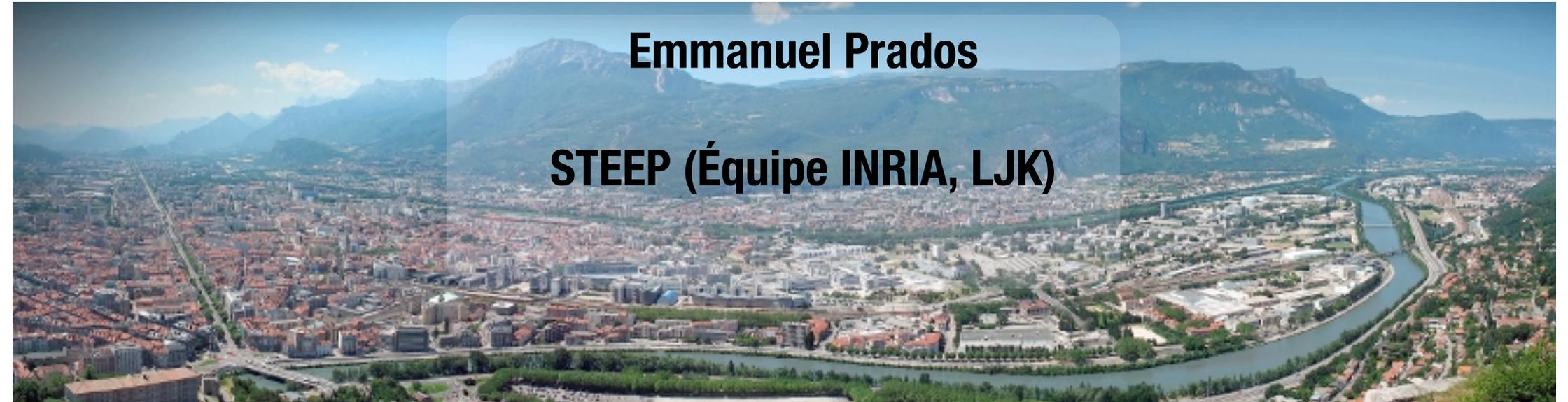


Quelques enjeux et challenges de la
modélisation transport-usage des sols
pour une aide à la décision vers des
territoires soutenable



Emmanuel Prados

STEEP (Équipe INRIA, LJK)

Plan de la présentation

1. Objectifs, domaines d'application, axes, projets, équipe
2. Proposition de discussion 1 : Des constats globaux à la modélisation locale pour l'aide à la décision
3. Proposition de discussion 2 : math-info et pluridisciplinarité ?

STEEP, équipe INRIA/LJK

Soutenabilité, Territoires, Environnement, Economie et Politique

Objectifs:

Développement d'outils **quantitatifs** pour **l'aide à la décision** permettant **la mise en œuvre** de politiques de **développement durable** aux **échelles territoriales**.

- Identification de leviers d'actions aux échelles territoriales
- Quantification d'impacts de choix (politiques, économiques,...)
- Analyse systémique, analyse multicritère
- Concept de soutenabilité territoriale

=> Modèles, éventuellement très simples = outils, mais pas une finalité!

Grilles de lecture / types d'outils

- **Analyse sectorielle, par filière : analyse de flux de matière, modèles *input-output***
 - **Comptabilité environnementale, écologie territoriale**
- **Analyse spatiale : Modèles de transport-usage des sols (LUTI/LUCC)**
 - **Economie urbaine**

Grilles de lecture / types d'outils

- **Analyse sectorielle, par filière : analyse de flux de matière, modèles *input-output***
 - **Comptabilité environnementale, écologie territoriale**
- **Analyse spatiale : Modèles de transport-usage des sols (LUTI/LUCC)**
 - **Economie urbaine**



Pressions et mécanismes
Leviers d'action

Grilles de lecture / types d'outils

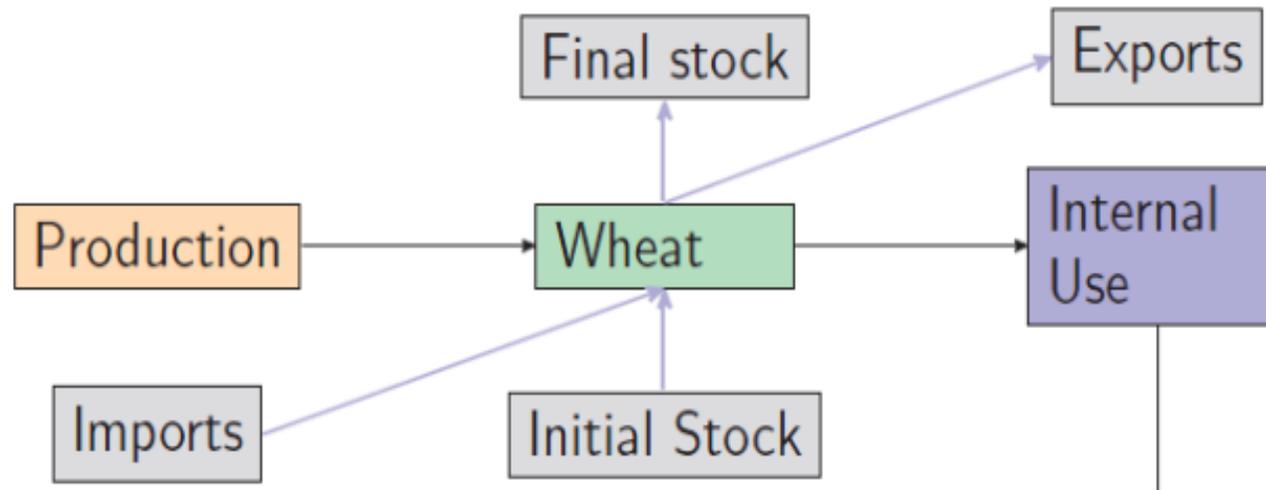
- **Analyse sectorielle, par filière : analyse de flux de matière, modèles *input-output***
 - **Comptabilité environnementale, écologie territoriale**
 - **Analyse spatiale : Modèles de transport-usage des sols (LUTI/LUCC)**
 - **Economie urbaine**
 - **Impacts sur les services des écosystèmes,**
 - **Ecologie**
- ➔ **Indicateurs, aide à la décision...**

Pressions et mécanismes
Leviers d'action

Grilles de lecture / types d'outils

- **Analyse sectorielle, par filière : analyse de flux de matière, modèles *input-output***
 - **Comptabilité environnementale, écologie territoriale**
- **Analyse spatiale : modèles de transport-usage des sols (LUTI/LUCC)**
 - **Economie urbaine**
- **Indicateurs, aide à la décision, impacts sur les services des écosystèmes**
 - **Gestion**

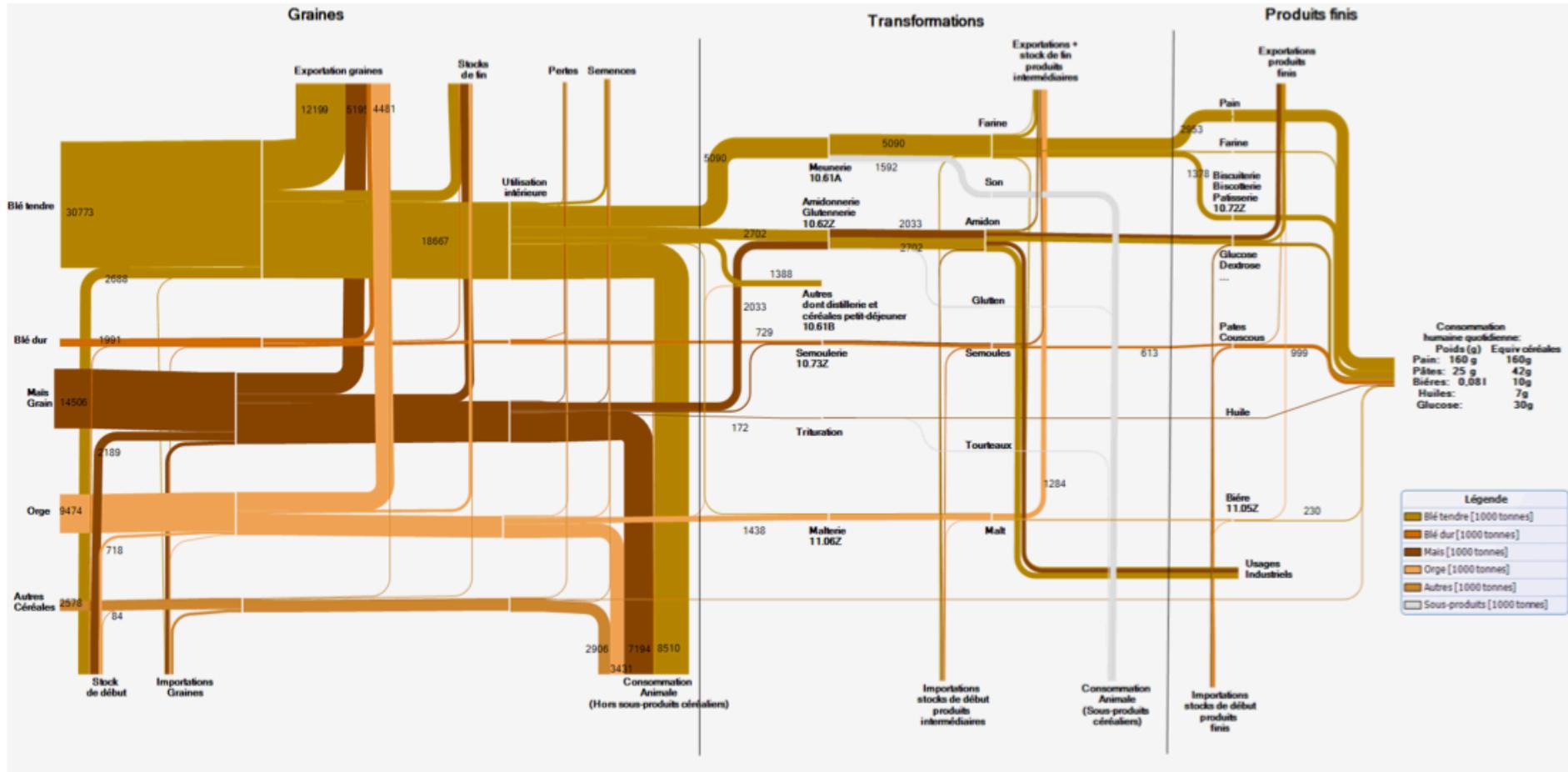
Caractérisation des flux (matière, énergie) entrant et sortant d'un territoire



L'exemple de la chaîne du blé :

- produit primaire: blé (grain)
- produits secondaires (1^{ère}, 2^{ème} transf.): farine, amidon, glucose...
- produits finaux: pain, bioéthanol...

Caractérisation des flux (matière, énergie) entrant et sortant d'un territoire

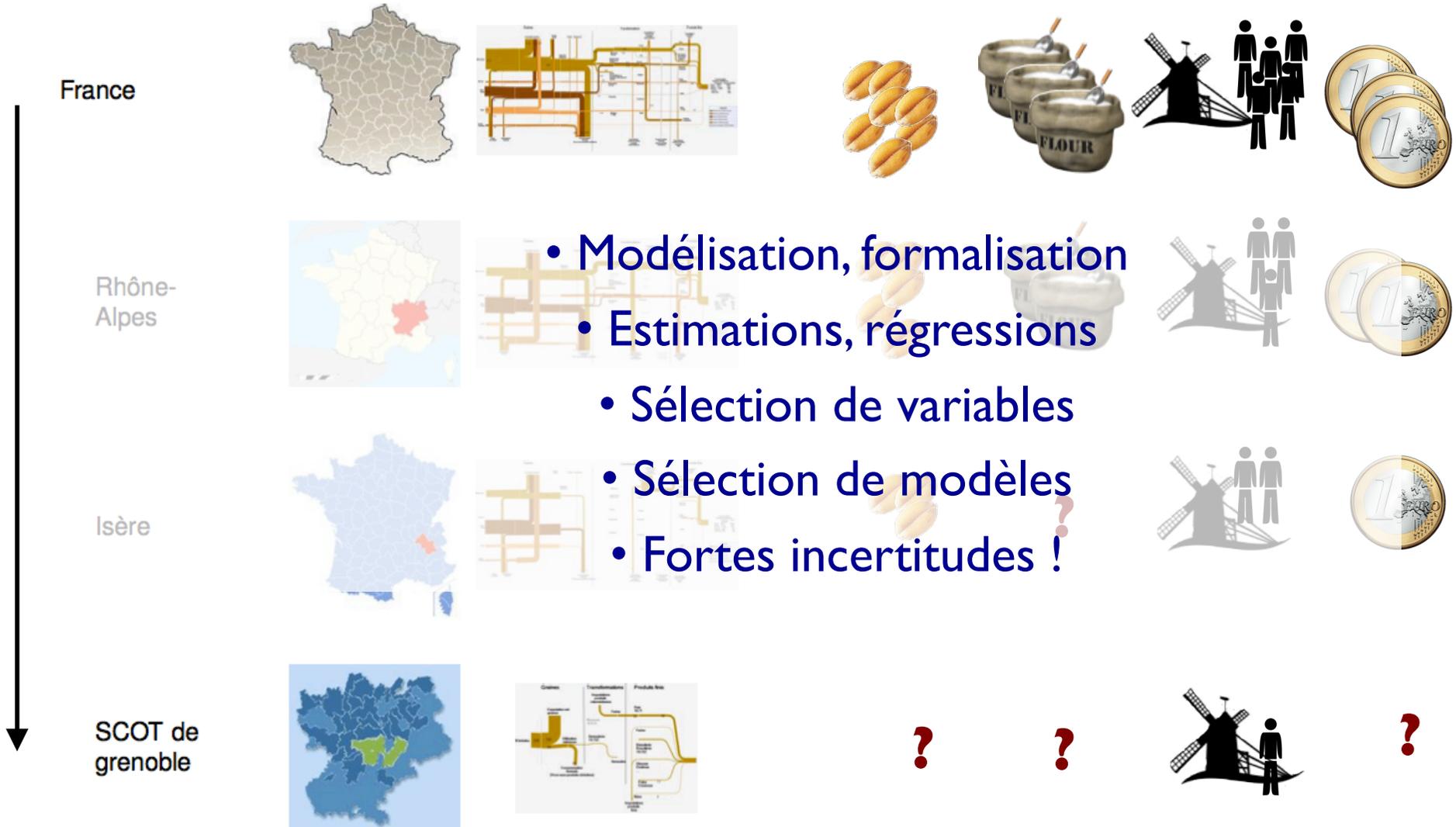


Blé, maïs, orge, ...

Caractérisation des flux (matière, énergie) entrant et sortant d'un territoire



Caractérisation des flux (matière, énergie) entrant et sortant d'un territoire



- Modélisation, formalisation
- Estimations, régressions
- Sélection de variables
- Sélection de modèles
- Fortes incertitudes !

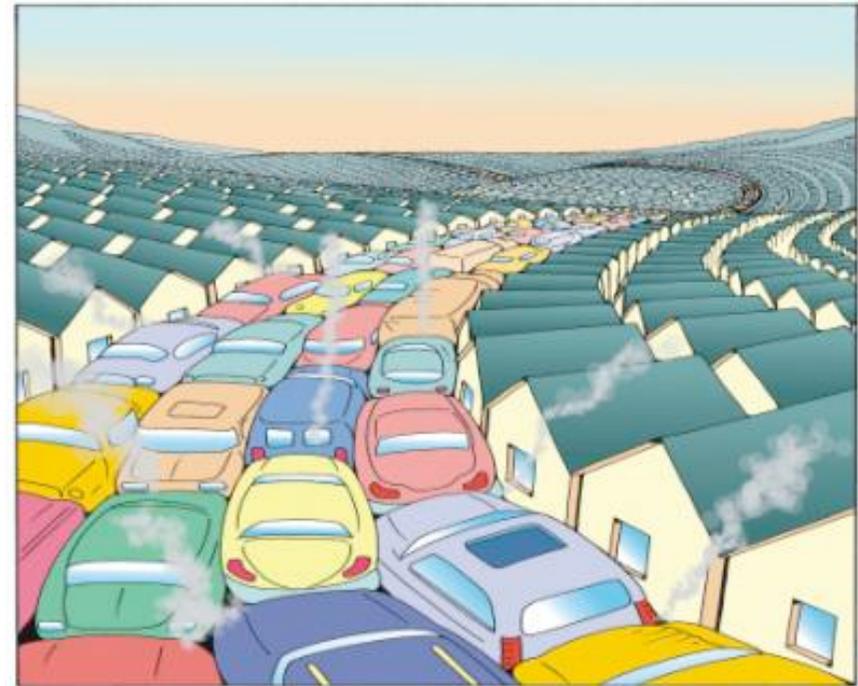
Grilles de lecture / types d'outils

- **Analyse sectoriel, par filière : analyse de flux de matière, modèles *input-output***
 - **Comptabilité environnementale, écologie territoriale**
- **Analyse spatiale : modèles de transport-usage des sols (LUTI/LUCC)**
 - **Economie urbaine**
- **Indicateurs, aide à la décision, impacts sur les services des écosystèmes**
 - **Gestion**

Modélisation de l'évolution des zones urbaines/ périurbaines et étalement urbain

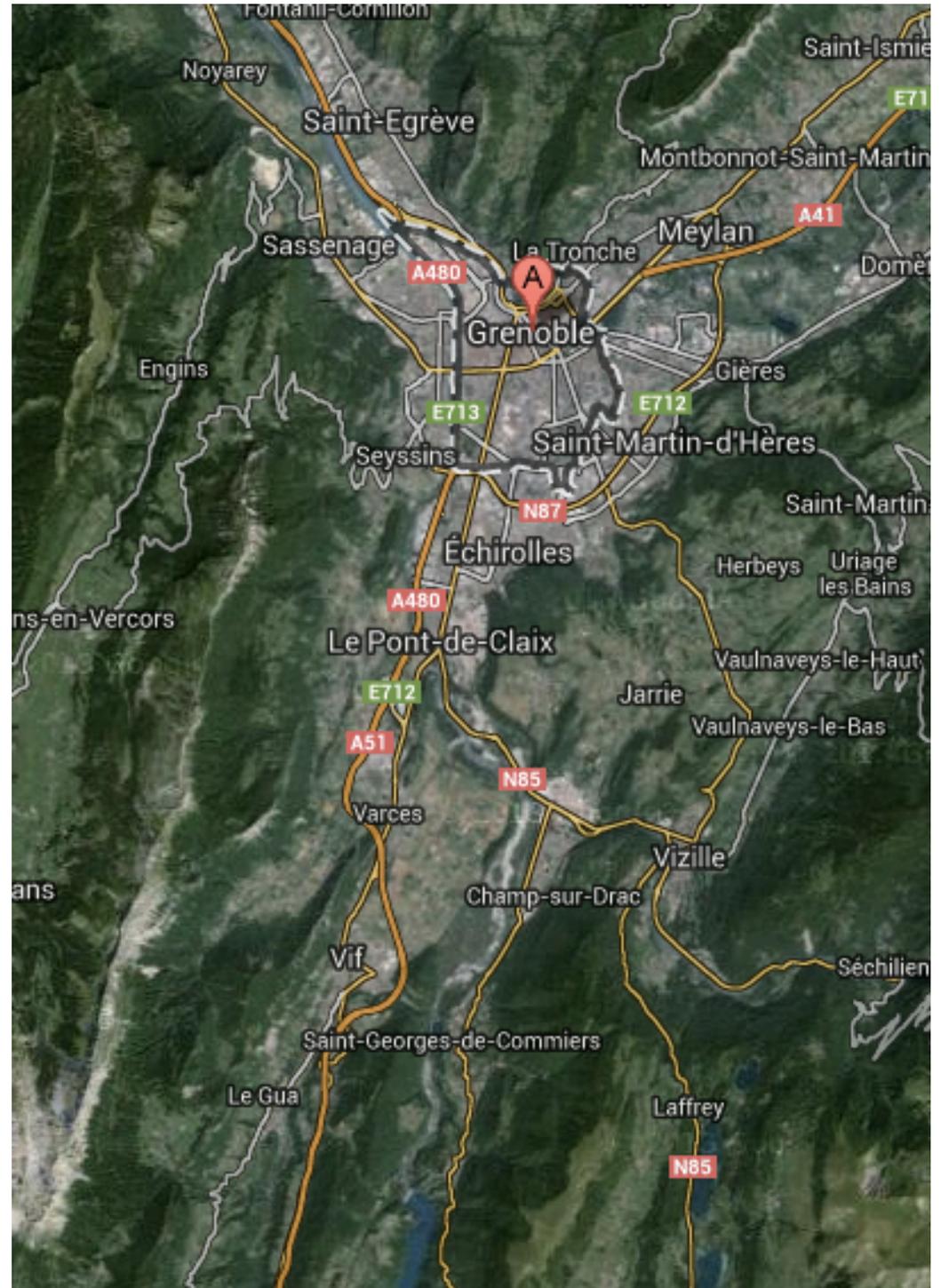
Etalement urbain

- Problèmes énergétiques et inégalités sociales
- Perte de terres arables
- Fragmentation de l'habitat écologique
- Pollutions atmosphériques



- **Couplage transport – usage des sols**
- Anticiper les **RETROACTIONS...**

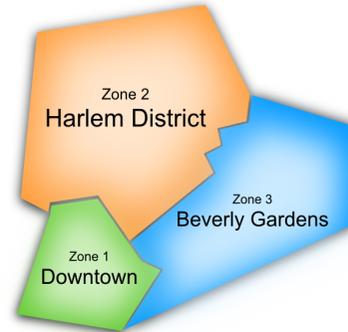
- **EXEMPLE: TRANUS**



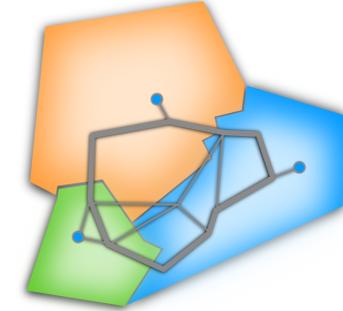
Modélisation de l'évolution des zones urbaines/ périurbaines et étalement urbain

Modèles intégrés de transport et usage des sols (LUTI)

- Localisation et niveau de l'activité (au sens large)
- interactions entre secteurs
- adéquation avec le transport / exploitation du réseau...



zones



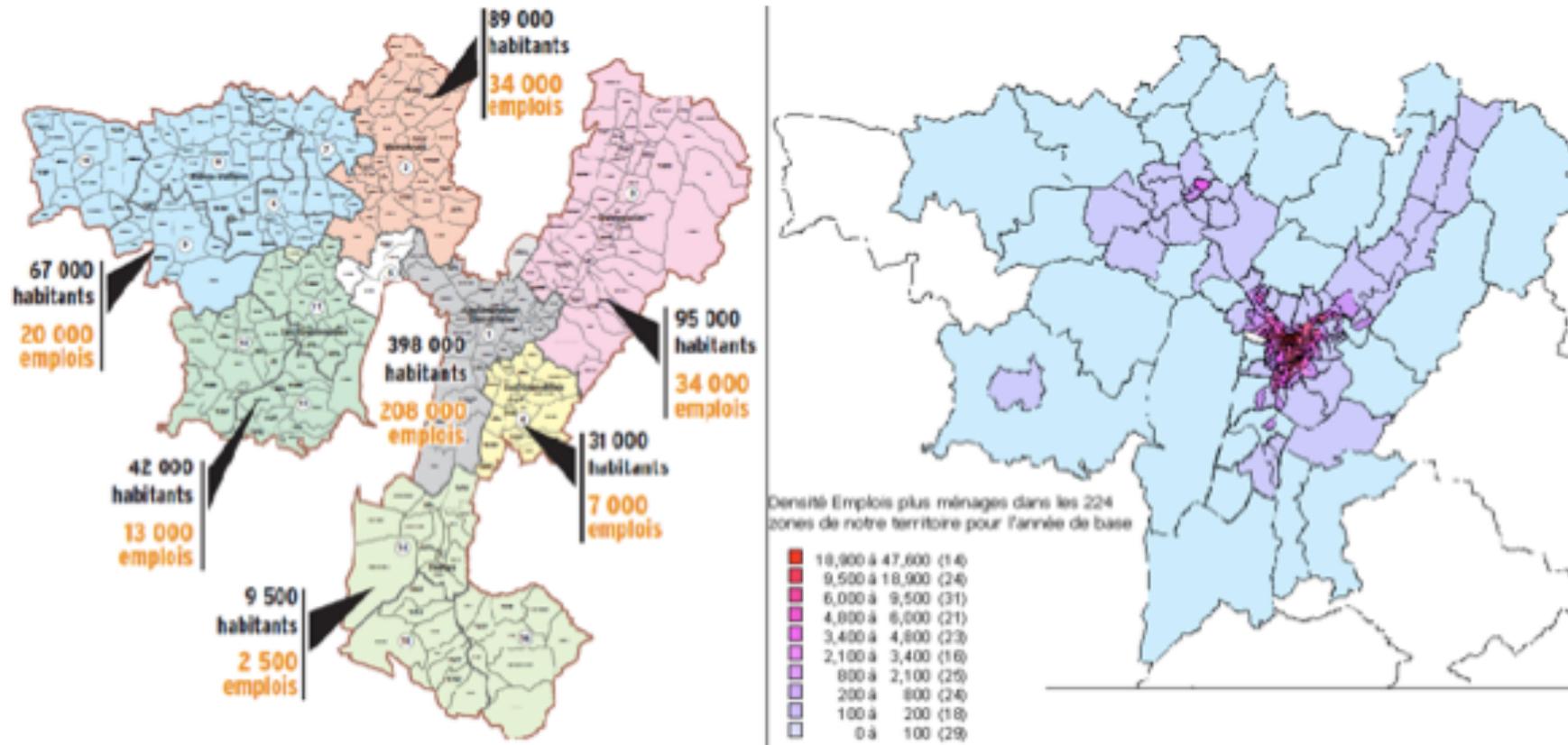
réseau de transport



secteurs (activité)

Exemple de zones

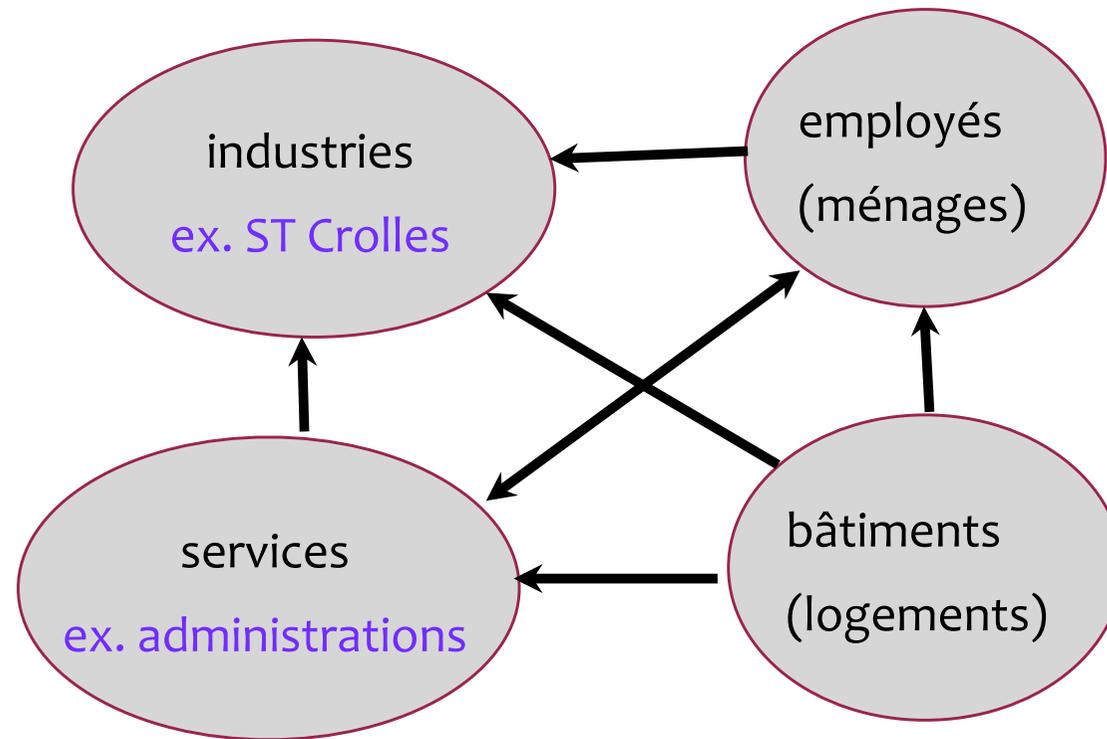
(Grenoble - IDDRI)



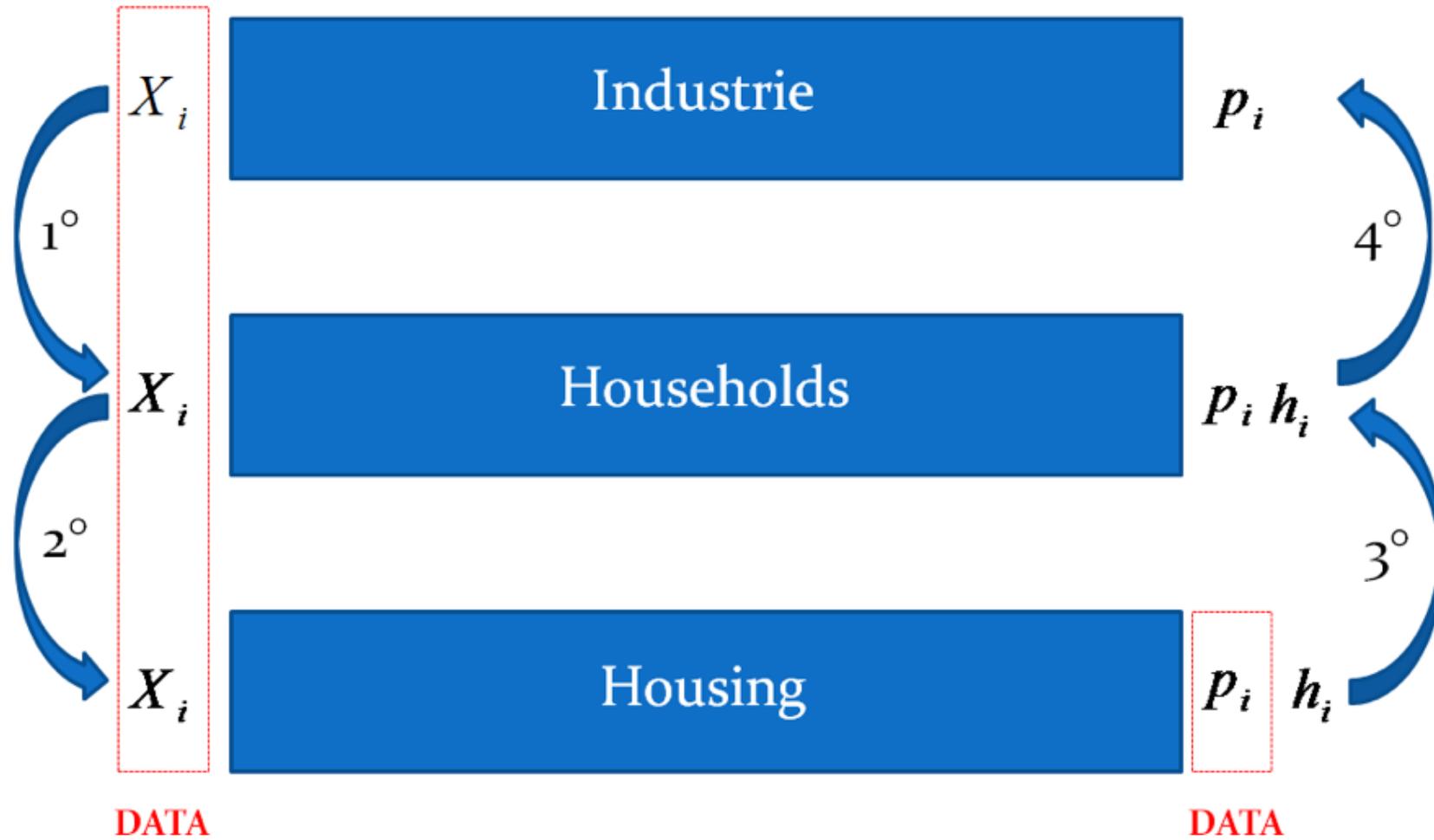
224 zones

Maillage: **Iris pour l'agglomération**, commune pour la 1^{ère} couronne, agrégation de communes en périphérie

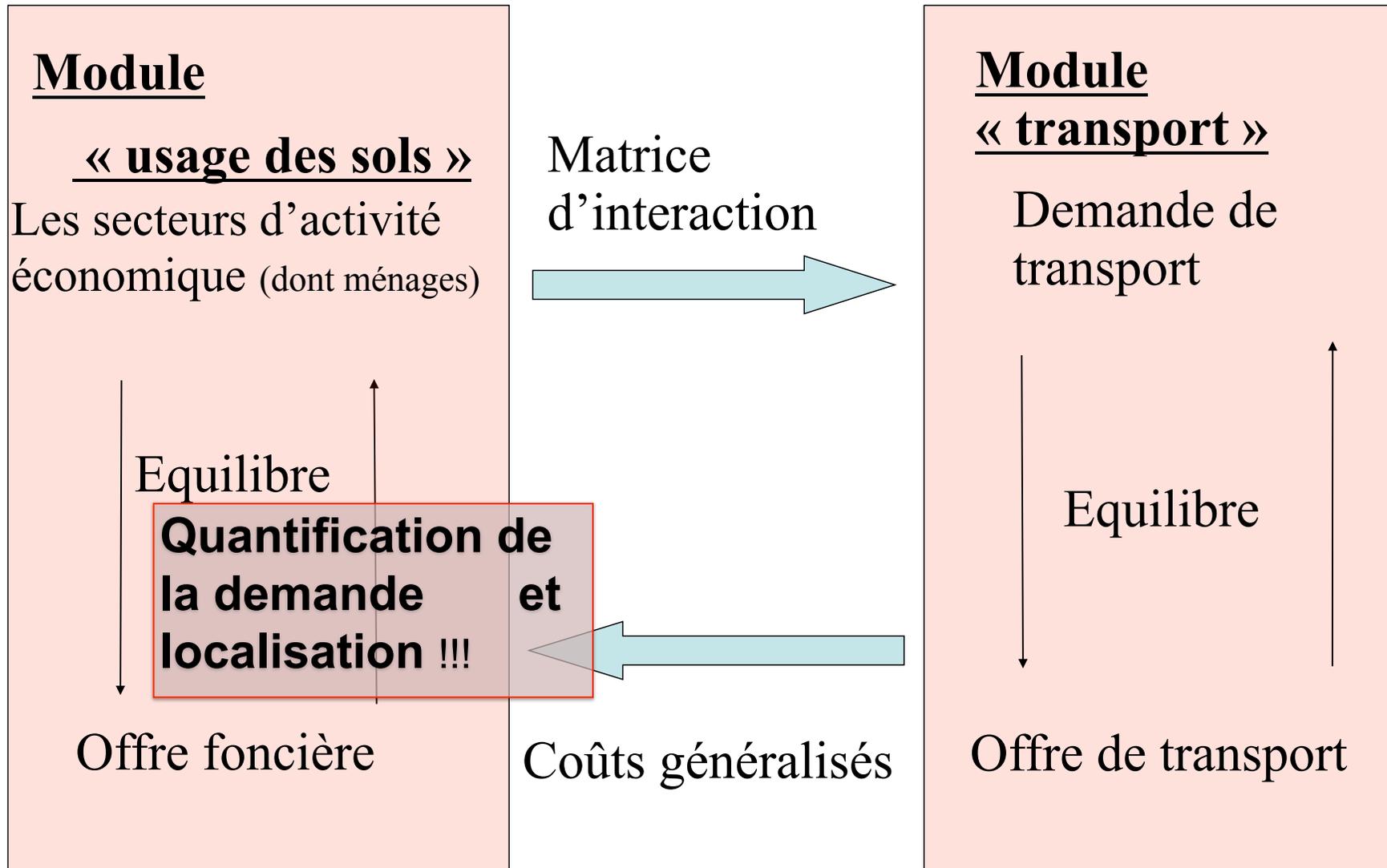
Exemple type de secteurs



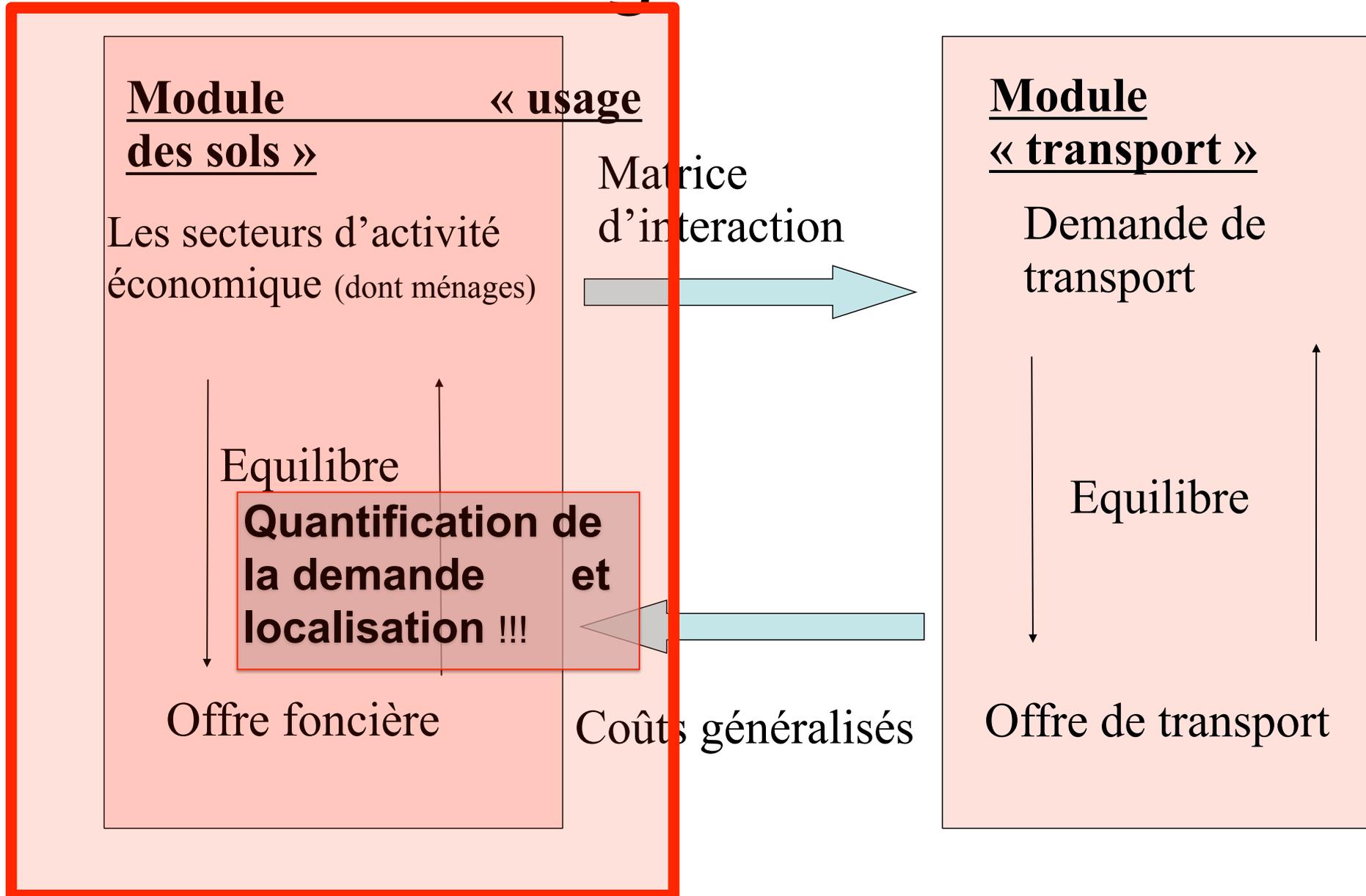
Hiérarchie et production induite



La structure générale de TRANUS



La structure générale de TRANUS



Le module «usage des sols» de TRANUS

3 étapes clefs:

E1: calcul de la demande de secteurs pour chacune des zones (quantité)

E2: localisation de la production « induite » par la demande (répartition)

E3: calcul des coûts / prix / «désutilités»

Étape E1: calcul de la demande

- zone par zone, tous les secteurs
- Dépend de
 - production des secteurs consommateurs
 - élasticité de la demande (par rapport aux prix)
 - paramètres de substitutions

Exemple:

Ménages aisés consomment maisons individuelles

Etape E1: calcul de la demande

Demande du secteur n dans la zone i :

Exemple:

n = maisons individuelles

m = ménages aisés

$$D_i^n = \sum_m D_i^{mn} + D_i^{*n}$$

Somme de toutes les demandes de n générées par les secteurs m consommant du n + demandes exogènes en n -- dans la zone i.

Demande de secteur n générée par le secteur m dans la zone i :

$$D_i^{mn} = X_i^m a_i^{mn} S_i^{mn}$$

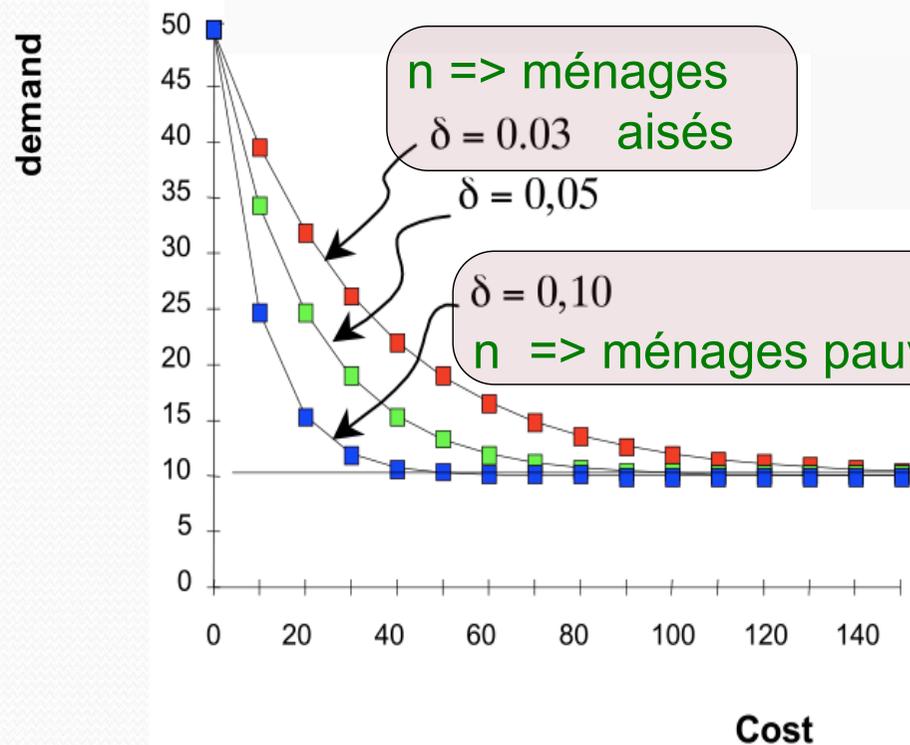
X_i^k

production d'un secteur k attirant n dans la zone i

Etape E1: calcul de la demande

Quantité de production de secteur n demandée par une unité de secteur m dans la zone i

$$a_i^{mn} = \min^{mn} + (\max^{mn} - \min^{mn}) \exp(-\delta^{mn} U_i^n)$$



Sensibilité au
« signal prix » !

Etape E2: localisation de la production induite

Exemple:

L'industrie consomme des ménages
(emplois) (travailleurs)

- Dépend de l'attractivité des zones pour le secteur demandé
ex. certaines zones sont plus attractives que d'autres pour y vivre
- Dépend de la «désutilité» à consommer le bien demandé dans une zone alors qu'il est produit dans une autre
ex. coût du transport domicile/travail + prix du logement

➡ Triptyque: Arbitrage transport / prix / attractivité !

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

Exemple:
n = ménages (aisés)

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

Exemple:
n = ménages (aisés)

production de n en zone j induite par
les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n \text{Pr}_{ij}^n$$

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

production de n en zone j induite par les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n Pr_{ij}^n$$

volume de demande



Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

production de n en zone j induite par les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n \text{Pr}_{ij}^n$$

La demande en i est répartie sur les différentes zones.
Multiplication par la proportion allouée à j.

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

production de n en zone j induite par les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n \text{Pr}_{ij}^n$$

Probabilité de répartition de la demande de n en i vers les autres zones ; en particulier la zone j

$$\text{Pr}_{ij}^n = \frac{A_j^n \exp(-U_{ij}^n)}{\sum_k A_k^n \exp(-U_{ik}^n)}$$

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

Attractivité

production de n en zone j induite par les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n \text{Pr}_{ij}^n$$

Probabilité de répartition de la demande de n en i vers les autres zones ; en particulier la zone j

$$\text{Pr}_{ij}^n = \frac{A_j^n \exp(-U_{ij}^n)}{\sum_k A_k^n \exp(-U_{ik}^n)}$$

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

production de n en zone j induite par les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n \text{Pr}_{ij}^n$$

Probabilité de répartition de la demande de n en i vers les autres zones ; en particulier la zone j

$$\text{Pr}_{ij}^n = \frac{A_j^n \exp(-U_{ij}^n)}{\sum_k A_k^n \exp(-U_{ik}^n)}$$

« Désutilité »
= coûts transport (j → i)
+ prix du secteur n en j

Etape E2: localisation de la production induite

$$X_j^n = \sum_i X_{ij}^n$$

production de n en zone j induite par les activités en zone i

$$X_{ij}^n = D_i^n \text{Pr}_{ij}^n$$

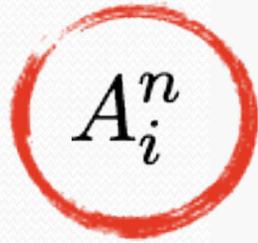
Probabilité de répartition de la demande de n en i vers les autres zones ; en particulier la zone j

$$\text{Pr}_{ij}^n = \frac{A_j^n \exp(-U_{ij}^n)}{\sum_k A_k^n \exp(-U_{ik}^n)}$$

TRANUS: Offre = demande
Demande toujours satisfaite!

Etat d'équilibre!

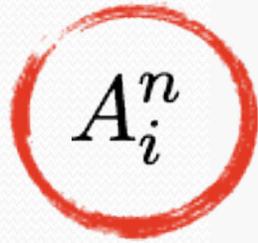
Etape E2: localisation de la production induite



Attractivité

- Attractivité d'une zone pour un secteur dépend de:
- l'importance relative des autres secteurs présents dans une zone pour un secteur donné; **affinité entre secteur.**
- facteurs attractifs non modélisés
- (**tous les territoires ne se valent pas → subjectif**)

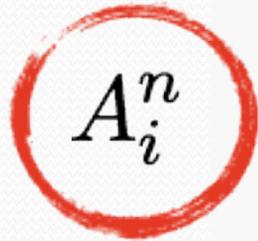
Etape E2: localisation de la production induite



Attractivité

- Attractivité d'une zone pour un secteur dépend de:
- l'importance relative des autres secteurs présents dans une zone pour un secteur donné; **affinité entre secteur.**
- **Exemples:**
- - **présence d'école attire les ménages**
- - **ménages aisés attirés par la présence d'autres ménages aisés**

Etape E2: localisation de la production induite



Attractivité

- Attractivité d'une zone pour un secteur dépend de:
- l'importance relative des autres secteurs présents dans une zone pour un secteur donné; **affinité entre secteur**.
- facteurs attractifs non modélisés
- (**tous les territoires ne se valent pas** → subjectif)

Exemples: vues, ensoleillement

Etape E2: localisation de la production induite

$$A_i^n$$

Attractivité

$$A_i^n = \left(\sum_k b_k^n \tilde{X}_i^k \right) + W_i^n$$

$$X_i^k$$

production d'un secteur k attirant n dans la zone i

$$b_k^n$$

poids relatif du secteur k en tant qu'attracteur du secteur n

$$W_i^n$$

attracteur initial de la zone i prenant en compte des éléments non modélisés qui attirent la localisation de n

Etape E3: coûts / prix / «désutilités»

«Désutilités»

fonction d'utilité de consommer dans la zone i du secteur n produit dans la zone j :
fonction du prix et de la désutilité du transport

$$U_{ij}^n = \lambda^n p_j^n + t_{ij}^n$$

désutilité du transport (dont prix pour transporter une unité de n des zones j à i)

$$t_{ij}^n$$

prix d'une unité de n dans la zone j
= coût de production d'une unité de n dans la zone j

$$p_j^n$$

Etape E3: coûts / prix / «désutilités»

Coût de production

La somme des coûts de tout ce qu'on consomme pour produire en i une unité de m , plus la **valeur ajoutée** :

$$c_i^m = \left(\sum_n D_i^{mn} \tilde{c}_i^n \right) + VA_i^m$$

VA_i^m valeur ajoutée pour produire une unité de m dans la zone i

\tilde{c}_i^n coût de consommation d'une unité de n dans la zone i

Etape E3: coûts / prix / «désutilités»

Coût de consommation

$$\tilde{c}_i^m = \frac{\sum_j X_{ij}^n (p_j^n + tm_{ij}^n)}{\sum_j X_{ij}^n}$$

somme sur les zones

$$c_i^m = \left(\sum_n D_i^{mn} \tilde{c}_i^n \right) + VA_i^m$$

somme sur les secteurs

Etape E3: coûts / prix / «désutilités»

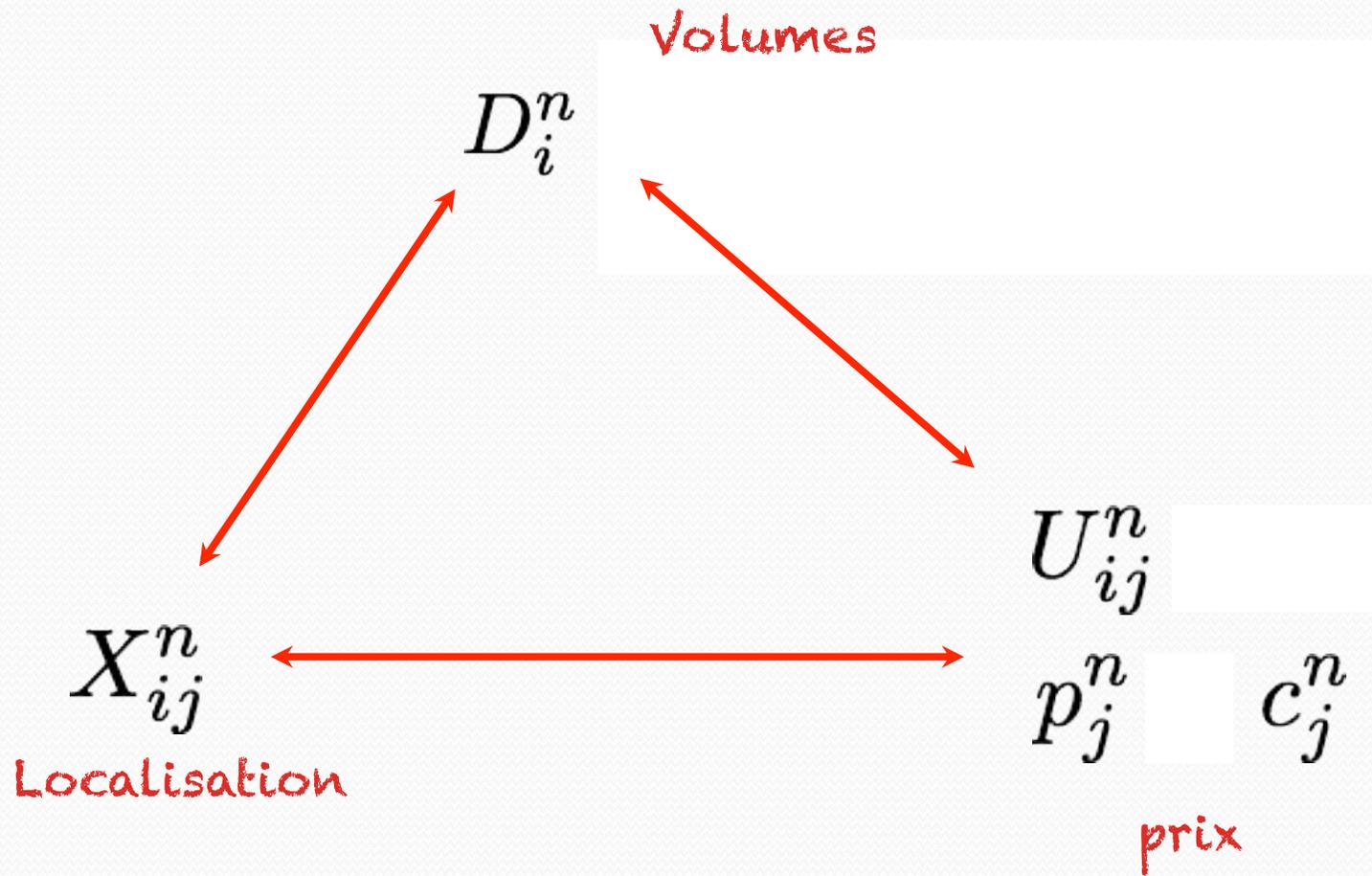
Prix

- Existence de contraintes sur la production (d'un secteur dans une zone)
- ex. quantité de surface foncière limitée
- Contraintes respectées => Prix = coût de production
$$p_j^n = c_j^n$$
- Sinon: prix déterminé de façon à ce que l'équilibre offre-demande soit vérifié.

Prise en compte: phénomènes de restrictions et concurrence !

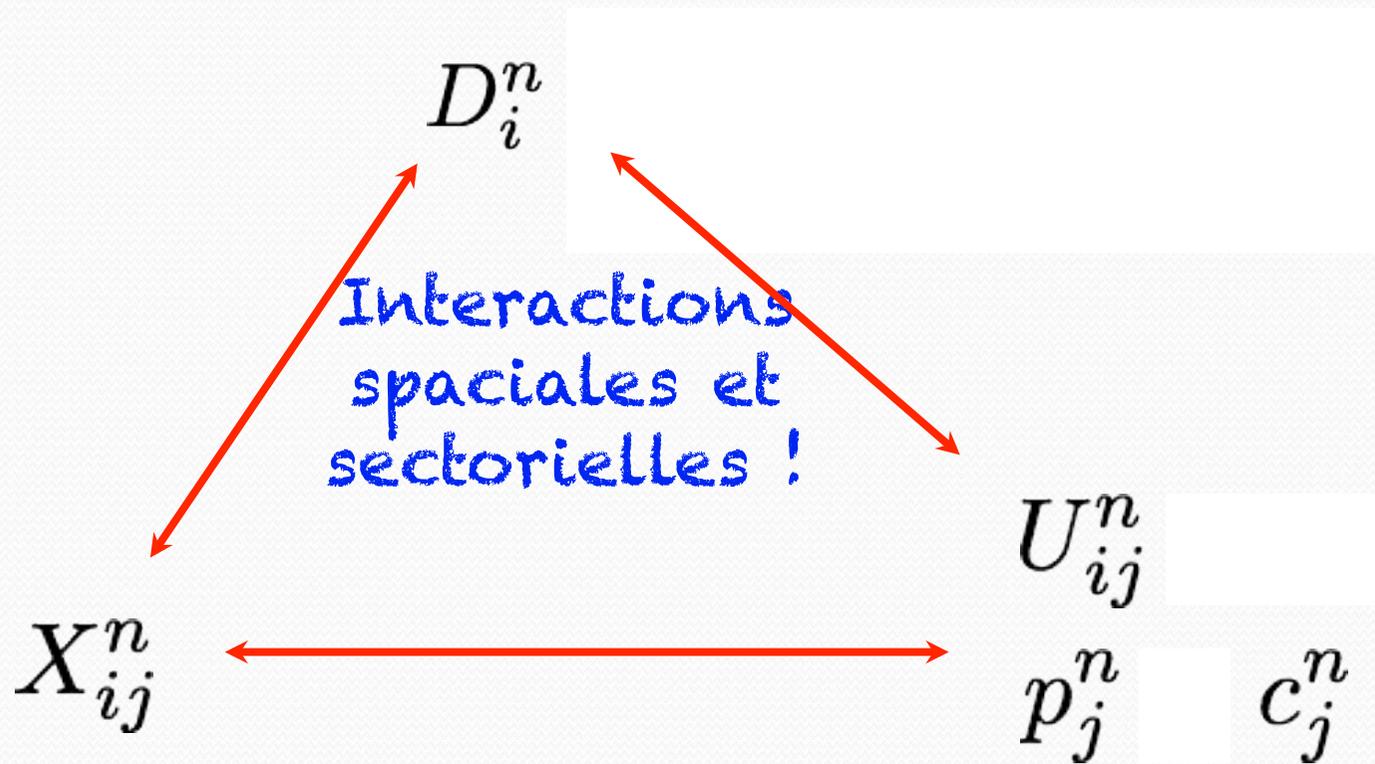
Le module usage des sols

Synthèse :

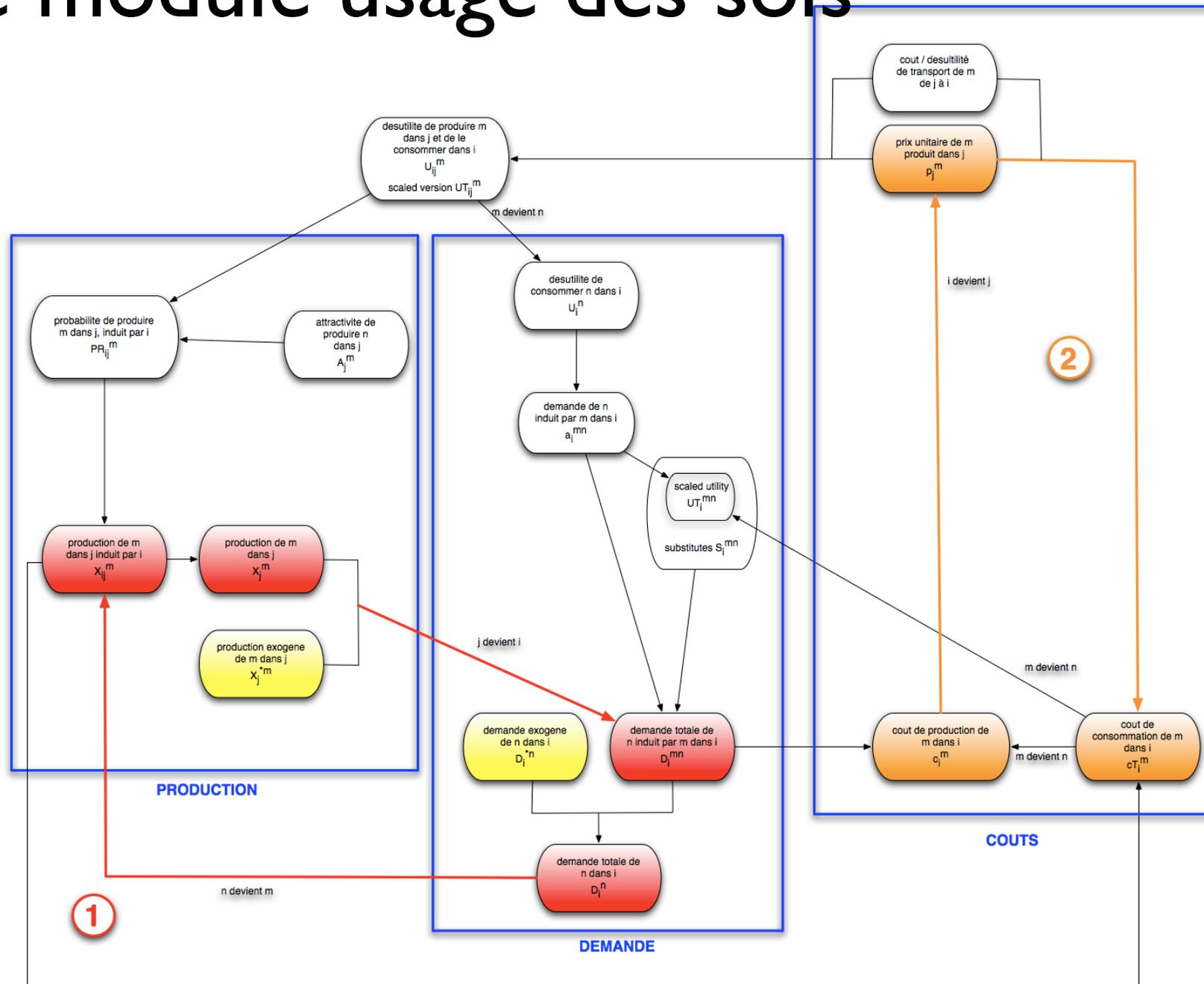


Le module usage des sols

Synthèse :



Le module usage des sols



Le module «usage des sols» de TRANUS

Mathématiquement:

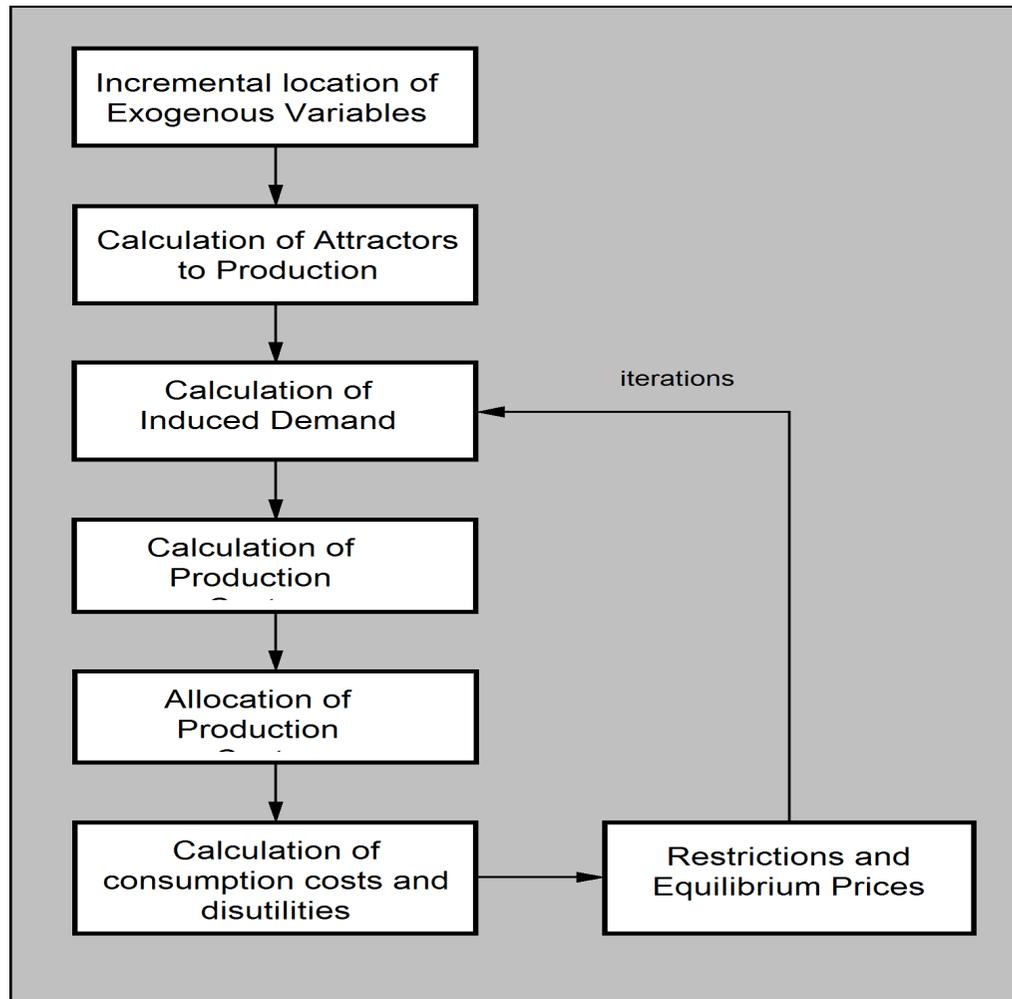
Gros système d'équations ordinaires

~ 25 équations, 10 000 000 variables / paramètres

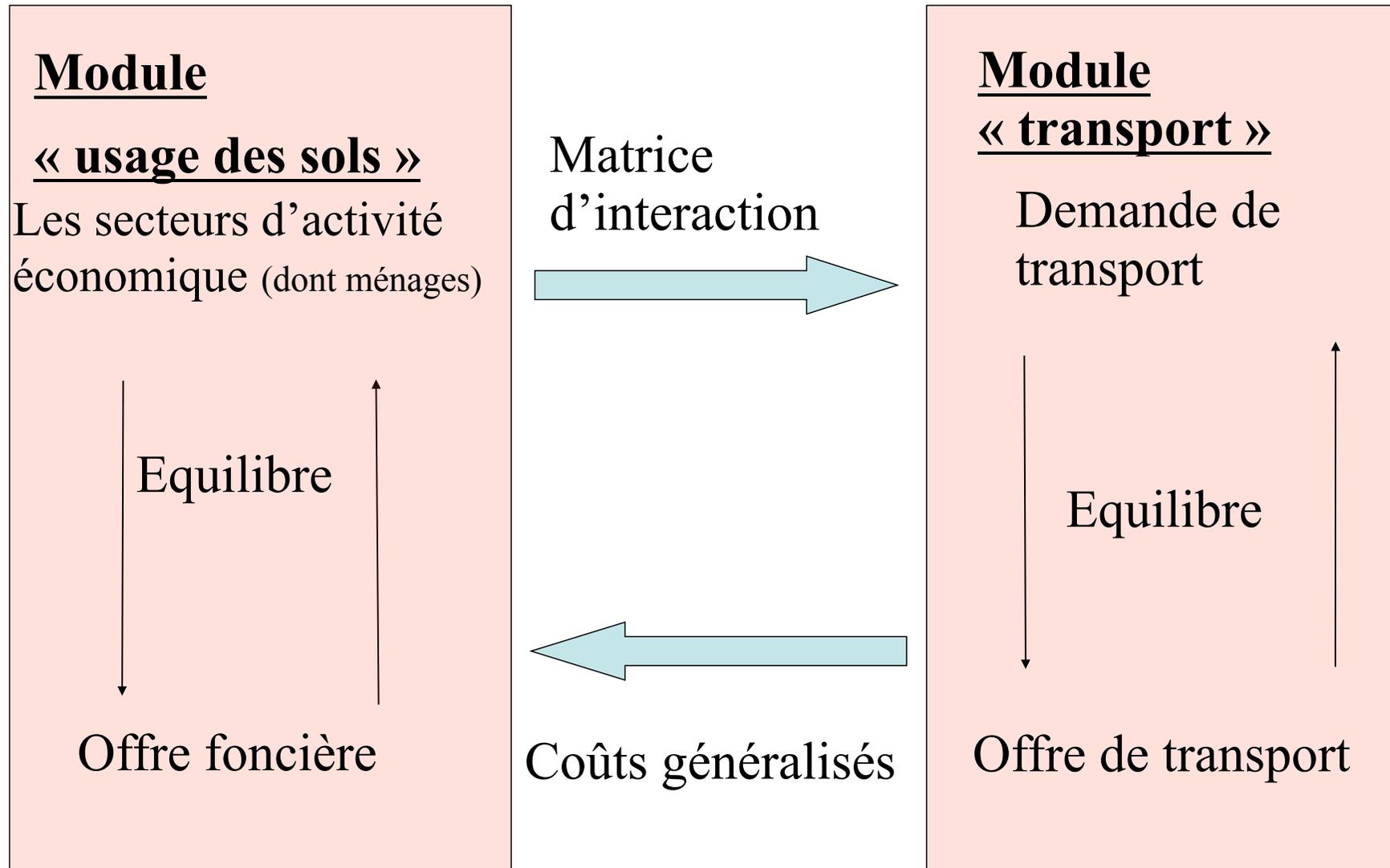
(Modèle de Grenoble)

Simulation \Leftrightarrow Calcul de la solution
de ce système

Le module usage des sols : algorithme **itératif**



La structure générale de TRANUS



Challenges en LUTI : Le calage et la validation de modèles

