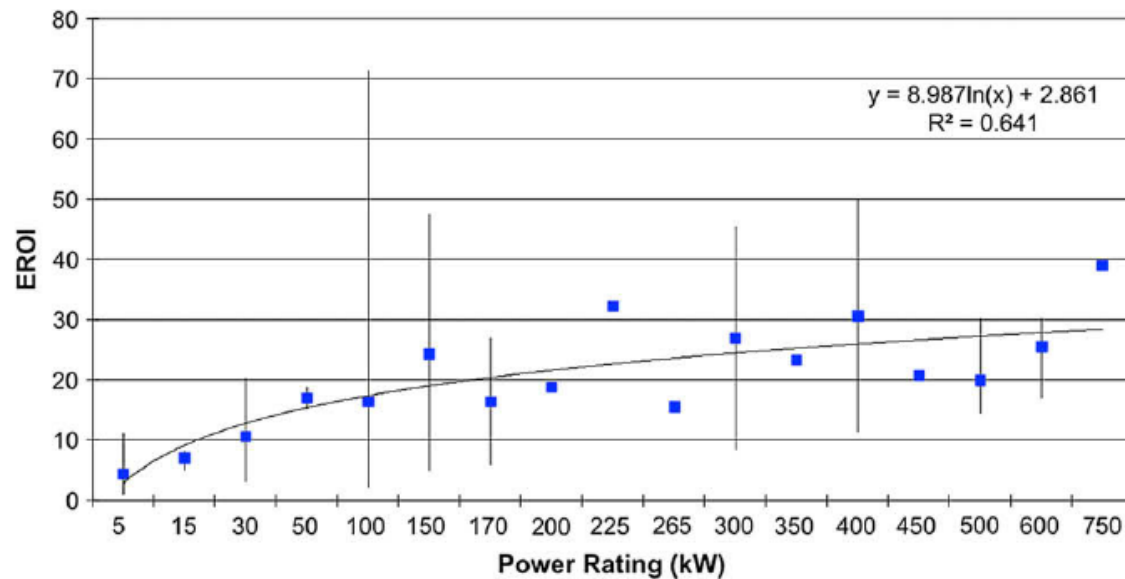
- L'éolien :

- L'efficacité de l'éolien dépend fortement de la vitesse du vent ( $v^3$ )

- $EROI \propto \text{Puissance}^{0,18}$

- Énergie primaire

- Les petites éoliennes (<10 kW) ne produisent pas d'énergie

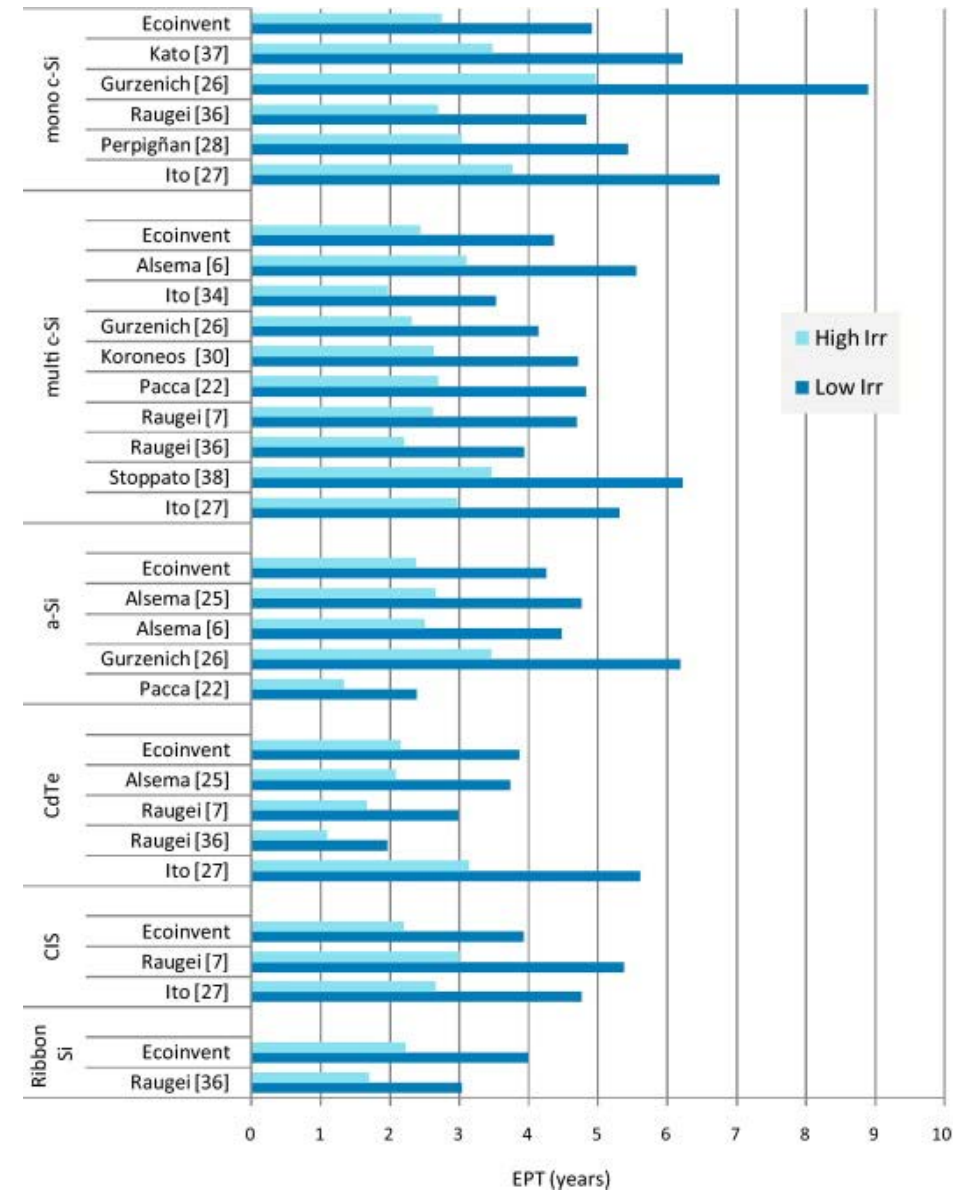


Kubiszewski et al 2010

# Les énergies renouvelables

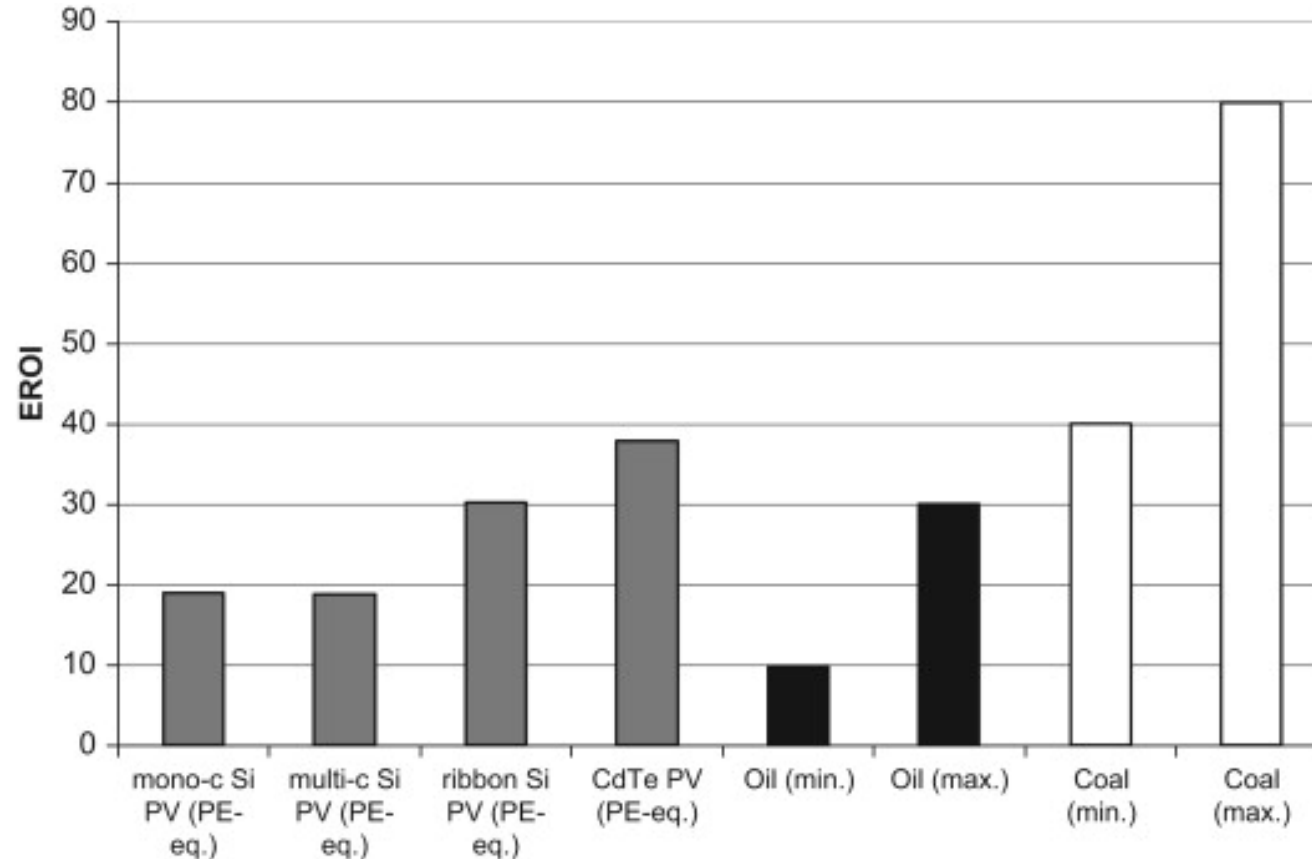
- Le photovoltaïque :
  - Les performances rapportées varient énormément
    - Technologie
    - Ensoleillement
  - EROI= 2-20
    - Énergie primaire

Laleman, Albrecht , Dewulf 2011



# Les énergies renouvelables

- Le photovoltaïque :



Raugei, Fullana-i-Palmer & Fthenakis 2012



# Les énergies renouvelables

- Le photovoltaïque :
  - Beaucoup d'énergie dans le support
    - Intégration en façade
    - Moins bon angle
  - EROI
    - Typique 3,5 à 8,3
    - Crédits énergétiques
      - 19-38



# Les énergies renouvelables

- Les capteurs thermiques :
  - Eau chaude domestique
    - EROI = 3,3 – 43!
    - Dépendant du climat
      - Québec EROI < 0!!!
  - Collecteurs perforés
    - EROI >> 10 (~100-200)
  - Solaire passif
    - Fenêtres + isolation
    - EROI = 10-∞



# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- ***La situation selon les sources d'énergies***
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - ***Les biocarburants***
  - Efficacité énergétique
- Conclusion

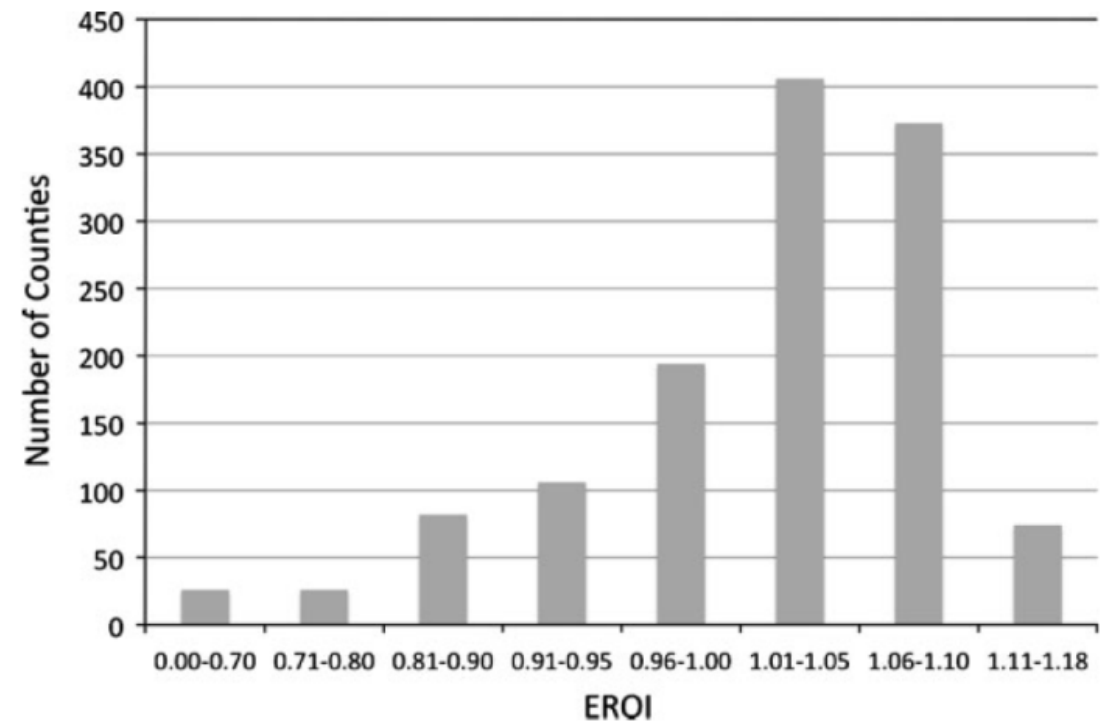
# Les biocarburants

- Dans le cas des biocarburants, l'analyse du retour sur l'investissement énergétique prend une importance considérable.
  - Éthanol
  - Biodiésel
  - Combustion



# Les biocarburants

- Éthanol grain est le cas le plus litigieux
- Meta-analyse Murphy, Hall, Power 2011
  - EROI = 0,71-1,67 (littérature)
  - EROI =  $1,07 \pm 0,2$  (meta)
  - Co-produit 14 %
- Éthanol cellulosique
  - EROI = 4-5
  - Co-produit 30-40 %



Murphy, Hall, Powers 2010

# Plan de la présentation

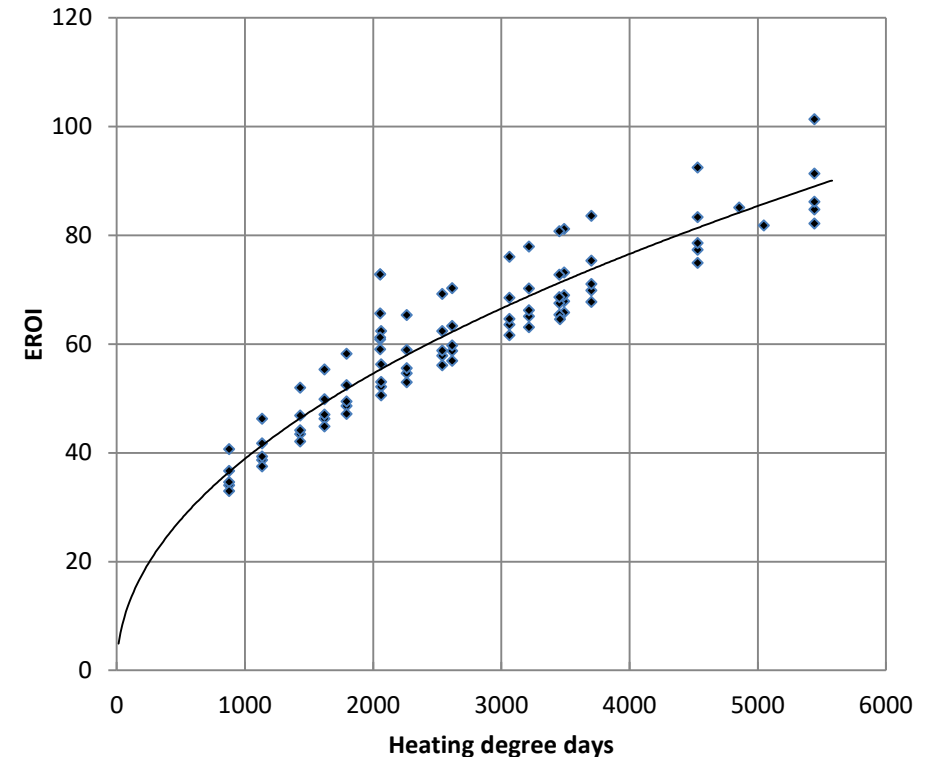
- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- ***La situation selon les sources d'énergies***
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - ***Efficacité énergétique***
- Conclusion

# Efficacité énergétique

- Au lieu de produire l'énergie, on peut l'économiser!

$$EROI = \frac{\dot{Énergie}_{économisée}}{\dot{Énergie}_{investie}} = \frac{W}{W} = \frac{J}{J}$$

- Isolation EROI >> 10
- Fenêtre haute performance
  - Double, EROI ≈ 100,
  - Triple, EROI ≈ 18-25
  - Faible émissivité, EROI ≈ 592-758
  - Argon, EROI > 100 000??



# Efficacité énergétique

- L'épaisseur optimale d'isolant varie avec la racine carrée du nombre de degrés-jour.
  - Le concept des passivhaus a été optimisé pour l'Autriche (3400 DJC)
  - Il est inadéquat pour les régions plus nordiques.
    - Il faut relâcher la norme et ne pas éliminer le système de chauffage.
    - Ex: Pays scandinaves > 15 kWh/(m<sup>2</sup>an)

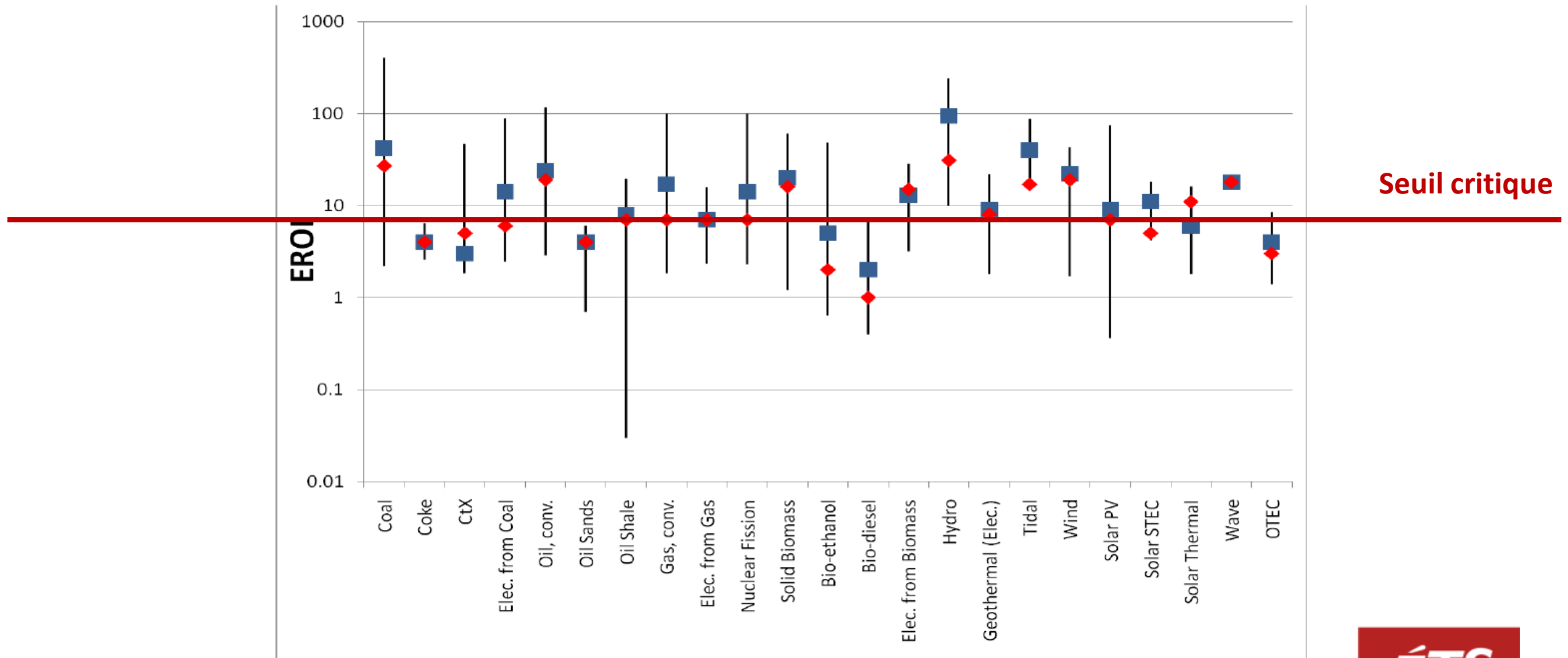


# Plan de la présentation

- Qu'est-ce que l'économie biophysique ?
- Le retour sur l'investissement énergétique
- La situation selon les sources d'énergies
  - Les énergies fossiles
  - Le nucléaire
  - Les énergies renouvelables
  - Les biocarburants
  - Efficacité énergétique
- **Conclusion**

# Conclusion

- Résumé des EROI de différentes sources d'énergie :



# Conclusion

- Résumé des EROI de différentes sources d'énergie :

**Note: les manières d'estimer l'EROI varient et conséquemment les valeurs calculées. Ce qui importe ici sont les tendances.**

*C.D. Rye, T. Jackson*

**Table 1**

Typical EROEI values (derived from Hall and Klitgaard, 2011).

Primary energy production technologies	Approximate EROEI
Hydropower	> 100:1
Historic oil and gas	100:1
Coal	80:1
Current global oil and gas	20:1
Wind (no storage)	20:1
Nuclear	15:1
Current US oil and gas	10:1
Solar (no storage)	10:1
Unconventional oil and gas	5:1
Biofuels	2:1

**Seuil critique**

# Conclusion

- La qualité des sources d'énergie est directement liée à l'économie.
  - EROI > 10
- La société industrielle s'est construite grâce à un accès à de l'énergie de haute qualité.
  - EROI = 50-100
- La qualité de l'énergie fossile se dégrade.
  - EROI < 20 (pétrole, gaz)

# Conclusion

- Certaines énergies renouvelables sont de bonne qualité.
  - Hydro-électrique
  - Éolien (EROI>20)
  - Combustion de la biomasse
- D'autres non
  - Biocarburant
- D'autres pas pour longtemps
  - PV

# Conclusion

- Dans une situation de pénurie énergétique, le choix des technologies de production d'énergie les plus efficaces s'impose.
  - Attention au paiement de la dette initiale !
- Ce n'est pas parce qu'une technologie est renouvelable qu'elle est verte.
  - Grano  $\neq$  Écolo

# Conclusion





**Merci de votre attention !**



# Références

- Brandt, A., Dale, M., A General Mathematical Framework for Calculating Systems-Scale Efficiency of Energy Extraction and Conversion: Energy Return on Investment (EROI) and Other Energy Return Ratios, *Energies* 2011, 4(8), 1211-1245
- Cleveland, C. J., Biophysical economics: Historical perspective and current research trends, *Ecological Modelling*, 38, 47-73 , 1987
- Dale, M., Global energy modelling: a biophysical approach: Ph.D. University of Canterbury, 2010
- Fizaine, F., & Court, V. (2016). Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy*, 95, 172-186.
- Gagnon, L., Bélanger, C., Uchiyama, Y., Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001, *Energy Policy*, 30, 1267–1278, 2002

# Références

- Guilford, M. C., Hall, C. A. S., A New Long Term Assessment of EROI for U.S. Oil and Gas Production and Discovery , 3rd Biophysical Economics Conference, Syracuse NY, April 15th-16th 2011
- Hall, C.A.S., Balogh, S., Murphy, D.J.R., What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies* 2, 25-47, 2009
- Huijbregts, M., et al, Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production, *Environ. Sci. Technol.*, 44, 2189–2196, 2010
- Kubiszewski, I., Cleveland, C. J., Endres, P.K., Meta-analysis of net energy return for wind power systems, *Renewable Energy* 35, 218–225, 2010
- Laleman, R., Albrecht, J., Dewulf, J., Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 267–281, 2011

# Références

- Georgescu-Roegen, N. 1971. The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen, N. 1975. Energy and economic myths, Southern Economic Journal 41: 347-381.
- Kapp, K. W. (1950) The Social Costs of Private Enterprise. New York: Shocken.
- Schumacher, E.F. 1973. Small Is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered. London: Blond and Briggs.
- Polanyi, K. (1944) The Great Transformation. New York/Toronto: Rinehart & Company Inc.
- Costanza R. (2003). Early History of Ecological Economics and ISEE [archive]. Internet Encyclopaedia of Ecological Economics.
- Malte Faber. (2008). How to be an ecological economist. Ecological Economics 66(1):1-7.

# Références

- Lenzen, M., Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review, *Energy Conversion and Management* 49, 2178–2199, 2008
- Lenzen, M., Munksgaard, J., Energy and CO<sub>2</sub> life-cycle analyses of wind turbines—review and applications, *Renewable Energy* 26, 339–362, 2002
- Murphy, D. J., Hall, C. A. S., Powers, B., New perspectives on the energy return on energy investment (EROI) of corn ethanol, *Environ Dev Sustain*, 13, 179–202, 2011
- Spash, C. L. (1999) The development of environmental thinking in economics, *Environmental Values* 8(4): 413-435
- Rye, C.D., Jackson, T., A review of EROEI-dynamics energy-transition models, *Energy Policy* 122 (2018) 260-272
- **Gupta, A. K., Hall C.A.S, A Review of the Past and Current State of EROI Data, *Sustainability* 2011, 3, 1796-1809 -> Lecture vivement conseillée**

# Activités à réaliser hors-classe

- Quelle fut la quantité d'énergie nécessaire à la construction de la route 175 entre Québec et Saguenay (1,1 G\$) ?
- Si l'EROI de la production d'éthanol grain est de 1,3 et que l'on a besoin d'une superficie  $X\text{m}^2$  pour produire un litre d'éthanol, quelle sera la superficie de culture nécessaire pour produire 1 litre d'éthanol net ?

# Activités à réaliser hors-classe

- Le coût de la rénovation de la centrale de Gentilly était estimé à un minimum de 2G\$ (4G\$ pour certains voire 8G\$ pour les plus pessimistes)
- Elle produisait 5 TWh par an. En combien d'année, l'énergie nécessaire à la rénovation sera-t-elle récupérée ?
- Quel est le point d'inflexion de la relation entre l'énergie nette et le EROI ?