



École des Ponts  
ParisTech

# La modélisation intégrée transport – usage du sol

**Nicolas Coulombel**

Université Paris – Est, LVMT

✉ : [nicolas.coulombel@enpc.fr](mailto:nicolas.coulombel@enpc.fr)

# PLAN DE LA PRÉSENTATION

---

1. Pourquoi des modèles LUTI ?
2. Les prototypes
3. Présentation générale des modèles LUTI
4. Présentation d'une application à Bruxelles
5. Présentation de UrbanSim

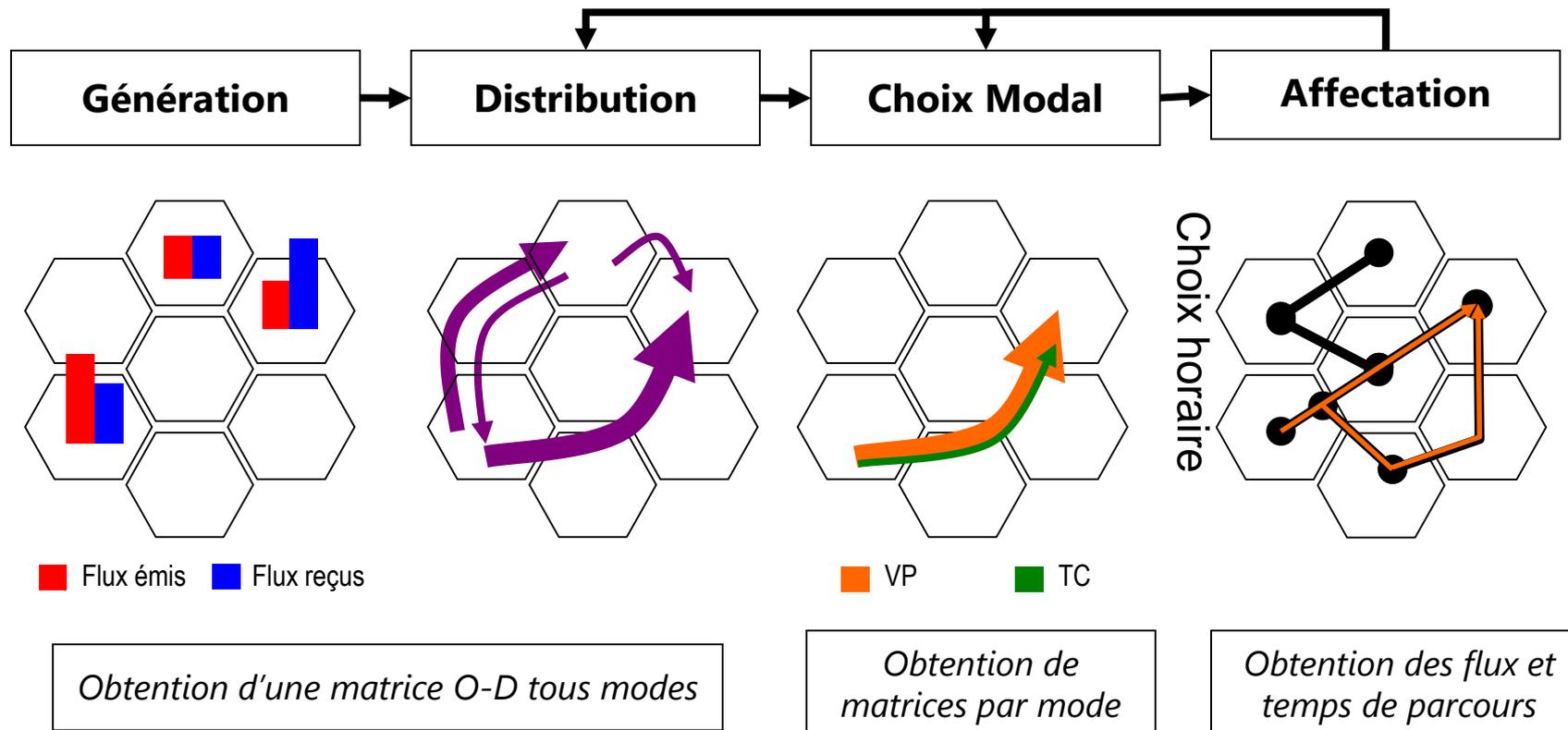
# PARTIE 1

**Pourquoi  
des modèles intégrés  
transport – usage du sol ?**

*Retour sur les modèles de transport  
et leurs limites*

# RETOUR SUR LA MODÉLISATION 4 ÉTAPES

*Bouclage par les temps de transport*



# AFFECTATION DYNAMIQUE DU TRAFIC

---

Dans modèle classique à 4 étapes, la procédure d'affectation utilise une matrice O-D à l'heure de pointe (HPM ou HPS)

- modèle de choix horaire souvent minimaliste
- hypothèse d'état permanent (*steady state*)

Modélisation dynamique du trafic

- matrice O-D HPM/HPS remplacé par matrice O-D dynamique
- modèle d'écoulement dynamique du trafic  $\Rightarrow$  calcul du PCC en dynamique

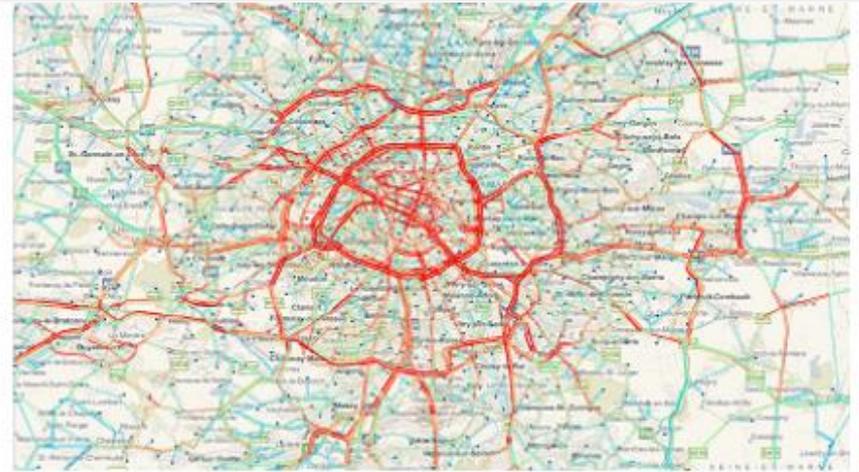
Limite

- À ce stade, pas de méthode précise pour générer la matrice O-D
- Ok pour analyses de court terme, mais quid de prospective ?

# EXEMPLE: ÉMISSIONS DE CO AVEC LADTA



(a) 04:00



(b) 08:00



(c) 12:00



(d) 18:00

# ACTIVITY-BASED MODELLING

---

Principe de base: modéliser les emplois du temps de chaque individu

- Quelles activités sont réalisées ?
- A quels horaires ?

⇒ *endogénéisation de la matrice O-D dynamique*

Illustration: modèle MATSim (cf. vidéo)

Limites

- complexité ⇒ extrêmement difficile de déterminer l'équilibre (pour peu qu'il existe et qu'il soit unique)
- calcul d'une solution approchée, considérée satisfaisante

(FCL) FUTURE 未来  
CITIES 城市  
LABORATORY 实验室

SEN0ZON

**MATSim**  
Multi-Agent Transport Simulation

# LIMITES DE MODÈLES PUREMENT TRANSPORT

---

Bonne prévision de la demande à court terme (CT)

...mais de fortes limitations à MT - LT

- en règle générale : matrice O-D renormée par un scalaire
  - au mieux : génération-distribution pour l'année horizon avec hypothèses exogènes sur distribution spatiale des ménages et des emplois
- ⇒ non prise en compte de l'impact des politiques de transport sur les choix de localisation des ménages et des emplois

# ÉTUDIER L'IMPACT D'UN PROJET SUR LE DÉVELOPPEMENT DES TERRITOIRES

---

## Justifier les nouveaux projets de transport

- des réseaux de transports matures en France  $\Rightarrow$  rentabilité en baisse (en considérant que gains de temps)
- intégrer les Wider Economic Benefits (cf. séances Evaluations)

## Demande croissante concernant les effets territoriaux

- évolution population, emploi

## Trouver des sources de financement

- être capable de mesurer l'impact sur les prix immobiliers
- permet de simuler l'effet de taxes sur les plus-values

# PARTIE 2

## Modèles LUTI : Les prototypes

# MODÈLES LUTI : LES PROTOTYPES

## LE MODÈLE DE VON THÜNEN (1826)

---

### Problématique de Von Thünen

- propriétaire agricole prussien, amateur d'économie
- possède un vaste domaine avec au centre un village et un marché
- produit ≠ biens agricoles, avec des coûts de production, de transport et des prix très variables

Question : comment rationaliser le choix et la localisation des diverses activités et productions?

- développement d'un modèle (simple) analysant comment les coûts de transport déterminent les prix fonciers et la localisation des activités agricoles
- pas encore vraiment un modèle LUTI (focus sur le lien  $T \rightarrow LU$ , peu sur  $LU \rightarrow T$ )

# HYPOTHÈSES DE BASES DU MODÈLE

---

## Espace défini par

- une plaine homogène (rendement invariant dans l'espace)
- **centre** : une ville, jouant le rôle de marché  *hétérogénéité spatiale*
- des **coûts de transport** qui varient selon les produits

## Hypothèse de l'Etat isolé

## Concurrence parfaite

- marchés concernés : tous (biens, transports et foncier)
- **rente foncière déterminée à l'équilibre**, selon le principe d'enchère

## Rendements constants

# ILLUSTRATION

---

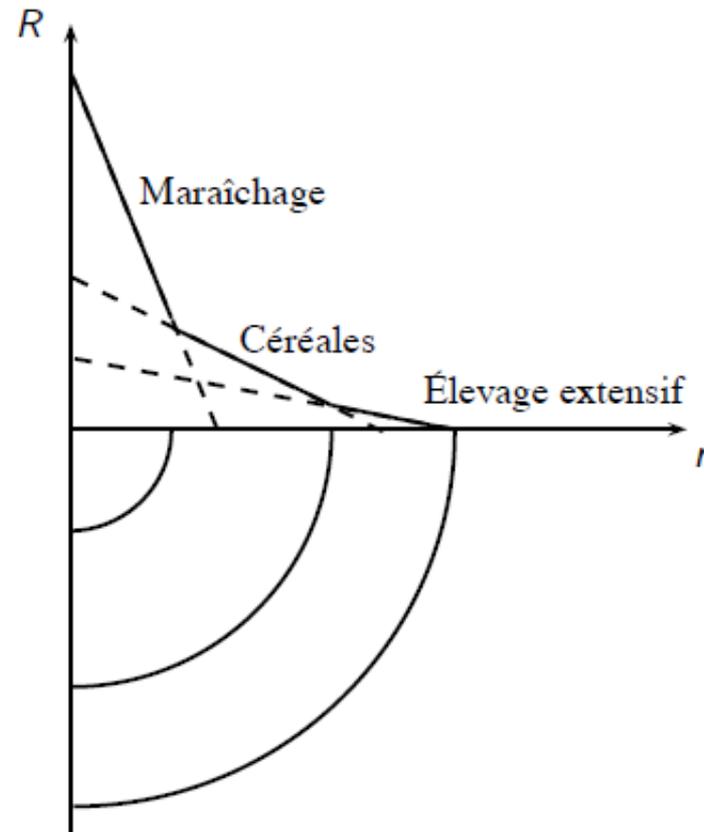


Figure: Courbes d'enchère foncière et usage du sol

# MODÈLES LUTI : LES PROTOTYPES

## LE MODÈLE MONOCENTRIQUE

---

Question posée : comment se forment les choix de localisation et les prix immobiliers au sein d'une agglomération?

Modèle canonique de la nouvelle économie urbaine : Alonso (1964), Mills (1967) et Muth (1969)

- adaptation du modèle de Von Thünen
- étant donné leur contrainte de budget, ménages cherchent le logement le + spacieux possible et le + proche du centre
- permet de déterminer les choix de localisation des ménages, les surfaces habitées et les rentes foncières (loyers)

# HYPOTHÈSES DU MODÈLE

---

## Modèle dérivé de celui de Von Thünen

- même représentation de l'espace (plaine homogène)
- marché remplacé par le centre d'affaires (*Central Business District* ou CBD)
  - le CBD concentre tous les emplois

## 2 occupations du sol possible

- habitation : loyer unitaire  $R(r)$
- agriculture : coût d'opportunité de la terre  $R_A \geq 0$
- propriétaire loue au + offrant

# REPRÉSENTATION DES MÉNAGES

---

Continuum de  $N$  travailleurs/consommateurs

Chaque ménage

- travaille dans le CBD  $\Rightarrow$  revenu  $Y$
- « commute » vers le CBD  $\Rightarrow$  coût de transport =  $T(r)$ 
  - hypothèse :  $0 \leq T(0) < Y < T(+\infty)$
- a besoin d'un logement  $\Rightarrow$  consomme une surface au sol  $s > 0$
- consomme une quantité  $z$  d'un bien composite
  - prix = 1 (numéraire)

# PROGRAMME DU MÉNAGE

---

Contrainte budgétaire

$$R(r)s + z + T(r) = Y$$

Programme résidentiel du consommateur

$$\max_{z,s,r} U(z,s) \text{ s.c. } R(r)s + z = Y - T(r)$$

- on peut raisonner en terme de revenu net  $Y - T(r)$
- **arbitrage** entre :
  - **accessibilité** au centre  $T(r)$
  - **surface**: consommation du sol  $s$

# NOTION D'ÉQUILIBRE URBAIN

---

## Problématique:

- 1 seul ménage avec courbe de prix  $R(r)$  exogène
- →  $N$  ménages avec courbe de prix  $R(r)$  endogène

Equilibre urbain: allocation de l'espace pour laquelle aucun ménage n'a intérêt à déménager

- à l'équilibre, tous les ménages ont la même utilité  $u^*$
- prix égalisent l'utilité que fournit chaque localisation

# ÉQUILIBRE URBAIN

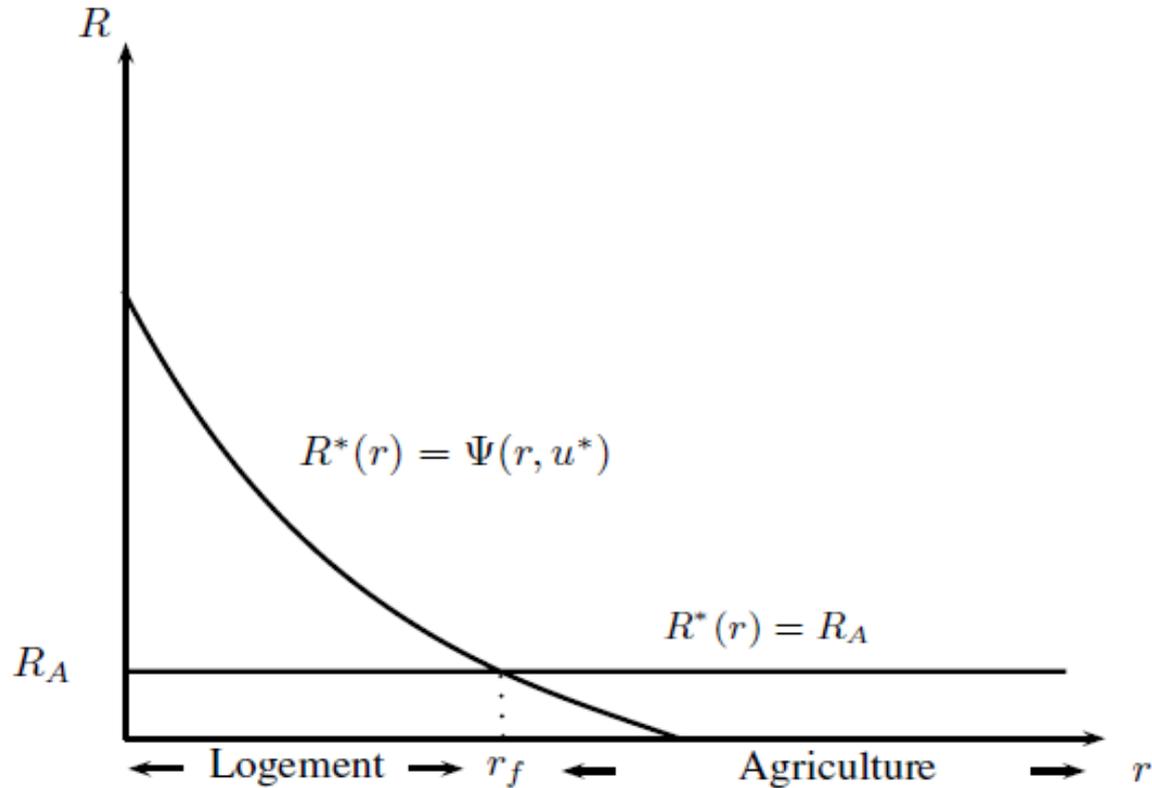


Figure: Rente foncière d'équilibre et usage du sol

# CONCLUSIONS SUR LE MODÈLE MONOCENTRIQUE

---

Dans sa version basique, toujours pas vraiment un modèle LUTI

- focus sur le lien  $T \rightarrow LU$
- mais de multiples extensions améliorent la représentation du transport (congestion, transports en commun, stationnement, ...)

Néanmoins, une influence majeure sur la modélisation LUTI

- mise en avant du rôle du transport dans choix de localisation, et *in fine* la formation des prix immobiliers
  - NB: prix égalisent l'utilité de chaque lieu  $\rightarrow$  capitalisation
- diffusion de l'**arbitrage accessibilité-surface**
  - fonctions d'utilité (choix de localisation), fonctions de prix hédoniques

# MODÈLES LUTI : LES PROTOTYPES

## LE MODÈLE DE GARIN-LOWRY

---

Modèle de Lowry (1964) souvent cité comme le 1<sup>er</sup> modèle LUTI

- Fortement amélioré, notamment au niveau de la formalisation, par Garin (1966)

Inspirations multiples:

- travaux de Hansen (1959) sur liens entre accessibilité et usage du sol
- nouvelle économie urbaine & modèle monocentrique
- théorie de la base

Modèle mécaniste expliquant la localisation des emplois et des ménages à partir des coûts de transport (exogènes)

- Encore une fois, focus sur le lien  $T \rightarrow LU$ ,,
- ,,mais modèle beaucoup + opérationnel que le modèle monocentrique

# FONCTIONNEMENT ITÉRATIF

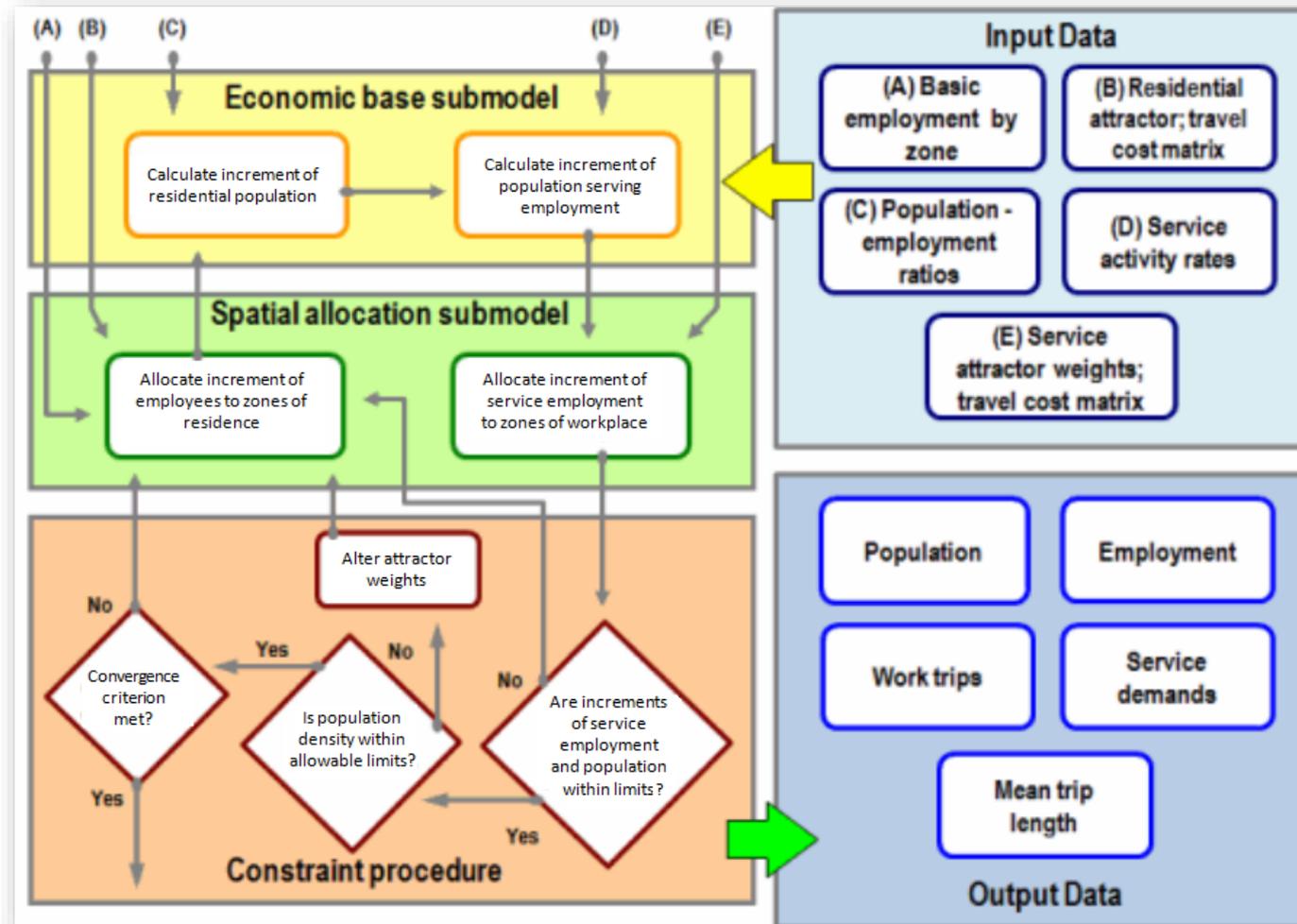
---

- 1)  $E_i$  emplois « basiques » localisés en zone  $i$
- 2) Génère  $H=u.E_i$  résidents, répartis selon la règle:

$$R_{ij} = (u \cdot E_i) \frac{w_j e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_{k=1}^N w_k e^{-\beta c_{ik}}}$$

- 3) Résidents localisés en  $j$  génèrent une demande de services « domestiques », et donc des emplois locaux  $E_j=v.R_{ij}$
- 4) Ces emplois « domestiques » génèrent des résidents...
- 5) Et ainsi de suite jusqu'à convergence...

# SCHÉMA DU MODÈLE DE GARIN-LOWRY



# CONCLUSIONS SUR LE MODÈLE DE GARIN-LOWRY

---

## Des liens marqués avec le modèle monocentrique

- demande de logement dérive de demande de travail
- coût de transport D-T au cœur du choix de localisation

## Mais une opérationnalisation + poussée

- découpage de l'aire d'étude en zones
- emplois dispersés dans l'espace
- solution facile à établir

## Un modèle pionnier pour les modèles LUTI

- en particulier les modèles spatio-économiques (cf. classification)

# PARTIE 3

## Présentation générale des modèles LUTI

# LES MODÈLES

## LAND USE - TRANSPORT INTERACTION

---

Objectif principal : analyser la coévolution des marchés immobiliers et des transports

- bouclage par l'ajout de la rétroaction transport → usage du sol par rapport aux modèles purement transport
- permet d'étudier effets de politiques de transport et/ou logement

Echelle: régionale

Résolution spatiale: variable (de macro-zones à parcelle)

Durée de simulation: typiquement 20-30 ans

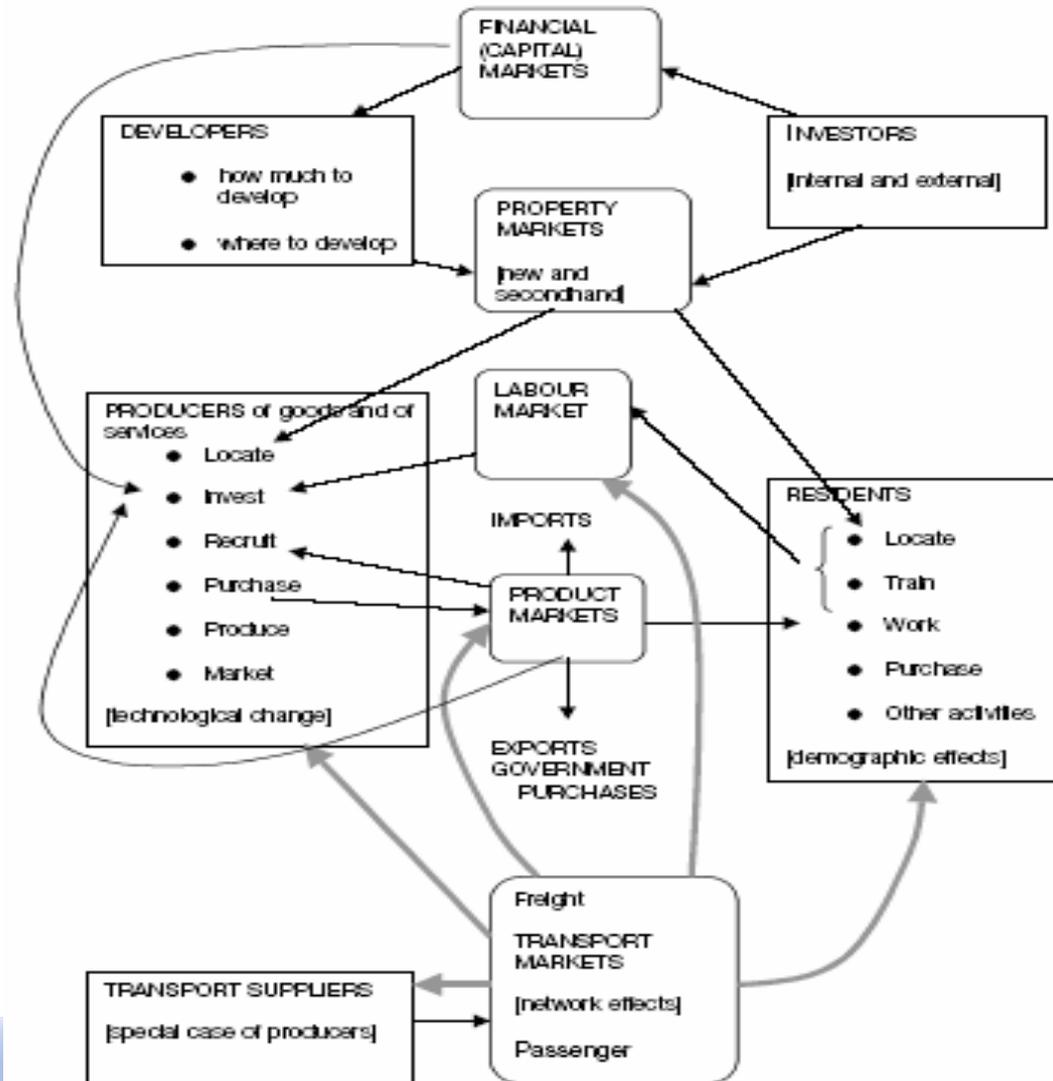
# PRINCIPAUX MARCHÉS ET ACTEURS REPRÉSENTÉS

## Marchés

- Immobilier
- Transport
- Travail
- Biens
- Financier

## Acteurs

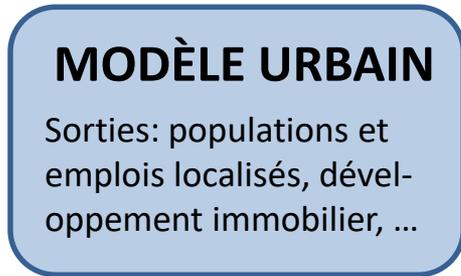
- Ménages
- Entreprises (biens/services)
- Promoteurs
- Investisseurs
- Fournisseurs de transport



# STRUCTURE TYPE D'UN MODÈLE D'INTERACTION TRANSPORT-USAGE DU SOL

Temps:  $t_0$  →  $t_1$  →  $t_2$

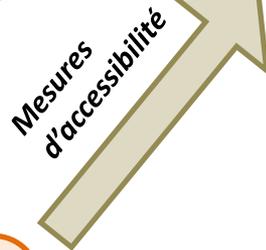
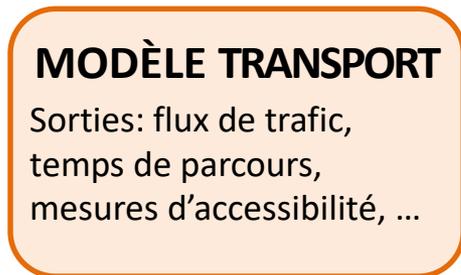
Étape 1



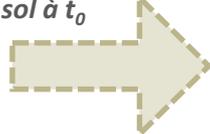
Variables  
d'occupation  
du sol



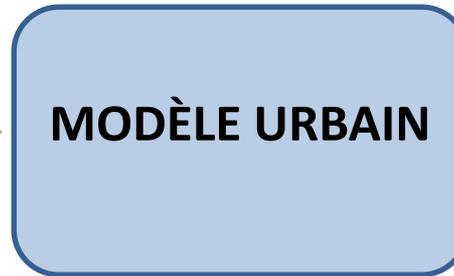
Étape 2



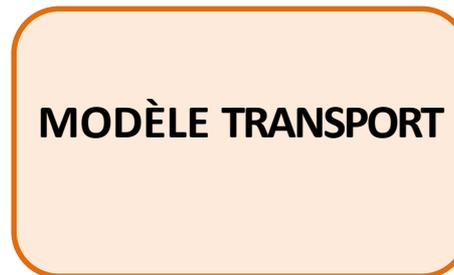
Variables  
d'usage du  
sol à  $t_0$



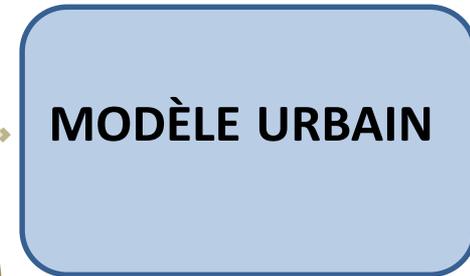
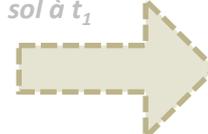
Étape 3...



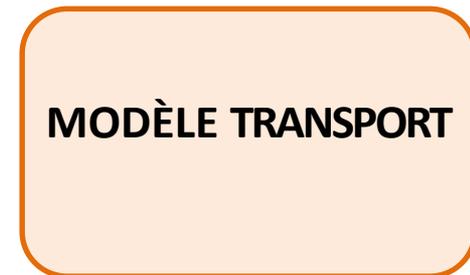
Variables  
d'occupation  
du sol



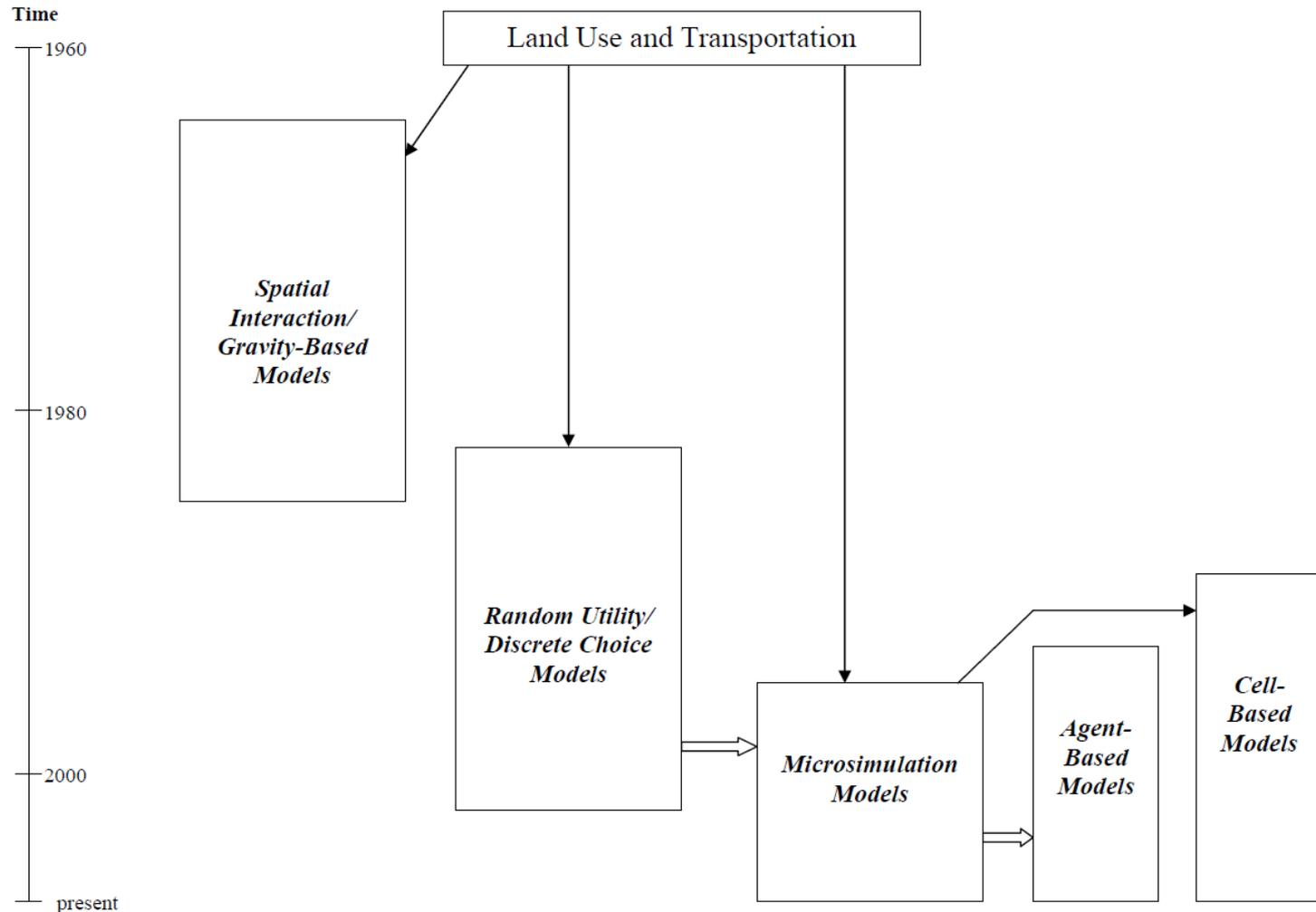
Variables  
d'usage du  
sol à  $t_1$



Variables  
d'occupation  
du sol



# UN COURT HISTORIQUE DES MODÈLES LUTI



# EXEMPLES DE MODÈLES EXISTANTS

---

TOPAZ, 1970 (Australia)

CALUTAS, 1978 (Japan)

IRPUD, 1985 (Germany)

MEPLAN, 1988 (UK)

TRANUS, 1989 (Colombia)

DELTA, 1998 (UK)

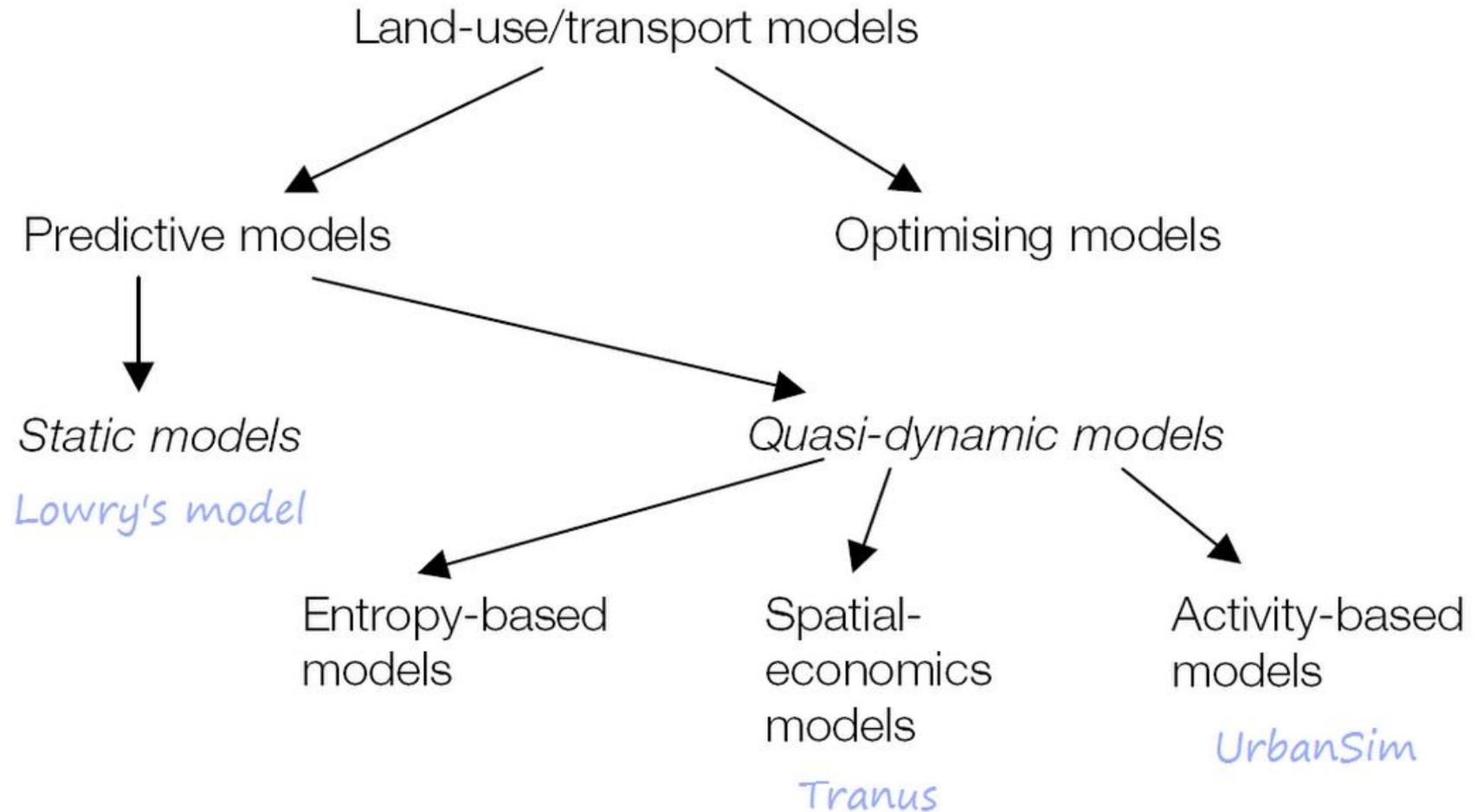
URBANSIM, 2000 (US)

PECAS, 2005 (US)

TIGRIS, 2006 (Netherlands)

# CLASSIFICATION DES MODÈLES

---



# ANALYSE COMPARATIVE DES 2 GRANDES FAMILLES DE MODÈLES LUTI

## Modèles d'interaction spatiale

- Exemples : Lowry, Tranus, NEDUM-2D...
- Nature relativement agrégée
- Modèles d'équilibre
- Choix de localisation, éventuellement suivi du choix du type de lgt

## Modèles « activity-based »

- Exemples : UrbanSim, RAMBLAS, ...
- Désagrégé (souvent micro-simulation)
- Modèles de déséquilibre
- Décision de déménager, puis choix du lgt

## Par-delà les différences, de multiples points de convergence

- fondement micro-économique des modèles
- influence de l'économie urbaine
- prépondérance des modèles de choix discrets
  - tendance à la « statistisation »
- représentation ad minima des ≠ statuts d'occupation

# MODÉLISATION DU MARCHÉ DU LOGEMENT

---

## Offre de logement

- comment caractériser l'offre? → typologie de logements
- comment modéliser la formation de l'offre?
  - Modèles d'équilibre: offre totale (fonction du système de prix)
  - Modèles de transition: développement immobilier + reconversions (nettes) - démolitions + vacance par mobilité des ménages

## Demande de logement

- comment se forme le niveau de demande?
  - Modèles d'équilibre: population totale (ou dérivée de l'emploi basique total)
  - Modèles de transition: décisions de déménagement + nouveaux ménages
- comment modéliser le choix de localisation?

# INTERACTIONS OFFRE - DEMANDE

---

Prix jouent un rôle central dans l'équilibrage Offre - Demande

- Modèles d'équilibre: intrinsèquement
- Modèles de transition: ajustement des prix vont + ou - équilibrer l'offre et la demande
  - à CT: via les choix de localisation
  - À MT: via le développement immobilier

Problèmes liés à l'analyse du prix du logement (pour modèles de transition)

- logements ont des caractéristiques très diverses → méthodes des **prix hédoniques**
- interaction entre niveau des prix, offre et demande → estimation jointe des prix et des choix de localisation

# PARTIE 4

## Une expérience de modélisation LUTI

*Le cas bruxellois*

# LE PROJET SCATTER

---

## Etude de l'étalement urbain et de ses conséquences

- cadre d'étude : 6 villes européennes, Bruxelles, Bristol, Stuttgart, Rennes, Milan et Helsinki
- analyse bibliographique et simulations à l'aide de modèles LUTI

## Objectifs

- définir les meilleures politiques en terme de transport et d'urbanisme pour lutter contre l'étalement urbain

# LE CONTEXTE BRUXELLOIS

---

## Un centre ville en perte de vitesse

- un peu moins d'1 million d'habitants (population de Bruxelles : 2,7 millions hab.)
- -120 000 habitants sur 30 ans

## Une politique ambitieuse de RER pour améliorer l'accessibilité au centre

- 9 nouvelles lignes desservant les zones à forte densité ou se densifiant

## Un risque : l'étalement urbain

- risque mis en évidence par le projet ESTEEM

# POURQUOI UN MODÈLE LUTI À BRUXELLES ?

---

Divers mécanismes économiques doivent être représentés

- analyser l'étalement urbain nécessite de prendre en compte aussi bien le système de transports que le système d'activités

Une combinaison de politiques à tester

- du fait des résultats de l'étude ESTEEM, il convient de tester un mélange de politiques de transports (avec comme politique centrale la nouvelle offre RER), et de politiques d'urbanisme

# PRÉSENTATION DU MODÈLE LUTI BRUXELLOIS

---

Modèle utilisé : TRANUS

7 segments de ménages, dont 5 sont endogènes

- cadres célibataires ou en famille, *blue - collar* célibataires ou en famille, étudiants, retraités, inactifs

13 secteurs d'activités, dont 3 endogènes

- secteurs endogènes : *private local services*, *retail trade* et *business local services*
- secteurs exogènes : agriculture, industrie, tertiaire lourd, administration belge, organisations internationales (OTAN, Commission Européenne...)

3 types de terrain

- résidentiel à haute et faible densité, zone d'activité mixte

# LES SCÉNARIOS TESTÉS

---

Référence

Implantation du RER

Mesures prioritaires

- développement du bus, amélioration des vitesses commerciales, réduction de capacité du réseau routier, amélioration de la qualité de vie dans le centre

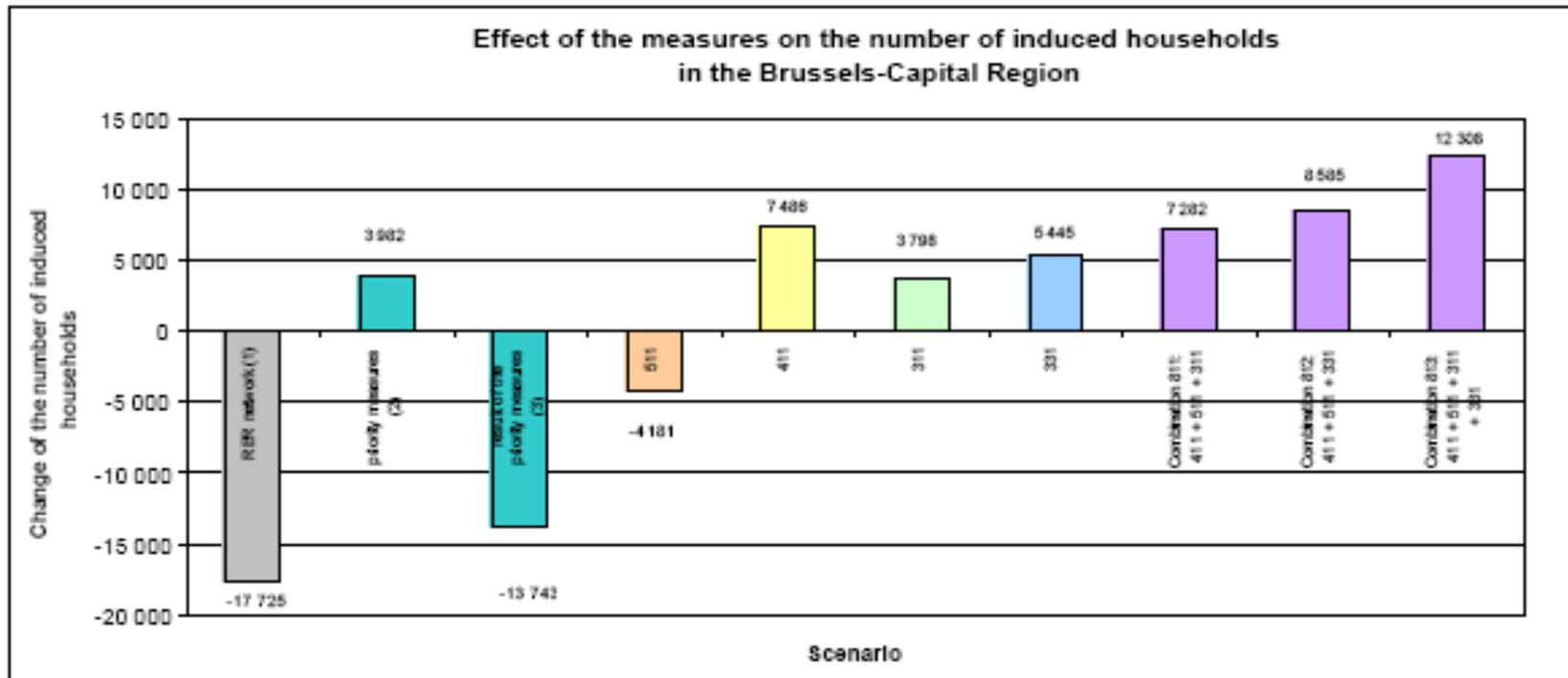
Réduction du prix des TC

Accroissement du coût d'usage de la voiture

Politiques fiscales sur le foncier

Combinaisons

# LES MÉNAGES INDUITS EN ZONE CENTRALE



**Types of scenarios:**

	2021 RER network		Decrease of PT fare		Fiscal measure on households
	Priority measures (new 2021 reference)		Increase of car use cost		Fiscal measure on services to business
					Combination of measures

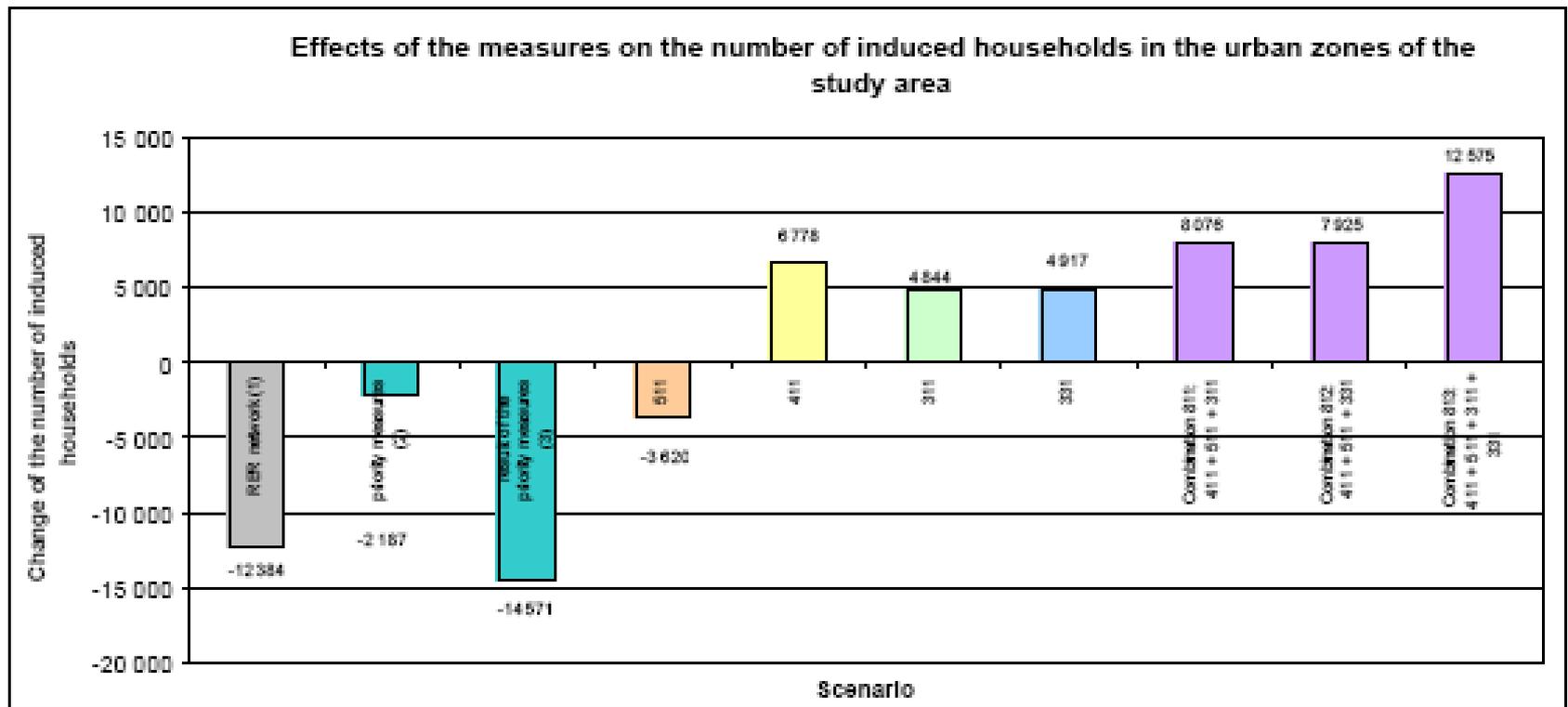
(1) The effect of the RER network is calculated in comparison with the 2021 reference scenario

(2) The effect of the priority measures is calculated in comparison with the 2021 RER scenario

(3) The effect of the priority measures is calculated in comparison with the 2021 reference scenario

The effects of the other measures are calculated in comparison with the priority measures

# LES MÉNAGES INDUITS EN ZONE URBAINE



Types of scenarios:



2021 RER network



Priority measures

(new 2021 reference)



Decrease of PT fare



Increase of car use cost



Fiscal measure on households

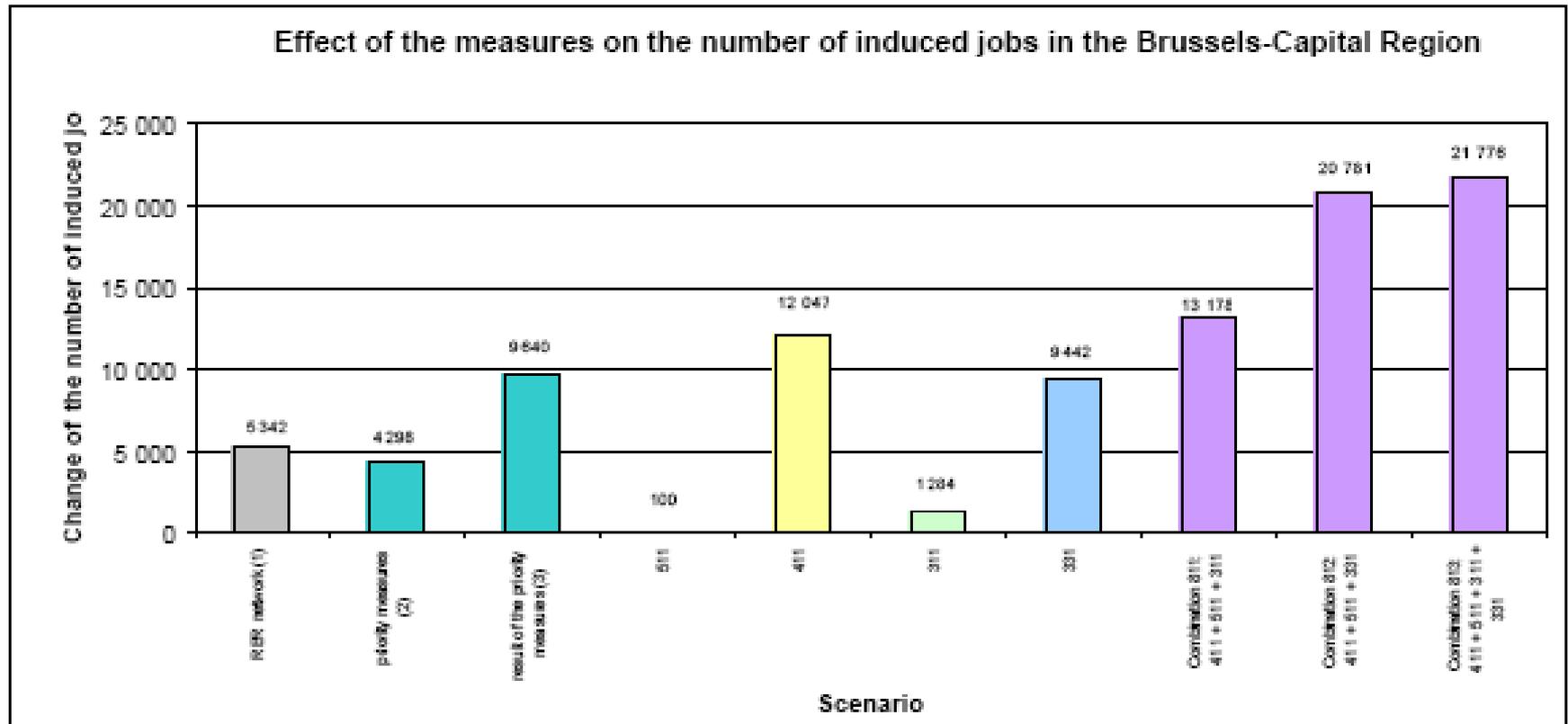


Fiscal measure on services to business



Combination of measures

# EMPLOIS INDUITS EN ZONE CENTRALE



Types of scenarios:

2021 RER network

Priority measures

(new 2021 reference)



Decrease of PT fare

Increase of car use cost



Fiscal measure on households

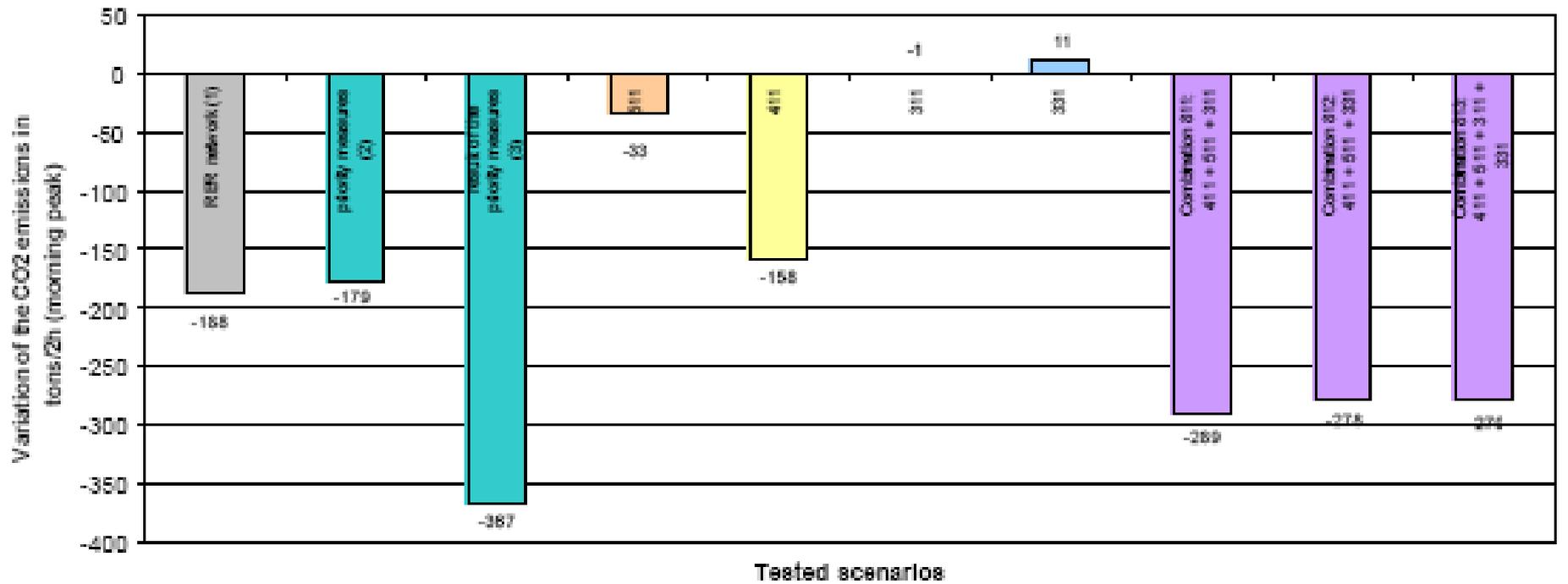
Fiscal measure on services to business



Combination of measures

# EFFETS ENVIRONNEMENTAUX

Effect of the measures on the CO2 emissions due to transport at the morning peak hours (7h-9h)



# PARTIE 5

## Présentation de UrbanSim

# URBANSIM EN QUELQUES MOTS

---

## Un logiciel libre...

- développé par Paul Waddell à Seattle
- renommé OPUS et version 4.3 en développement à Berkeley

## De modélisation urbaine

- but: étudier l'évolution de la localisation des emplois et des ménages sur un territoire

## Basé sur la micro-simulation

- chaque ménage, individu, emploi, est représenté séparément
- utilisation extensive des modèles de choix discret

# UNITÉ GÉOGRAPHIQUE D'ANALYSE

---

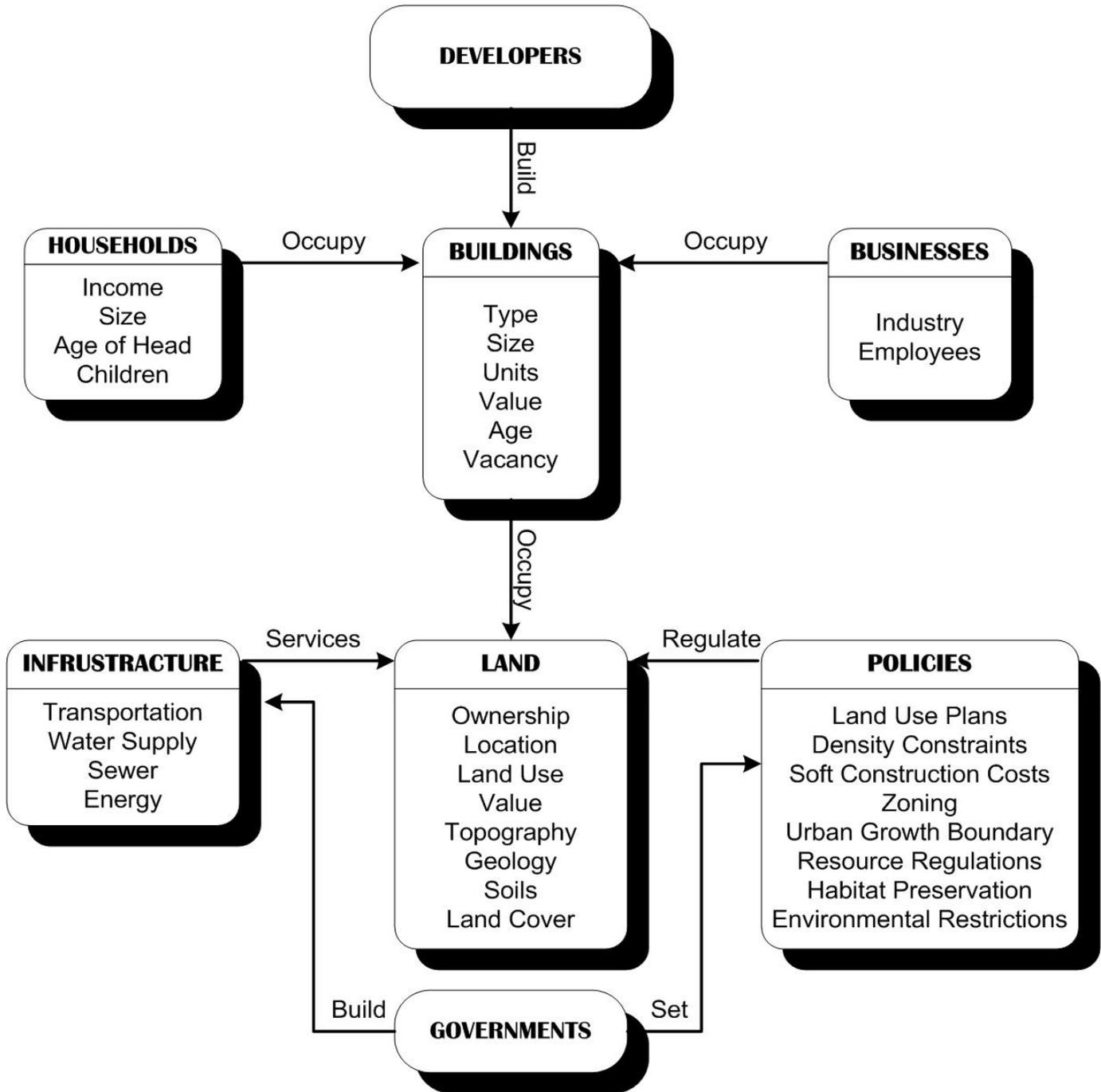
3 types de zonage

possibles :

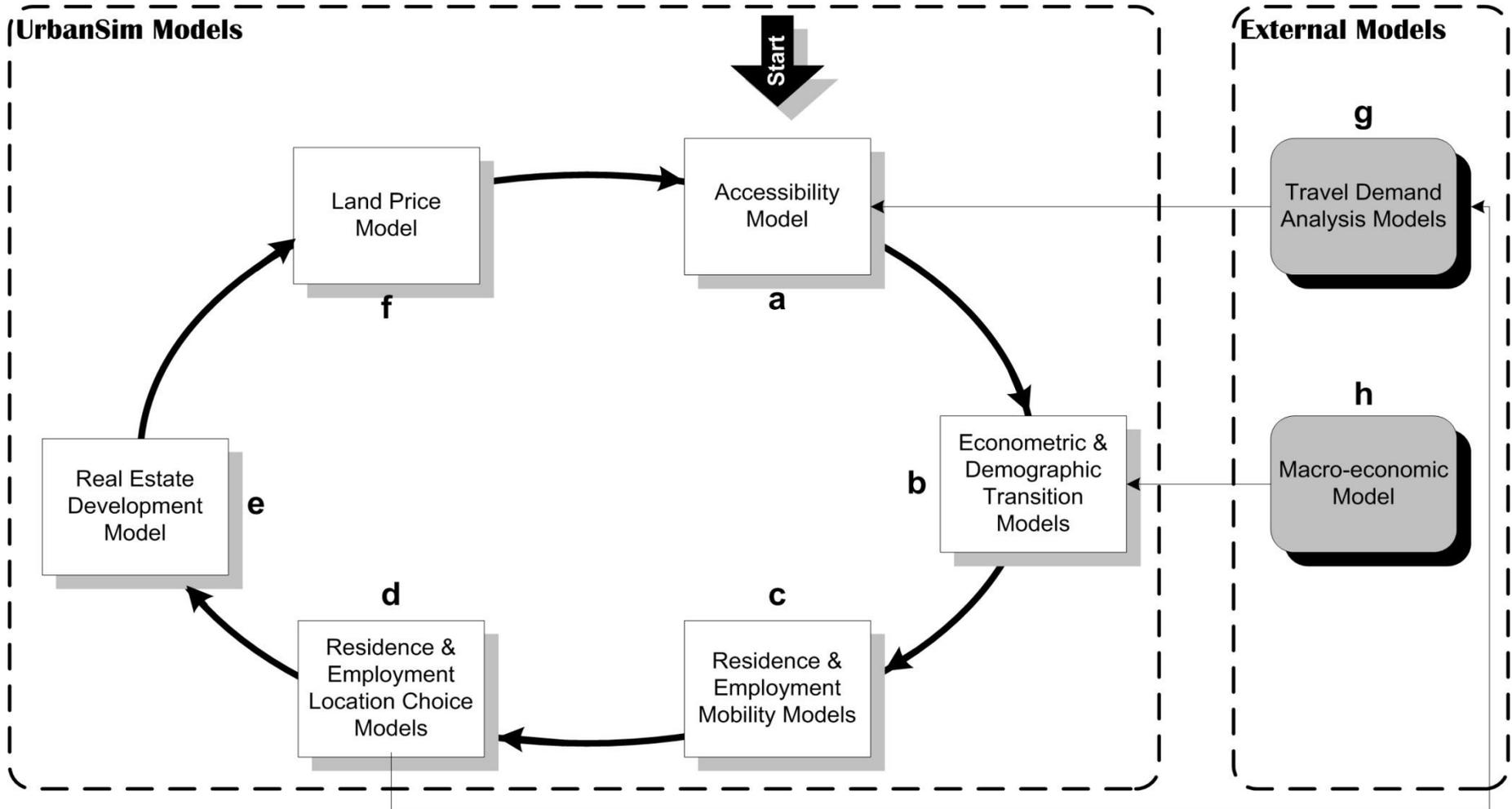
- grille carrée
- zone cadastrale
- zone quelconque



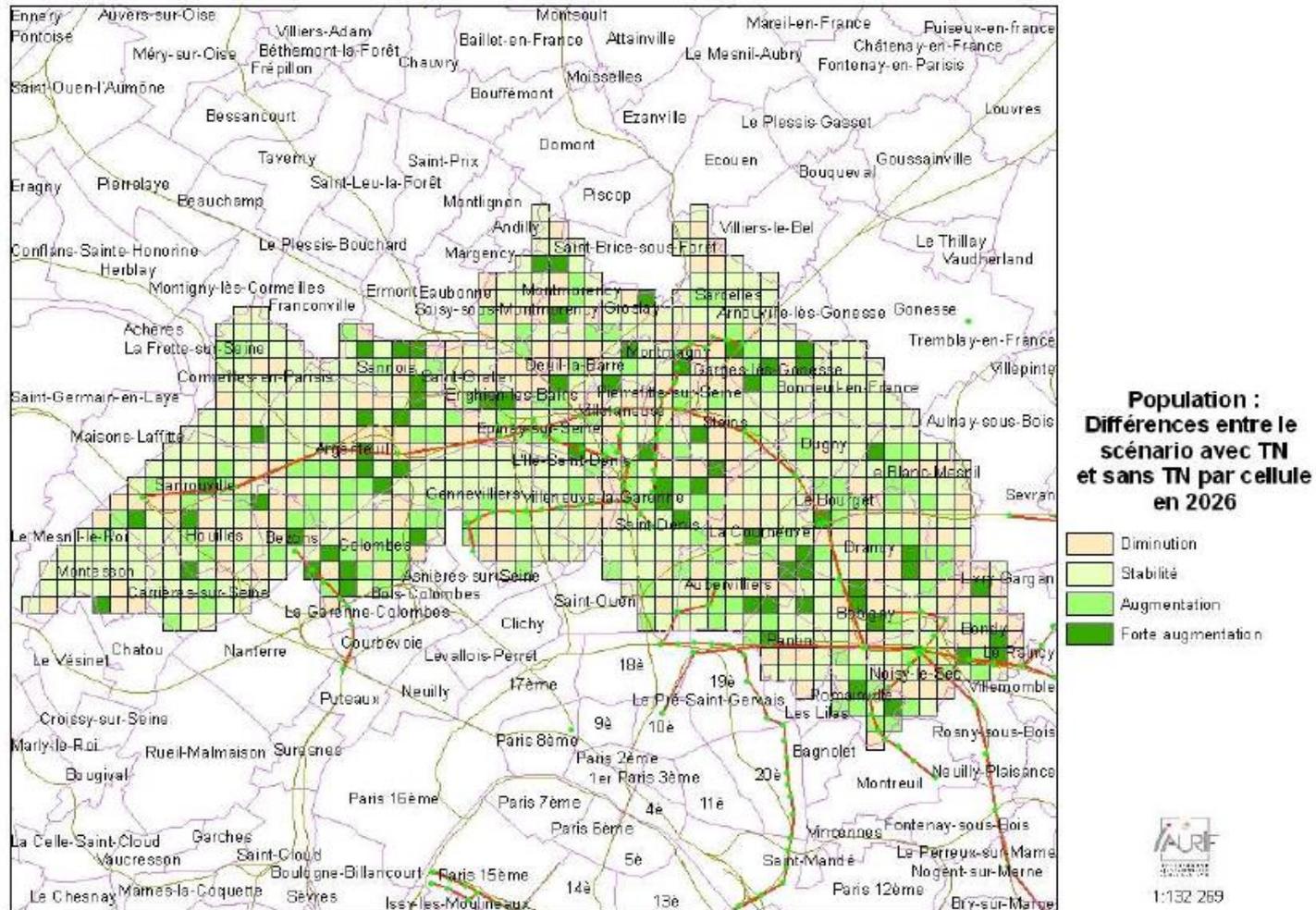
REVUE  
DES  
PRINCIPAL  
ES  
ENTITÉS



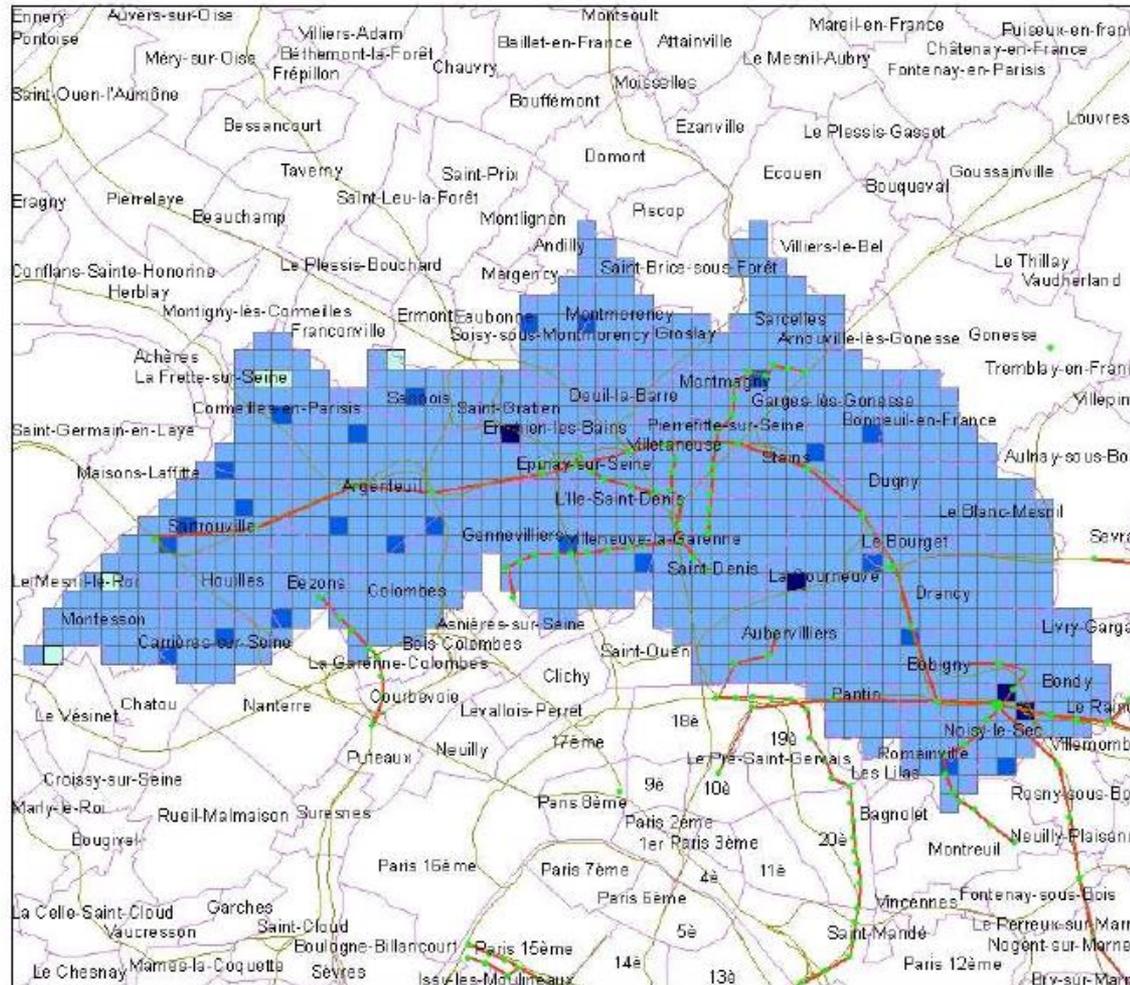
# LE CYCLE DE SOUS-MODÈLES



# ILLUSTRATION : APPLICATION TANGENTIELLE NORD ÉVOLUTION DE LA POPULATION



# ILLUSTRATION : APPLICATION TANGENTIELLE NORD ÉVOLUTION DES EMPLOIS



**Emplois :**  
Différences entre le  
scénario avec TN  
et sans TN par cellule  
en 2026



# PARTIE 6

## Présentation du projet ANR CITIES

# DÉFINITION: CALIBRATION

---

Dans le projet d'article : calibration = estimation des paramètres des modèles

- Exclut le processus de va-et-vient avec la spécification du modèle (choix des variables, des modules)
- Intrants pour la calibration : données + connaissance préalable

Question de vocabulaire

- Si calibration à la main, ou choix des paramètres à dire d'expert : peut on encore parler d'« estimation » ?

# CALIBRATION : 3 PRINCIPAUX ÉLÉMENTS

---

## Stratégie de calibration :

- Piecewise
- Limited view (ou blackbox)
- Simultaneous
- Sequential
- Bayesian Sequential (*utile à distinguer?*)

## Formulation du problème

- Fonction objectif + contraintes

## Méthode de résolution

- Outils numériques + stratégie de leur application

# DÉFINITION: VALIDATION

---

Pas encore de définition arrêtée: « A model should be validated against its intended usage, which in the case of LUTI models typically involves simulations for a future horizon. »

- Validation liée à l'usage prévu pour le modèle
- Mais ceci vaudrait alors aussi pour calibration, qui est pourtant perçue comme une étape + objective?
  - Article Hunt 2001a qui met en évidence sensibilité des résultats à la fonction objectif utilisée pour la calibration

Capacité prédictive du modèle peut être testée en confrontant résultats d'une simulation à des données non utilisées pour la calibration : échantillon d'apprentissage vs échantillon test

- Validation historique = 1 forme spécifique de cette méthode

« It is widely acknowledged that an appropriate usage of LUTI models may not be in interpreting model outcomes as accurate predictions, but rather as general trends. A more "behavioral" validation may thus be in order, including assessment by experts or sensitivity analysis »

- Validation « objective » vs. Validation « subjective »
- Même dans la validation objective: subjectivité dans choix des indicateurs et des seuils pour dire si modèle est validé ou non...

# RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES

---

Pas de consensus sur la méthode de calibration et de validation des modèles LUTI

- Forte dépendance aux données, au type de modèle...

Calibration : quelques tendances se dessinent:

- Activity-based models: prédominance de la calibration « piecewise »
- Spatial-economics models : prédominance de la calibration « limited view », puis « sequential »
- Stratégie « simultaneous » et « bayesian sequential » sont rares à inexistantes
- Utilisation de « prior knowledge »: très rare sous forme de contrainte sur paramètres, parfois faite à la main (le dire d'expert)

# RÉSULTATS INTERMÉDIAIRES - VALIDATION

---

Validation historique assez fréquente, mais peu de recul sur indicateurs choisis

- Souvent indicateurs zonaux agrégés (pop totale, emploi total):
  - reflète qu'une partie des modules, il faudrait regarder des distributions croisées
- Utilisation discutable du  $R^2$
- Peu de réflexion sur des valeurs correctes, ou comparaison à un modèle « naïf »:
  - pour modèles activity-based: indicateurs portent souvent sur valeurs totales, pas sur le  $\Delta$ , ce qui avec le poids de l'histoire aide beaucoup

Validation par analyse de sensibilité existe, le + souvent sous forme de scénarios

- Mais si on se fie au dire d'expert, à quoi sert le modèle?

Propagation des incertitudes se développe, mais encore assez rare...