LIED Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain

Université Paris Cité

Approche historique et modélisation énergétique des systèmes agricoles

Petros Chatzimpiros (LIED, Univ Paris Cité)

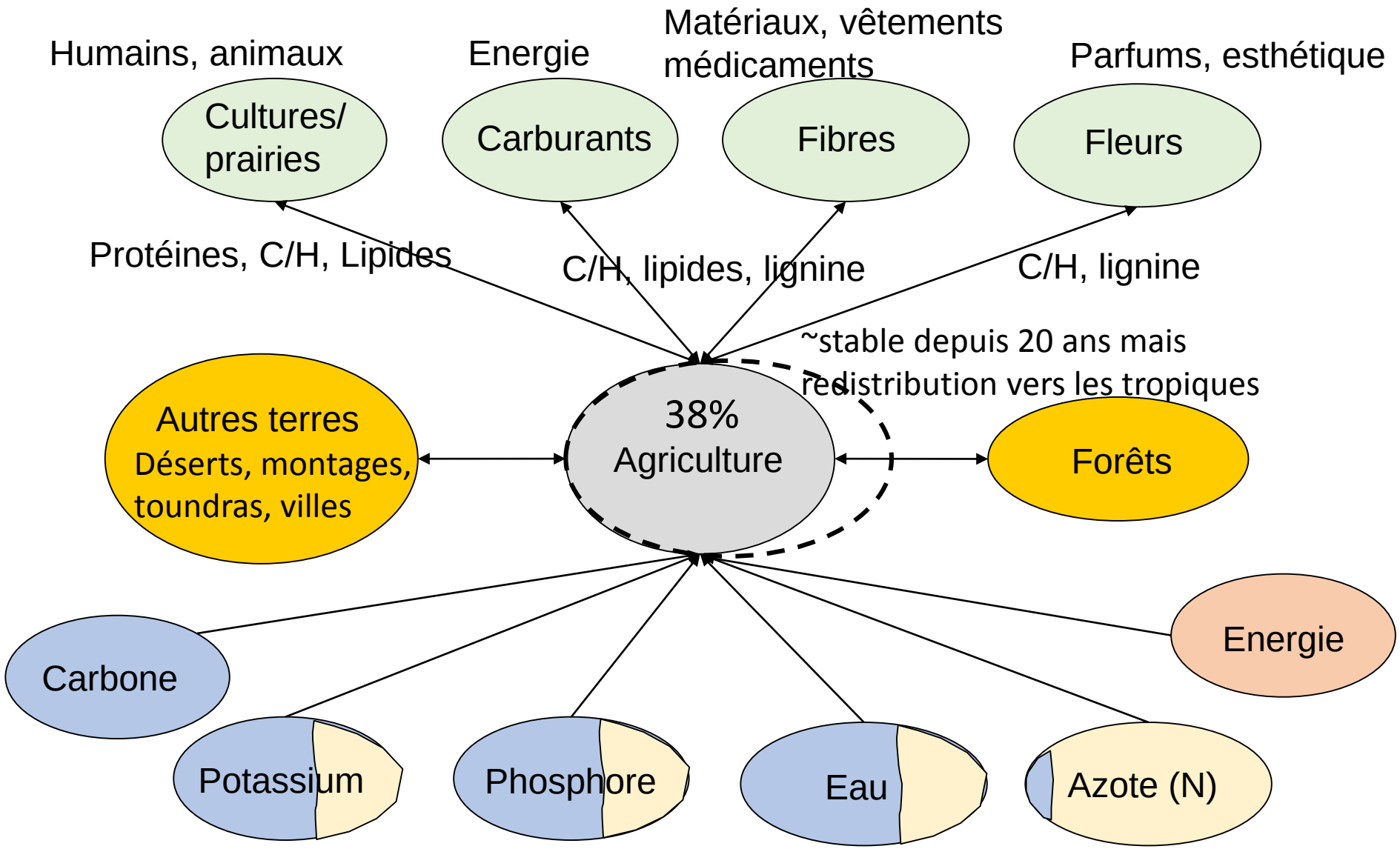
Contexte

- Transition énergétique -> Course au soleil (photons, vent, hydraulique).

- L'agriculture immense interface de captation des photons :
  - Agriculture alimentaire
  - Agriculture énergétique ?

- Conditions de génération du surplus agricole et devenir de ce surplus.

Agriculture : ressources et débouchés



Invariants biophysiques et choix humains

Plan

1. Quelques tendances à l'échelle mondiale.
2. Analyse énergie/nutriments pour modéliser les systèmes agricoles.

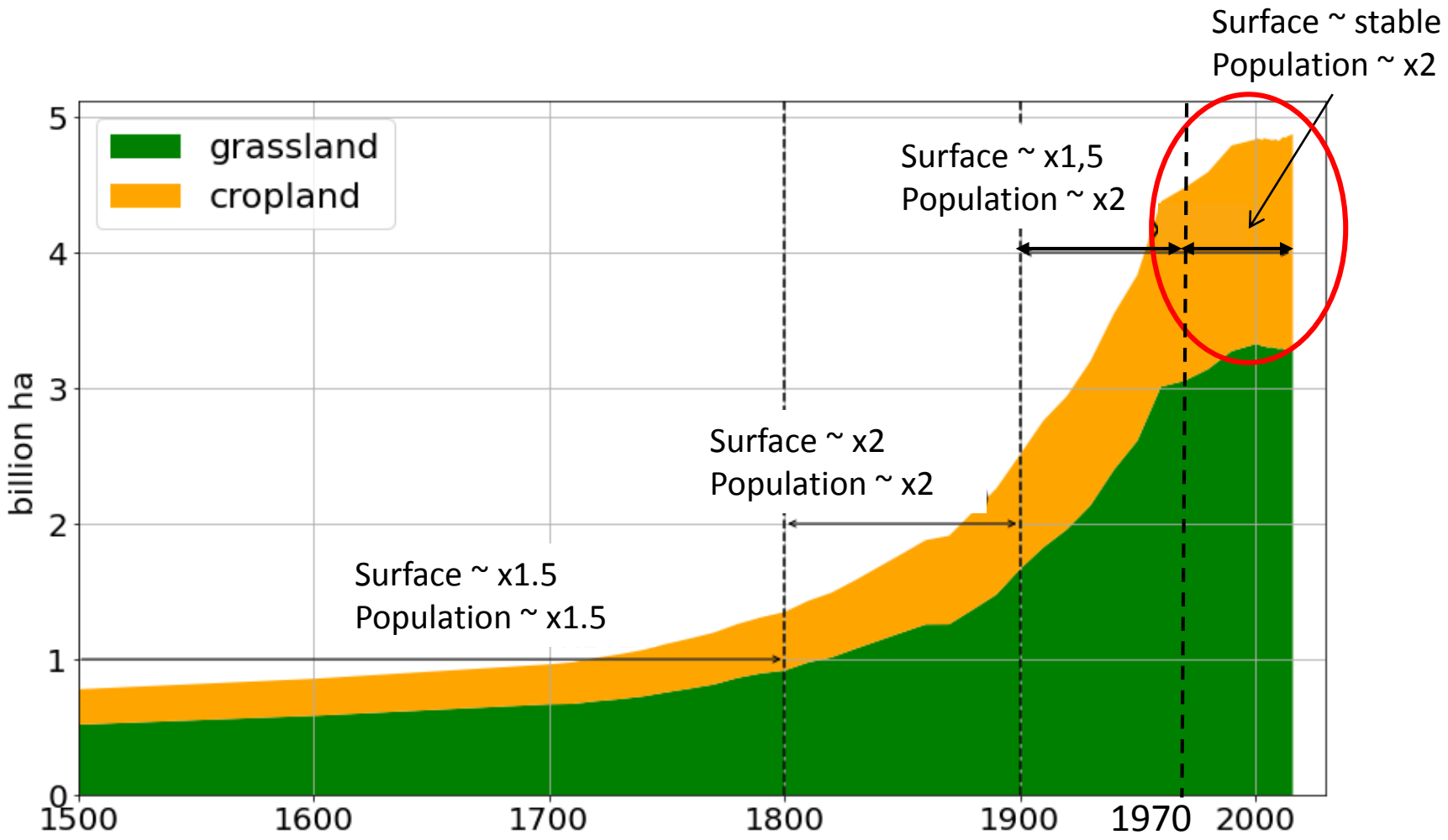
- Périmètre de système et indicateurs adaptés aux transitions, France longue durée.

3. Liens entre transitions, agro-mondialisation et impacts environnementaux.

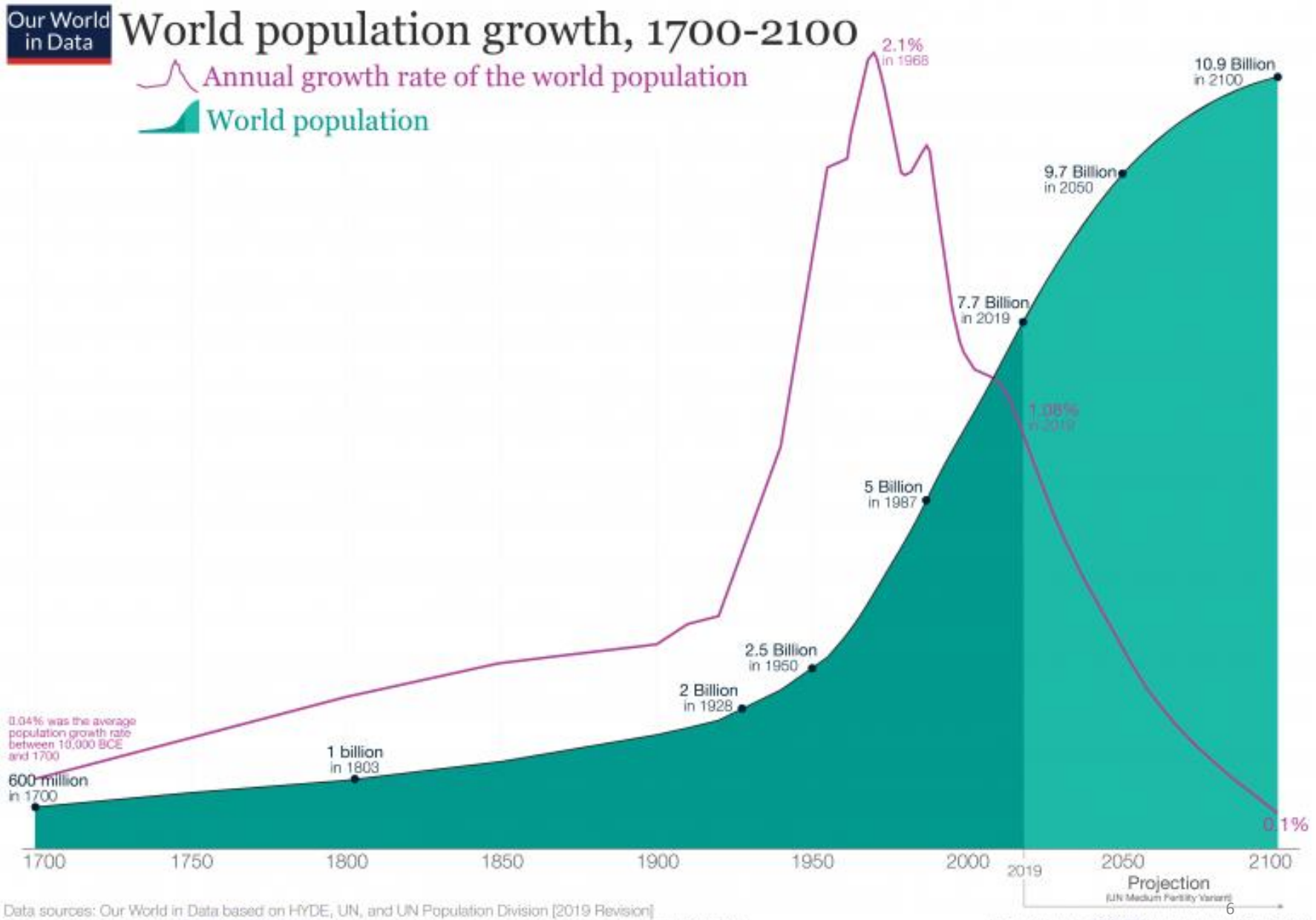
- Surplus agricole et sécurité alimentaire mondiale.

4. Ouverture.

1. Déploiement de l'agriculture mondiale, étendue 1500-2020

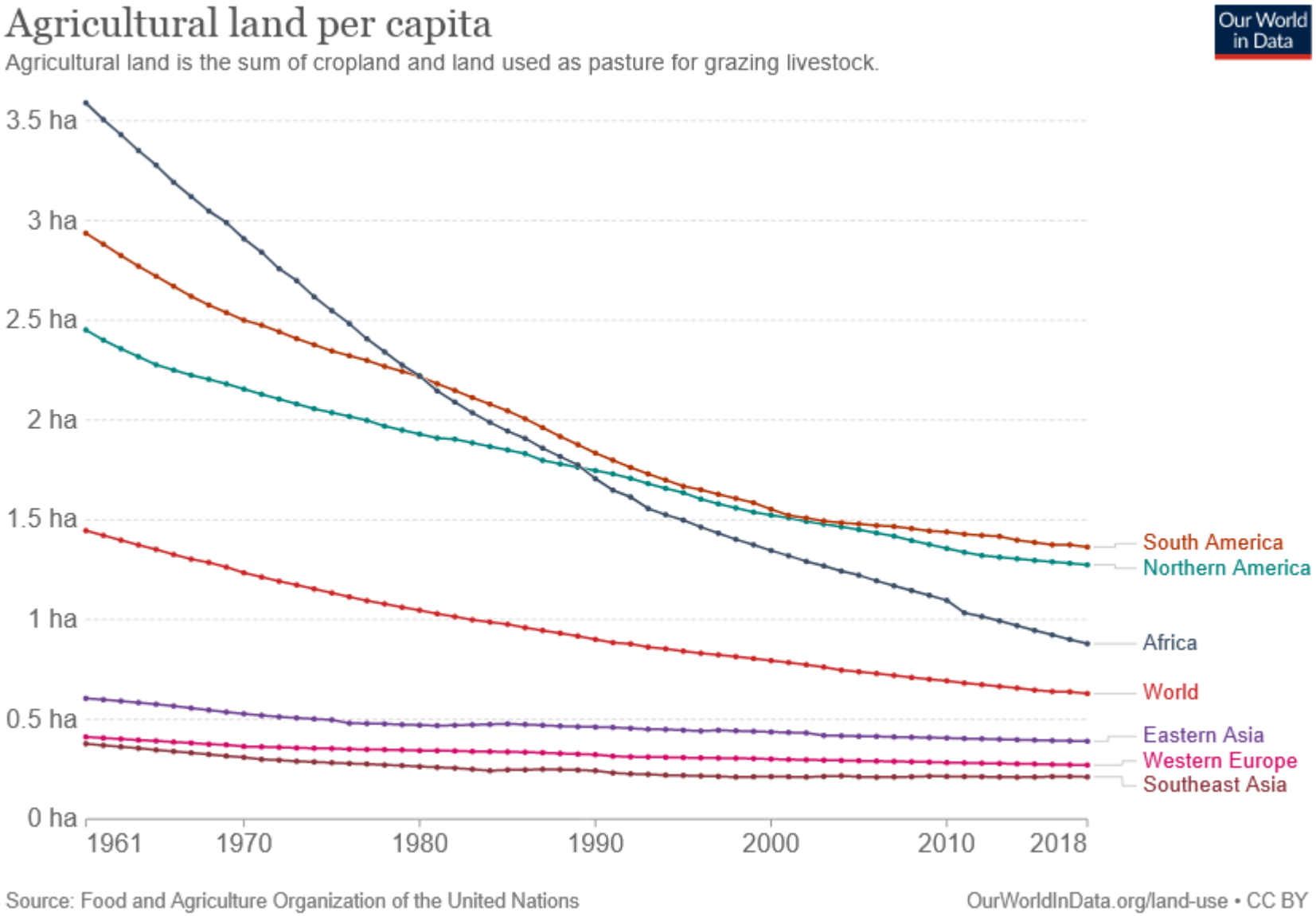


Source : HYDE, Fig. Souhil Harchaoui



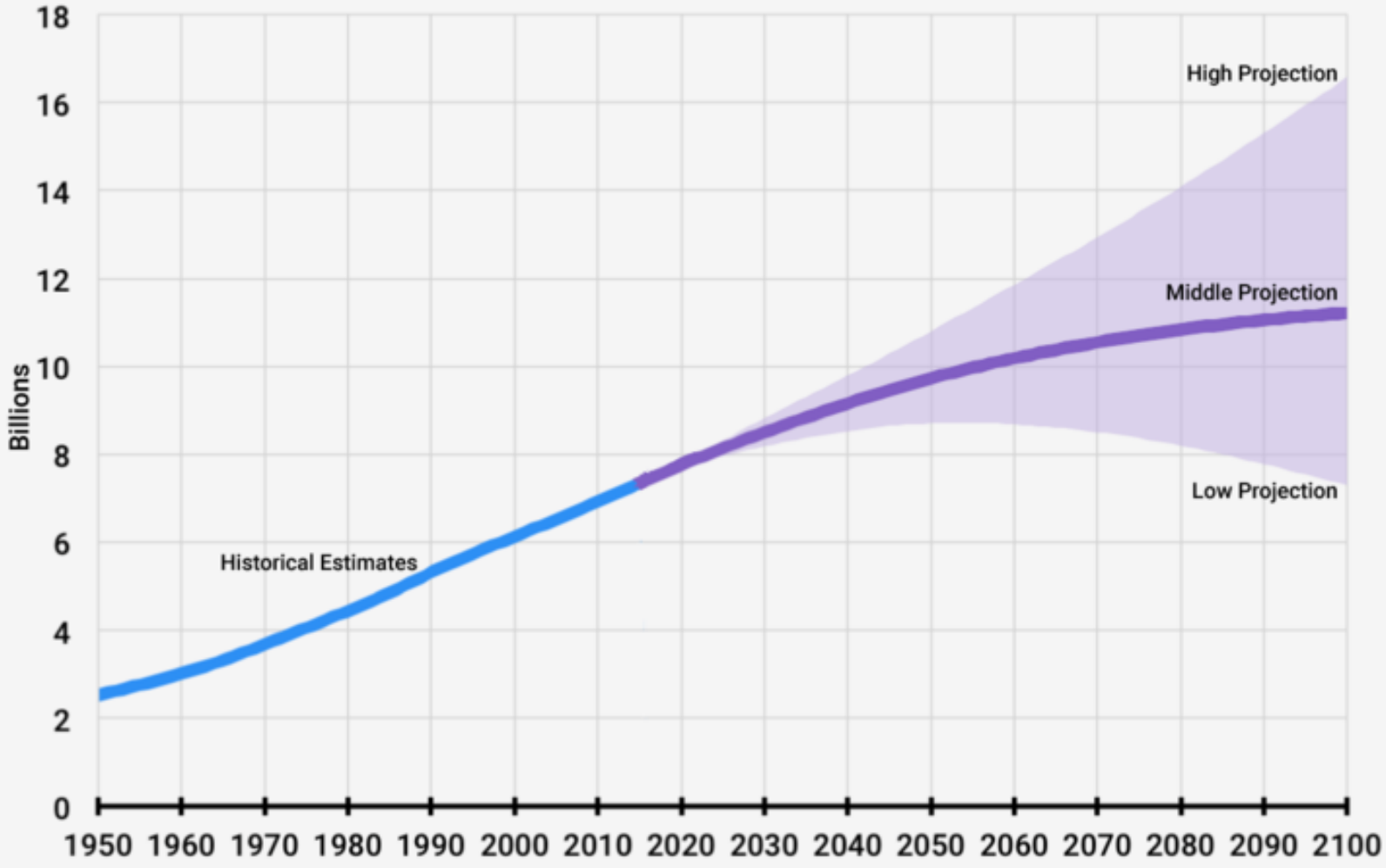
Data sources: Our World in Data based on HYDE, UN, and UN Population Division [2019 Revision]
This is a visualization from OurWorldinData.org, where you find data and research on how the world is changing.

Licensed under CC-BY by the author Max Roser.



Foi dans la croissance de la productivité par hectare et le commerce international

PROJECTED WORLD POPULATION



SOURCE: United Nations, "World Population Prospects: 2015 Revision"

BUSINESS INSIDER

Combien ça pèse ?

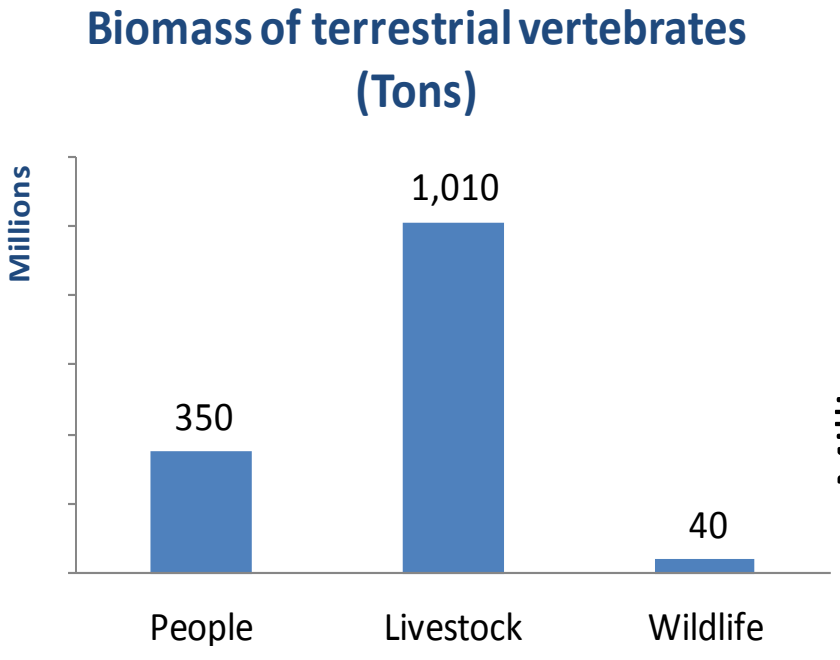


Fig 1 : Biomass of people, livestock and wildlife, adapted and updated from Smil (2002) and (FAO 2010).

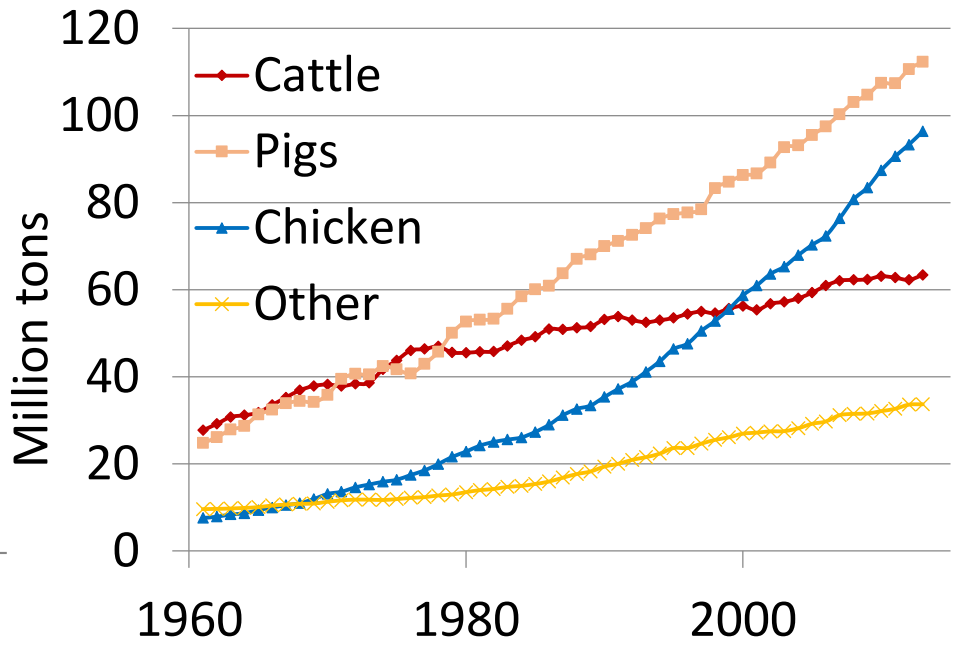
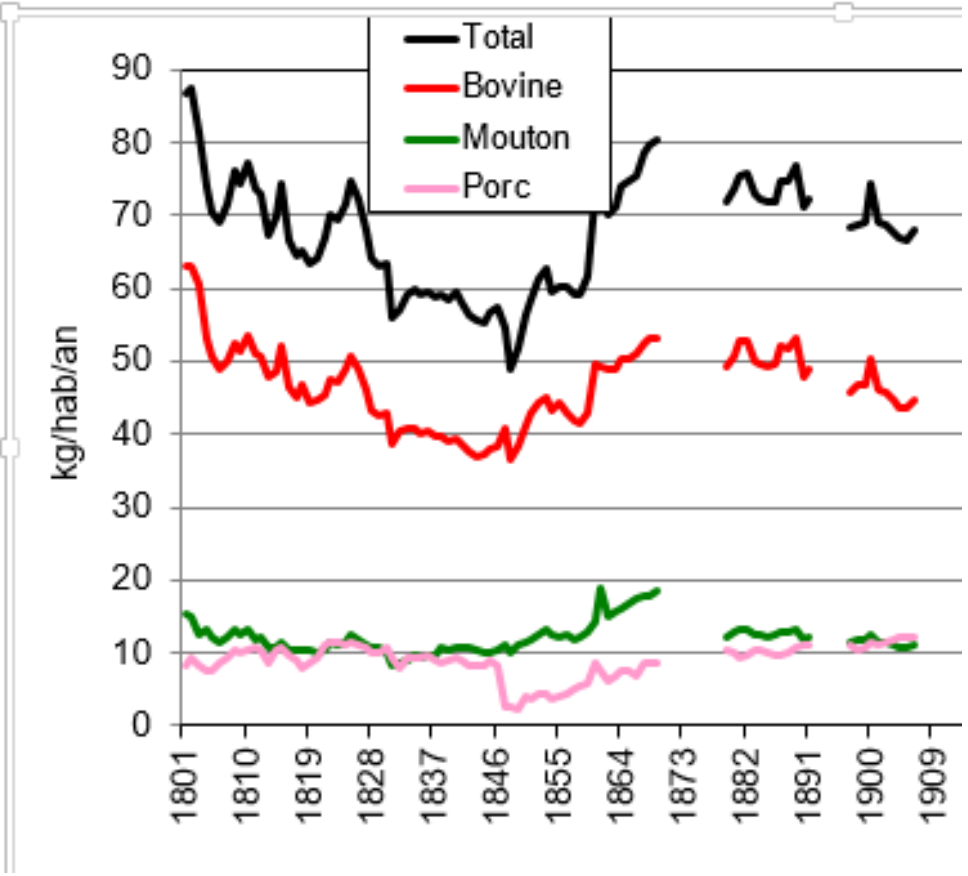


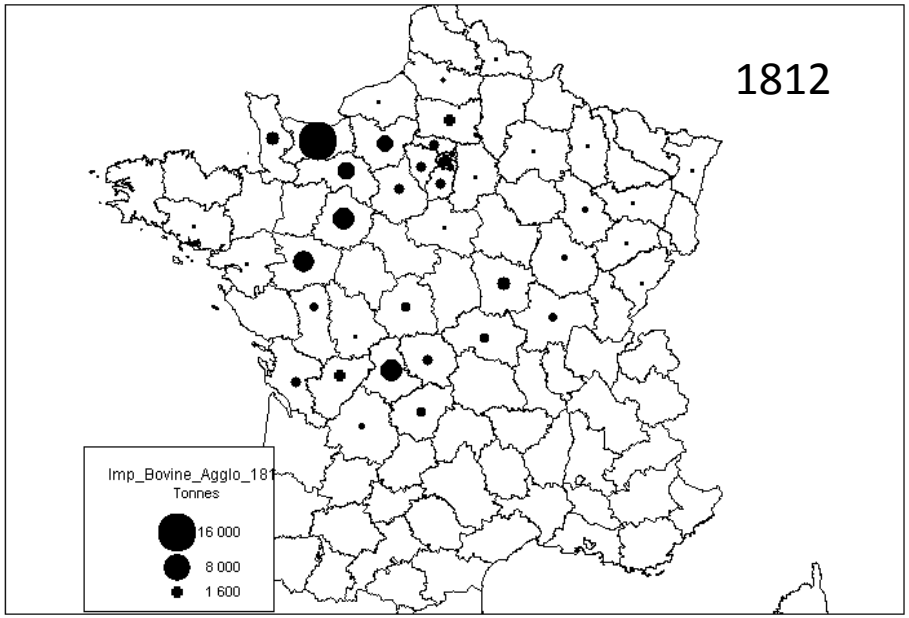
Fig 2: Change in global livestock production over time (FAOSTAT).

Aujourd'hui : Porc, volailles, bœuf.

Elevage occupe 3.73 milliards d'hectares (90 % prairies, 10 % arables) – au total ~75% des terres mondiales

Mise en perspective : profil de la consommation de viande en ville préindustrielle et aire d'approvisionnement. Paris, XIXe siècle.

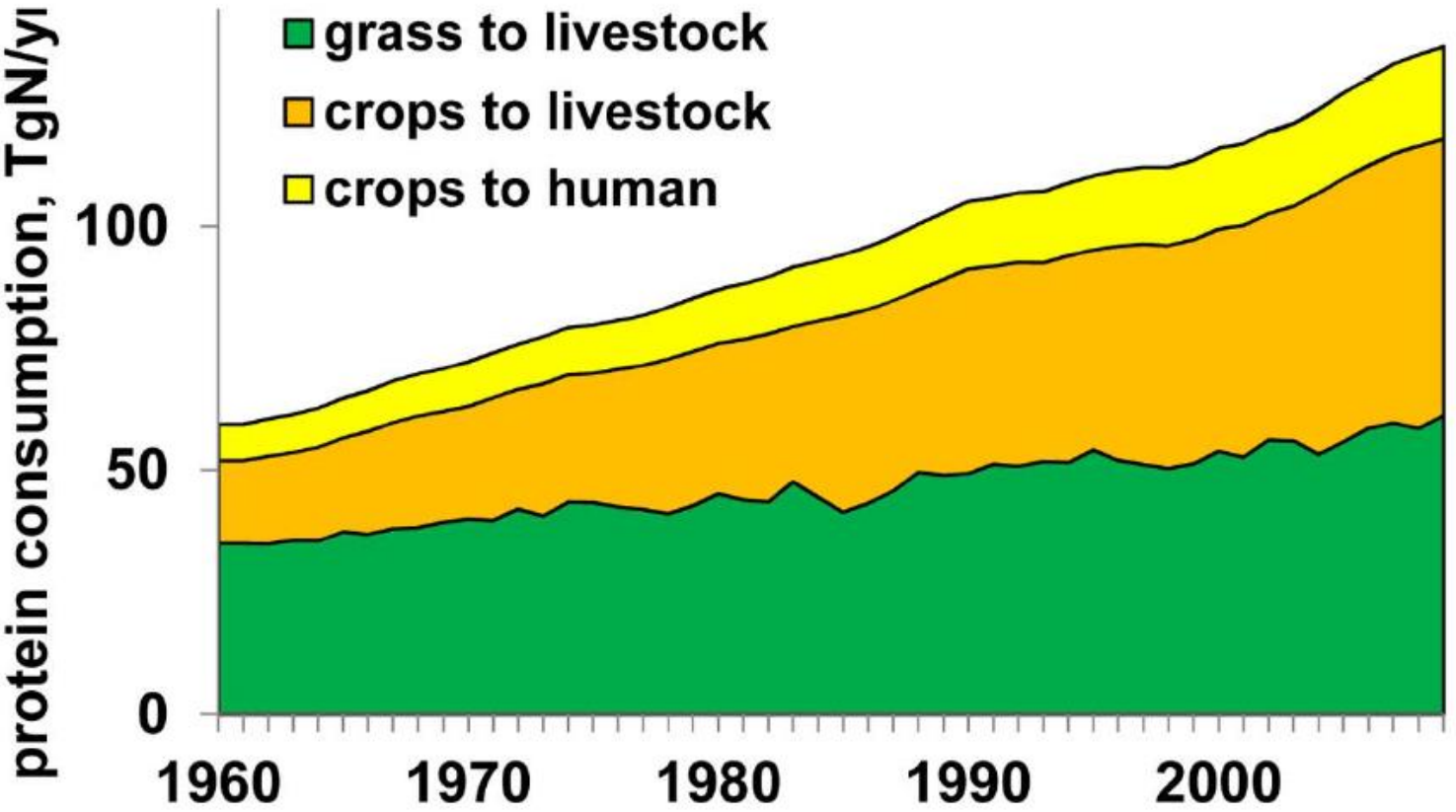




Provenances aval et distances jusqu'à ~600 km

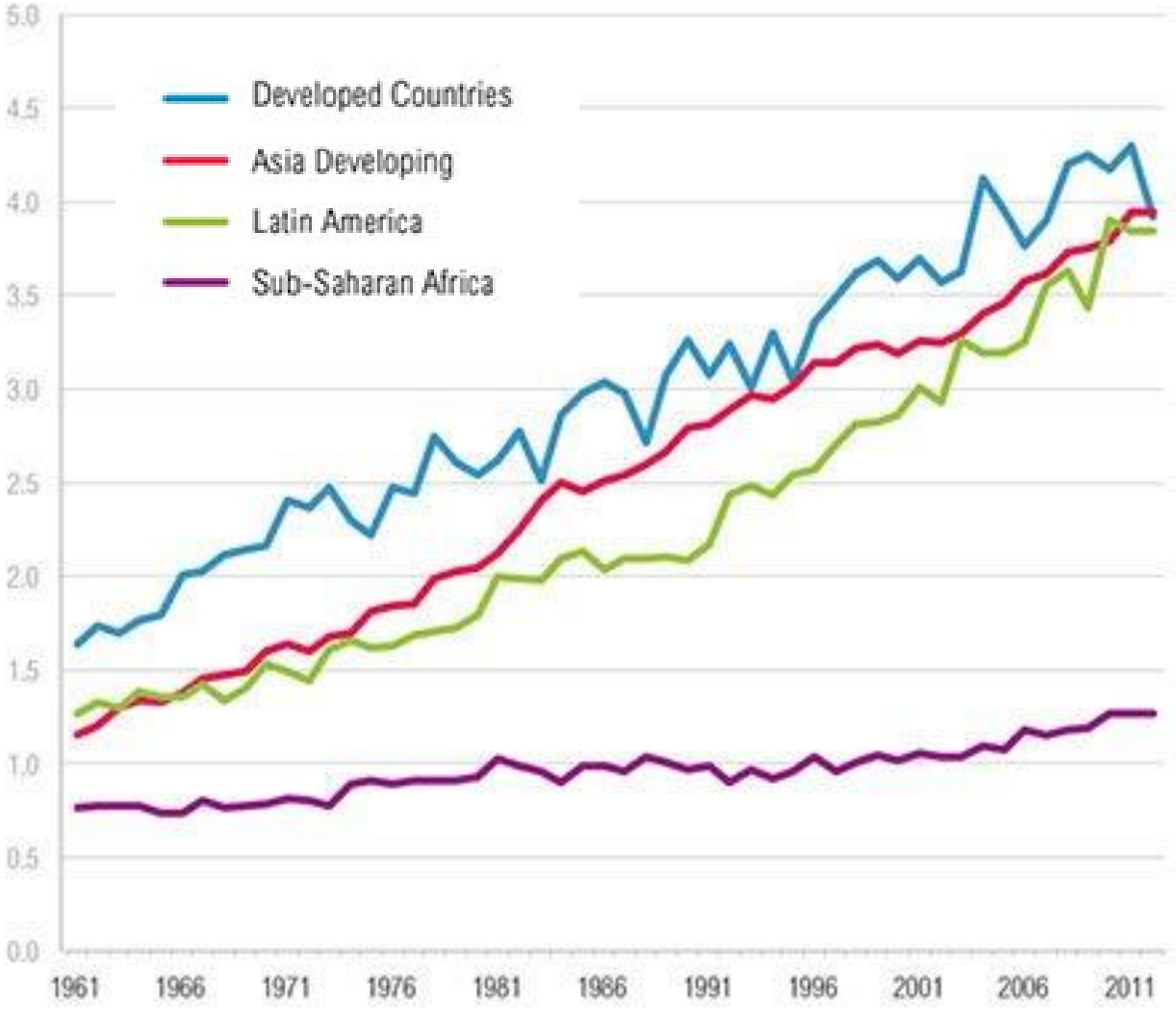
Chatzimpiros, 2011

Débouché des protéines végétales, monde, 1961-2014



Lassaletta et al., 2016

Cereal Yields (in metric tons per hectare)

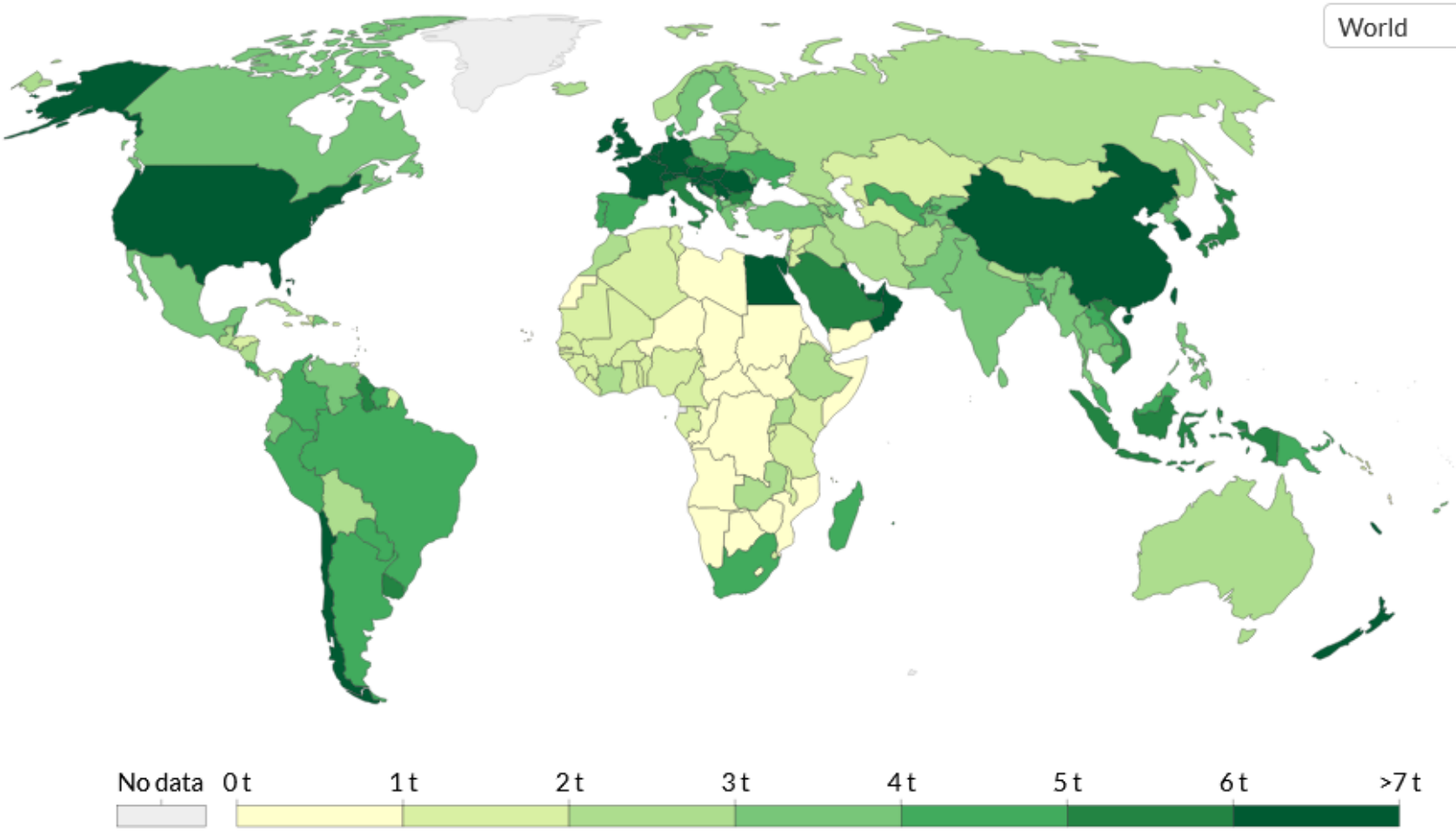


WORLD RESOURCES INSTITUTE

Cereal yield, 2018

Our World in Data

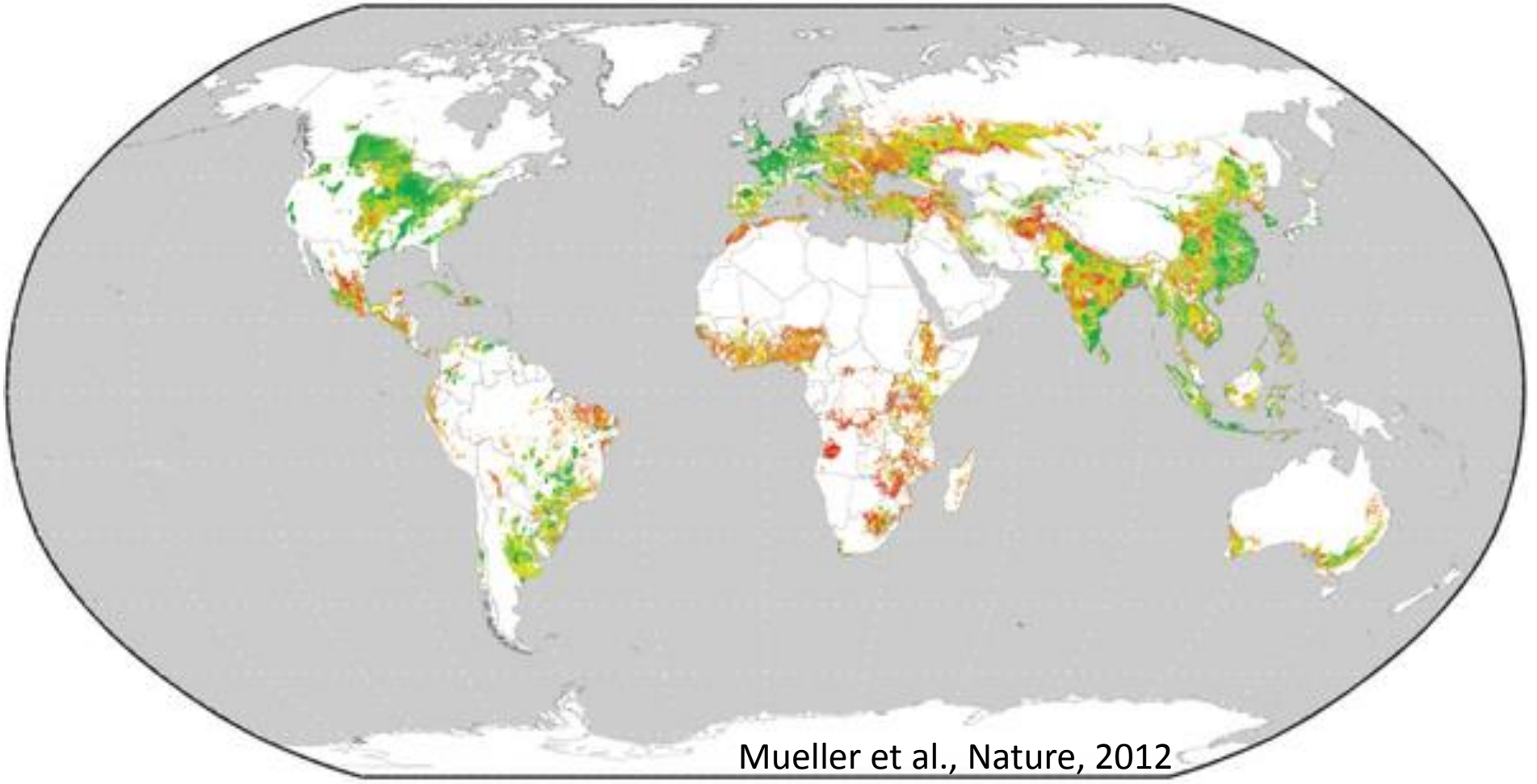
Cereal yields are measured in tonnes per hectare. Cereals include wheat, rice, maize, barley, oats, rye, millet, sorghum, buckwheat, and mixed grains.



Source: UN Food and Agriculture Organization (FAO)

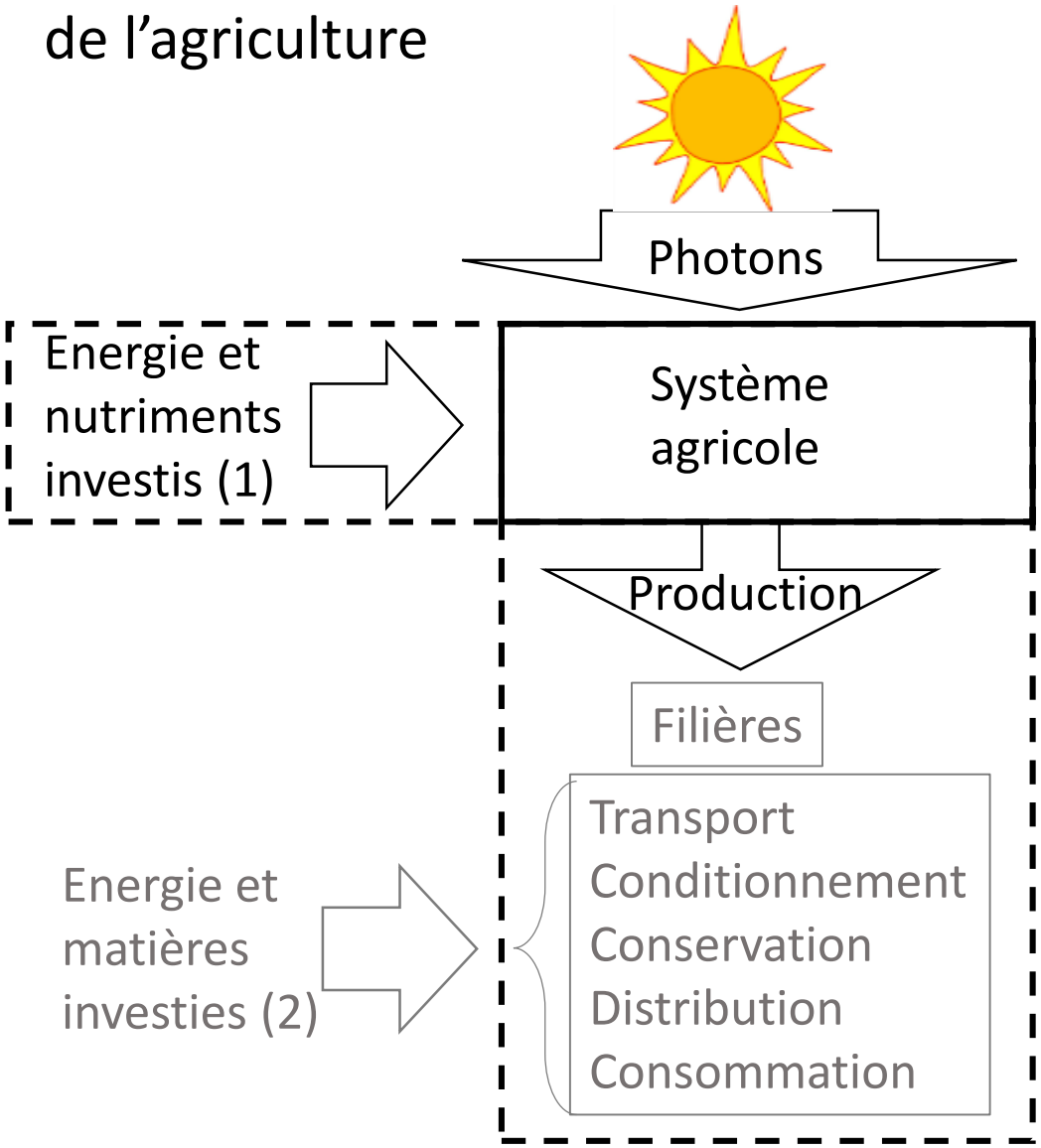
OurWorldInData.org/crop-yields • CC BY

Disparités mondiales des rendements de cultures



2. Analyse du fonctionnement dans une vision prospective

Transitions sociotechniques : changements du périmètre fonctionnel de l'agriculture



Moyens de production

- Mains d'œuvre (~10^2 W)
- Animaux (~10^3 W)
- Machines (~10^5-10^6 W)
- Fertilisation (industrie vs BNF)

⇒ Spécialisations agricoles

⇒ Découpage du territoire

⇒ Commerce international

Double description

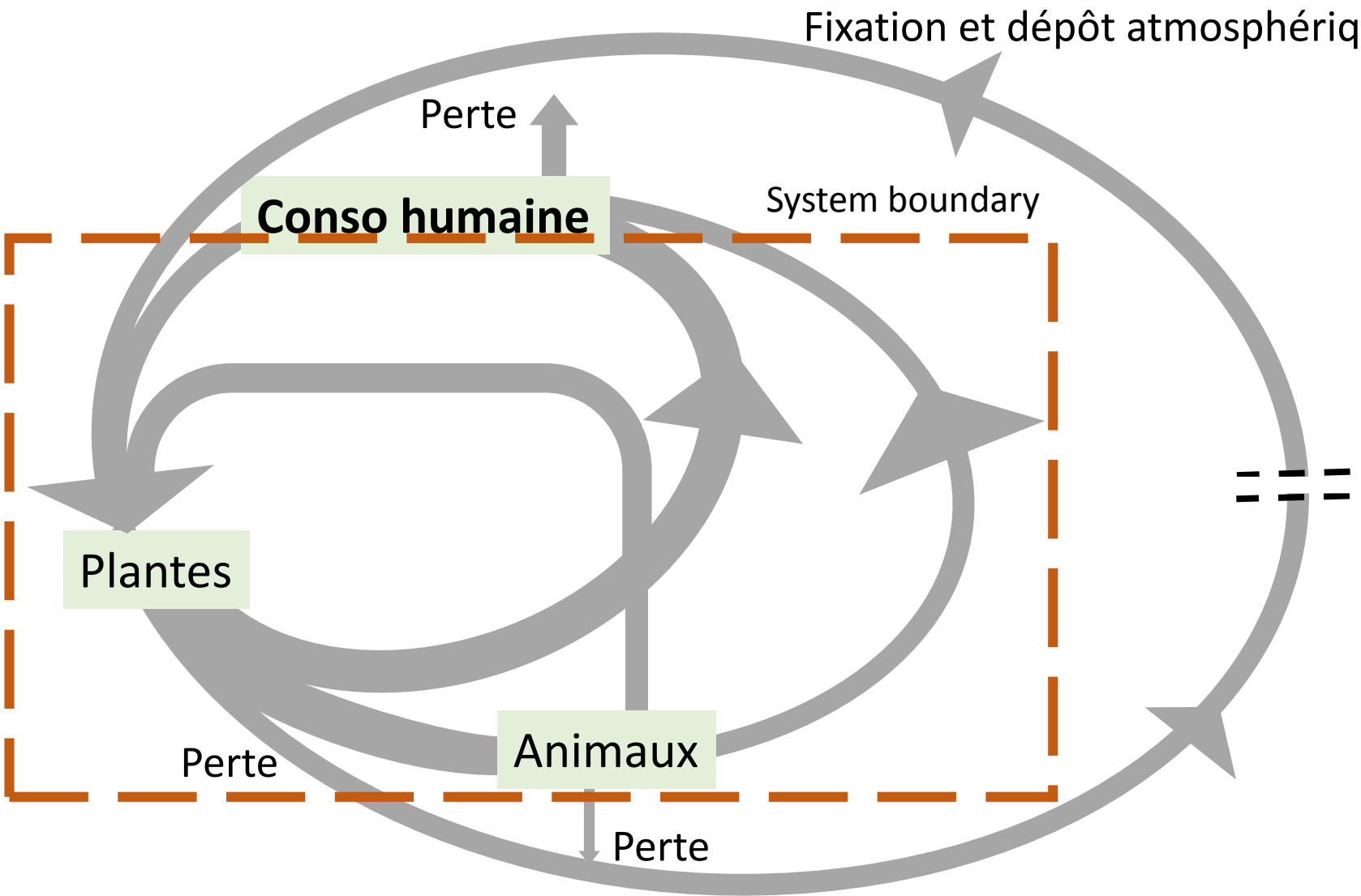
- Fonctionnement biogéochimique de l'agriculture
  - $\Rightarrow$ type de production (bio, conventionnelle)
  - $\Rightarrow$ capacité à produire
  - $\Rightarrow$ surface nécessaire par unité de production
  - $\Rightarrow$ impacts environnementaux (dont GES)
  - $\Rightarrow$ production = fraction des nutriments investis

- Couplage biogéochimie/énergie
  - $\Rightarrow$ capacité à nourrir selon régime énergétique (type et quantité d'énergie investie)
  - $\Rightarrow$ production $\neq$ fraction de l'énergie investie
  - $\Rightarrow$ défi de modélisation

Agriculture préindustrielle

Flux de nutriments de faible intensité ~ écosystème naturel.

Systèmes localement intégrés.



Agriculture industrielle.

Intensification du flux de nutriments, production et pertes

- Pertes ~ f(fertilisation et pratiques)
- Engrais compensent pertes
- Découplage cultures/animaux/ville.
- Pertes = Conso*(1-NUE)/NUE

Pertes

Fertilizers

Engrais organique ?

excrétion

Excrétion

Consommation humaine

Cultures

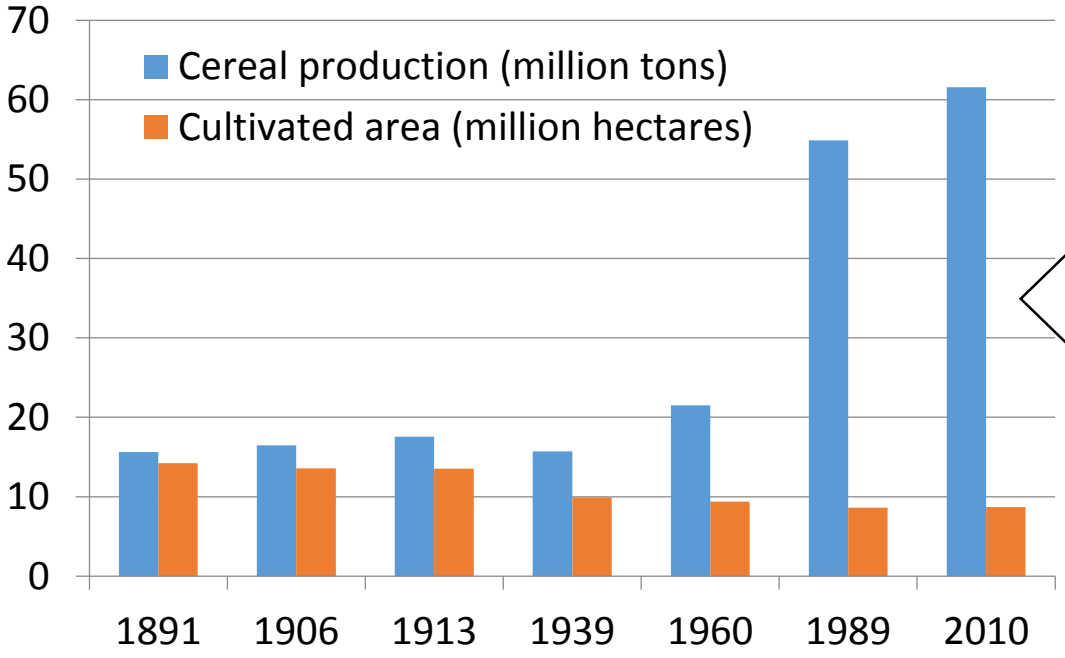
Animaux

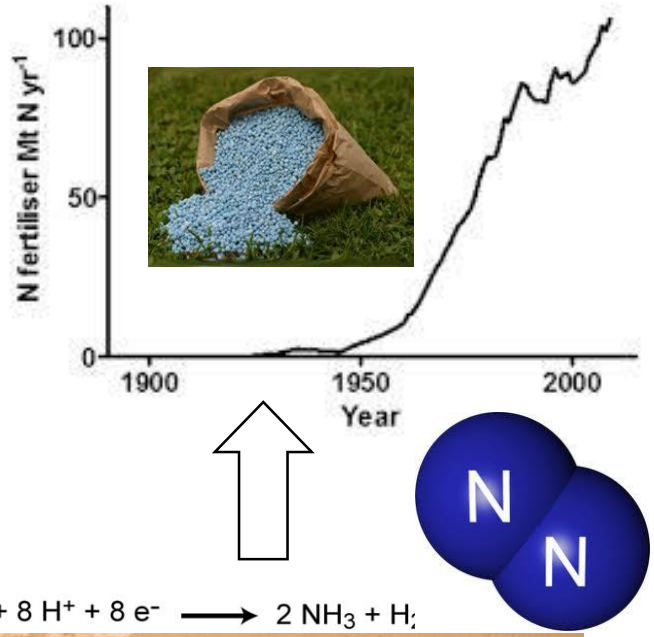
Perte

Engrais de synthèse : 60 % de la population actuelle

Dépendance de l'énergie fossile

Trade-offs biogéochimiques, fertilisation Haber-Bosch

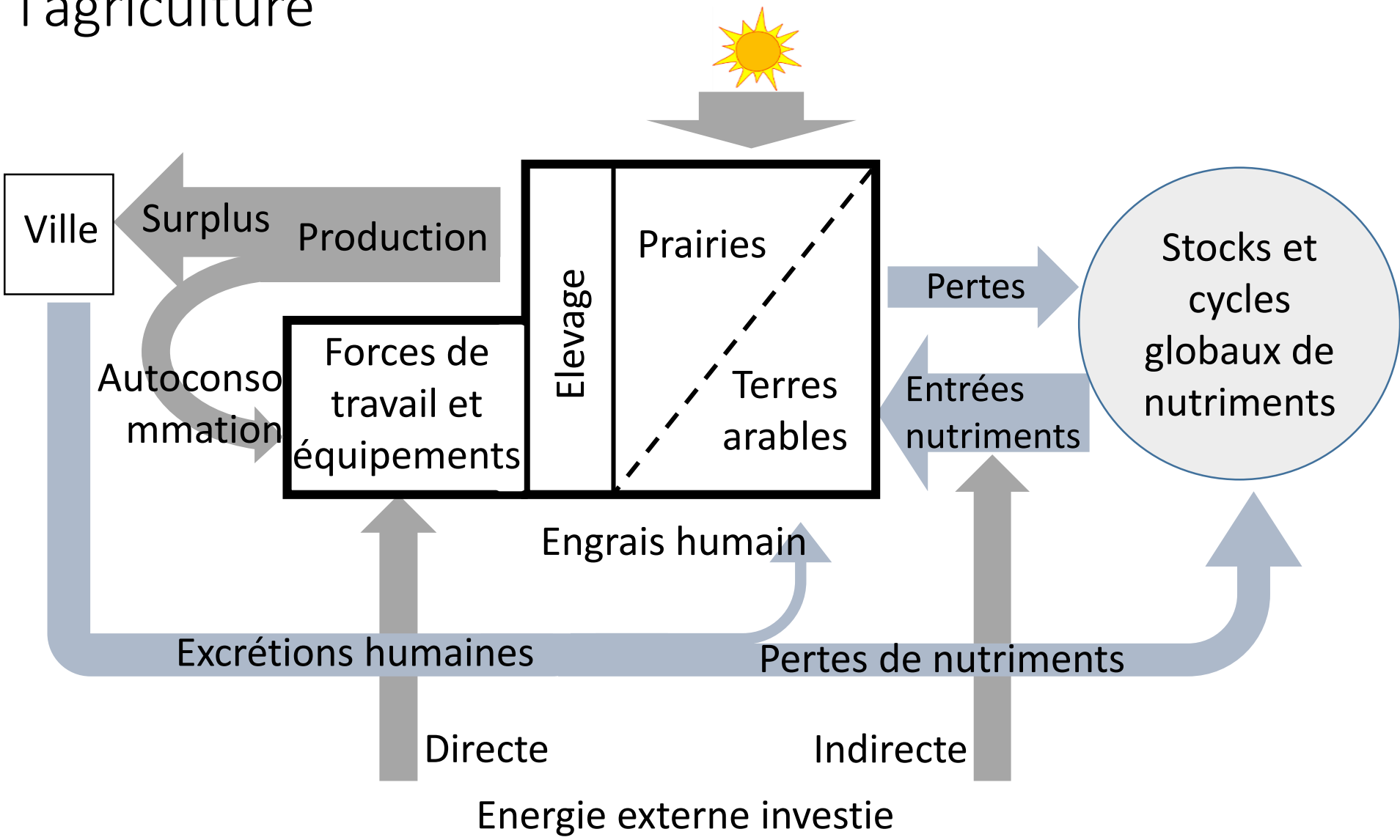




$N_2 + 8\ H^+ + 8\ e^- \longrightarrow 2\ NH_3 + H_2$

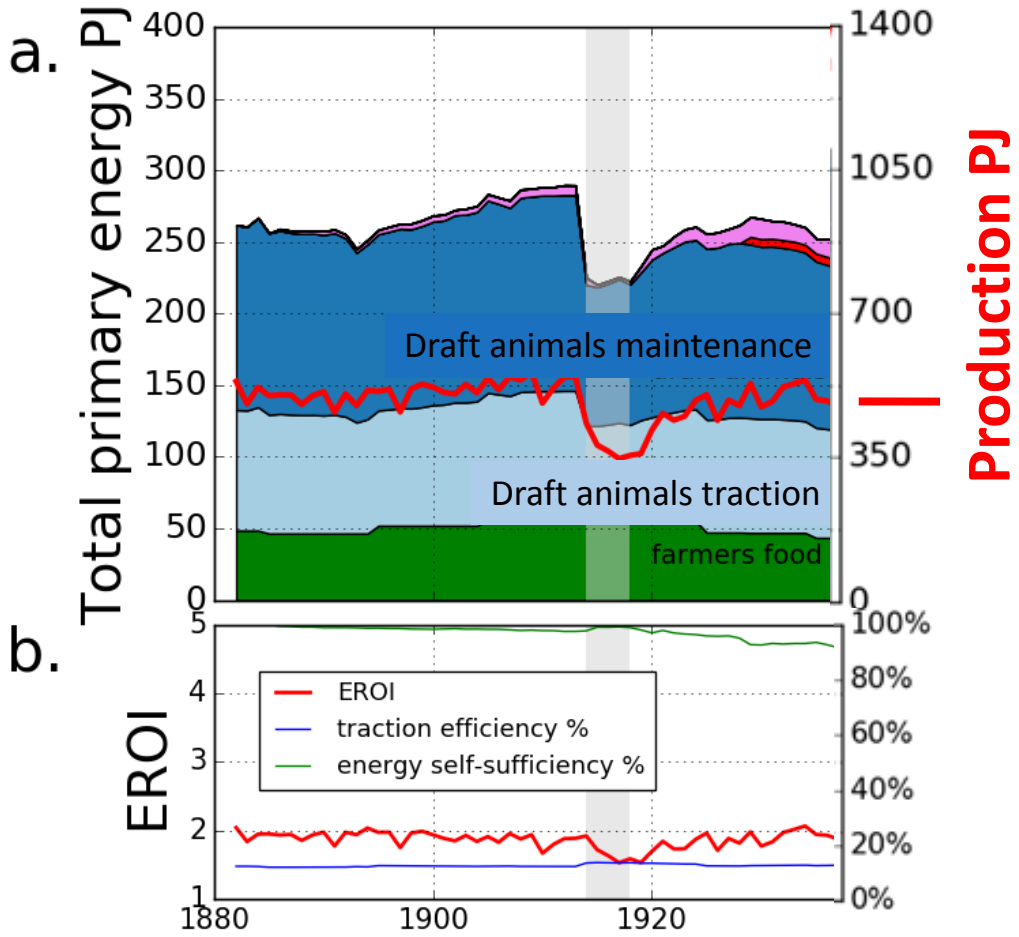
Procédé Haber Bosch 1913

Cadre de modélisation énergie/nutriments de l'agriculture



Chatzimpiros and Harchaoui, in preparation

Analyse de l'agriculture française dans la longue durée. Agriculture traditionnelle (préindustrielle), France

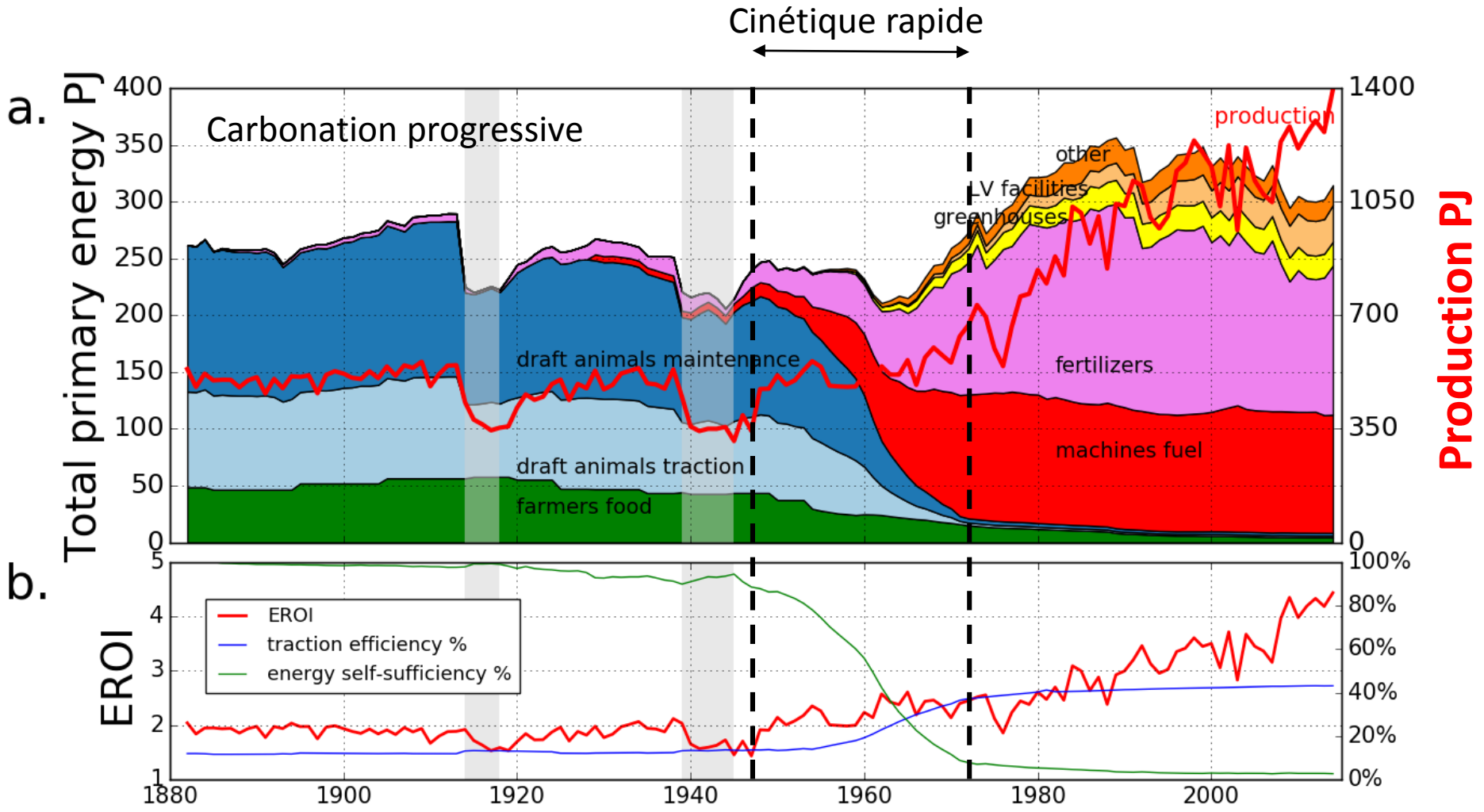


Trois indicateurs énergétiques:

- Rapport d'énergie produite (biomasse) à l'énergie investie (fossile, électricité et biomasse) : EROI.
- Autonomie énergétique (~part autoproduite de l'énergie investie).
- Efficacité(s).

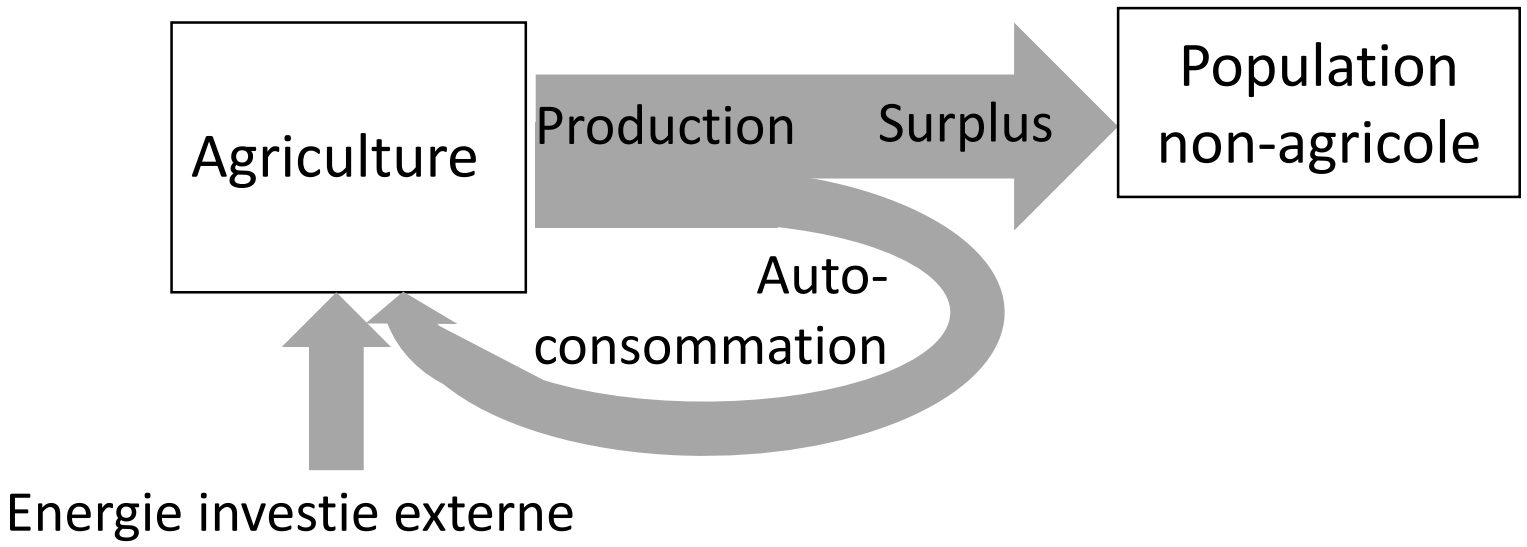
Harchaoui and Chatzimpiros, *Journal of Industrial Ecology*, 2018

Mécanisation et industrialisation = transition énergétique



Harchaoui and Chatzimpiros, *Journal of Industrial Ecology*, 2018

Production ≠ Surplus

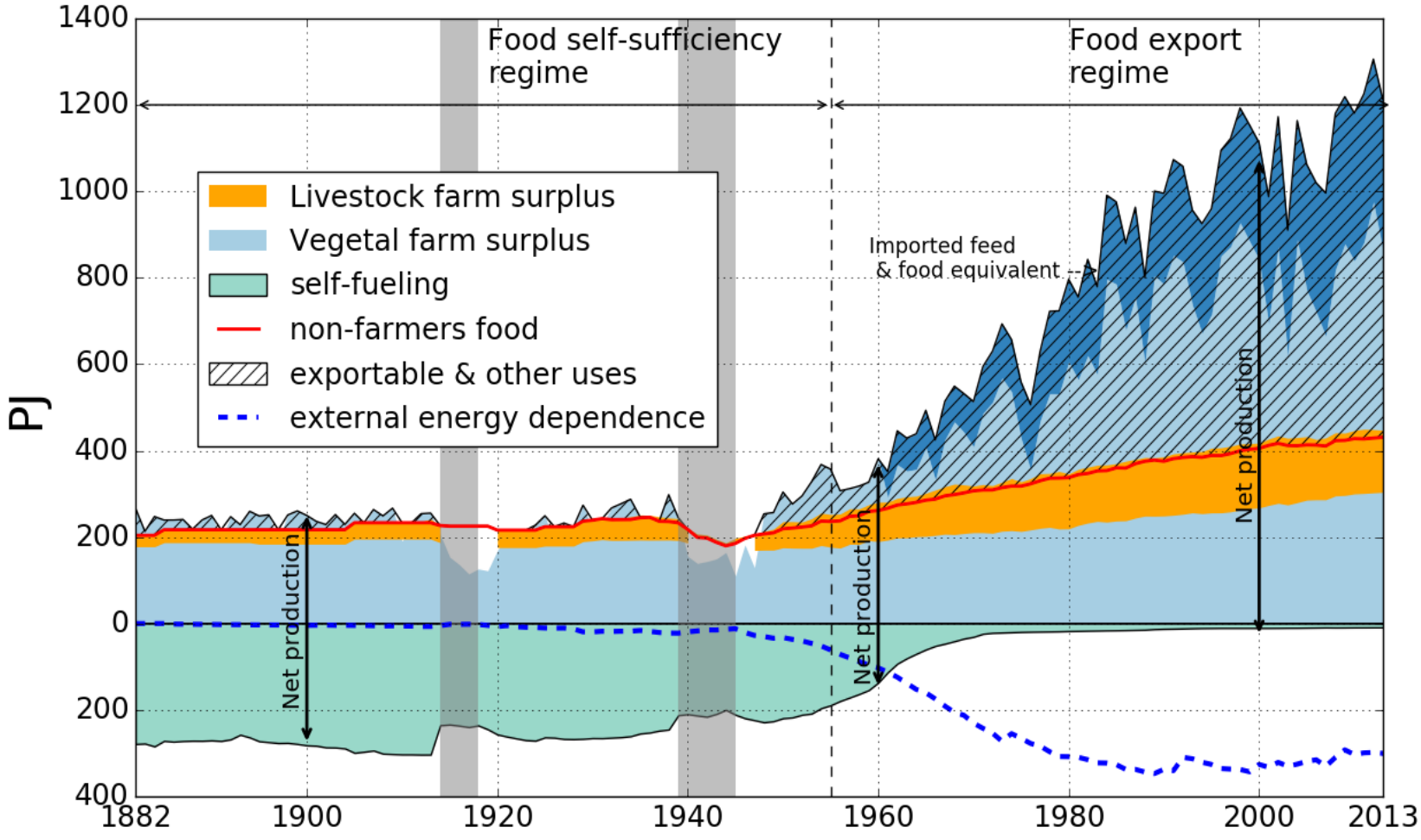


La capacité de génération de surplus est inversement liée à l'autonomie énergétique.

Harchaoui and Chatzimpiros, in preparation

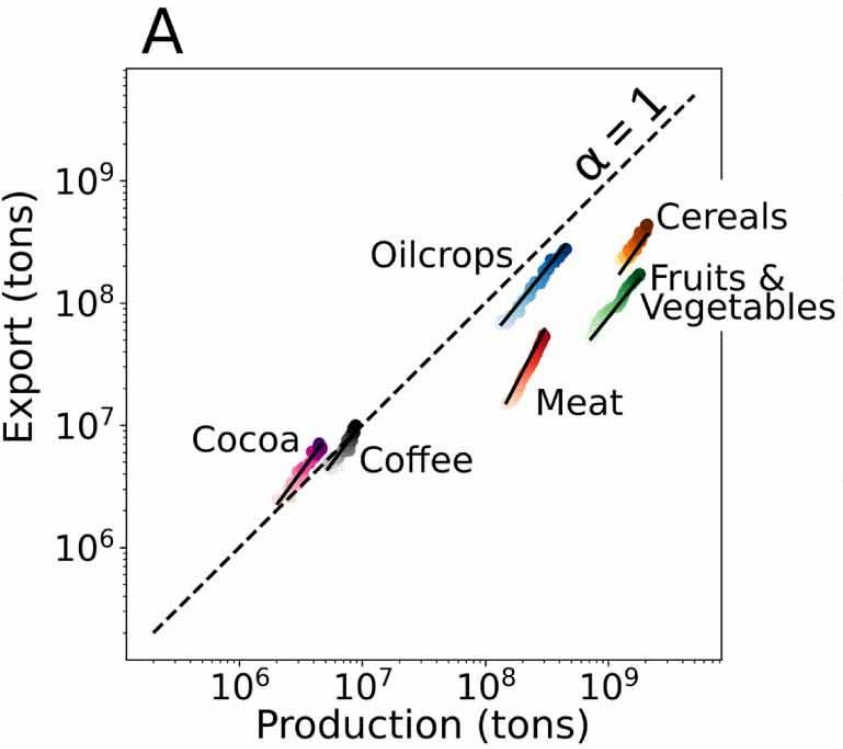
2. Augmentation par six du surplus français depuis 1950.

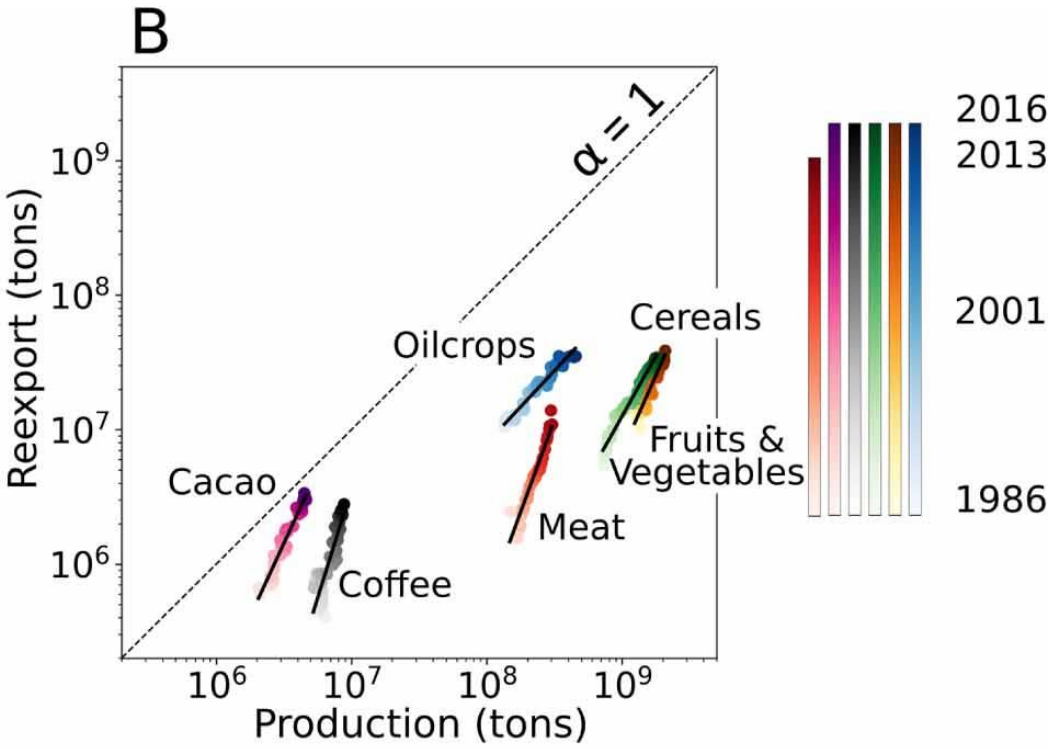
< 1950 : productivité constante et faible. Ressources investies prélevées sur la production nette (autonomie) : compétition entre autonomie et surplus.
> 1950 : productivité croissante jusqu'à plafonnement. Ressources investies externes (dépendance) : production = surplus.



Harchaoui and Chatzimpiros, J. Ind. Ecology 2018

Surplus, commerce et sécurité alimentaire mondiale





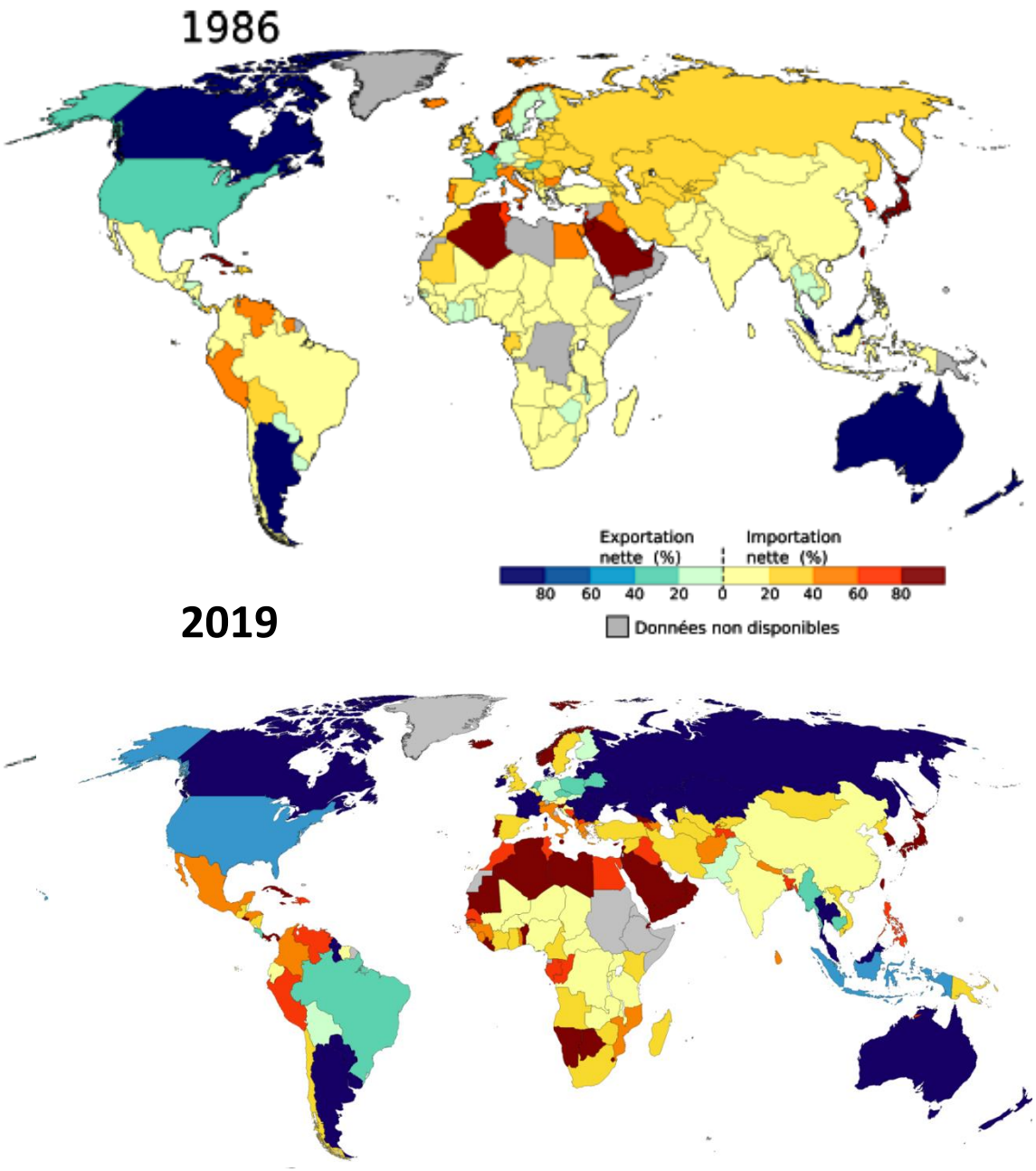
Products	α_1	α_2
Cereals	1.43	2.27
Meat	1.93	2.74
Oilcrops	1.25	1.08
Fruits & vegetables	1.25	1.80
Cocoa	1.37	2.18
Coffee	1.35	3.24

- Croissance exponentielle des filières longues
- Financiarisation.
- Infrastructures et ressources associées.

Dupas et al., Environmental Research Letters, 2022

Distribution géographique des surplus et déficits

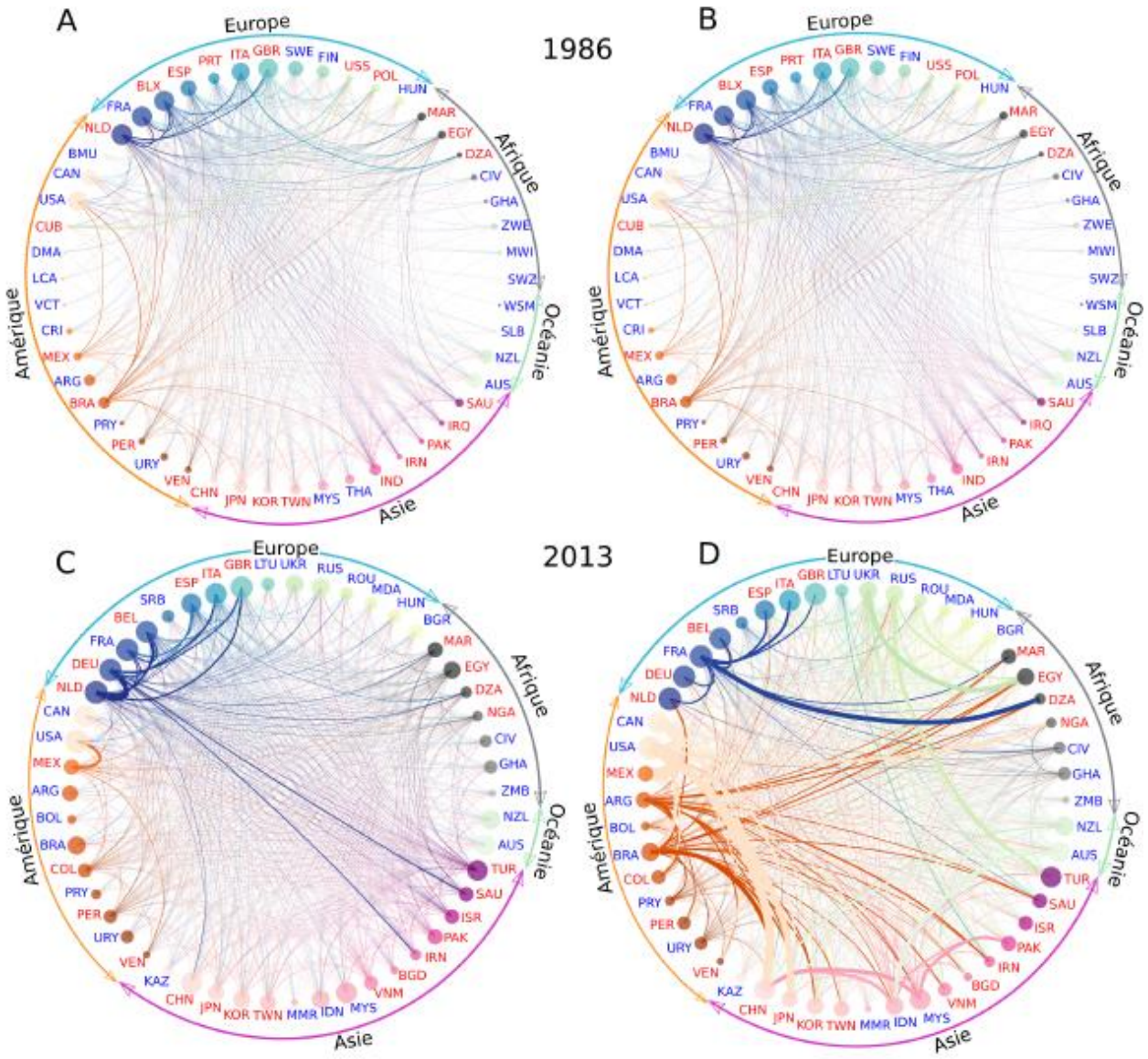
Thèse de doctorat, Marie-Cécile Dupas oct. 2020, Univ. Paris Cité



- Surplus très concentrés: pays industrialisés.
- Ces pays nourrissent les pays pauvres et les « navires démographiques ».

Dupas et al., in preparation

Réseau mondial des calories



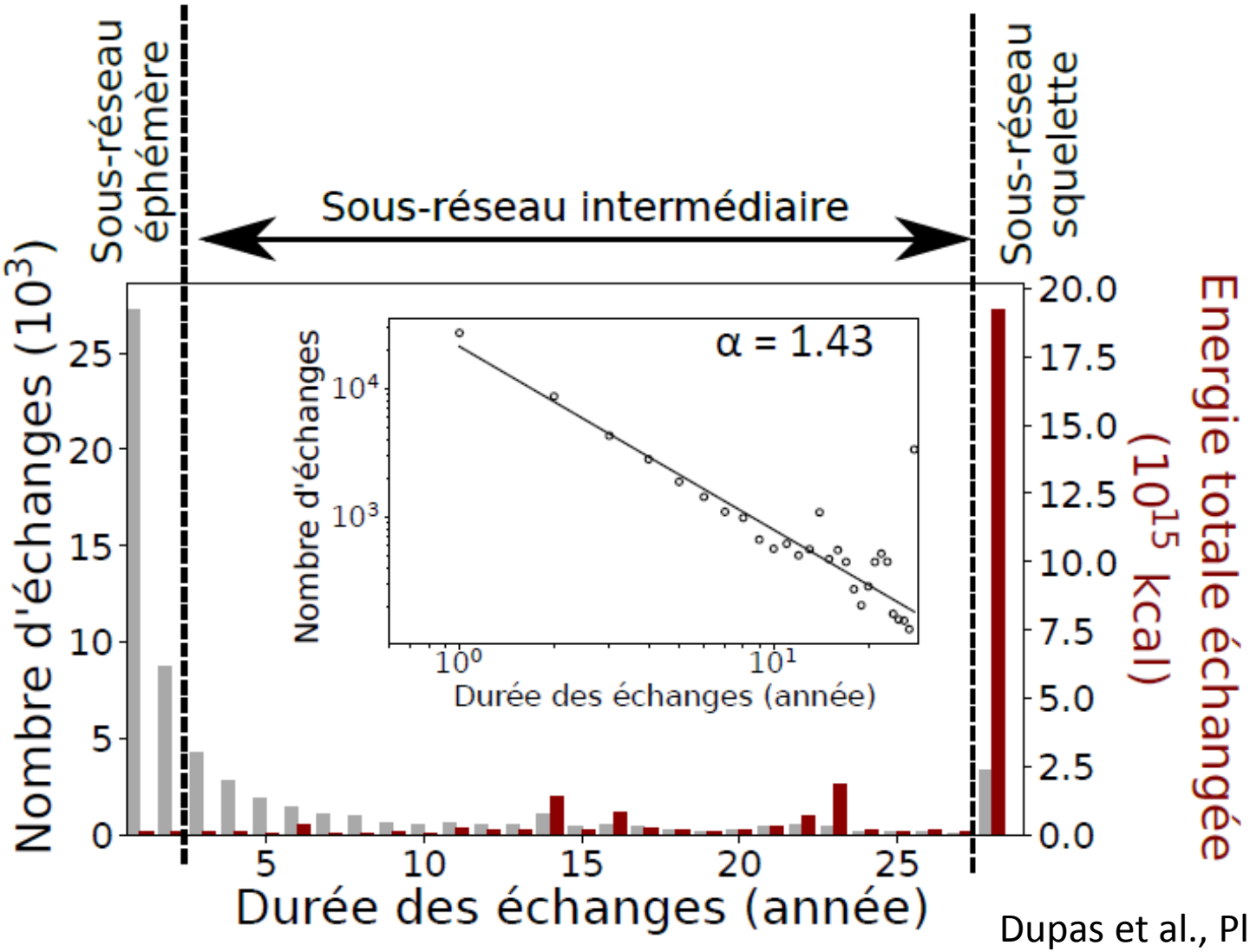
A et C : exportations des pays déficitaires (en rouge) en 1986 et 2013

B et D : exportations des pays excédentaires (en bleu) en 1986 et 2013.

Déficits structurels liés à la spécialisation dans des produits de rente.

Marie Cécile Dupas, thèse, oct. 2020, Univ. Paris Cité

Invariants de structure / répartition de la puissance commerciale



Dupas et al., PlosOne 2019

Marie Cécile Dupas, thèse, 2020

3. Ouverture et questions ouvertes

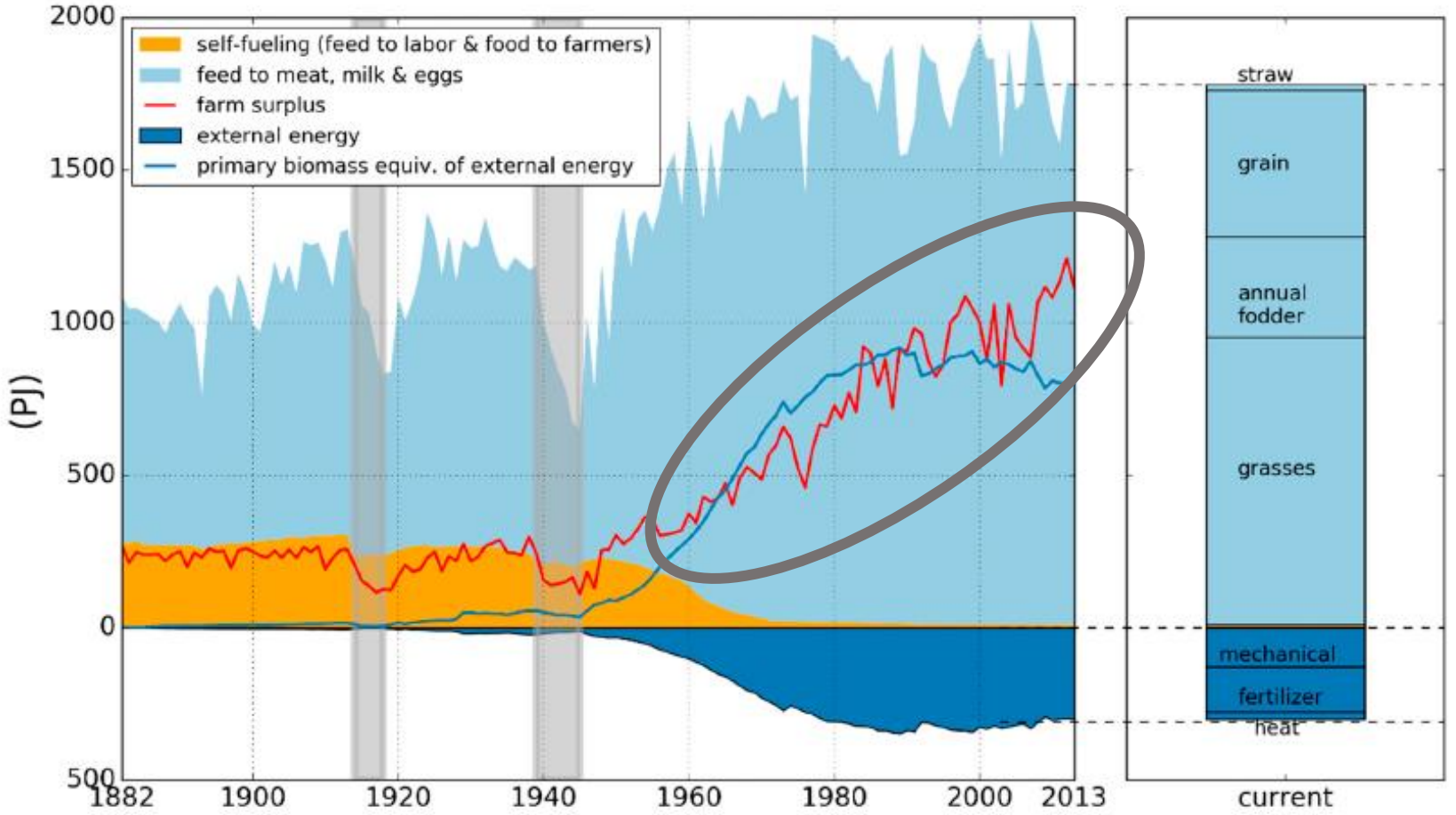
La notion de surplus largement ignorée dans la littérature / confondue avec production.

$\Rightarrow$ Surplus extrêmement central en contexte de transition : population non-agricole possible à nourrir/complexité sociale/mondialisation

$\Rightarrow$ Admissible que le surplus alimentaire et sa circulation soient le produit des énergies fossiles: choix de société permettant de maximiser la population non-agricole et la mondialisation. En revanche :

- Surplus en cas de suppression des fossiles ?
- Surplus énergétique (biocombustibles) pour la transition ?

Exprimé en équivalent biomasse, l'énergie investie dans l'agriculture française ne laisse aucun surplus.



Harchaoui and Chatzimpiros, Sustainability, 2018

=> Elevage, résidus, efficacités de conversion de nutriments/énergie, labour, spécialisations…

Ouverture et questions ouvertes.

- Viabilité énergétique (en plus de biogéochimique) des systèmes mixtes polyculture/élevage.
- Intégration disciplinaire : Biogéochimie, géographie, énergétique des écosystèmes, théorie de réseaux.
- L'agriculture représente aujourd'hui ~5 % de la consommation d'énergie (monde, UE, France..) et les chaînes de commercialisation encore autant (?). Cette part d'énergie assure la sécurité alimentaire mondiale. GES~25%.
- Une décrue énergétique mettrait au défi la démographie mondiale et le rapport urbain/rural.
- « Décarbonation » (et au delà) de l'agriculture par une meilleure gestion de l'azote.
- Raisonner les chaînes d'approvisionnement (dé-libéraliser) ?
- Garder l'énergie fossile pour l'agriculture en faisant la transition des autres secteurs ?