

Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques

Soutenance de thèse de
Fabien ESCULIER

Directeurs de thèse :
Josette GARNIER (METIS) & Bruno TASSIN (LEESU)

Jury : Nicolas BUCLET
Étienne PAUL
Sylvain PELLERIN
Catherine BOUTIN
Tove LARSEN
Jacques LESAVRE
Jean-Pierre TABUCHI

Université Grenoble Alpes
INSA Toulouse
INRA Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux
IRSTEA Lyon-Villeurbanne
EAWAG
AESN
SIAAP

Président de jury
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinatrice
Invité
Invité


CAPi


École des Ponts
ParisTech

Programme de recherche
et action OCAPI

Vendredi 9 mars 2018



Genèse

1) Développement durable & assainissement



Ministère de l'Écologie
et du Développement Durable



Crédit SIAAP

Station d'épuration de Seine Aval



Genèse

- 1) Développement durable & assainissement
- 2) Soutenabilité du Grand Paris : l'effet ciseau

LE GRAND PARIS SUR SEINE



Paris, été 1942

Credit VNF



Genèse

- 1) Développement durable & assainissement
- 2) Soutenabilité du Grand Paris : l'effet ciseau

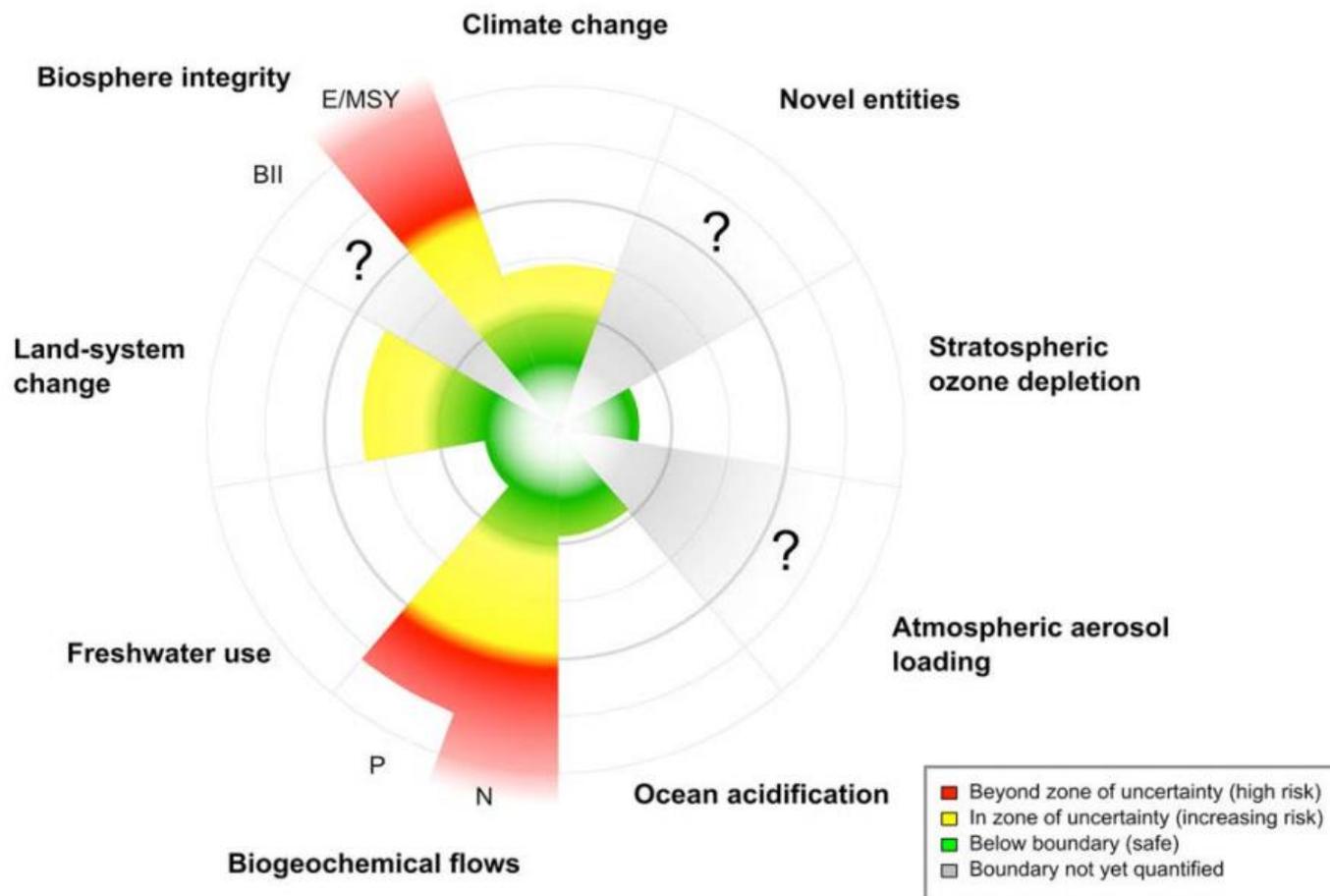
Programme de recherche et action OCAPI

Optimisation des cycles Carbone,
Azote et Phosphore en ville





Les limites du système Terre à l'Anthropocène



Steffen, Rockström, *et al.*, 2015



Origine des flux anthropiques d'azote (N) et de phosphore (P)

Alimentation

Excrétion

Bilan annuel

OMS,
2007

3,4 kg N



3,4 kg N

Brownlie,
2015

350 g P

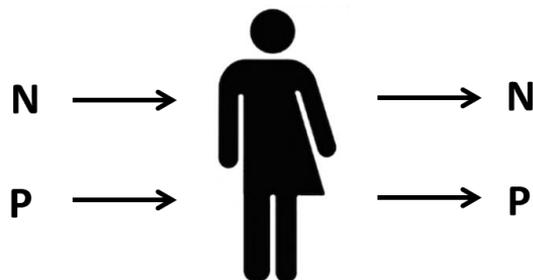


350 g P

Besoin physiologique
confortable

Besoin physiologique
confortable

Système alimentation/excrétion



Contexte

- Plus de sept milliards d'humains
- Plus de la moitié de l'humanité en ville
- Modèle de développement industriel occidental

Cadre : villes du monde occidental

Cas d'étude : agglomération parisienne

Condition nécessaire de soutenabilité :
inscription dans les limites du système Terre



Problématique

Dans quelle mesure les systèmes
alimentation/excrétion des villes occidentales ne
seraient-ils pas soutenables ?

&

comment seraient-ils susceptibles d'opérer une
transition afin de garantir leur soutenabilité ?



Plan

- I. Caractérisation des systèmes alimentation/excrétion (A/E) urbains et de leur soutenabilité
- II. Systèmes A/E occidentaux aujourd'hui
Agglomération parisienne en 2013
- III. Régimes et trajectoires des systèmes A/E passés
Trajectoire de l'agglomération parisienne 1850-2010
- IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs
- V. Prospective de transition
Scénarios futurs pour l'agglomération parisienne



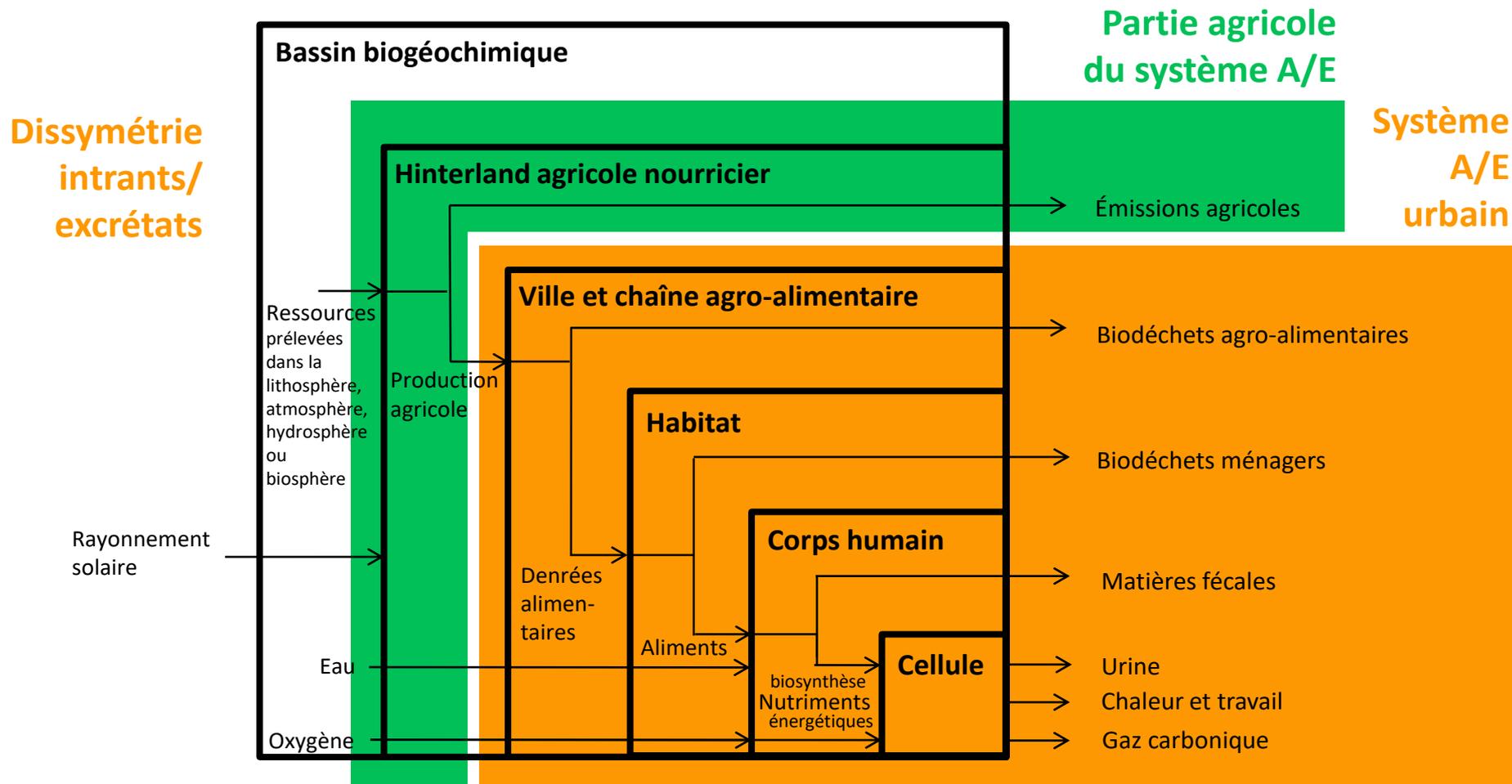
Méthodologie générale

- Bibliographie pluridisciplinaire
- Analyse de systèmes socio-écologiques (écologie territoriale)
- Analyse de flux de matières
Compilation de données statistiques, y compris historiques : SIAAP, INSEE, ANSES, Min. Écologie, Min. Agriculture, etc.
- Voyages d'étude
Scandinavie, Pays-Bas, Allemagne, France
- Recherche et action



I. Caractérisation des systèmes A/E

Niveaux conceptuellement imbriqués et cascade d'intrants et d'excrétats





Traceurs des systèmes alimentation/excrétion urbains

- Principaux flux :
 - Eau
 - Carbone réduit et oxygène
 - Azote réactif



Traceurs des systèmes alimentation/excrétion urbains

- Principaux flux :
 - Eau :
système A/E << système Eau
 - Carbone réduit et oxygène
 - Azote réactif



Traceurs des systèmes alimentation/excrétion urbains

- Principaux flux :

- Eau :

ystème A/E << système Eau

- Carbone réduit et oxygène :

ystème A/E << système Énergie à hydrocarbures fossiles

- Azote réactif :

spécifique du système A/E

Caractéristiques de l'azote :

- *critique à tous les niveaux (pollution ou ressource)*
- *forte mobilité et difficulté de gestion*



Traceurs des systèmes alimentation/excrétion urbains

- Élément principal : azote réactif
- Éléments secondaires :
 - Phosphore (P)
 - Potassium (K)
 - Autres macronutriments (S, Ca, Mg, Na, Cl)
 - Micronutriments (Fe, Mn, Co, Zn, etc.)

À inclure selon l'appréciation de leur criticité

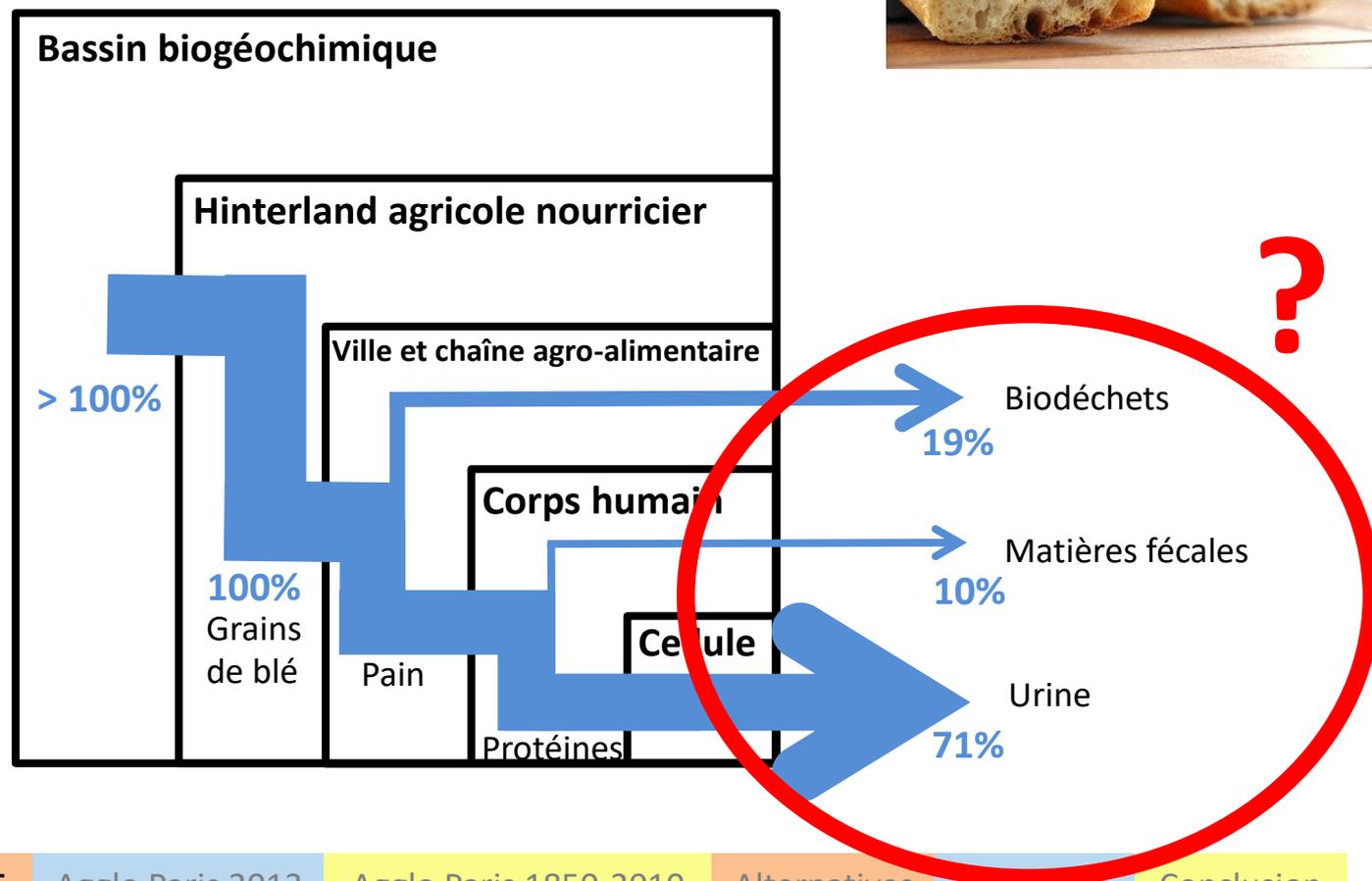


Flux du système A/E en comptabilité azotée

Cas d'étude : baguette de pain consommée dans l'agglomération parisienne



Credit: minuterfacile





Proposition méthodologique de caractérisation des systèmes A/E urbains

1) Circularité

Taux d'utilisation de l'azote des excréments urbains en production agricole

2) Pollution

Taux d'azote réactif des excréments rejeté dans l'environnement

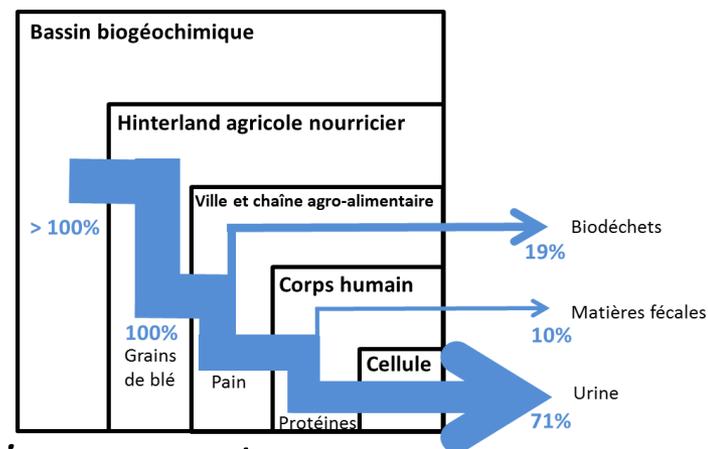
3) Sobriété

Écart au besoin physiologique (3,4 kgN/pers/an)

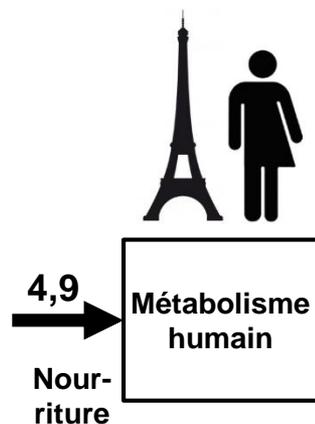
4) Degré de couplage avec les autres systèmes

5) Empreinte agricole

Ressources mobilisées et pollutions émises au niveau agricole



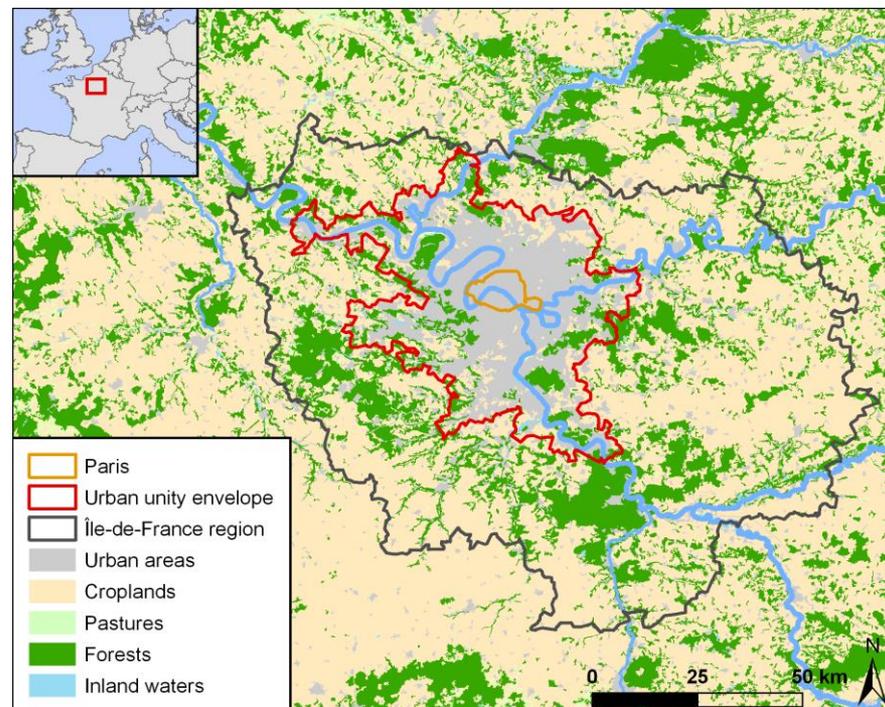
II. Système A/E occidentaux aujourd'hui



150% du besoin
physiologique

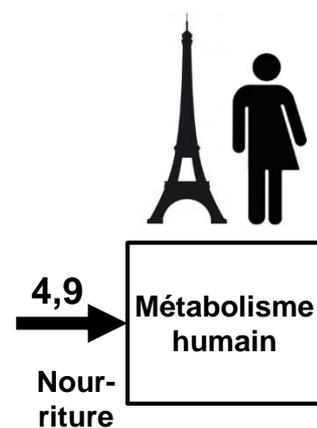
Régime non sobre

Données 2012-2013



Crédit S. Théry

kgN/pers/an

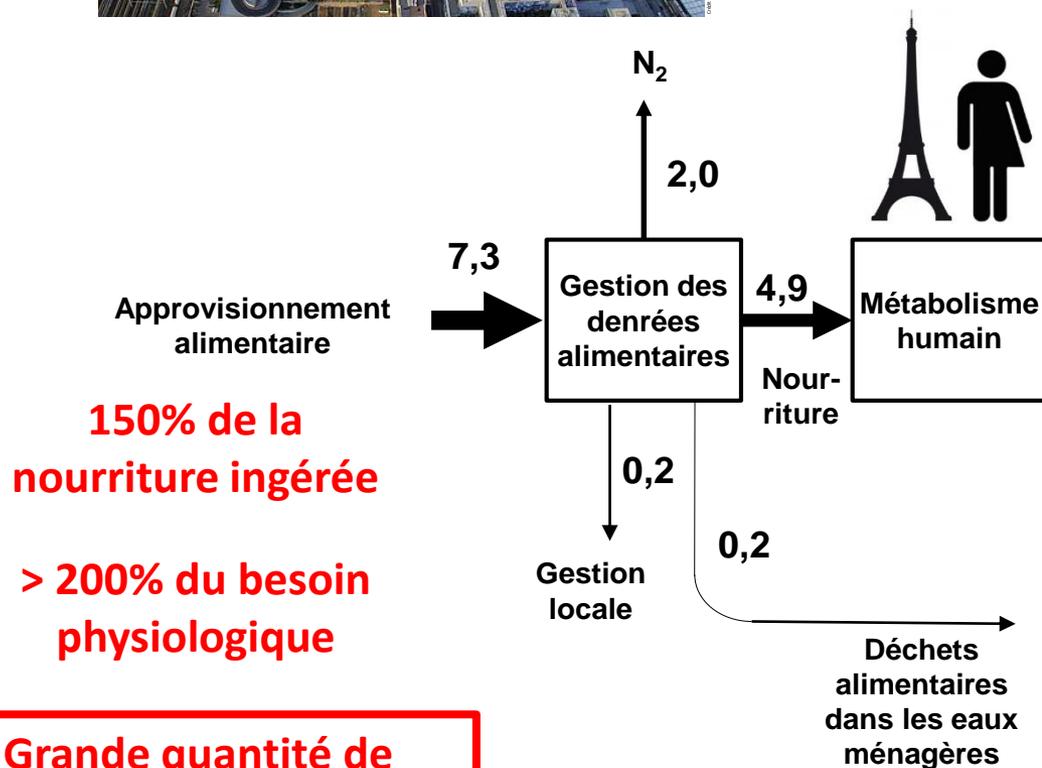




Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

Esculier, Le Noë, et al., 2018

kgN/pers/an



150% de la nourriture ingérée

> 200% du besoin physiologique

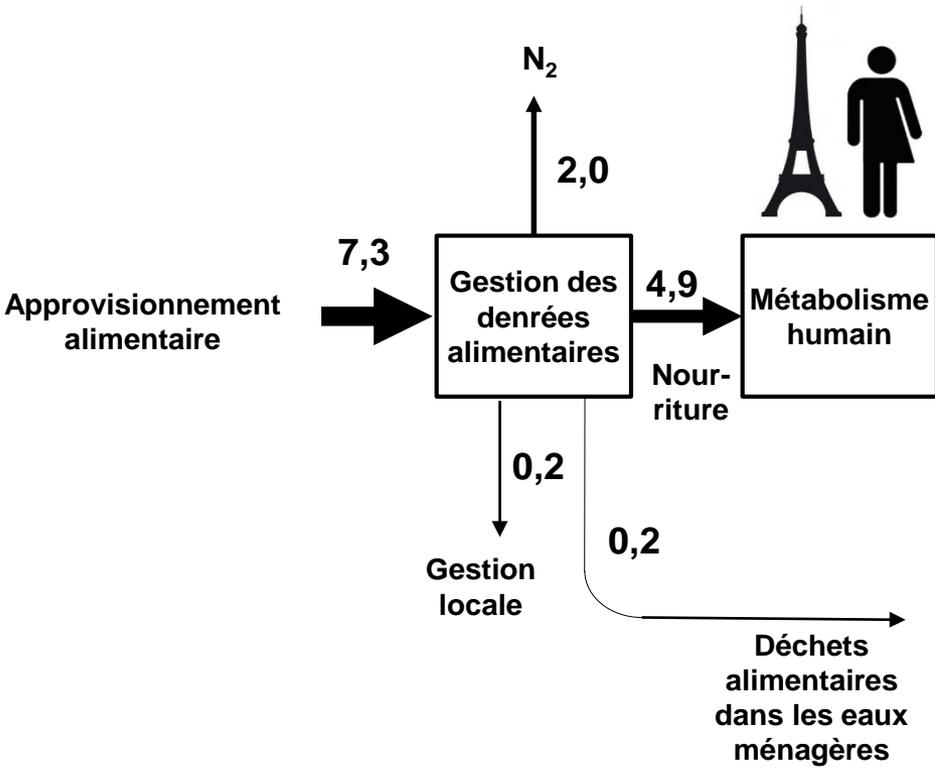
Grande quantité de nourriture non consommée, en outre non valorisée



Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

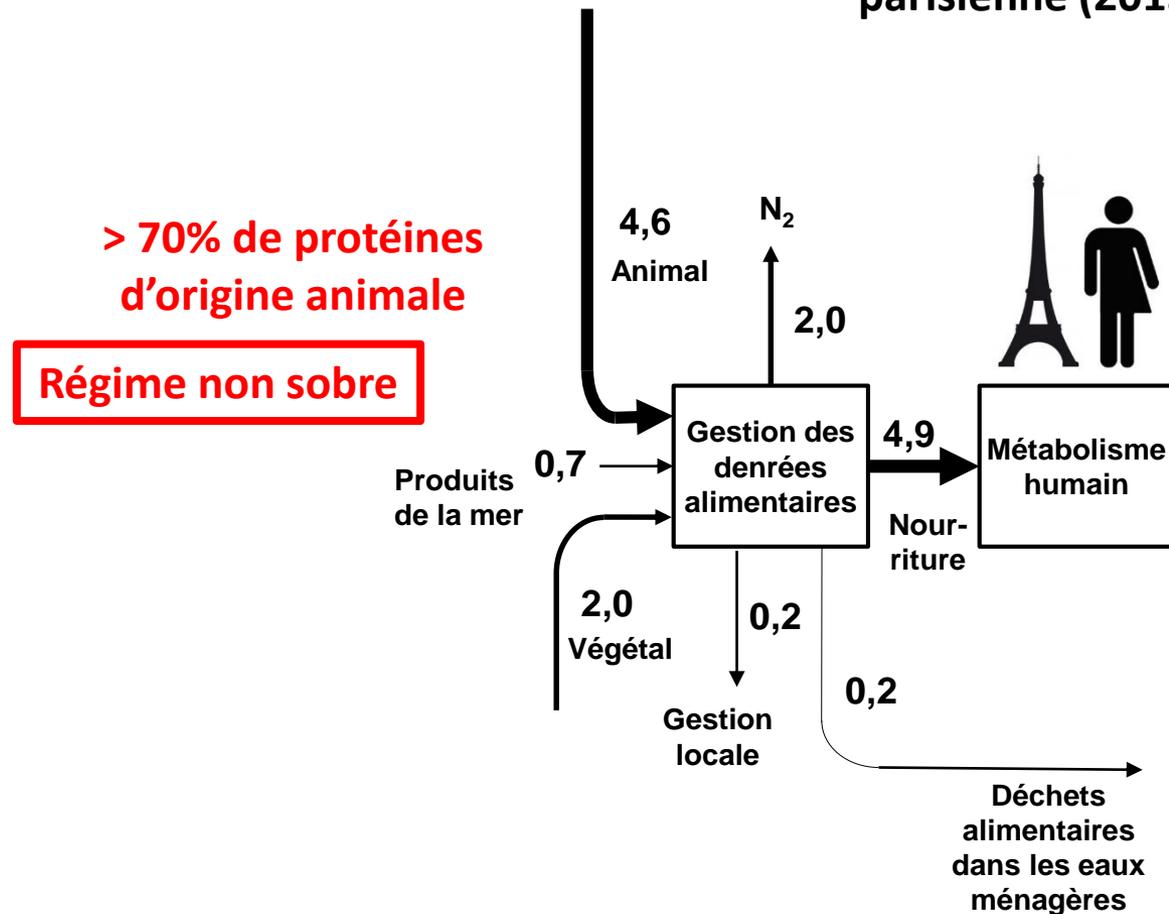
Esculier, Le Noë, et al., 2018

kgN/pers/an



Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

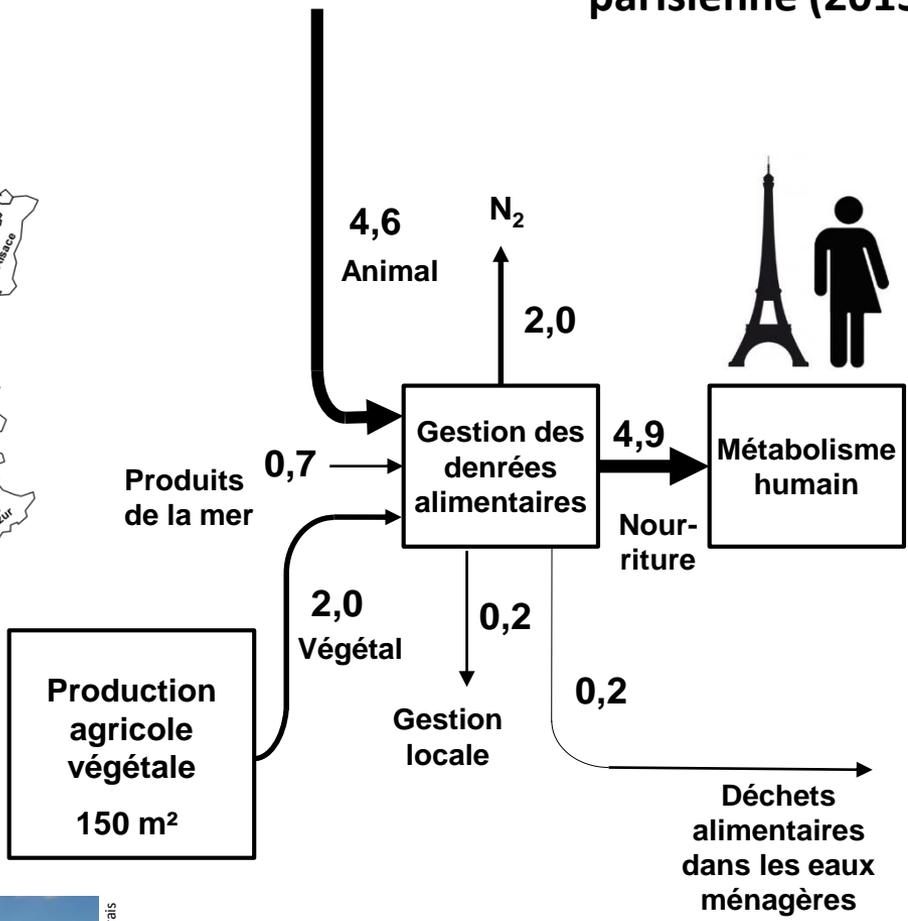
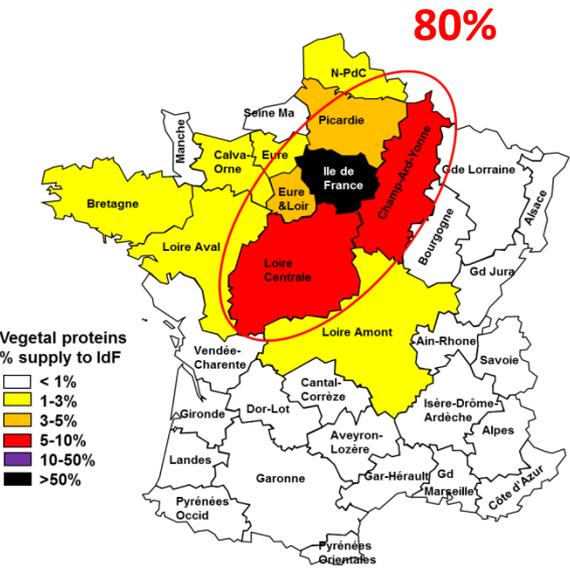
kgN/pers/an





Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

kgN/pers/an



Crédit Pays Beauce Gâtinais en Pithiverais

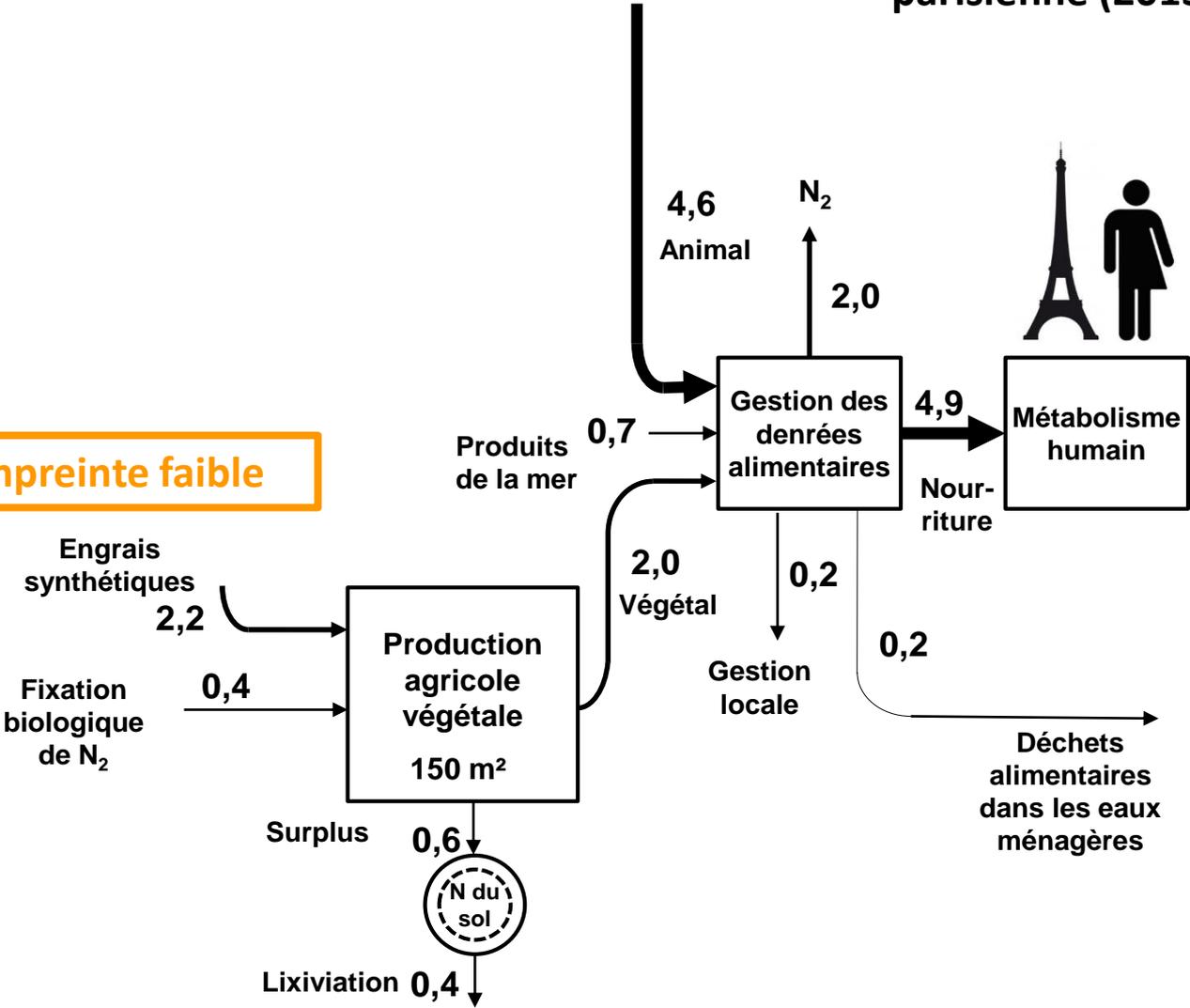


Systeme A/E de l'agglomération parisienne (2013)

Esculier, Le Noë, et al., 2018

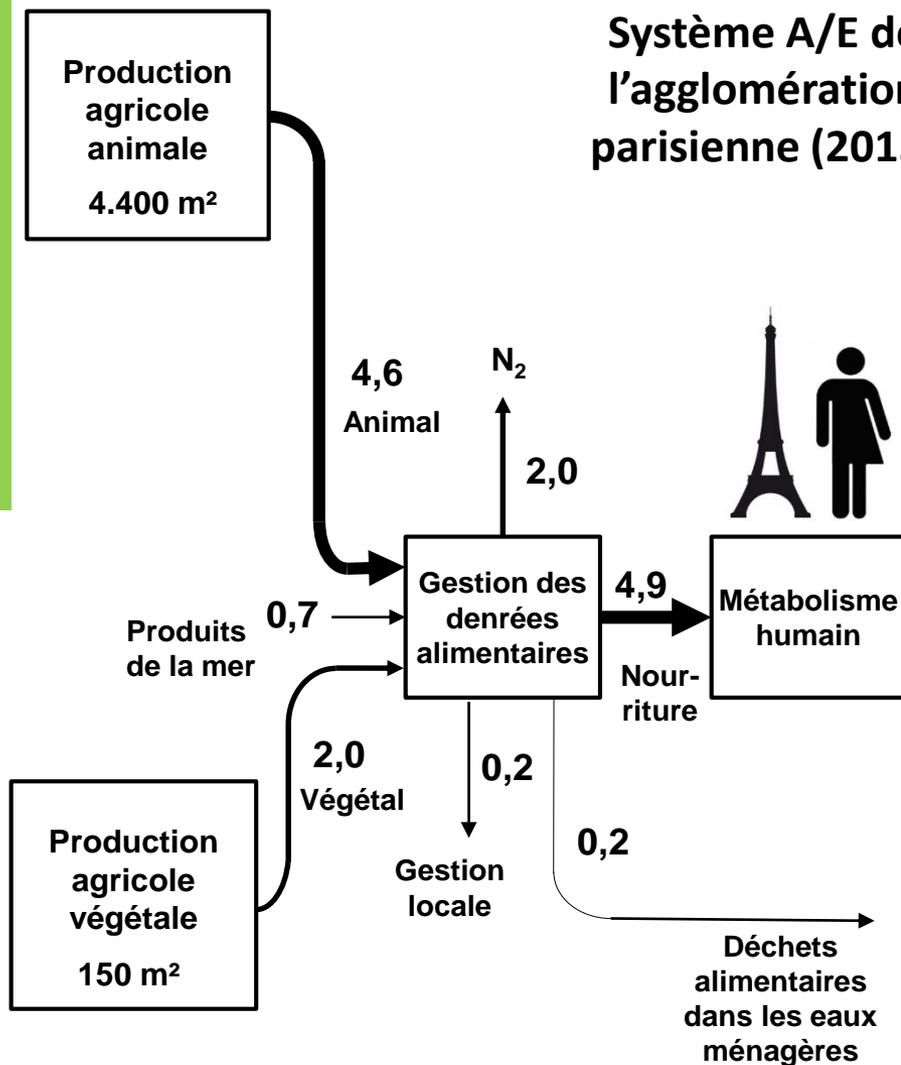
kgN/pers/an

Empreinte faible



Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

kgN/pers/an

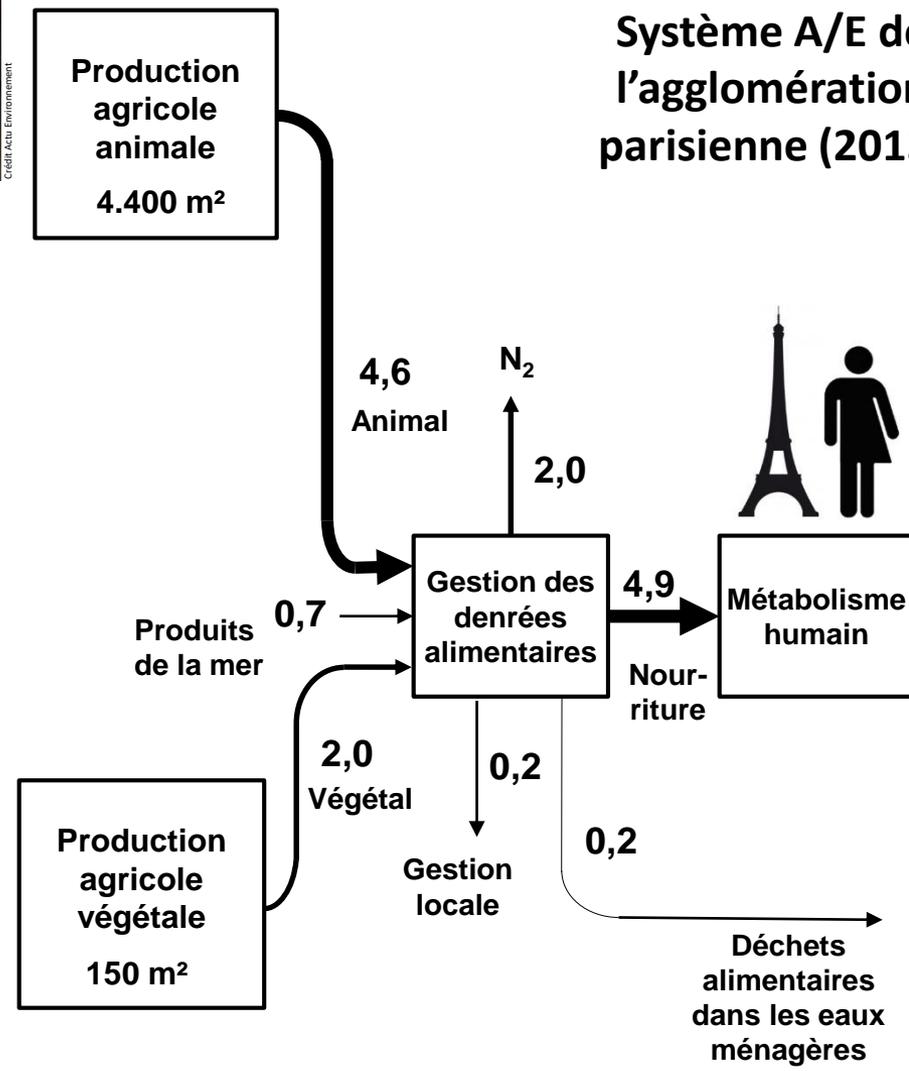


270 m²
de ville

32 m² de
logement



Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)



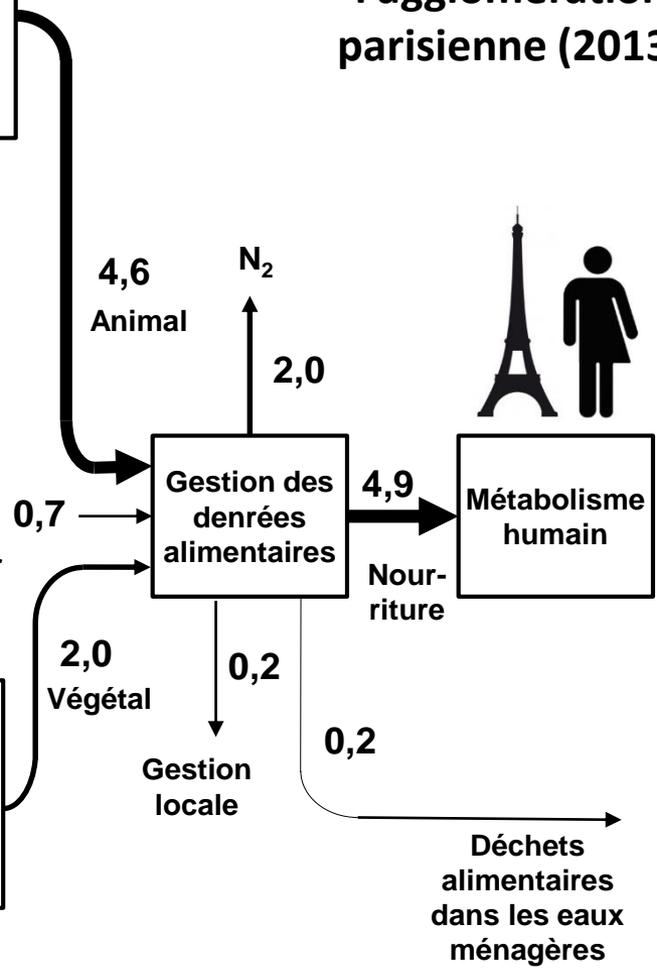
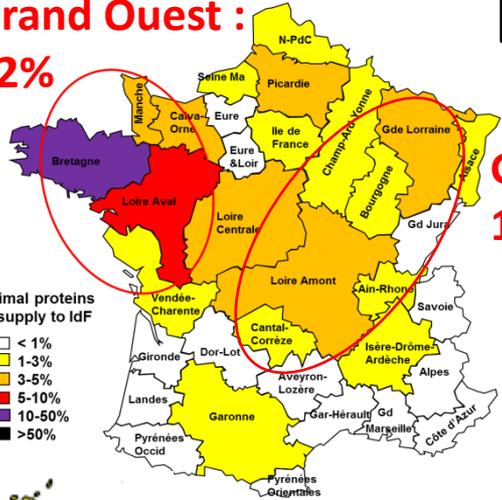
Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

Production agricole animale
4.400 m²

Production agricole végétale
150 m²

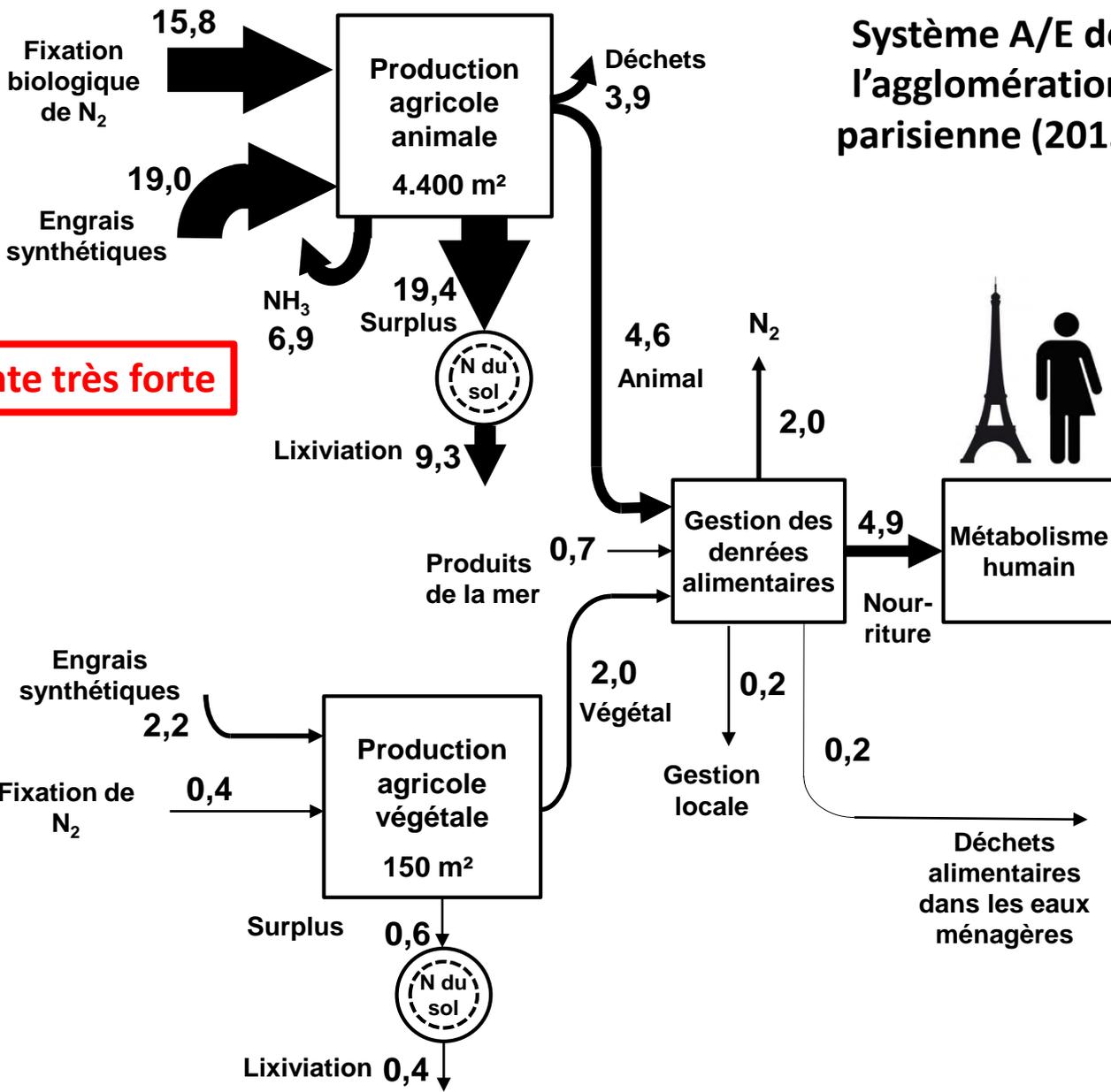
Grand Ouest :
32%

Grand Est :
13%

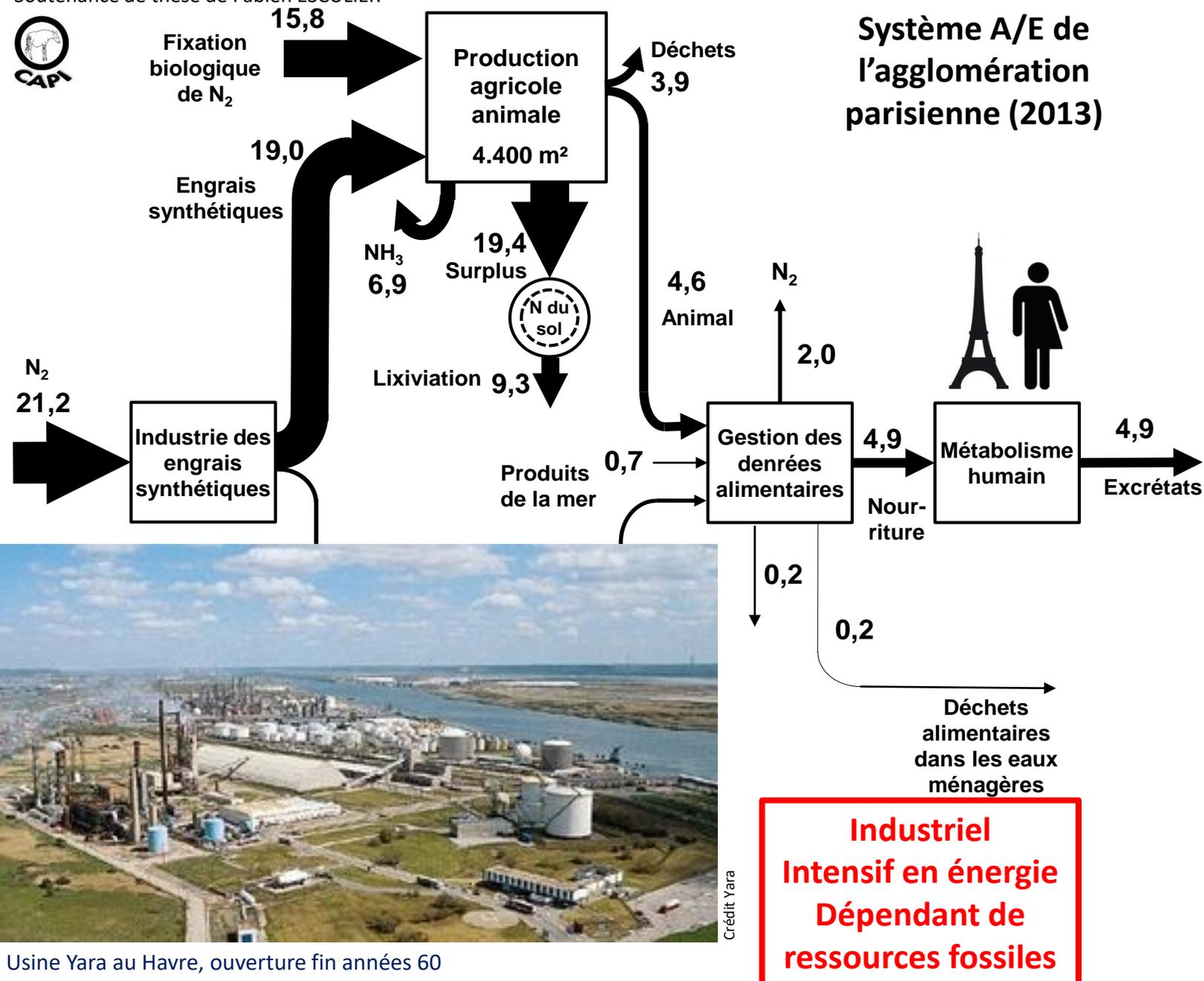


Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

kgN/pers/an



Soutenance de thèse de Fabien ESCULIER

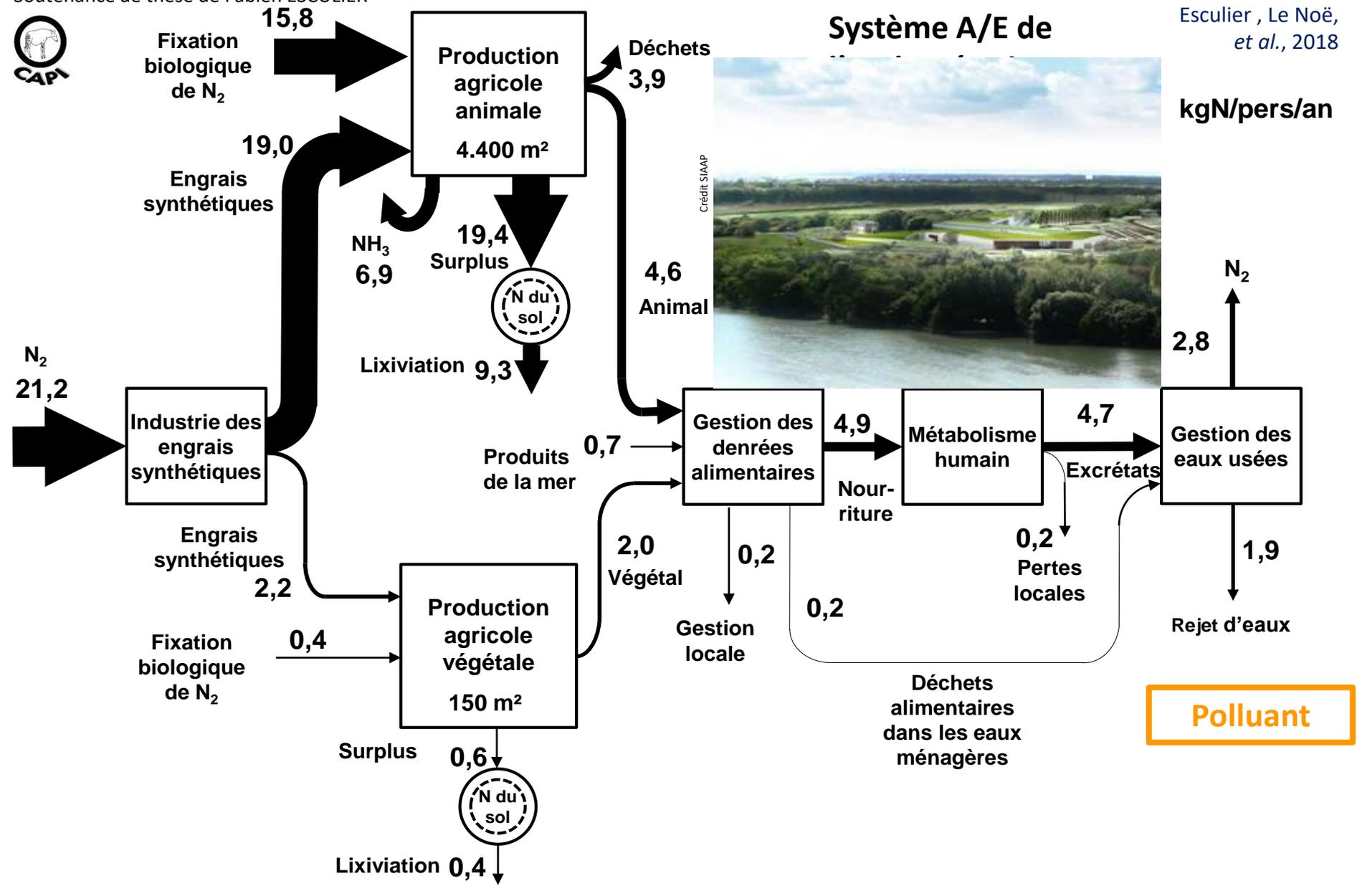


Usine Yara au Havre, ouverture fin années 60



Système A/E de

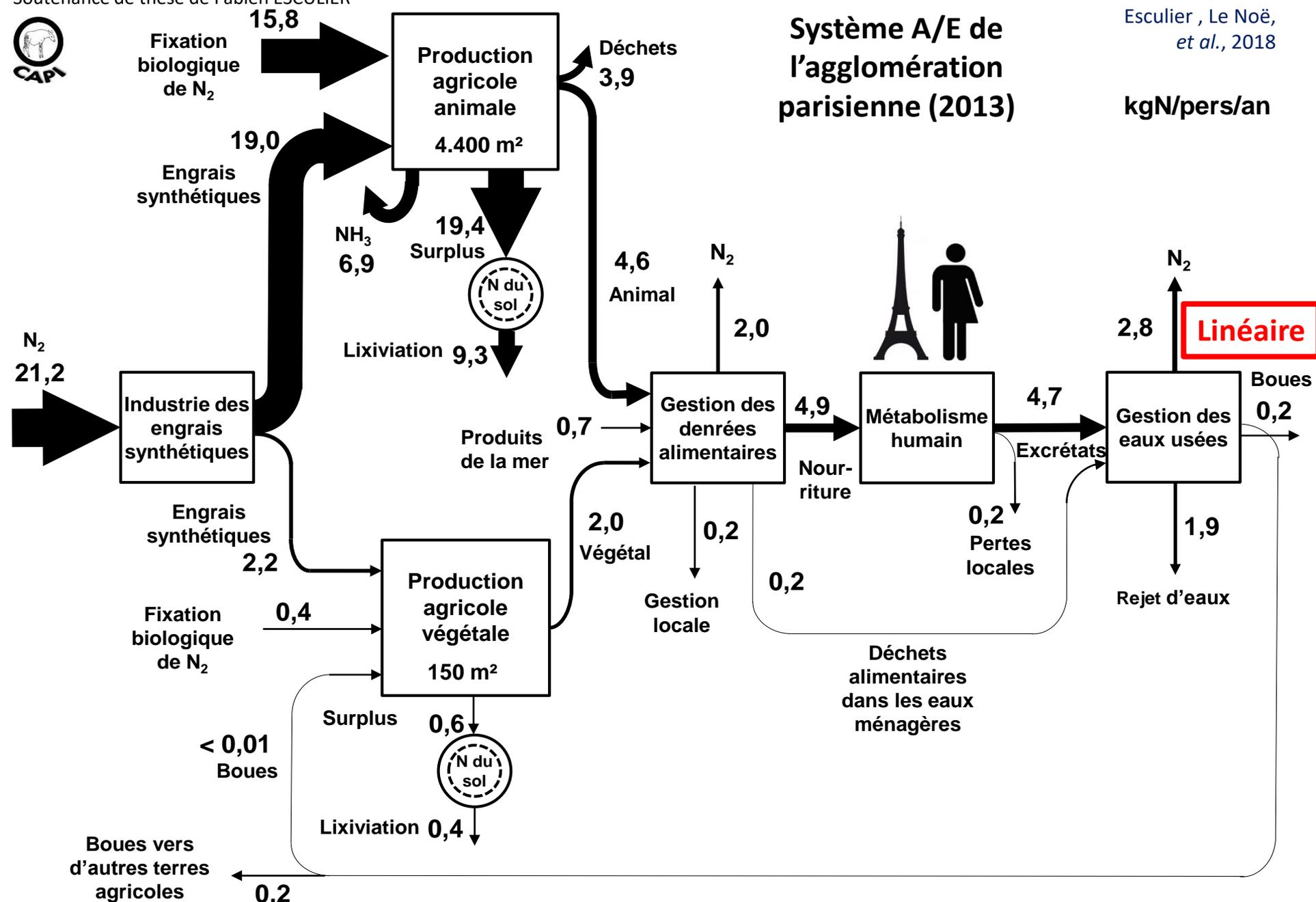
kgN/pers/an





Système A/E de l'agglomération parisienne (2013)

kgN/pers/an





Caractérisation du système A/E de l'agglomération parisienne

- 1) Circularité
- 2) Pollution
- 3) Sobriété
- 4) Degré de couplage avec les autres systèmes
- 5) Empreinte agricole



Caractérisation du système A/E de l'agglomération parisienne

- 1) Linéaire
- 2) Pollution
- 3) Sobriété
- 4) Degré de couplage avec les autres systèmes
- 5) Empreinte agricole



Caractérisation du système A/E de l'agglomération parisienne

- 1) Linéaire
- 2) Polluant
- 3) Sobriété
- 4) Degré de couplage avec les autres systèmes
- 5) Empreinte agricole



Caractérisation du système A/E de l'agglomération parisienne

- 1) Linéaire
- 2) Polluant
- 3) Non sobre
- 4) Degré de couplage avec les autres systèmes
- 5) Empreinte agricole



Caractérisation du système A/E de l'agglomération parisienne

- 1) Linéaire
- 2) Polluant
- 3) Non sobre
- 4) Très fortement couplé au **système eau**
- 5) Empreinte agricole



Caractérisation du système A/E de l'agglomération parisienne

1) Linéaire

2) Polluant

3) Non sobre

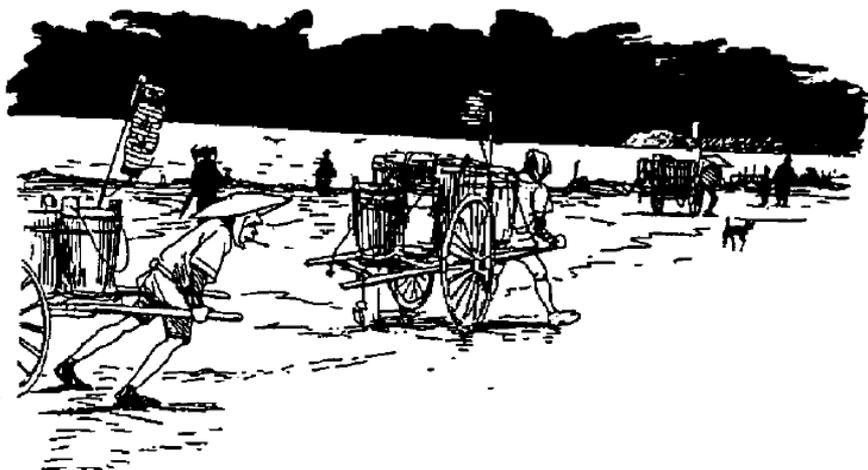
4) Très fortement couplé au **système eau**

5) Très forte empreinte agricole

**Caractéristiques
générales des villes
occidentales au
début du XXI^e siècle**

III. Régimes et trajectoires des systèmes A/E passés

- Extrême diversité spatio-temporelle
- Deux illustrations relatives à la circularité



Matsui, 1998

Asie, XVIII^e siècle



Adler, 2015

Europe, XIX^e siècle

« Les excréments humains [...] sont la force et la santé du peuple »

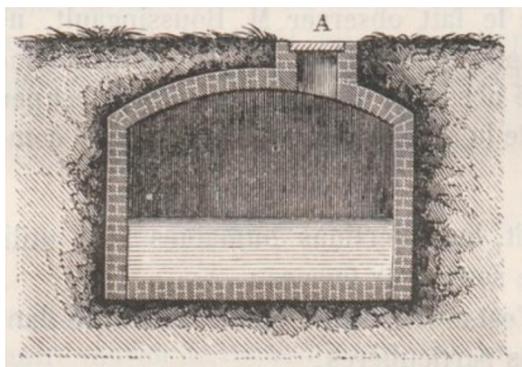
Chine, I^{er} millénaire avant J.-C. – cité par Cross (1985)

Hydronymie : Merderet, Merdillon, Merdron,... et Merdereau

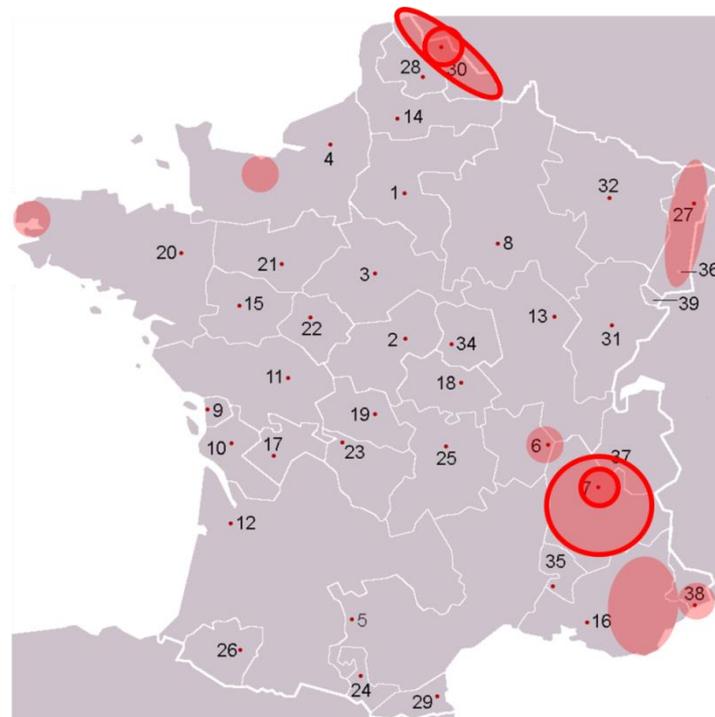
Mutualisme fécond » du XIX^e siècle en France

Barles, 2005

- Matières de vidange de fosses d'aisance
- Développement de nombreux procédés
- L'épandage à la flamande : particulièrement circulaire ?



Girardin, 1867



Zones identifiées d'épandage à la flamande
(recensement non exhaustif)

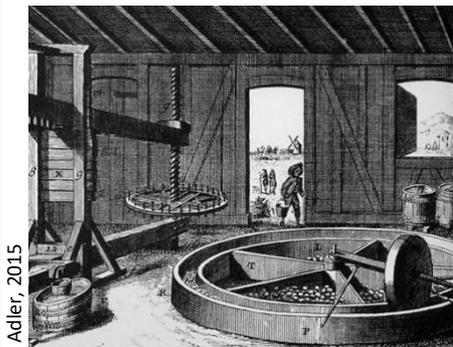
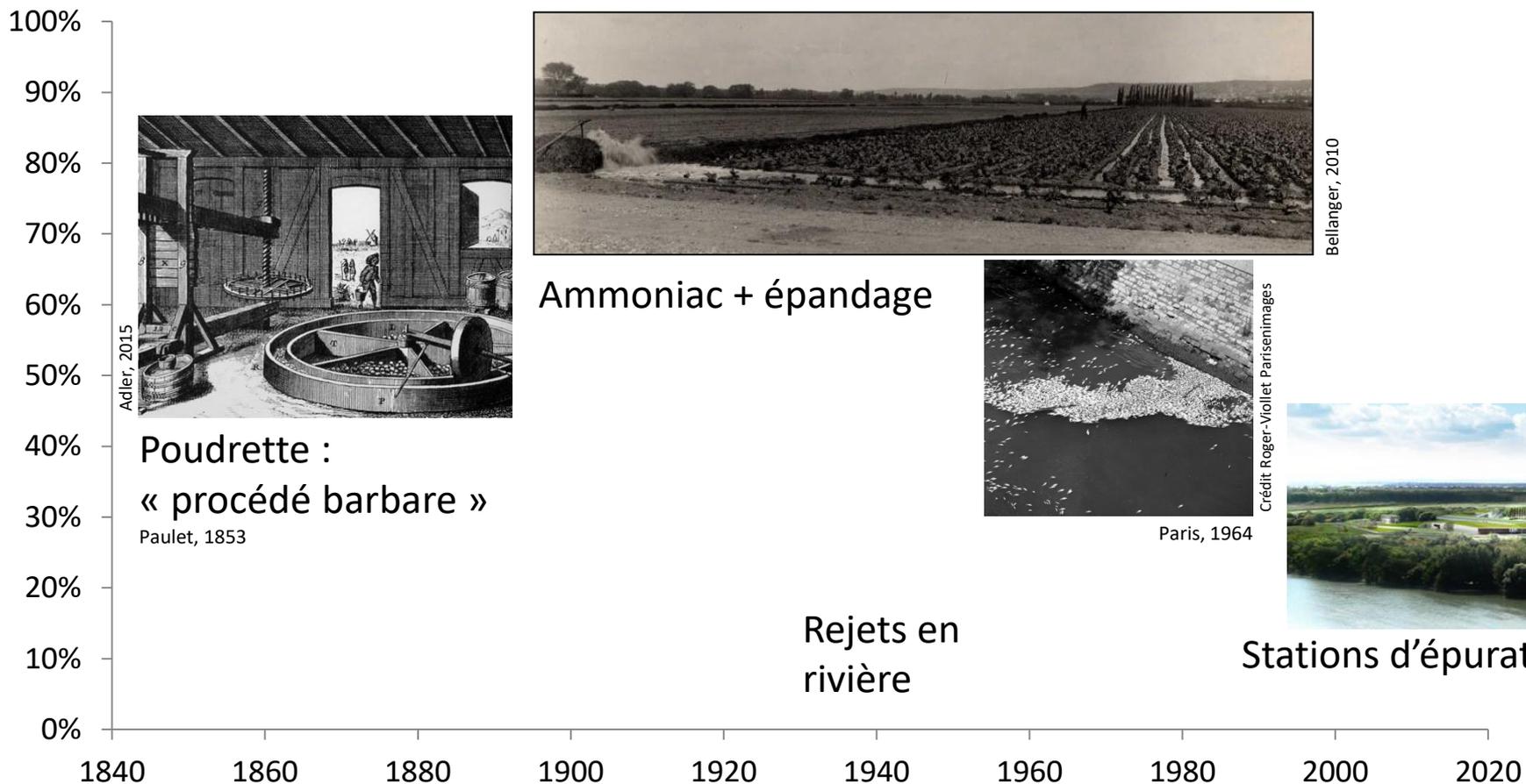
Entouré de rouge : vidange rémunératrice pour les citadins



Le cas de l'agglomération parisienne

1850-2010

Taux de recyclage agricole de l'azote des urines et matières fécales



Adler, 2015
Poudrette :
« procédé barbare »
Paulet, 1853



Bellanger, 2010
Ammoniac + épandage



Crédit Roger-Viollet Parisenimages
Rejets en rivière

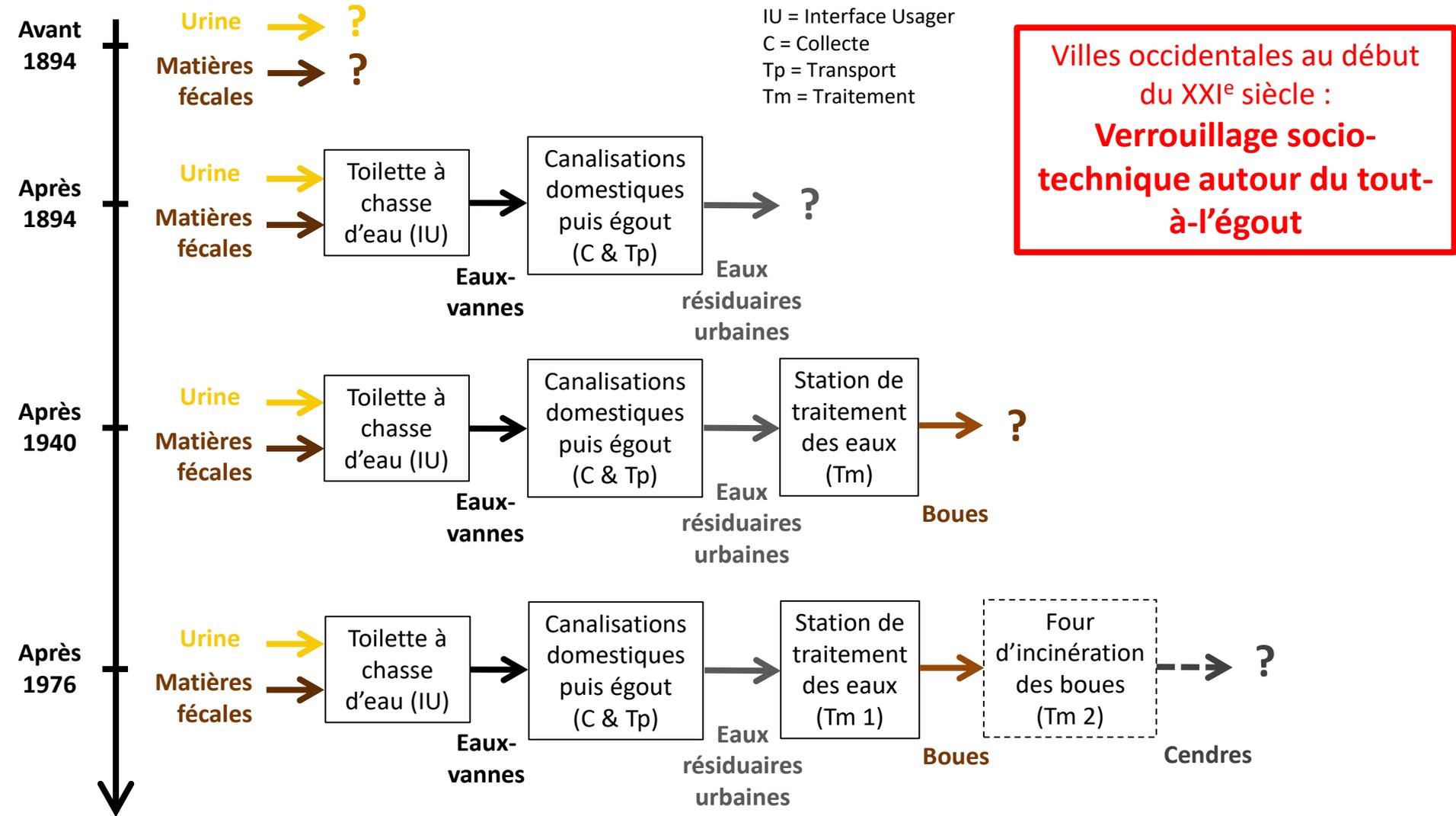


Crédit SIAAP
Stations d'épuration

Données SIAAP & Barles 2007

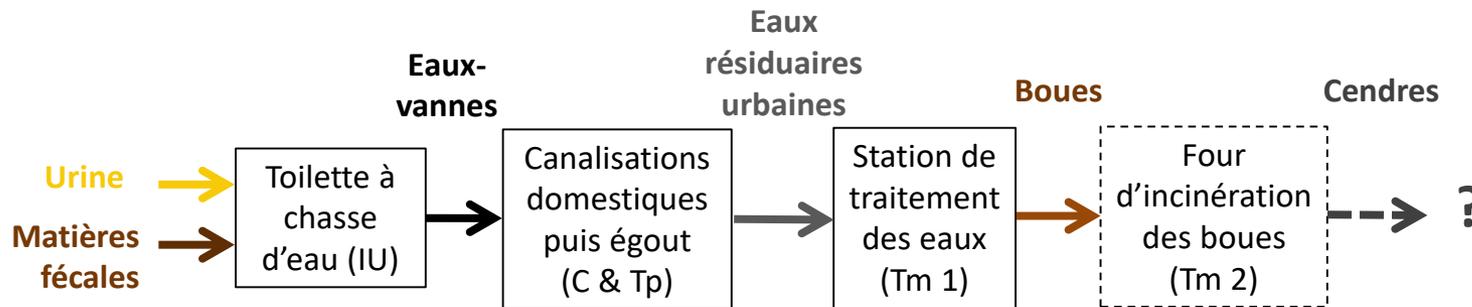


Uniformisation des chaînes de gestion et réduction des champs du débat



IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

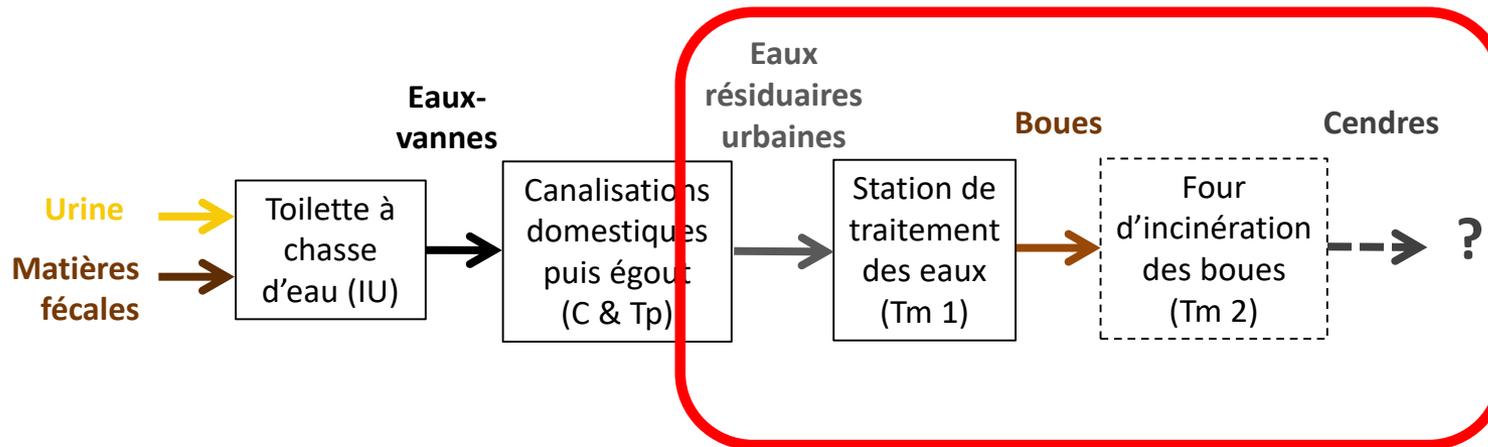
Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



IU = Interface Usager
 C = Collecte
 Tp = Transport
 Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



Modification « bout du tuyau »

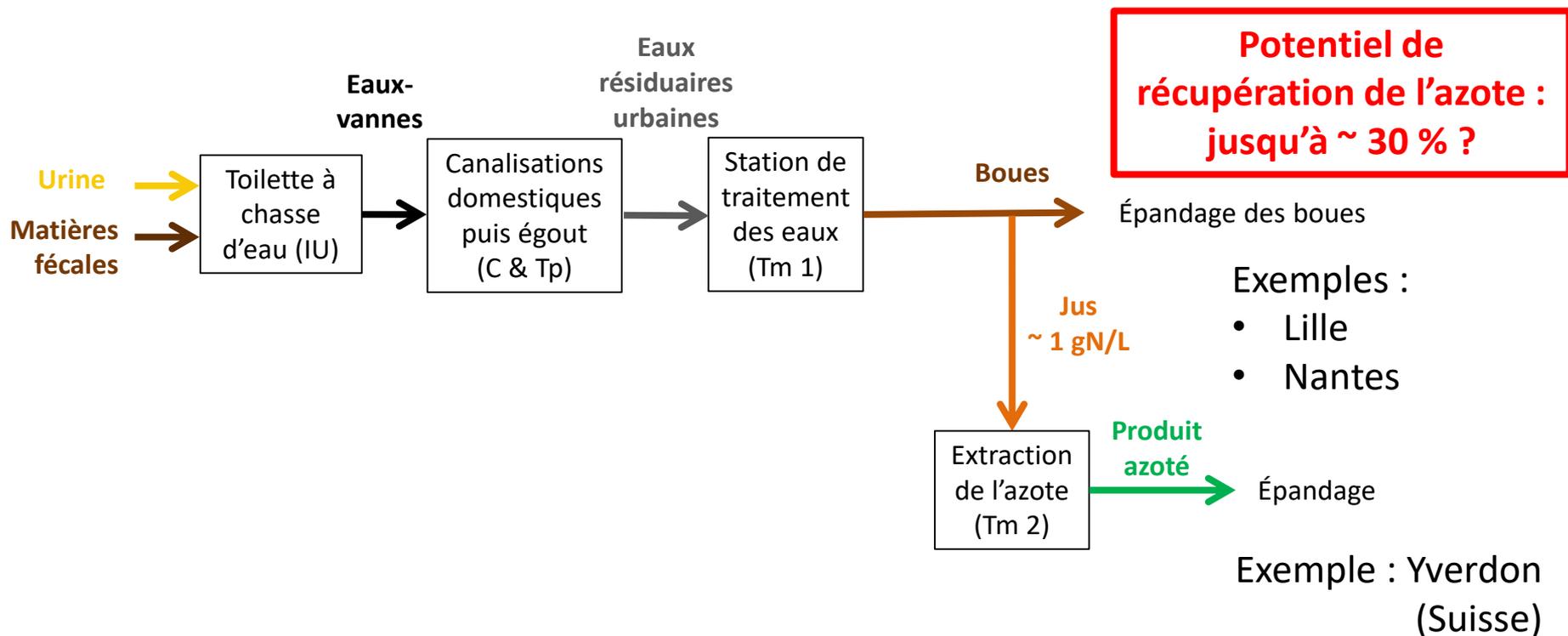
- Aucune réalisation circulaire connue
- Potentiel à investiguer mais peu de travaux ni d'intérêt
- Dilution forte : $\sim 0,05$ gN/L

Évolution du régime socio-technique : faible

IU = Interface Usager
 C = Collecte
 Tp = Transport
 Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

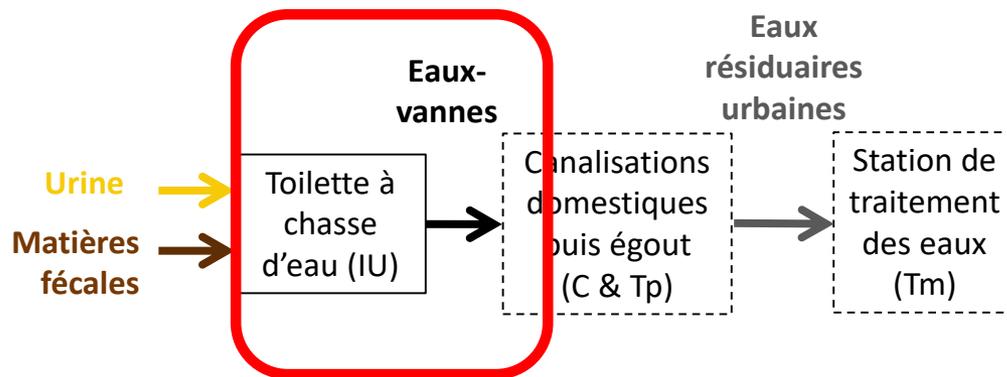
Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



IU = Interface Usager
 C = Collecte
 Tp = Transport
 Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



- Souvent toilettes sous-vide
- Aucune réalisation circulaire connue
- Potentiel à investiguer
- Dilution modérée : $\sim 1 \text{ gN/L}$

**Potentiel de récupération de l'azote :
~ 90 % ???**

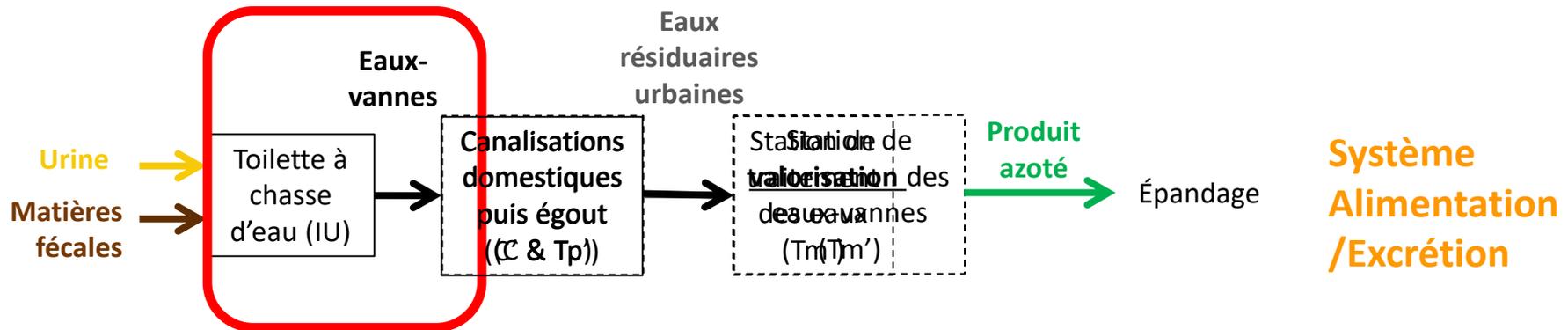


Crédit Passivhaus-vauban

IU = Interface Usager
C = Collecte
Tp = Transport
Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)

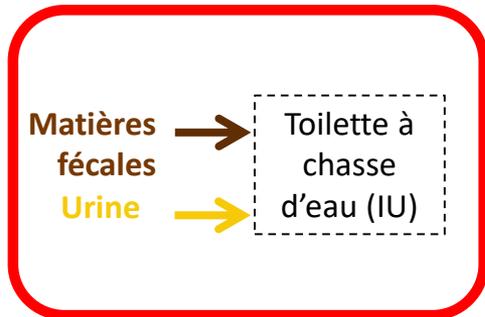


**Évolution du régime socio-technique :
forte**

IU = Interface Usager
C = Collecte
Tp = Transport
Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



IU = Interface Usager

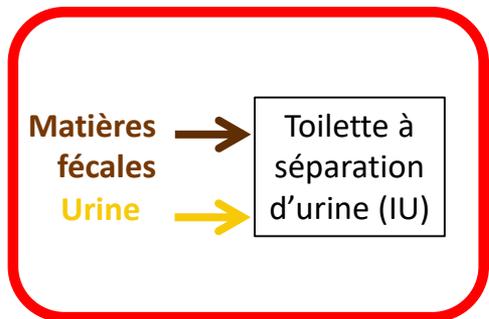
C = Collecte

Tp = Transport

Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



Éco-villages scandinaves :

- engagement bénévole
- faible densité

- Séparation à la source de l'urine
- Concentration élevée ~ 10 gN/L

Évolution du régime socio-technique : très forte



Recommandations OMS (2012)



IU = Interface Usager
 C = Collecte
 Tp = Transport
 Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)



Développement de procédés de concentration de l'urine

- Limitation des volumes à stocker et transporter (~ 1,3 L/pers/j)



Crédit : EAWAG



Crédit : YUNA

IU = Interface Usager

C = Collecte

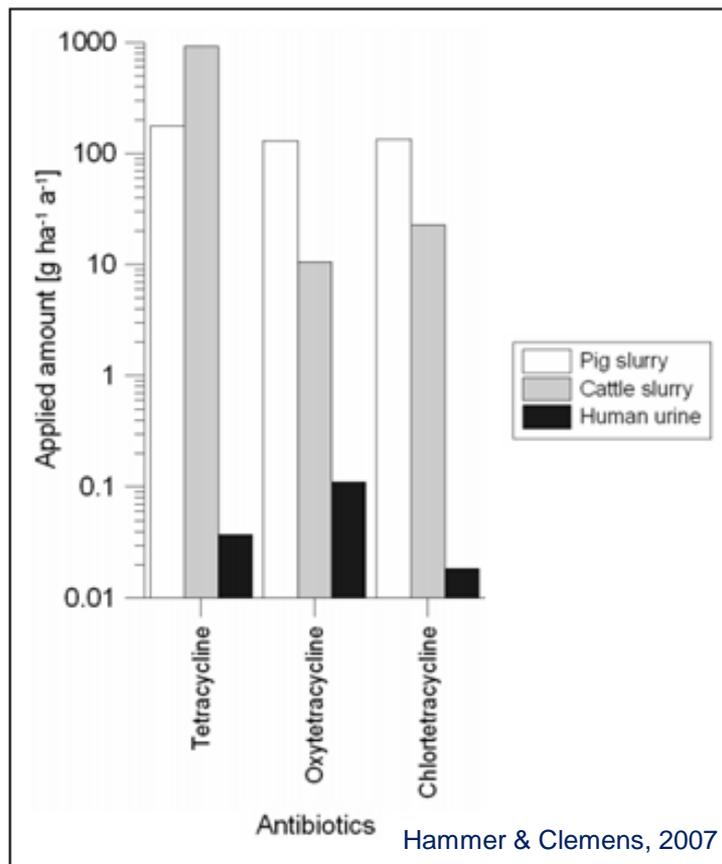
Tp = Transport

Tm = Traitement

IV. Émergence de systèmes A/E alternatifs

Potentiel de circularité (cas de l'agglomération parisienne)

Circularité extractive et intégrale



Mélange plus important avec des substances indésirables :

- Boues d'épuration
- Urines
 - Principalement substances médicamenteuses

Winker, 2009	OMS, 2012
Aucune évaluation possible des effets toxiques	
Recommandé de ne pas utiliser pour les cultures destinées à l'alimentation humaine	Les effets négatifs sont supposés négligeables



Contexte parisien favorable pour la séparation à la source des urines et des eaux-vannes

- Intérêts de deux acteurs publics :
 - AESN (SDAGE, stratégie d'adaptation changement climatique)
 - SIAAP (effet ciseau population / rivière)
- Éléments facilitateurs :
 - « La transition vers une économie circulaire [est d'intérêt général] » (L 110-1-1 du CE, depuis 2015)
 - Pas d'empêchement juridique majeur pour l'urine
 - Multiplication des initiatives et mobilisation variée d'acteurs





Transitions circulaires envisageables pour l'agglomération parisienne

- Court terme
 - Développements d'initiatives de séparation à la source de l'urine ou des eaux-vannes :
 - Acteurs engagés dans le dépassement du verrouillage socio-technique
 - **Opportunité** : urinoirs secs masculins et « gros producteurs »
- Moyen et long terme
 - Accompagnement réglementaire et régulation économique
 - Combinaison avec d'autres évolutions circulaires « bout du tuyau »



Crédit personnel



V. Prospective de transition

Développement de deux scénarios :

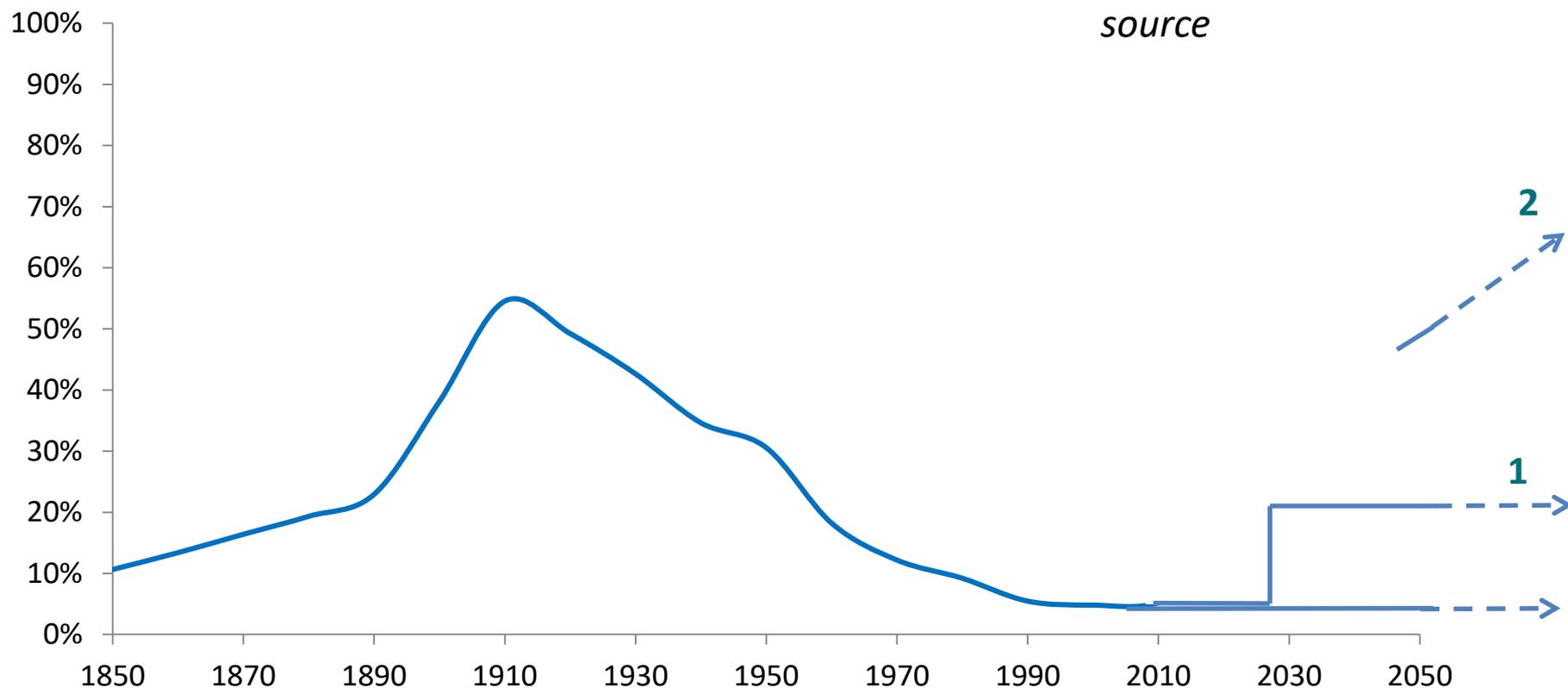
- **Scénario 1 « bout du tuyau »**
 - Hypothèse : valorisation de l'azote des jus de boues en station d'épuration
- **Scénario 2 « circulaire »**
 - Hypothèses : scénario 1 +
 - Équipement des nouveaux bâtiments > 2020 puis reprise de l'existant (1 %/an jusqu'à 2,5 %/an) :
séparation à la source de l'urine ou des eaux-vannes
 - Efficacité de valorisation de l'azote de 75 %



V. Prospective de transition

**Taux de recyclage agricole de l'azote
des urines et matières fécales
de l'agglomération parisienne**

1. **Scénario « bout du tuyau »**
concentration des jus
2. **Scénario « circulaire »**
Scénario 1 + séparation à la source





Systeme A/E complet de l'agglomération parisienne en 2053

- **Scénario 2 « circulaire »**

Hypothèses complémentaires :

- Régime alimentaire sobre :

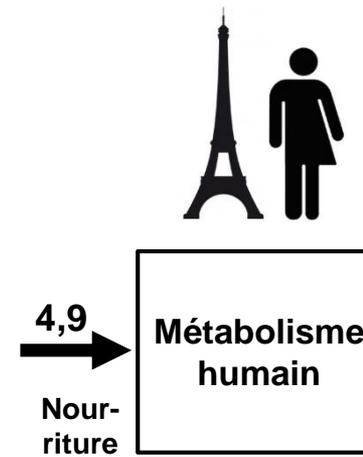
 - 3,9 kgN/pers/an et 33 % de protéines animales

- Taux de biodéchets de 15 %

- Systèmes agricoles intégrés polyculture-élevage
(scénario bio-autonome-demitarien – Billen *et al.*, 2017)

Système A/E de l'agglomération parisienne

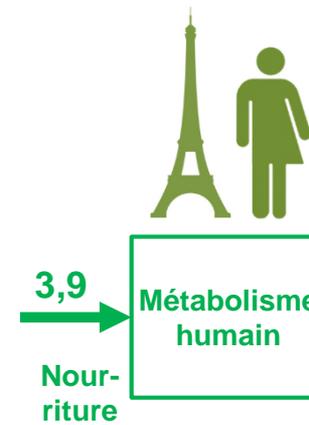
2013





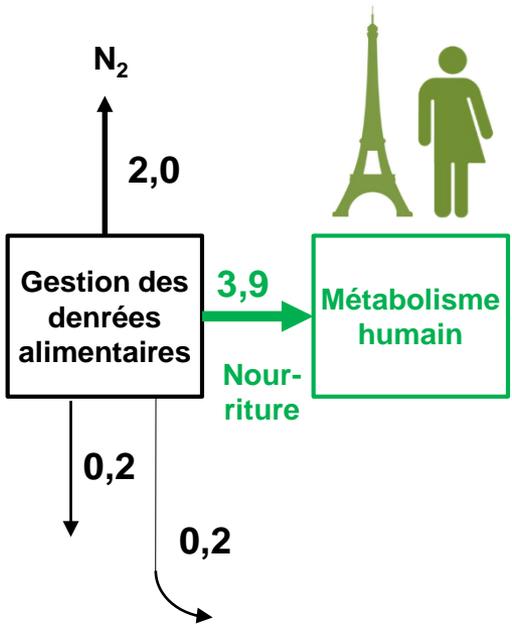
Système A/E de l'agglomération parisienne

2053



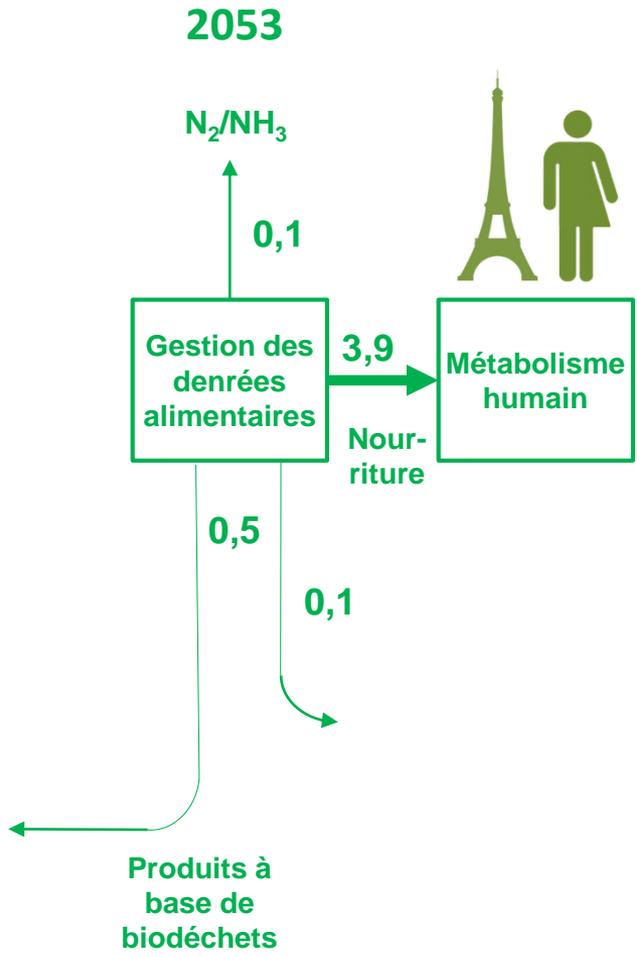
Système A/E de l'agglomération parisienne

2013



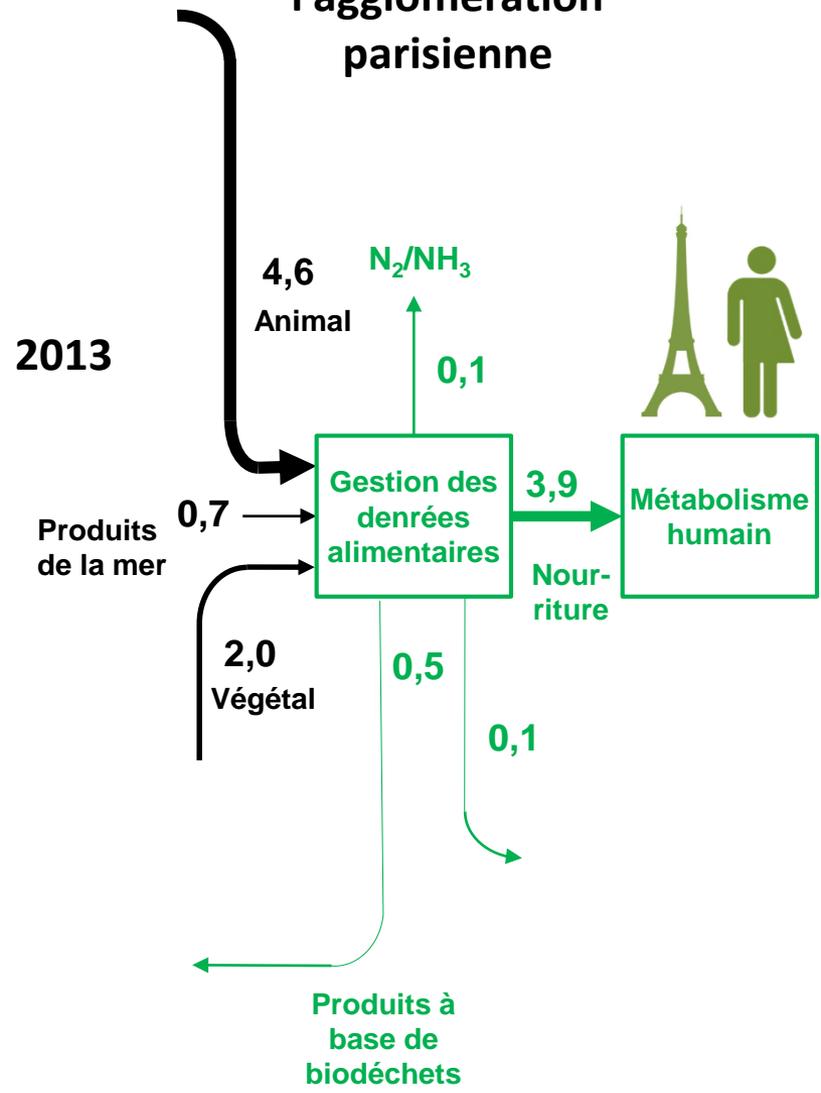


Système A/E de l'agglomération parisienne



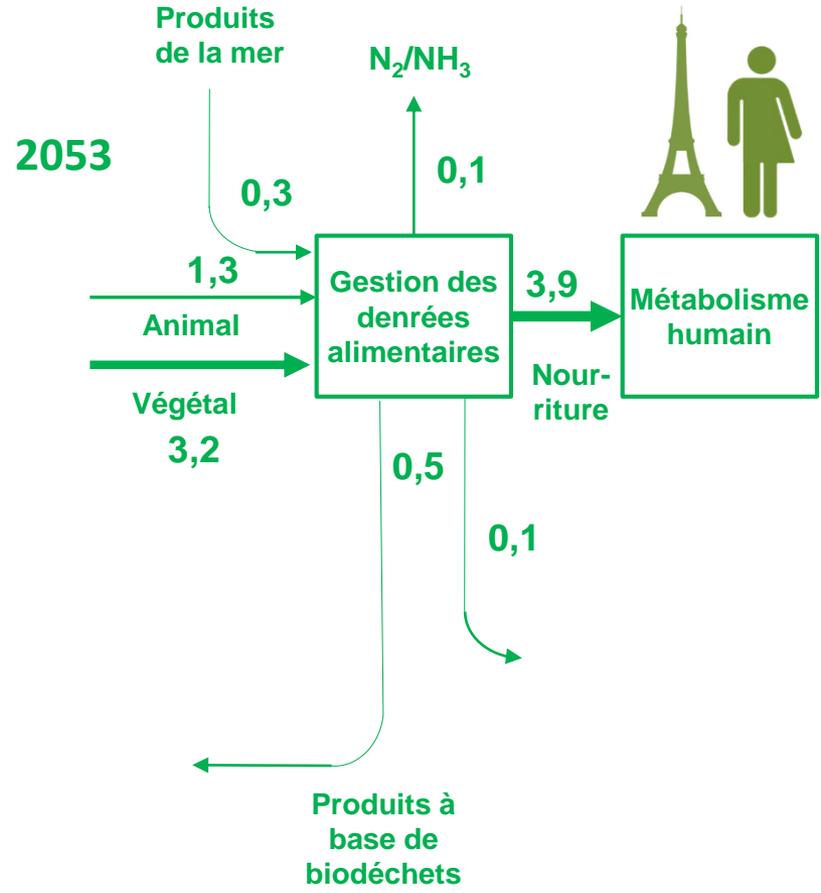


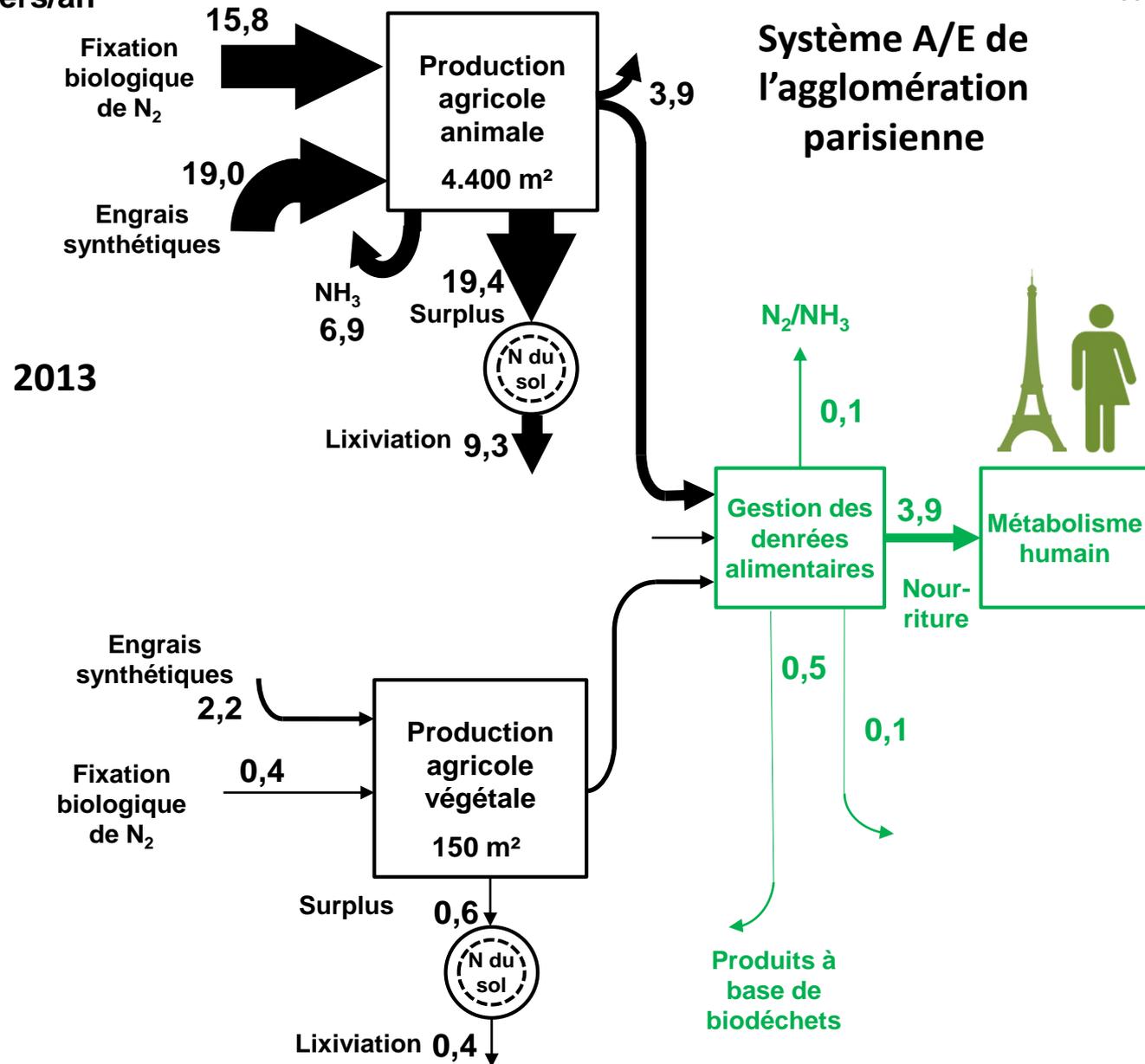
Système A/E de l'agglomération parisienne





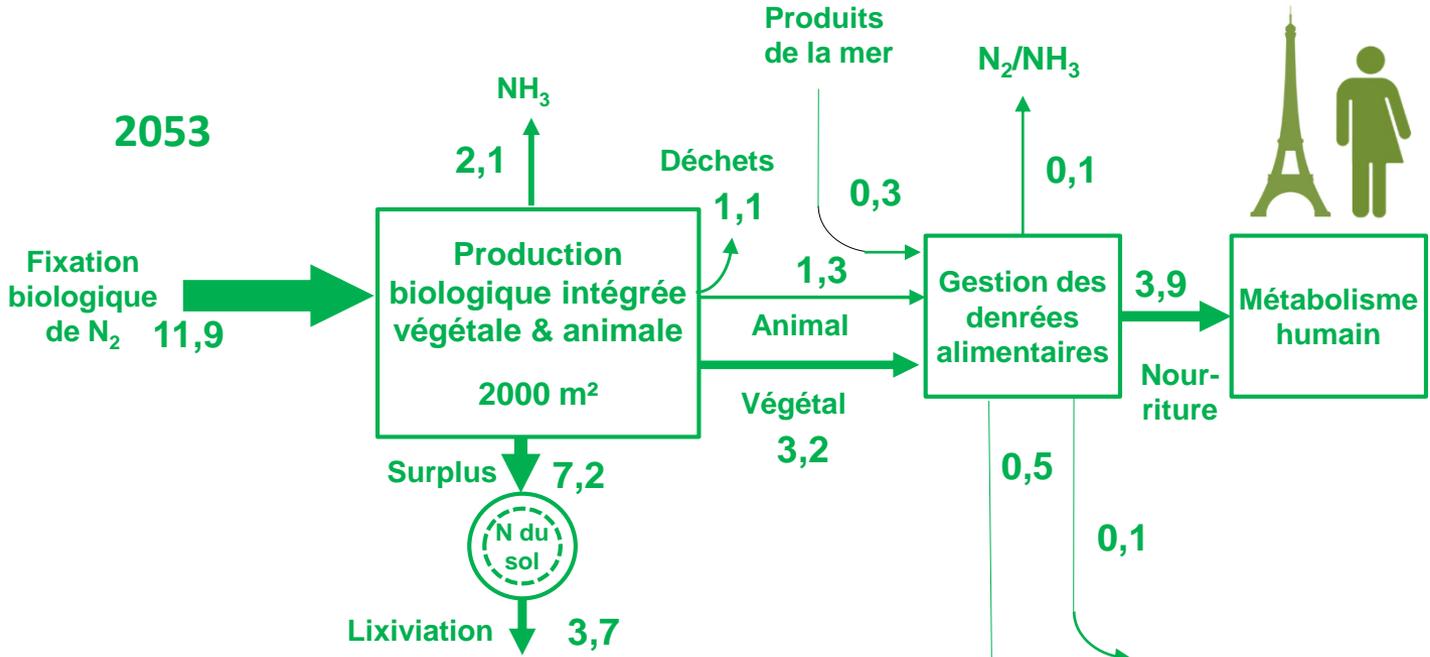
Système A/E de l'agglomération parisienne







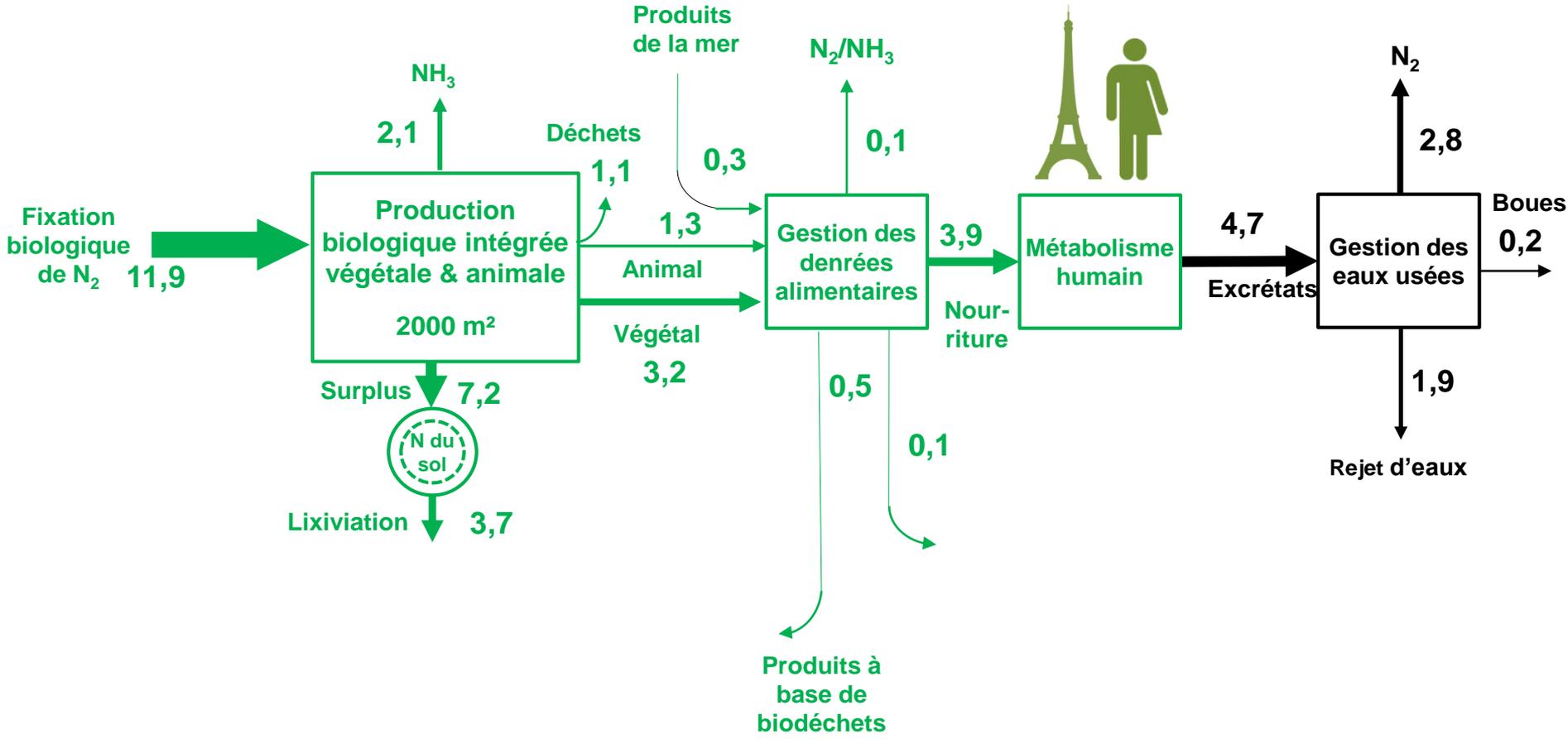
Système A/E de l'agglomération parisienne



Pollutions agricoles divisées par 3
Augmentation prairies 160 %
Surfaces agricoles divisées par 2

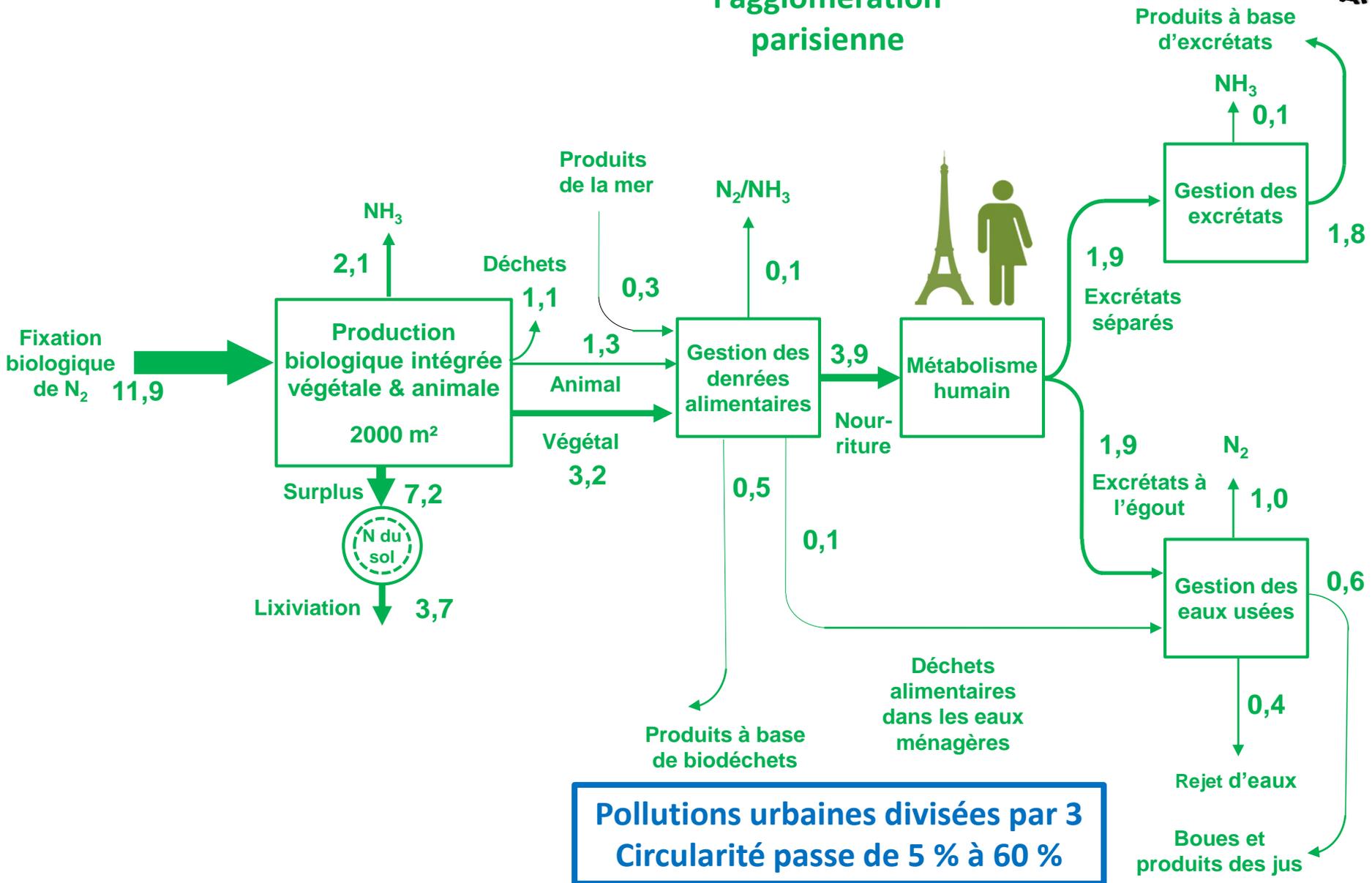


Système A/E de l'agglomération parisienne

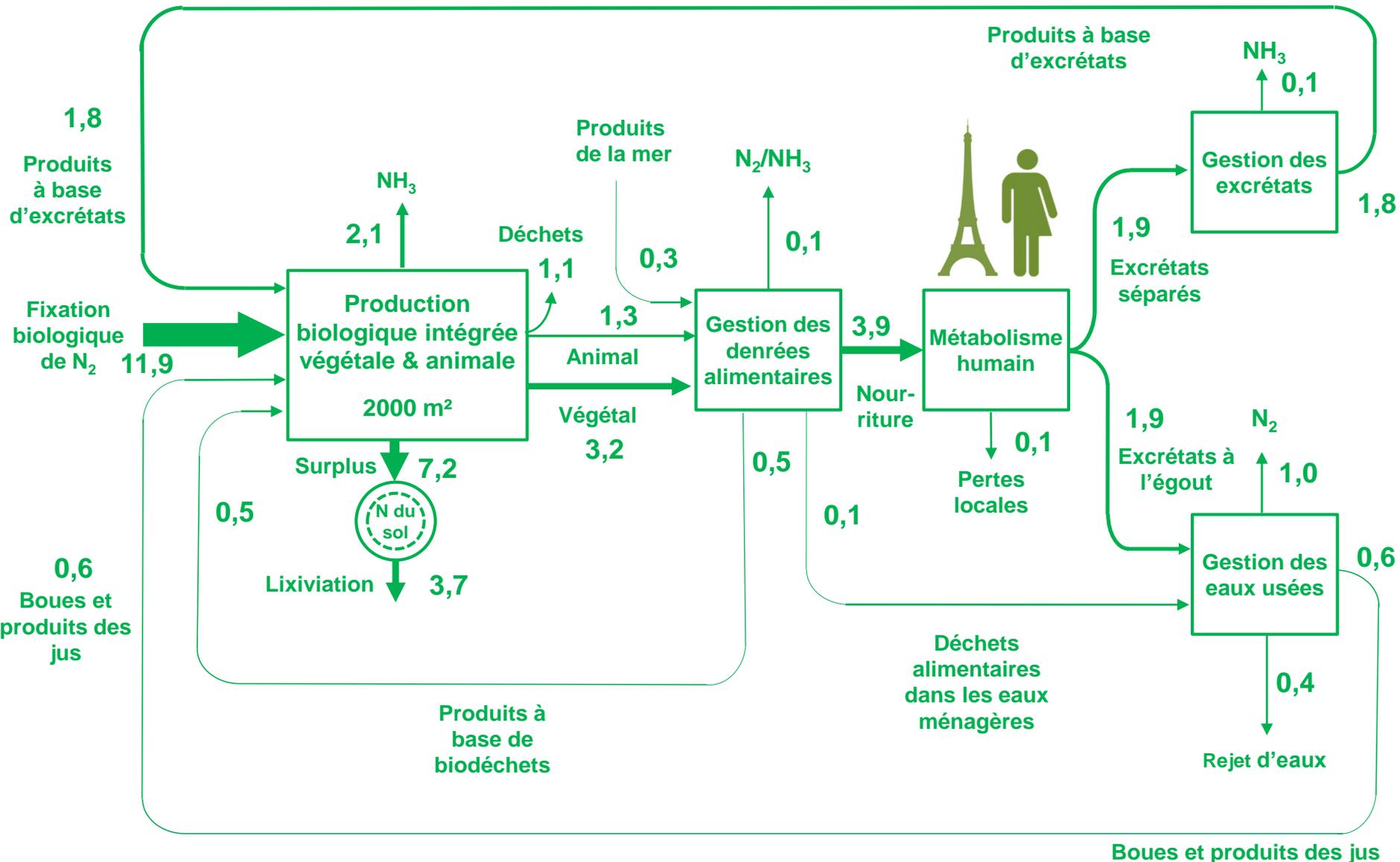




Système A/E de l'agglomération parisienne



Scénario circulaire du système A/E de l'agglomération parisienne en 2053



Conclusion

- Systèmes A/E des villes occidentales non soutenables :
 - Linéaires
 - Polluants
 - Non sobres
 - Très forte empreinte agricole
- Transition socio-écologique envisageable vers des systèmes :
 - Circulaires
 - Peu polluants
 - Sobres
 - À faible empreinte agricole



Perspectives

Phase I : 2015 - 2017

Phase II : 2018 - 2020

- Agrocapi (agronomie, sociologie)
- ANR Design (procédés, urbanisme, sociologie)
- Anthropologie

➔ Quelles transitions socio-écologiques ?



Crédit : ENPC

Projet Azuris

Merci
À
Tous !



Crédit personnel

Projet Azuradom



Bibliographie

- Cf. mémoire de thèse téléchargeable sur :
<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01787854/document>