

## 2.2. Outils et modèles pour la compréhension et l'exploration des dynamiques spatiales urbaines

*Arnaud Banos – CNRS, Alexis Drogoul – IRD, Benoît Gaudou –  
université de Toulouse, Huỳnh Quang Nghi – université de Cần Thơ,  
Trương Chí Quang – université de Cần Thơ, Võ Đức Ân – MSI-IFI*

La représentation d'un système réel dans toute sa complexité pour en mesurer les évolutions possibles, ou pour concevoir des solutions d'aménagement qui lui soient adaptées, est l'un des enjeux des recherches actuelles en modélisation informatique. Complémentaire des méthodes analytiques classiques, l'approche permet de concevoir des modèles dont la dynamique est la résultante des interactions entre des représentations informatiques des entités du système modélisé (acteurs, institutions, environnement, aménagements, etc.). Ces modèles servent ensuite de support à une démarche expérimentale « virtuelle » – faisant appel à des simulations – où les dynamiques résultantes peuvent être étudiées avec tous les détails nécessaires et où l'interaction avec l'utilisateur est encouragée.

L'objectif de l'atelier est de sensibiliser les stagiaires aux méthodologies de

modélisation informatique des phénomènes de croissance urbaine. S'appuyant sur un cas d'étude concernant l'évolution d'une partie de la ville de Cần Thơ (delta du Mékong) entre 2000 et 2010, les points suivants sont abordés : les modèles de croissance urbaine ; les aspects méthodologiques de constitution d'un corpus de données (géographiques, urbaines, sociales) nécessaires à toute modélisation (systèmes d'information géographiques – SIG, images satellites, résultats d'enquêtes) ; la construction de modèles de croissance urbaine dans la plateforme de modélisation Gama et leur exploration par simulation en fonction de la question initiale. Les stagiaires sont répartis en groupes de travail dont l'objectif est d'enrichir deux des modèles présentés en incorporant de nouvelles données et de nouvelles règles. Chaque groupe est amené à récapituler la méthodologie présentée durant les deux premières séances.

*La veille de l'ouverture de l'atelier, les stagiaires se retrouvent autour des formateurs afin d'installer les logiciels nécessaires à la formation.*

## Journée 1, jeudi 24

*La première partie de l'atelier est consacrée à la présentation des stagiaires et des intervenants (cf. biographies des formateurs, liste des stagiaires placée en fin de chapitre). Durant le tour de table, chacun doit présenter son voisin selon l'organisme de rattachement, les recherches en cours et les attentes de la formation.*

### [Alexis Drogoul]

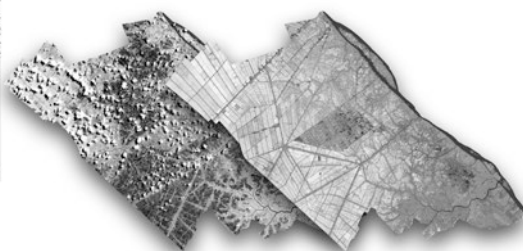
Vous avez vu au cours des séances plénières un certain nombre de défis posés par l'urbanisation croissante et l'augmentation de l'urbanisation dans le monde. Dans cet atelier, nous allons nous placer dans le cadre précis de décideurs, d'aménageurs. Vous allez devoir à la fois comprendre la dynamique d'un système urbain, anticiper et prévoir les changements futurs de ces systèmes, les décrire et les évaluer mais également explorer des politiques d'aménagement.

Nous allons nous intéresser principalement aux modèles de morphogenèse urbaine ou bien de croissance urbaine, c'est-à-dire des modèles représentant l'évolution de l'inscription spatiale de la ville dans

### Carte 16 Exemple de Cần Thơ



Satellite and aerial images, GIS data  
Different points in time: 1999, 2005, 2010, 2014



Source : construction de l'auteur.

son environnement physique. Pour comprendre cette dynamique, nous allons construire des modèles qui vont avoir besoin d'un grand nombre de données souvent hétérogènes : imageries satellitaires, photographies aériennes, enquêtes, études de terrain, etc. Ces données seront combinées en fonction de l'objectif donné au modèle pour comprendre comment le système social, urbain et environnemental évolue.

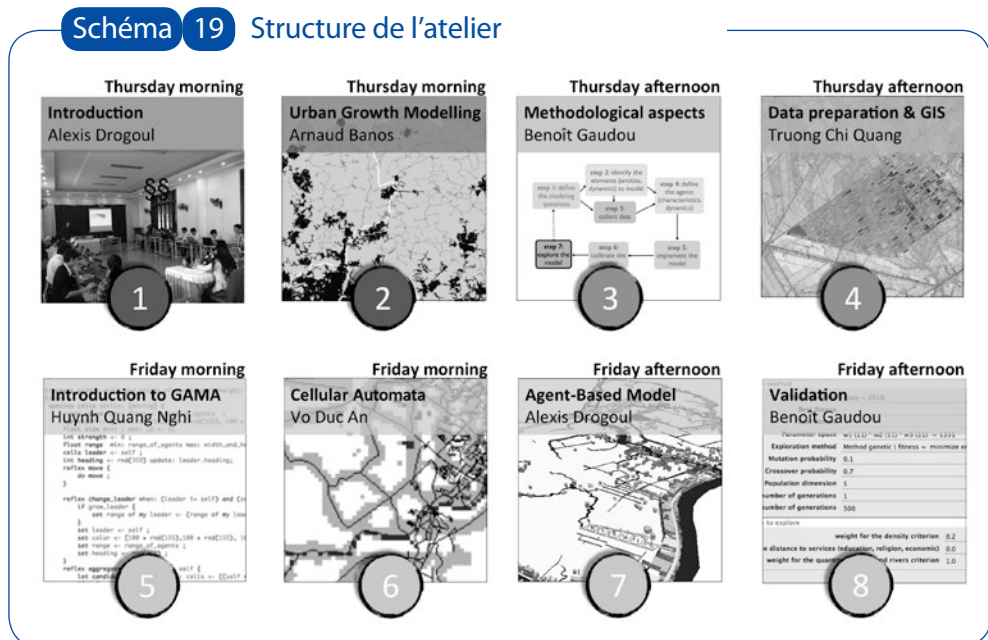
La formation mettra en lumière différents aspects méthodologiques des questions de recherche et d'application. Nous essayerons de retransmettre un savoir qui, sans vous rendre autonome, vous sensibilisera à une

dimension méthodologique utilisée dans certains projets d'urbanisme.

Toutes les sessions théoriques ainsi que les exercices pratiques utiliseront une même base de données créée par les formateurs qui concerne la ville de Cần Thơ. (cf. carte 16)

Cần Thơ est aujourd'hui la plus grande des villes du delta du Mékong et sa dynamique est l'une des plus fortes au cours des dix dernières années. Nous disposons en outre d'un riche ensemble de données historiques sur la ville.

Au niveau théorique, la formation s'organise ainsi :



Source : construction de l'auteur.

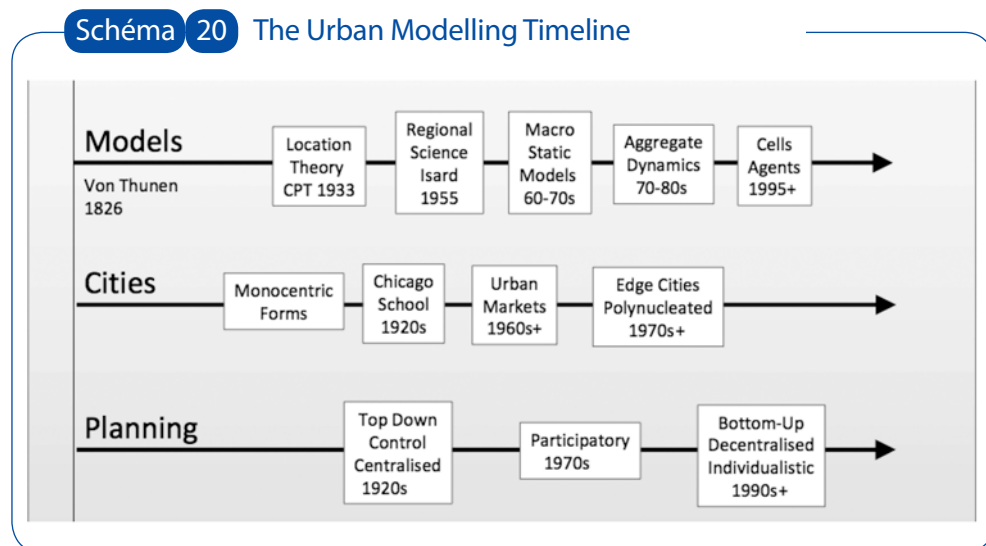
Arnaud Banos passera tout d'abord en revue différents modèles de croissance urbaine, s'attardera sur les questions et les enjeux de ces modèles. Dans l'après-midi, Benoît Gaudou traitera des aspects méthodologiques de construction d'un modèle puis Trương Chí Quang abordera la question de la collecte et du traitement des données. La journée de vendredi sera consacrée à l'outil de modélisation et de simulation et à la présentation de deux modèles représentatifs de modélisation urbaine – automates cellulaires et modélisation à base d'agents utilisant des informations vectorielles. Les deux derniers jours seront consacrés aux travaux pratiques sous forme de groupes de travail – un

formateur pour quatre stagiaires – ; deux présentations orales par groupe en atelier sont prévues avant la restitution par deux d'entre vous le samedi.

## 2.2.1. Modèles de croissance urbaine

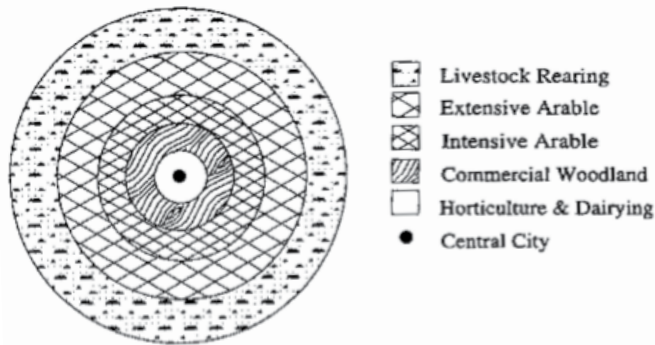
[Arnaud Banos]

La modélisation urbaine a un historique important, ses transformations sont liées à l'évolution de la vie et à la manière de planifier la croissance urbaine. Le modèle élaboré par von Thunen est fondamental car il est au cœur de l'économie spatiale et de la géographie urbaine.



Source: Batty, 2014.

## Schéma 21 Von Thunen Model



Source : von Thunen, 1842.

Von Thunen est un propriétaire foncier qui a observé des régularités dans la manière dont les villes s'organisent avec leurs campagnes. Au XIX<sup>e</sup> siècle, les villes sont alimentées par les campagnes. Von Thunen met en avant des cercles concentriques de culture autour de la ville caractérisés par un passage progressif de l'intensif vers

l'extensif et, à l'extrême périphérie, des terres non cultivées. À cette époque, la valeur agricole du sol est liée à sa fertilité ; von Thunen part en revanche de l'idée que la valeur foncière dépend de sa distance au marché. Il définit un modèle théorique à partir des hypothèses suivantes :

### Encadré 11 Construction du modèle de von Thunen

- Le système ville-campagne est autonome (clos).
- Le milieu physique est plat (aucun obstacle naturel).
- Les qualités du sol et les conditions climatiques sont homogènes.
- Les producteurs minimisent leurs coûts à la distance.
- Les producteurs maximisent leurs profits.

$P$  = profit d'une culture donnée à un marché  $P$

$D_i$  = distance d'un point  $i$  au marché

$\beta$  = coût de transport par unité de distance

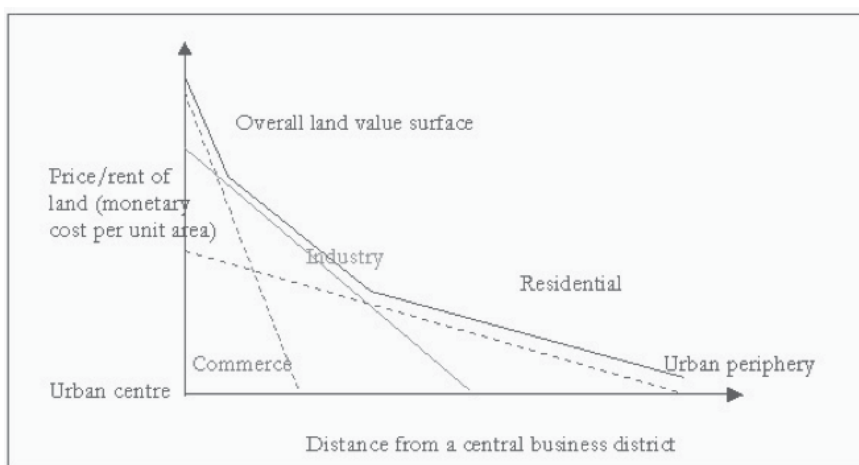
$R_i$  = rente d'une culture à un point  $i$

$$R_i = P - \beta D_i$$

Le modèle nous dit qu'à un endroit donné, la rente foncière est fonction du profit de la culture produite moins le coût de transport pour l'acheminer au marché. Concrètement, cette équation permet de prédire exactement l'occupation du sol en fonction de la distance à la ville.

Ce modèle a inspiré la théorie de la rente foncière de l'économiste argentin Alonso qui, aujourd'hui encore, pose les fondements de l'économie urbaine.

## Graphique 2 Alonso Bid-Rent



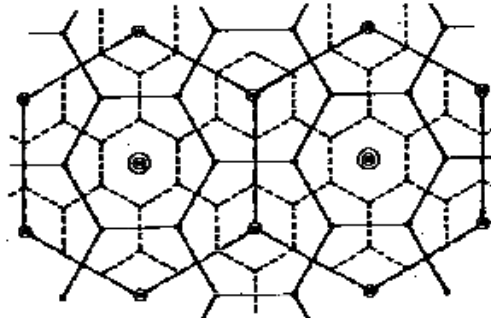
Source: Torrens, 2000.

La théorie explique pourquoi les villes européennes, monocentriques sont organisées autour du centre d'affaires avec, en périphérie, les industries puis les zones résidentielles. La notion d'accessibilité est essentielle : le temps d'accès au centre permet de comprendre comment la ville se construit et se développe.

Dans le prolongement de cette réflexion, Walter Christaller, géographe allemand, a proposé une théorie qui touche les domaines de l'économie, de la géographie et de l'urbanisme. Christaller montre que la

distribution des villes – petites, moyennes ou grandes – n'est pas aléatoire, alors que chaque entité urbaine correspond à des événements particuliers ; les villes sont indépendantes et autonomes. Comment expliquer alors que par un processus centré localement, on observe une régularité macroscopique de leurs distributions spatiales ? Le prix Nobel en économie Paul Krugman, qui est l'une des personnes les plus influentes en économie dans le monde, considère qu'il s'agit là de l'un des problèmes les plus difficiles posés à la recherche.

Schéma 22 Central Places Theory



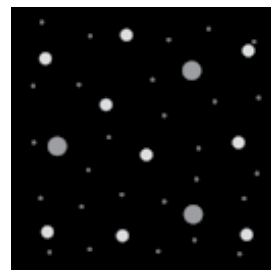
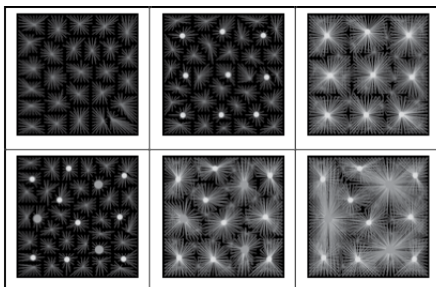
Source: Christaller, 1933.

Walter Christaller s'est inspiré de von Thunen : l'espace est homogène ; les consommateurs ont tous un comportement à acheter au plus petit prix ; la concurrence est parfaite. Il considère également que le coût de transport des biens est pris en charge par le consommateur – qui habite souvent en dehors de la ville. Le coût de transport est ainsi intégré dans le prix de vente. Christaller définit une hiérarchie urbaine – si vous habitez dans une petite ville, vous achèterez des produits ordinaires (légumes, fruits, vêtements, etc.), plus le produit (ou service) sera rare, plus la taille de

la ville sera importante. Exemple : si vous avez besoin de documents préfectoraux, vous vous rendrez dans une grande ville dont dépendent les villes moyennes. Les prémices posées, les conséquences sont relativement simples : les consommateurs vont minimiser leurs coûts de transport et privilégier les villes les plus proches ; les producteurs vont avoir tendance à se répartir de manière régulière.

Vous pouvez introduire toutes ces hypothèses et ces règles de comportement dans un modèle multi-agent :

Image 1 Central Places Theory 2



Source: Banos et al., 2011.

Les petites villes cherchent à se positionner de manière à maximiser leur profit ; les villes moyennes ont une aire d'influence plus importante. Toutes les villes opèrent en fonction du modèle de Christaller. Le point surprenant est que, en réalité, les villes ne se positionnent pas aussi facilement les unes par

rapport aux autres : leur localisation est le fruit d'un long processus, historiquement ancré. Et pourtant, cette régularité s'observe.

De nombreuses recherches portent ainsi sur la répartition extrêmement régulière des villes et leurs distributions selon la taille.

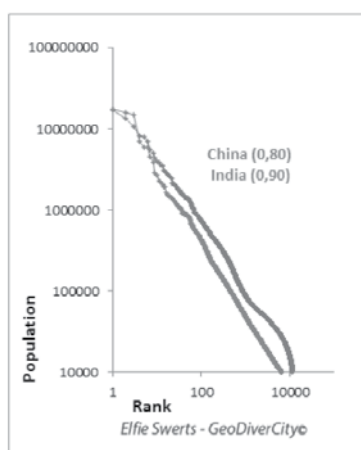
### Graphique 3 Zipf Law

$$f(P) = a \cdot P^{-\beta}$$

Where:

- $f(P)$  is the frequency of different city sizes  $P$
- $a$  is a constant of proportionality
- $\beta$  is the scaling parameter

= Zipf law:  $\beta = 2$



Source : <http://geodivercity.parisgeo.cnrs.fr/blog/>

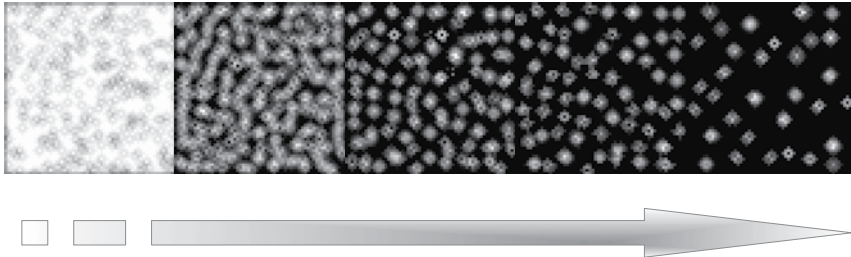
L'économiste Zipf a été le premier à montrer que si vous considérez la population d'une ville en échelle logarithmique et son rang, vous identifiez une signature statistique. Dans ce cas de figure, toutes les villes s'organisent selon une droite dont l'exposant est souvent proche de la valeur 2 (loi de Zipf). Ce qui est étonnant est que, bien que le comportement d'une ville soit lié à un contexte unique, vous observez pourtant des régularités avec des signatures quasiment toujours identiques.

Revenons au modèle proposé par Paul Krugman. Imaginons une ville simple, linéaire, composée de cellules adjacentes. Chaque cellule possède un nombre d'entreprises identique au départ. Chaque lieu présente un

intérêt de localisation pour ces entreprises qui tient compte de deux forces opposées, l'une d'attraction et l'autre de répulsion : en étant proches les unes des autres, les entreprises peuvent réduire certains coûts (économies d'échelle) – un branchement électrique collectif pour les entreprises réduira par exemple les dépenses –, mais également attirer d'avantage de clients (principe des zones commerciales). Toutefois, si elles sont trop proches, elles se font également concurrence. La dynamique de localisation repose alors sur un subtil équilibre entre ces deux forces, qui ne sont pas symétriques, la force de répulsion diminuant plus lentement que la force d'attraction.



Image 2 Krugman Model: Results



Source : construction de l'auteur.

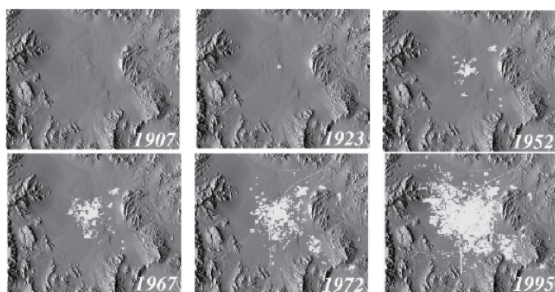
À partir d'une situation initiale où toutes les entreprises sont localisées dans l'espace, la tendance est un regroupement. Sur cette image, vous pouvez considérer par exemple qu'il s'agit de centres commerciaux ou de villes :

- les centres commerciaux regroupent des magasins qui bénéficient d'économie d'échelle mais, en même temps, ils ont intérêt à ce que les autres magasins soient suffisamment éloignés pour éviter la concurrence ;
- les villes existent car les acteurs économiques ressentent le besoin d'être proches afin de bénéficier d'économie d'agglomération, tout en étant éloignés des autres villes, facteurs de concurrence.

Il est néanmoins difficile de parler de modèle de croissance urbaine en travaillant simplement sur une seule ville. Cette croissance implique que la ville soit ouverte sur son environnement et ait des relations avec d'autres villes du système – des relations de compétition mais aussi de coopération. C'est un mécanisme fondamental de la croissance économique.

En revanche, les modèles de morphogénèse s'affranchissent du contexte, on ne travaille que sur la forme urbaine. Examinons une catégorie de modèles utilisés dans les années 1980-1990.

### Image 3 Diffusion-Limited Aggregation



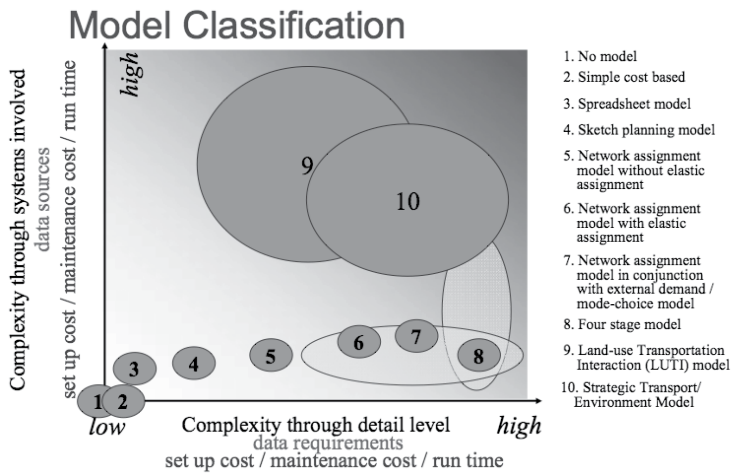
Source : Acevedo et al., 1997.

Ces modèles sont basés sur une observation. Prenons le cas de la croissance de la ville de Las Vegas (États-Unis). Seuls les espaces urbanisés sont considérés. Nous sommes très loin de la forme circulaire de la ville monocentrique de von Thunen. La surface de la ville est finie, pourtant, si vous cherchez à calculer son périmètre, il est infini : on ne peut calculer la distance pour faire le tour de la ville. Comment expliquer ce genre de géométrie particulière ? Les propositions, très à la mode dans les années 1970-1980, s'inspiraient de la cristallographie, discipline qui étudie la création des cristaux. Par analogie, on considère que les nouveaux arrivants vont peut-être tomber par hasard

sur la ville en construction et qu'ils vont décider de s'y installer. Le mécanisme est donc individuel : un déplacement aléatoire qui mène à la création de la surface de la ville en développement. Le résultat est déterminé par le processus aléatoire des nouveaux arrivants (particules). Si vous l'appliquez à la genèse urbaine, cela veut dire que les villes sont auto-organisées et que personne ne décide de rien au niveau collectif. La ville est un ensemble de décisions individuelles.

Concentrons nous à présent sur des modèles d'occupation du sol et de transports que nous allons chercher à développer au cours de l'atelier.

**Graphique 4** Land-Use / Transport Models

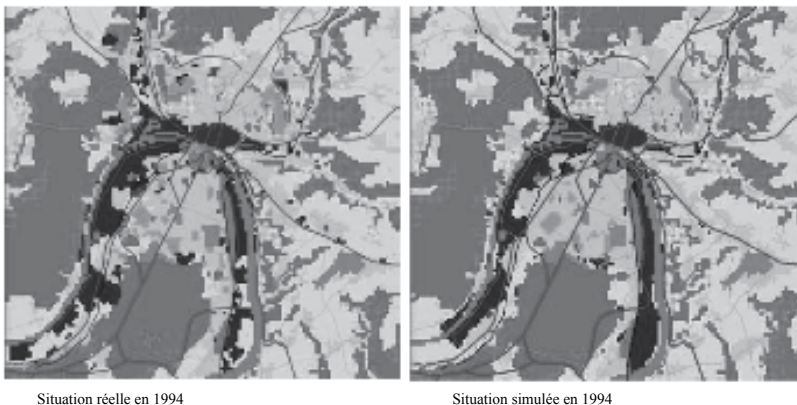


Source : Emberger, 2005.

Le travail du modalisateur est de chercher à faire le lien entre un modèle qui est une expression d'une ou de plusieurs théories et des théories qui sont à l'origine du modèle. Ce graphique présente une classification des modèles les plus utilisés aujourd'hui en fonction de leur complexité – niveau de

détails impliqués ; quantité de sous-systèmes dans le modèle. Il est par exemple possible de construire un modèle simple qui calculera le coût urbain généralisé de n'importe quelle ville en prenant des variables de surface, de temps de transport moyen, de nombre d'entreprises.

**Image 4** Land-Use Models, Cellular Automata

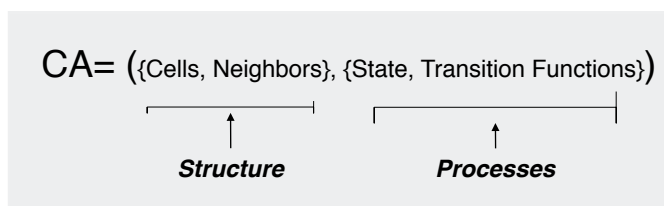


Source : Langlois, 2008.

Nous allons dissocier l'évolution de l'occupation du sol des transports et de la mobilité, puis nous superposerons les fichiers. Souvent, les modèles d'occupation du sol reposent sur un formalisme

appelé « automate cellulaire » que nous examinerons cette semaine. Dans le cas présent, il s'agit d'une application à la ville de Rouen, en Normandie (France).

### Schéma 23 Cellular Automata

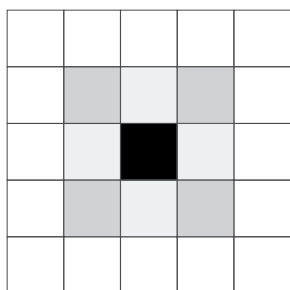


Source: Moreno et al., 2009.

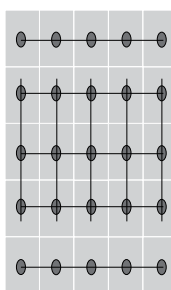
Fondamentalement, un automate cellulaire combine une structure et des processus. La structure correspond aux cellules et à un voisinage ; chaque cellule est définie par rapport à son voisinage. Les processus intègrent l'état de la cellule. Par exemple,

une cellule peut être occupée par de la forêt, de l'eau ou du bâti. Les fonctions de transition vous donnent la probabilité pour une cellule de changer d'état – à l'instant « T », une forêt ; à l'instant « T+1 » un bâti avec une certaine probabilité.

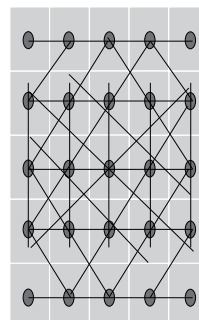
### Schéma 24 Cellular Automata (2)



a. 2D Automata with definition of neighbors



b. Underlying Neighboring graph



c. Underlying Neighboring graph

Source: Moreno, op. cit.

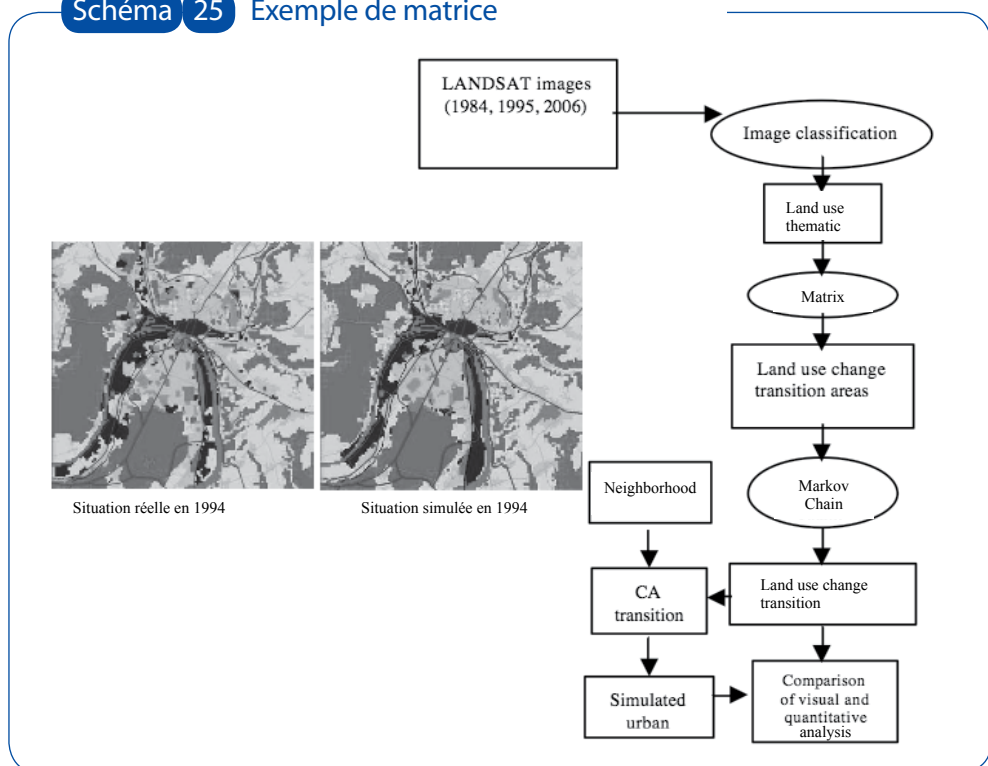
Chaque cellule est caractérisée par un état. Ici l'état est la couleur noire et chaque cellule est capable d'identifier ses voisins. « *b* » est une représentation de « *a* » avec des graphes. Chaque cellule devient un nœud et tous les nœuds voisins de la représentation sont liés par un lien. Alors vous obtenez le graphe « *b* » ou « *c* » en fonction de ce que vous reprenez comme définition du voisinage.

Les automates cellulaires ont rencontré beaucoup de succès car ils permettaient de reproduire des processus complexes avec des règles simples – chaque cellule

fait évoluer son état de manière dynamique en fonction de l'état des cellules voisines. Un des exemples les plus célèbres dans le domaine de la « vie artificielle » est nommé « le jeu de la vie » de Conway et permet d'engendrer une grande diversité de formes (*patterns*) en fonction de règles très simples.

Dans un contexte urbain, comment expliquer qu'une cellule va changer d'état à un moment donné ? La façon la plus habituelle de procéder est de partir de données, comme les images satellites par exemple, afin de construire des matrices de transition.

### Schéma 25 Exemple de matrice

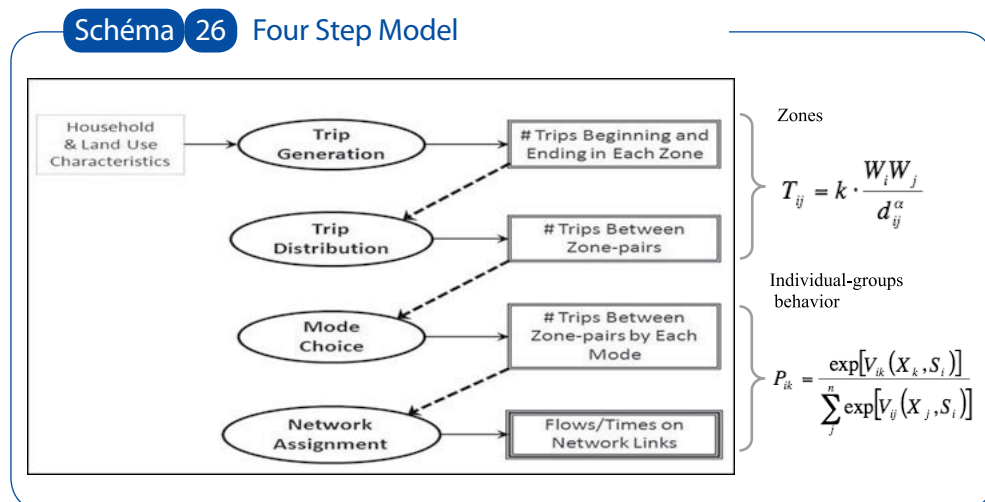


Source : Demirel et al., 2010 ; Langlois, op. cit.

À partir de cette classification, le nombre de catégories de classe d'occupation du sol est limité. Puis l'on définit les changements (dynamiques) pour les cellules en fonction des trois images Landsat (1984, 1995, 2006). Une matrice de transition est créée – plusieurs milliers de cellules ont un état à une date donnée et la matrice de transition indique un changement d'état avec la probabilité de passer d'un état *forêt* à l'état *bâti* par exemple. On cherche à réduire les combinaisons en utilisant un modèle de régularités statistiques (*chaînes de Markov*). Ce modèle identifie les probabilités de transition dans un ensemble qui est immense. On compare les prédictions de l'automate pour les mêmes dates. Contrairement au modèle de von Thunen, l'approche est centrée sur les données (« *Data Driven* ») et le modèle produit est capable, dans certaines configurations et

sur un temps court, de produire de bonnes prédictions. En revanche, ce modèle est peu adapté pour expliquer la manière dont la ville grandit : l'apprentissage se fait par un modèle qui n'est pas causal mais qui travaille sur la base de régularités statistiques. À l'inverse, les modèles « *Concept Driven* ou *Theory Driven* » sont plus explicatifs mais, en raison de leur caractère plus général, ils peuvent avoir un pouvoir de prédiction plus faible – encore que ceci dépende de la manière de définir une « bonne » prédiction.

Intéressons-nous au calcul de la mobilité associée à l'évolution de la croissance urbaine. La façon la plus simple de procéder et la plus utilisée est de travailler sur des modèles macroscopiques qui vont raisonner sous forme de zones. L'espace urbain est découpé en zones et les flux entre ces zones sont estimés.



Source : Southworth, 1995.

Le modèle le plus utilisé dans le monde entier est le modèle à quatre étapes. On cherche tout d'abord à définir le potentiel d'émission de chaque zone – par exemple, le nombre de personnes qui y résident – et son potentiel d'attraction (en fonction des lieux d'emploi par exemple). Sur cette base, on introduit une étape de distribution des flux (« *Trip Distribution* ») qui dépend naturellement de la capacité d'émission et d'attraction des zones. Puis, on détermine la manière dont les individus se déplacent (mode de transport) et leurs itinéraires, que l'on va affecter au réseau de transport (« *Network Assignment* »). Un grand nombre d'équations entrent en jeu dans le modèle à quatre étapes mais l'on peut les regrouper en deux grandes familles : les équations macroscopiques (cas des étapes de génération et distribution des flux) et des équations qui renvoient à des comportements individuels (cas du choix modal ou d'itinéraire, qui relève souvent de modèles dits de « choix discrets »).

On notera que le modèle macroscopique sous-jacent à la génération/distribution des flux s'inspire de la physique newtonienne. Le nombre de personnes se déplaçant (le flux) entre les zones «  $i$  » et «  $j$  » est ainsi fonction du « poids » des zones «  $i$  » et «  $j$  ». Ce nombre est par ailleurs inversement proportionnel à la distance qui sépare ces deux zones. On retrouve là le modèle de gravitation universelle de Newton, sur la base d'une analogie qui continue à inspirer des débats au sein de la communauté des chercheurs. Contrairement au modèle physique de la théorie newtonienne, qui est un modèle explicatif (causal) et universel (l'exposant de la distance est une constante), le modèle de génération de flux est un modèle

statistique descriptif (le « poids » des zones est approché par des indicateurs indirects, tels que leur population par exemple) et relatif (l'exposant de la distance est ajusté aux données et varie donc entre les lieux et les époques). Toutefois, l'analogie sur lequel il repose fait sens lorsque l'on raisonne à un niveau macroscopique et ce modèle permet souvent d'estimer de manière assez fine les flux entre des zones urbaines ou des villes au sein d'un système de ville.

En revanche, il est nécessaire d'introduire des comportements quand il s'agit de décider de la manière dont les individus voyagent et les endroits par où ils vont passer. Ces comportements sont en effet beaucoup plus variables. La construction d'un modèle implique dès lors une série de simplifications – à l'image de celles mentionnées pour les modèles de von Thunen ou Christaller. Par exemple, émettre l'hypothèse que les agents sont en situation d'information parfaite, sont capables de comparer « l'utilité » de toutes les alternatives possibles et de choisir systématiquement celle qui maximisera leur utilité, permet d'exprimer mathématiquement le modèle, sous une forme très compacte et pratique. De manière générale, si l'on pose l'hypothèse que tout le monde est différent, il devient difficile d'exprimer (formaliser) un modèle et encore plus de le résoudre au moyen des outils à notre disposition (par exemple, les mathématiques). L'avantage des modèles à base d'agents est que vous pouvez – dans une certaine mesure – relâcher ces hypothèses. Mais vous verrez au cours de l'atelier que cette possibilité est contrainte en amont et en aval. En amont parce que cette idée que tous les individus et/

ou leurs comportements sont différents est discutable, surtout dans un contexte spécifique et bien circonscrit comme celui de la mobilité. Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue que des fluctuations microscopiques peuvent produire des régularités à un niveau macroscopique. D'où la double nécessité de se poser les bonnes questions en amont. De même, en aval, un modèle qui serait constitué d'un trop grand nombre de paramètres deviendrait rapidement très difficile à comprendre et à maîtriser.

On notera également que le modèle à quatre étapes, dans la version que je viens de vous présenter, est largement statique. Il manque, par exemple, une donnée essentielle : le trafic routier.

Cette donnée est importante car vous l'intégrerez durant les travaux de groupe. L'intérêt est d'émettre des hypothèses et de simplifier la situation. Par exemple : sur des routes avec une seule voie, les voitures ne peuvent pas se doubler, il n'y a pas d'accidents, etc. Dans ce cas, vous pouvez énoncer un modèle sous une forme purement mathématique. Pour un tronçon de route, vous connaissez la concentration – le nombre de véhicule à un instant « t » –, et le débit – le nombre de véhicules qui passent par un tronçon pendant une période donnée. Dans les cas simples, la théorie du trafic nous dit qu'il existe une relation fondamentale entre la densité et le débit : si vous augmentez le nombre de véhicules

## Schéma 27 Models Coupling

**Dynamic spatial interaction-based models**

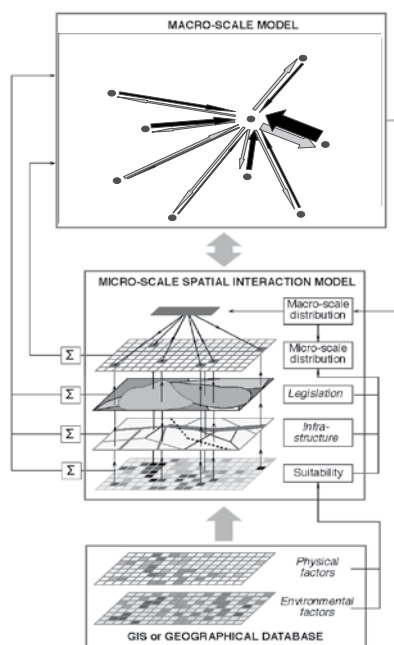
1950 – 1975

**High-resolution Spatially-dynamic**

1990

**GIS – Geographical Information Systems**

1980



Source : Engelen, 2006.



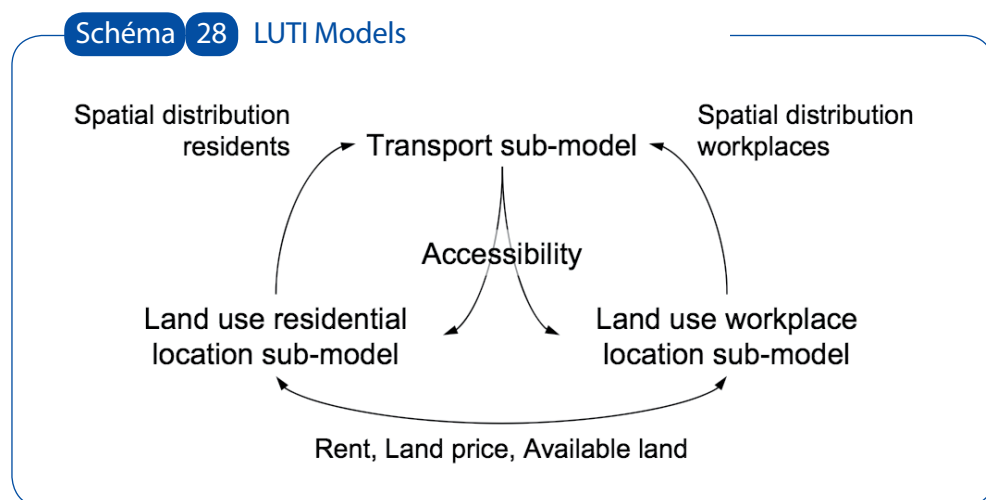
sur la route, le débit augmente jusqu'à une valeur critique qui correspond à la capacité du tronçon de route ; à partir de ce moment, à chaque fois que vous ajoutez un véhicule, le débit diminue (congestion).

Si l'on veut descendre au niveau de la voiture, on regarde le comportement de chaque véhicule qui tient compte de la vitesse maximale autorisée et de celle qu'elle précède, comme dans le modèle de NaSch – soit l'on se place au niveau microscopique des véhicules individualisés avec des comportements spécifiques, soit l'on intègre

un niveau macroscopique et seul le flux de véhicule est considéré.

En fonction des époques, des formalismes différents ont été utilisés. (cf. schéma 27)

Cette approche était typique des décennies 1950 à 1970. Elles correspondent à l'introduction des systèmes d'informations géographiques (SIG) qui ont permis d'alimenter les modèles avec des données plus précises. Puis l'on a couplé avec des informations rasterisées au niveau des pixels, du linéaire pour le réseau routier.



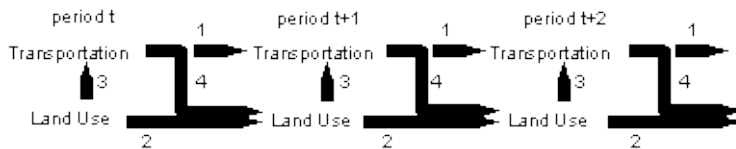
Source : Engelen, op, cit.

Voilà un modèle *Land-Use and Transport Interaction* (LUTI) qui cherche à coupler toutes les informations. Tout est lié, il n'y a pas de début ni de fin. L'accessibilité est un

concept majeur, tout cela évolue en fonction de l'accessibilité (distance, coût).

Je termine sur la question centrale de la dynamique du couplage.

## Schéma 29 Slow-Fast Dynamics



Interactions Modeled:

- 1 = Inter-period transportation system changes
- 2 = Inter-period land use changes
- 3 = Intra-period effects of land use changes on travel patterns
- 4 = Inter-period effects of travel and transportation system changes on land use

Source: Southworth, op. cit.

Par quoi commencer ? Voici un schéma typique censé vous dire exactement comment cela fonctionne dans le modèle précédent. Les périodes se divisent ainsi :

- flèche 1 : la période de changement dans le module de transport ;
- flèche 2 : la période de changement d'occupation du sol ;
- flèche 3 : la période d'effet des changements d'occupation du sol sur la mobilité ;
- flèche 4 : la période d'effet de la mobilité sur l'occupation du sol.

L'occupation du sol a un impact rapide sur la mobilité. Si j'enlève des bâtiments, la mobilité sera immédiatement impactée. En revanche, l'évolution de la mobilité a un effet plus long sur l'occupation du sol – il faut que les individus aient des difficultés à se déplacer pendant une longue période avant de décider d'éventuellement déménager.

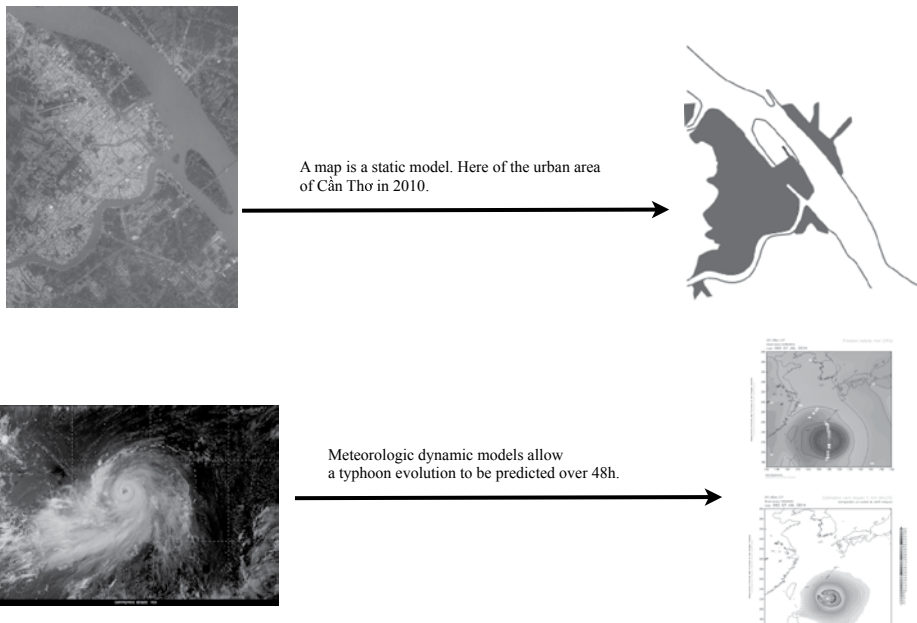
### 2.2.2. Cas d'étude : types de questions, approches et modèles

[Benoît Gaudou]

Le premier modèle est statique (cf. image 5), il représente une image satellite de la ville de Cần Thơ – vision à un instant « T » de l'état urbain. Le second exemple est un modèle dynamique – description de l'évolution dans le temps d'un phénomène. Il est illustré par le typhon qui est remonté vers le Japon en juillet 2014. Les modèles dynamiques de type météorologique permettent des prédictions, ils donnent l'évolution d'un système par simulation. Un autre principal objectif de la modélisation est un appui à la décision en testant différents scénarios.

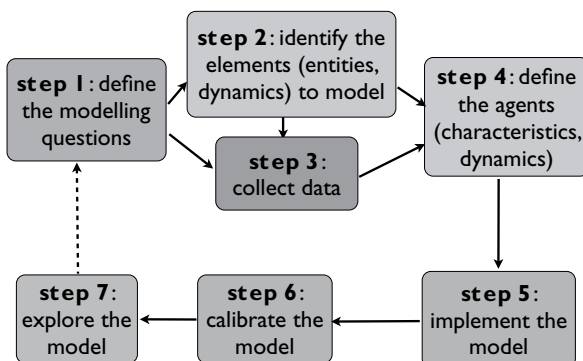
Ce schéma représente les différentes étapes de modélisation et de simulation. (cf. schéma 30)

## Image 5 Static and Dynamic Models



Source : Konings, 2012 ; <http://lesbrindherbes.org/2014/07/06/l-enorme-typhon-neoguri-se-dirige-japon/>

## Schéma 30 Modelling is a Multi-Step Cycle



Source : construction de l'auteur.

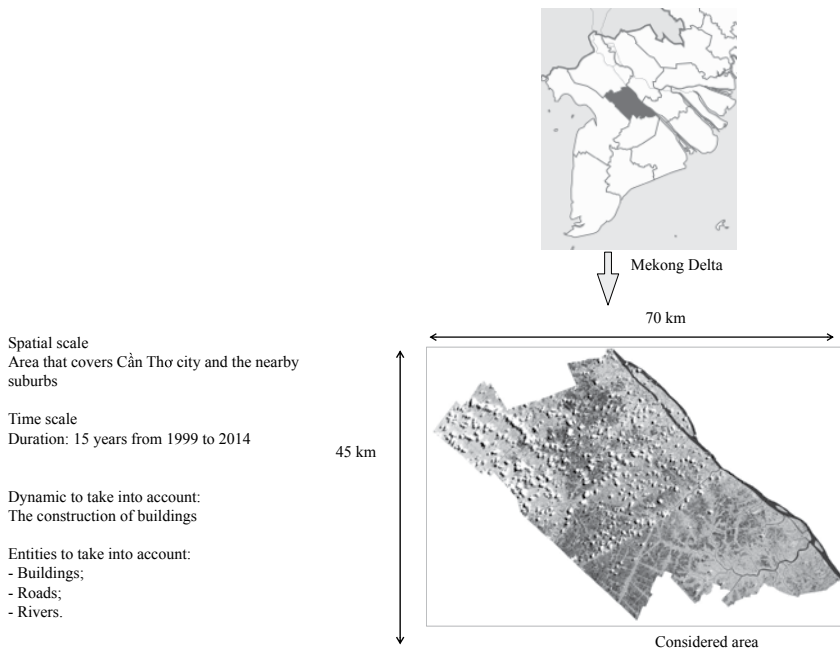
Un modèle est défini par la question à laquelle il est censé répondre. Notre atelier s'intéresse à des modèles axés sur la compréhension et les facteurs explicatifs de la croissance urbaine en prenant pour objet la ville de Cần Thơ. Quels sont les mécanismes, les règles nous permettant de produire une croissance urbaine similaire à la croissance réelle ? Un large éventail de questions peuvent se poser en lien avec les transformations de l'espace urbain : ajouts et/ou suppressions de routes, modifications du réseau de transports fluviaux et publics, impacts de la construction de centres commerciaux, réflexions sur les besoins de services (hôpitaux, écoles, réseaux hydrauliques, etc.), etc.

En terme de techniques, nous allons nous concentrer sur la modélisation à base

d'agents qui autorise : (i) d'intégrer simplement l'hétérogénéité spatiale, (ii) d'inclure des données spatialisées, (iii) de décrire des phénomènes au niveau microscopique qui vont générer un comportement macroscopique et, enfin, (iv) de réaliser des expériences à l'aide de scénarios.

Nous allons identifier à la fois les entités importantes du système considéré et leurs dynamiques. Les entités sont des éléments individuels du système, leur état se caractérise par des variables ou des attributs. La dynamique, ou processus, est ce qui permet de modifier le système : par exemple, les actions attachées aux entités – déplacements, interactions entre agents ou bien la dynamique d'agents tels que les marchés financiers, les inondations, etc.

## Image 6 Model 1: Entities, Dynamic and Scales



Source : construction de l'auteur.

Dans ce premier modèle, l'échelle spatiale qui nous intéresse est la grande région autour de Cần Thơ ; la dynamique ciblée est l'apparition de nouvelles entités urbaines, par exemple

de nouvelles habitations. Pour nos propos, les déplacements des entités s'effectuent par la route et les voies fluviales. L'échelle temporelle considérée est de quinze années.

## Image 7 Model 2: Entities, Dynamic and Scales

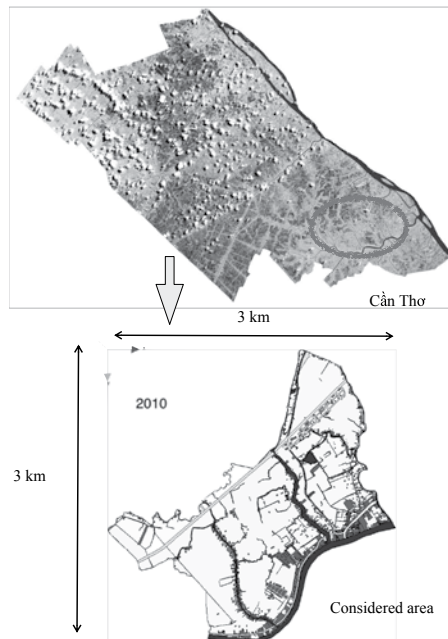
**Spatial scale**  
The An Binh ward of Cần Thơ

**Time scale**  
Duration: 5 years from 2005 to 2010

**Dynamic to take into account:**  
The construction of buildings

**Entities to take into account:**

- Buildings
- Roads
- Rivers



Source : construction de l'auteur.

Dans le second modèle, au lieu de s'intéresser à la croissance urbaine de la ville entière, on considère maintenant le quartier de An Binh. Le modèle est plus précis, tout en s'intéressant à une même dynamique.

La première étape est la constitution d'un ensemble de données, soit par enquêtes de terrain, auprès des agences gouvernementale ou en libre accès sur Internet. Pour la ville de Cần Thơ, les données proviennent du département des Ressources naturelles et de l'Environnement.

L'étape suivante correspond à la construction du SIG. Les données vont subir différentes transformations afin d'homogénéiser le format, de corriger la table attributaire, d'établir des liens entre les différentes sources afin de produire de nouvelles données, etc.

Que va-t-on intégrer au modèle ? Quels sont les agents définis dans le système ?

La définition du type d'agent dépend pour beaucoup de l'échelle choisie et de la question formulée. L'implémentation sera

différente si l'on se place au niveau de la ville complète, du quartier ou de la maisonnée – il est possible de représenter individuellement les habitants, les foyers ou l'habitation complète. Pour Cần Thơ, on s'intéresse à la production de nouveaux bâtiments. Ces agents ont pour attribut une forme, une position et un type résidentiel ou commercial. Un agent représente une entité physique dans le système. Dans ce modèle, les bâtiments sont les agents principaux : c'est sur eux que sont décrites les dynamiques et les règles de l'expansion urbaine.

Nous allons nous rapprocher des modèles de types automates cellulaires présentés par Arnaud Banos. L'espace est ainsi divisé en grilles dans lesquelles chaque cellule est un agent avec, par exemple, un attribut de densité démographique. Chaque agent agrège un certain nombre de bâtiments.

*Benoît Gaudou conclut son intervention sur les questions de dynamiques et d'implémentation du modèle. Il présente pour cela trois plateformes : Net Logo, Repast et Gama, qui sera utilisée pour la formation. Les objectifs de calibration sont également abordés.*

*La fin de la journée est consacrée à des aspects méthodologiques pour la constitution d'un corpus de données. Les points suivants sont développés par Trương Chí Quang : introduction aux SIG ; données rasters et vecteurs ; conversion des différents formats de données ; etc.*

## Journée 2, vendredi 25

[Alexis Drogoul]

Cette journée va être consacrée à des aspects purement méthodologiques dans lesquels nous allons aborder la conception et l'implémentation de ces modèles dans la plateforme Gama. Notre objectif n'est pas que vous deveniez autonomes et experts en Gama (!) mais que vous soyez suffisamment en confiance pour aborder en groupe un travail collectif de conception de modèles et d'expérimentation.

*Huỳnh Quang Nghi présente la plateforme Gama et introduit le langage « Gama Modeling Language » (GAML) permettant l'écriture de modèles. Une seconde section développée par Võ Đức Ân introduit le modèle à base d'automates cellulaires, dont l'objectif est de reproduire le développement urbain de la ville de Cần Thơ pour la période de 1999 à 2014. Des éléments de présentation ont été développés dans l'édition 2012 des JTD, nous renvoyons ici le lecteur aux précédentes publications (Drogoul et Gaudou, 2012 ; Drogoul et al. 2012). Enfin, Alexis Drogoul reprend les différentes étapes de construction présentées la veille par Benoît Gaudou (cf. schéma 30) dans le cadre d'un exercice de reproduction du phénomène de densification du bâti dans le quartier de An Binh à Cần Thơ entre 2005 et 2010.*

### 2.2.3. Tempête de cerveau

[Arnaud Banos]

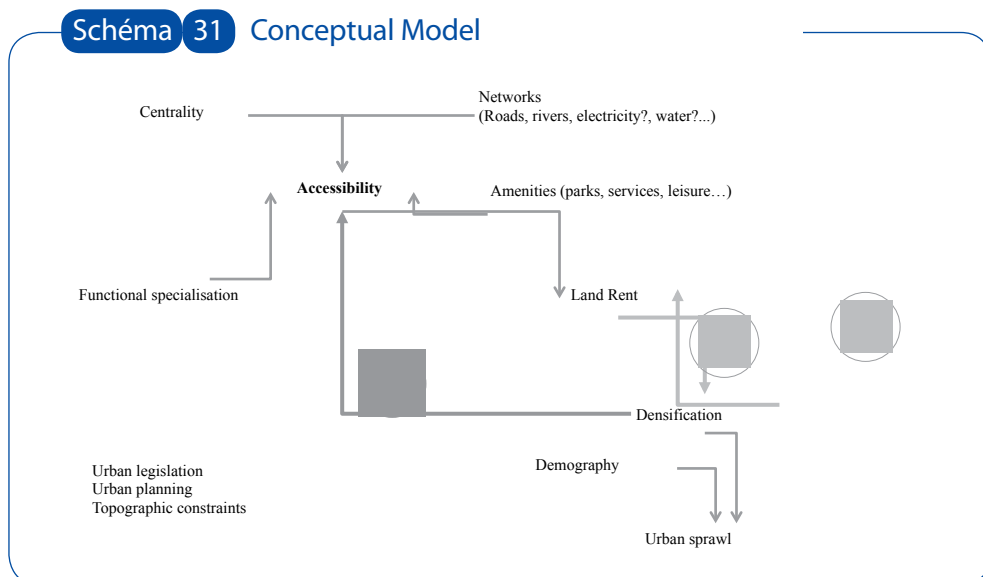
Prenons le temps d'une mise au point sur les travaux de la matinée.

Nous avons demandé aux différents groupes de proposer trois exemples de règles pour le développement urbain à Cần Thơ. Votre réflexion peut être matérialisée par des mots simples comme : centralité, réseaux, spécialisation fonctionnelle, valeur du sol, densification, etc. Cela renvoie à des concepts fondamentaux de l'urbanisme. La législation urbaine impose des contraintes et le travail de planification modifie et propose de nouveaux projets facteurs

du dynamisme urbain. Par ailleurs, les contraintes topographiques influencent les transformations de la ville

Comment passer d'un concept général à un modèle ? Nous avons examiné comment définir des règles simples et comment les intégrer dans Gama. Mais cela n'est pas suffisant car un modèle est une construction intellectuelle et non pas simplement une représentation informatique ou mathématique. Il importe d'établir cette construction pour alimenter le modèle en tant qu'objet concret informatique ou mathématique.

En premier lieu, il faut effectuer un travail de mise en système des concepts.



Source : construction de l'auteur.

Vos descriptions ont omis le concept d'accessibilité qui permet de connecter de nombreux autres concepts. La notion de centralité est fondamentalement une notion d'accessibilité. L'idée de réseaux routiers ou de réseaux électriques, par exemple, est liée au concept d'accessibilité. Il en est de même pour les parcs, les lieux de loisirs ou encore la spécialisation fonctionnelle – lieux d'activités, lieux de commerce. Nous l'avons vu avec la théorie de von Thunen et celle de la rente foncière d'Alonso, l'accessibilité est un concept central pour expliquer la valeur du sol en un temps donné. Ce qui compte n'est pas seulement ce qui se passe à un endroit mais la manière dont cet endroit est accessible depuis le reste de la ville.

La rente foncière induit la planification. Tous les acteurs économiques qui cherchent à se localiser en ville sont en compétition pour s'installer dans les meilleurs endroits par rapport à leurs capacités économiques. La théorie de la rente foncière nous dit que si la valeur du sol était identique partout en ville, cette ville ne serait pas dense. La rente foncière engendre la densification de la ville et, en retour, la densification urbaine renforce la rente foncière car les acteurs sont en situation de concurrence.

La densification a également un impact sur l'accessibilité par le biais du trafic ; ces deux forces s'opposent. Rappelons-nous du modèle de Krugman et des forces d'attraction et de répulsion. Les individus sont attirés les uns vers les autres, vers les lieux d'activités, le centre-ville et les réseaux. Mais, une force les repousse loin de la ville du fait des difficultés

d'accessibilité. À l'intérieur de ce mécanisme, il y a également une force de répulsion : la concurrence *via* le marché augmente la rente foncière et les acteurs économiques qui n'ont pas les capacités d'assumer les coûts doivent s'éloigner du centre.

En ajoutant des relations entre ces concepts, nous forgeons un modèle de développement de la ville basé sur l'attraction et la répulsion. Mais pour obtenir de la croissance urbaine, nous devons inclure la démographie – facteur à la fois endogène et exogène.

Il nous faut à présent implémenter le modèle dans Gama afin de tester sa capacité à reproduire de la croissance urbaine. Nous allons nous positionner en tant qu'aménageurs urbains (utilisation de l'automate cellulaire puis du modèle vectoriel). Trois défis se posent à nous : 1) introduire des commerces dans le modèle de façon à reproduire la spécialisation fonctionnelle ; 2) inclure de la mobilité ; 3) reproduire des zones de faibles densités.

Un travail en groupe implique des interactions sociales qui sont fondamentales pour la recherche. Il faut exprimer ses idées, être capable d'écouter et de discuter de façon à trouver quelque chose de cohérent. Voilà quelque chose d'absolument central dans la démarche scientifique. L'un des objectifs du travail en groupe est donc de vous permettre de vous entraîner à échanger, à recevoir les arguments pour construire des propositions communes.



Benoît Gaudou conclut la journée sur les questions de simulation, d'exploration des différents paramètres et les différentes solutions apportées par un modèle dans le cadre d'un exemple de croissance urbaine. En lien avec l'intervention précédente, deux projets sont proposés :

- utilisation du modèle automate cellulaire fourni pour observer des résultats différents en fonction de changement sur des données SIG : modification des données SIG (ajout/suppression de routes, de ponts, etc.) ; simulation sur les nouvelles données et avec les données originales (dans Gama) ; comparaison des résultats et compréhension de l'impact de la planification urbaine sur la croissance urbaine ;

- utilisation du modèle à base d'agent fourni pour observer et comprendre la croissance spatiale des unités géographiques : ajout d'indicateurs de la densité du trafic pour observer l'impact du phénomène sur le développement ; ajout des règles pour construire des activités commerciales et observer son impact.

Le caractère technique des sessions développées durant le reste de semaine ne peut s'inscrire dans le simple cadre de cette publication. Afin de préciser son contenu, nous invitons le lecteur à contacter les formateurs de l'équipe constituée par Alexis Drogoul et renvoyons également aux différents programmes de recherche décrits dans les biographies en fin du présent ouvrage.

## Bibliographie sélective

- ABRAMI, G., B. ANSELME., B. GAUDOU et F. ROUSSEAU (2014), Le modèle de von Thunen, *Fiche pédagogique MAPS*.
- ALONSO, W. (1964), *Location and Land Use, Toward a General Theory of Land Rent*, Harvard University Press, Cambridge.
- AVECEDO, W., L. GAYDOS, J. TILLEY, C. MLADINICH, J. BUCHANAN, S. BLAUER, K. KRUGER et J. SCHUBERT (1997), *Urban Land Use Change in the Las Vegas Valley*, [http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/population/las\\_vegas/](http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/population/las_vegas/)
- BANOS, A., N. CORSON, C. PIVANO, H-L. RAJAONARIVO et P. TAILLANDIER (2014), "Micro-macro Traffic Modeling". *Fiche pédagogique MAPS*.
- BANOS, A., D. MORENO, C. PIVANOL et P. TAILLANDIER (2011), "Christaller, Still Alive!", *Cybergeo*, <http://cybergeo.revues.org/24878>.
- BATTY, M. (2014), "MRes in Advanced Spatial Analysis and Visualisation: Lecture 2, Modelling Histories-Types and Styles", UCL.
- BATTY, M. et P. LONGLEY (1994), *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Academic Press, San Diego, CA et Londres.
- CHRISTALLER, W. (1966), *Central Places in Southern Germany*, Trad. par C. Baskin, Prentice Hall, de : *Die zentralen Orte in Süddeutschland. Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*, Jena, Fischer Verlag (1933).



- DEMIREL, H. et M. CETI (2010), Modelling Urban Dynamics via Cellular Automata, *ISPRS Archive* Vol. XXXVIII, Part 4-8-2-W9, "Core Spatial Databases - Updating, Maintenance and Services – from Theory to Practice", Haifa.
- DROGOUL, A, et B. GAUDOU (2012), « Méthodes informatiques de modélisation à base d'agents » in LAGREE, S. (ed. scientifique), Collection *Conférences et Séminaires*, n°8, AFD-ÉFEO.
- DROGOUL, A, B. GAUDOU, A. GRIGNARD, P. TAILLANDIER et D-A VO (2012), « Approches pratiques de la modélisation à base d'agents » in LAGREE, S. (ed. scientifique), Collection *Conférences et Séminaires*, n°8, AFD-ÉFEO.
- EMBERGER, G. (2005), *Introduction to LUTI modelling - What is it and why do we need it?*, SPARKLE – Training course.
- ENGELEN, G. (2006) "Complexity, Land use and Cellular Automata Modelling", *S4 Workshop RIKS*, Maastricht.
- GRIMM, V., U. BERGER, D.-L. DE ANGELIS, J.G POLHILL, J. GISKE et S.F. RAILSBACK (2010), "The ODD Protocol: A Review and First Update", *Ecological Modelling* 221.
- HAGEN-ZANKER, A. (2006), "Evaluation of Spatial Models, Map Comparison Kit", *S4 Workshop RIKS*, Maastricht.
- KONINGS, V. (2012), "Can Tho, How to Grow? Flood Proof Expansion in Rapidly Urbanising Delta Cities in the Mekong Delta: the Case of Can Tho", Master thesis, University of Delft.
- KRUGMAN, P. (1996), *The Self-Organising Economy*, Blackwell Publishers, Boston.
- LANGLOIS, P. (2008), "Cellular Automata for Modeling Spatial Systems", in *The Modeling Process in Geography, From Determinism to Complexity*, pp. 277-307.
- LEBACQUE, J-P. (1996), "The Godunov Scheme and What it Means for First Order Traffic Flow Models", nn J.B. Lesort (ed.) *Transportation and Traffic Theory*, proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 24-26 juillet, Lyon, Pergamon, Oxford.
- LIGHTHILL, M.J. et G.B. WHITHAM (1955), *On Kinematic Waves II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads*, Proceedings of the Royal Society A, vol. 229.
- MORENO, D., D. BADARIOTTI et A. BANOS (2009), "Integrating Morphology in Urban Simulation through Reticular Automata", in *European Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, FGSE, Lausanne.
- NAGEL, K. et M. SCHRECKENBERG (1992), "A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic", *Journal de Physique*, I 2 (12): 2221.
- RAIMBAULT, J., A. BANOS et R. DOURSAT (2014), "A Hybrid Network/Grid Model of Urban Morphogenesis and Optimization", ICCSA, Le Havre GS2: Fractal Analysis, Social Systems, June 26.
- SOUTHWORTH, F. (1995), *A Technical Review of Urban Land Use Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Travel Reduction Strategies*, Oak Ridge National Laboratory, Technical Report. <http://cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL-6881.pdf>
- THÜNEN (von), J.H. (1842), *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*, Rostock, Leopold.
- TORRENS, P. (2000), "How Land-use Transportation Models Work", CASA, paper n° 20.

## Liste des stagiaires

Nom et prénom	Établissement	Domaine/discipline	Thème de recherche	Courriel
Bùi Châu Trường Thọ	Institut de recherche sur le développement	Planification urbaine	Développement urbain	buichautruongtho@gmail.com
Loïc Boisseau (auditeur libre)	PADDI	Transport, urbanisme	Transport, urbanisme	paddi.lboisseau@gmail.com
Chu Phạm Đăng Quang	Institut de recherche sur le développement	Planification urbaine	Planification urbaine	dangquang16.5@gmail.com
Đình Thị Diệu	International Center for Advanced Research on Global Changes	Géographie	Dynamique de l'occupation des sols et société	dinhdieu86@gmail.com
Đỗ Thanh Nghị	Université de Cần Thơ	Informatique	Data mining	dtngchi@cit.ctu.edu.vn
Hoàng Thị Thanh Hà	Université de Đà Nẵng	Informatique	Multi-agent, simulation	httha@yahoo.com
Lê Thị Bảo Yến	Université de Đà Nẵng	Multi-agent	Simulation of traffic flow around the administrative building center of Đà Nẵng city based on multi-agent system	baoyentk@gmail.com
Nguyễn Ngọc Ánh	École normale supérieure de Hà Nội	Géographie	Systèmes d'information géographique, planification et environnement	anh.hnue@gmail.com
Nguyễn Ngọc Doanh	Institut polytechnique de Hà Nội	Modélisation et systèmes complexes	Modélisation et systèmes complexes en écologie	doanhbondy@gmail.com
Nguyễn Thị Hà Mi	Université de Cần Thơ	Gestion foncière	Environnement urbain	nthmi@ctu.edu.vn
Nguyễn Thị Hoàng Anh	Centre national des satellites du Việt Nam	Géographie	Dynamique du fleuve Rouge	nthanh@vnsc.org.vn
Nguyễn Quốc Huy	International Center for Advanced Research on Global Changes	-	Outils et modèles pour l'analyse des dynamiques spatiales urbaines	huyquoc2311@gmail.com
Nguyễn Thị Vân	Université des ressources hydrauliques	Mathématiques	Modèles écologiques	van@wru.vn
Trần Duy Minh	Université des sciences sociales et humaines de Hồ Chí Minh Ville	Géographie, SIG	Dynamique spatiale	tdminh@hcmussh.edu.vn
Trần Nguyễn Minh Thư	Université de Cần Thơ	Informatique	Data mining	tnmthu80@gmail.com

Nom et prénom	Établissement	Domaine/discipline	Thème de recherche	Courriel
Trần Thị Lệ Hằng	Université de Cần Thơ	Modèles mathématique et gestion des ressources naturelles	Application Webgis, eau en zone urbaine	ttlhang@ctu.edu.vn
Phạm Duy Tiến	Université de An Giang	Planification foncière, SIG	Planification rurale et urbaine	pdtien.agu@gmail.com
Nguyễn Lê Vi Huỳnh	Centre HCM-GIS	SIG	Applications SIG	levihuynh@gmail.com
Ket Pinnara	Institut de technologie du Cambodge	Ressources en eau	Techniques d'irrigation au Cambodge	ket.pinnara@gmail.com



Conférences  
& Séminaires

13

Juillet 2015

# Regards sur le développement urbain durable

Approches méthodologiques,  
transversales et opérationnelles

Université d'été régionale en sciences sociales  
« Les Journées de Tam Đảo » (Đà Lạt, Việt Nam)  
Juillet 2014

# Regards sur le développement urbain durable

Approches méthodologiques, transversales et opérationnelles

ÉDITEUR SCIENTIFIQUE

**Stéphane LAGRÉE**

*École française d'Extrême-Orient, ÉFEO*

*fsp2s@yahoo.fr*

COORDINATION

**Virginie DIAZ**

*Agence Française de Développement, AFD*

*diazv@afd.fr*



ÉCOLE FRANÇAISE  
D'EXTRÊME-ORIENT



Paris  
Nouveaux  
Mondes  
hesam

