

# DURABILITÉ URBAINE SOUS CONTRAINTE FINANCIÈRE

par Jean DELONS

Cofiroute, directeur du département Économie et Traffic

et Vincent PIRON

Piron Consulting

*La crise économique en cours conduit la puissance publique à faire appel, de plus en plus, au secteur privé, tant pour la conception que pour le financement des ouvrages, et tant dans le domaine des transports que dans celui des bâtiments. Se pose alors de manière rigoureuse la question de la rentabilité économique d'une part, et financière de l'autre, de ces investissements: comment l'évaluer à long terme? En zone urbaine,*

*Cofiroute et VINCI Concessions ont développé un modèle urbain, nommé Pirandello® et déjà présenté dans cette revue il y a trois ans. Depuis lors, l'équipe de Cofiroute (\*) a validé le modèle par des tests et des études sur différentes agglomérations de taille différente et de façon diachronique en reconstituant l'évolution de l'Ile-de-France entre 1968 et 2005. Les lois comportementales des ménages ont été améliorées, et le comportement des acteurs économiques institutionnels a été intégré au logiciel.*

*Ceci permettra de meilleurs tests de la durabilité (sociologique, économique et environnementale) des projets, notamment celui du Grand Paris.*

Parmi les familles de mots les plus employées ces derniers temps, on trouvera la famille « durabilité » et la famille « endettement ». Ces familles recourent des concepts relativement simples et précis (voir la définition initiale de la durabilité et la définition d'une dette (1) telle que proposée par le dictionnaire).

Gro H. Bruntland a défini le développement durable comme celui « qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». La question d'équité intergénérationnelle est donc au cœur de la notion. La durabilité consiste à léguer à nos enfants un monde qui n'est pas détérioré

par rapport à celui dont nous avons hérité des générations précédentes. En termes financiers, nous pourrions interpréter ceci comme la maxime des bons bourgeois lyonnais d'antan: vivons des intérêts et ne touchons pas au capital.

Dans la famille « endettement », le même raisonnement s'applique: le niveau des dettes aujourd'hui ne doit pas compromettre la capacité des générations futures à subvenir à leurs besoins et à réaliser des investissements. Les entreprises et les ménages le savent bien: sauf exception, les dettes sont remboursées. Pour les États le raisonnement n'est pas le même car celui qui endette le pays ne remboursera pas la dette lui-même de ses propres deniers. Cela signifie que la décision publique, gestionnaire de fait de plus de la moitié des finances du monde, doit être gérée de façon particulièrement soignée, notamment en différenciant correctement les dépenses d'investissement et celles de fonctionnement. Bien sûr, la comptabilité publique respecte formellement cette séparation, mais nombre d'investissements n'engendrent pas de richesses à un niveau suffisant et ne mériteraient pas le nom « d'investissements ».

(\*) Sous l'autorité de Jean DELONS, l'équipe se constitue de Charlotte DEROME, Jean-Philippe CHESNEAU et Nacéra MEDDAH.

Trop souvent, la « durabilité » est confondue avec la seule approche environnementale et le concept de dette disparaît derrière des garanties d'États ou des assurances anti-défaut, des titrisations vendues à des acheteurs qui n'ont aucune idée de ce qu'ils achètent, etc.

Dans l'observation des coûts et des investissements, nous centrerons notre propos sur les villes car ce sont elles qui concentrent la majeure partie de la valeur actualisée nette des coûts (investissements et exploitation) nécessaires à un fonctionnement harmonieux des pays. La partie « investissements » est d'ailleurs en général faible devant la partie « fonctionnement ». Déjà 50 % de la population mondiale habitent en ville (3 Mds d'habitants environ) et si jamais les villes qui se construisent actuellement ne sont pas « durables », le monde ira vers des problèmes sociaux d'une ampleur inédite.

La question se pose alors de savoir comment croiser ces concepts de « durabilité » et de « dette », c'est-à-dire comment orienter les investissements et les règles de fonctionnement des villes pour obtenir des structures urbaines qui constituent *in fine* une « ville durable ».

En 2008, nous avons présenté dans cette revue (2) un nouveau logiciel de représentation urbaine, déposé sous la marque Pirandello®, et qui décrit l'équilibre urbain d'une ville. Nous rappellerons brièvement le principe de ce modèle, et développerons de quelle façon nous l'avons enrichi depuis 2010, précisément de façon à prendre en compte cette contrainte d'endettement (ou de financement, si l'on préfère).

---

## RAPPEL DU PRINCIPE DU LOGICIEL D'ÉQUILIBRE PIRANDELLO®

### Le principe

Le modèle Pirandello fait une large place à l'accessibilité, et nous nous sommes beaucoup appuyés sur la « théorie de l'accessibilité » (3). Pour la résumer sommairement, cette théorie exprime le fait qu'il y a d'autant plus de richesses créées dans une agglomération que les interactions entre les différents partenaires habitant la ville y sont nombreuses et peu coûteuses en temps ou en argent. L'accessibilité se calcule et peut s'exprimer en euros. C'est la grandeur que les gens maximisent implicitement lorsqu'ils désirent aller « en ville ». Elle tend à concentrer tant les populations que les emplois.

*A contrario*, les ménages ont besoin de surface pour vivre. Leur « confort domestique » sera d'autant plus grand qu'ils disposeront de surfaces pour habiter et pour les différentes activités de la vie courante telles que l'école, les espaces ludiques et culturels, les espaces réservés aux activités sociales communes, les besoins de santé, les lieux de culte...

Dans leur décision de localisation, les ménages feront le choix correspondant à leurs préférences, mais sous contrainte budgétaire évidemment.

Il en va de même pour les entreprises. Si l'accessibilité aux emplois et aux marchés est fondamentale, la localisation d'une entreprise va être décidée en fonction de nombreux paramètres. Là encore, nous avons représenté le processus de décision des entreprises par une équation d'équilibre très simple. Bien entendu, des aspects fiscaux tant pour les entreprises que pour les ménages, jouent un rôle important dans les décisions d'implantation et sont introduits comme éléments complémentaires des équations.

Le principe du modèle Pirandello est le suivant: nous avons supposé que l'agglomération était à l'équilibre, c'est-à-dire que les forces centripètes tendant à concentrer les

ménages et les entreprises en ville sont équilibrées par les forces centrifuges (principalement sociales et économiques) tendant à chasser du centre les ménages et les entreprises qui veulent s'offrir la surface qu'elles désirent tout en respectant leur contrainte budgétaire. Pour trouver cet équilibre, Pirandello simule le comportement des ménages et des entreprises avec une hypothèse centrale: ils cherchent, par leurs choix d'implantation géographique, à maximiser leurs bénéfices (richesse financière pour les entreprises et bien-être pour les ménages) sous contrainte budgétaire.

Bien entendu, tous les ménages n'ont pas les mêmes contraintes budgétaires. Nous avons donc divisé la population en huit niveaux de revenus: ce sera une approximation de la dimension sociologique du problème.

Les équations d'équilibre sont *simples à expliquer*, et représentent idéalement les conditions contradictoires que cherchent à satisfaire les ménages (1) et les entreprises (2):

$$\text{Accessibilité} + \text{Confort Domestique} + \text{Environnement} - \text{Coûts} = \text{Constante (1)}$$

$$\text{Productivité} - \text{Salaires} - \text{Fiscalité} - \text{Coûts} = \text{Constante (2)}$$

Les trois mécanismes les plus importants sont:

— la sélection des destinations des trajets, en fonction des temps et des coûts de transport; c'est la déclinaison de la « théorie de l'accessibilité » qui permet de prendre en compte la constance de la mobilité;

— le choix de la localisation des ménages, en fonction du prix du m<sup>2</sup>, de l'accessibilité et de leur revenu, les ménages cherchant un lieu de résidence qui maximise leur satisfaction;

— le mécanisme de formation des prix de l'immobilier et des constructions neuves, les prix et les constructions étant liés au niveau de la demande.

De cette manière, on obtient une représentation de l'équilibre urbain, qui prend en compte l'ensemble des comportements classiques des ménages (sauf le choix de l'heure de départ...), des entreprises, et des propriétaires immobiliers, et qui permet de réaliser une représentation des déplacements de l'équilibre urbain en fonction de la variation de paramètres structurels de la ville.

Le modèle est classé dans la catégorie des LUTI (4) (5) tout en se différenciant des modèles complexes de ce type basés quant à eux sur une conception dynamique. Alors que ceux-ci requièrent de nombreuses hypothèses qui influent sur les résultats et souffrent d'une efficacité économétrique assez limitée, Pirandello® établit sur le long terme une situation d'*équilibre urbain*: cette technique permet de ne pas se préoccuper des « chemins » individuels empruntés par les résidents et les emplois, qui sont difficiles à anticiper, en s'appuyant sur des principes micro-économiques précis et fiables.

### Les schémas fonctionnels explicatifs

#### ICI FIGURES 1 et 2

Les transformations apportées depuis la première version du modèle (voir figures 1 et 2).

La destination finale du modèle Pirandello est d'aider à la décision publique en apportant le maximum d'informations objectives et scientifiques sur le fonctionnement des zones urbaines, c'est-à-dire sur le comportement des ménages, des entreprises et des décideurs publics sous contrainte budgétaire. Comme tout modèle, Pirandello est simplificateur, il radicalise les comportements car il ne peut pas décrire la totalité des interactions sociales urbaines. Donc il ne faut pas se tromper sur les paramètres négligés et vérifier par des tests ou des recoupements si les paramètres négligés sont vraiment négligeables. Le développe-

ment du modèle s'est fait selon le principe suivant: nous sommes partis d'un logiciel stable et relativement simple, nous l'avons rendu plus robuste en ajustant des paramètres sur des séries statistiques longues et nous l'avons enrichi en prenant en compte des paramètres additionnels qui ne remettent pas en cause la stabilité. Nous avons pu ainsi transformer profondément le logiciel initial.

### Enrichissement de la description comportementale

#### Loi de formation des prix du logement

Les résidents sont logiques et cherchent à concilier trois approches pour l'achat des appartements: l'usage réaliste tel que les habitants vont le vivre, l'imaginaire des destinations qui ne seront que très rarement utilisées, et enfin l'espérance de gain à la revente. Nous avons donc fortement modifié la procédure de calcul de prix par rapport à la version précédente.

On a cherché à prendre en compte une distinction entre le marché de court terme et le marché d'accession à la propriété, qui définit l'équilibre de long terme.

#### *Équilibre de long terme: l'accession à la propriété*

En réalité, les résidents ont le choix de devenir propriétaire, ou de rester locataires, soit par manque de revenus, soit parce qu'ils disposent de placements encore plus rentables. Par ailleurs, on assiste à un découplage du prix du m<sup>2</sup> à l'achat et en location.

Considérons un résident représentatif. Il investira dans son appartement si la valeur actualisée (au taux psychologique  $\psi$ ) du service annuel rendu et de la valeur de son appartement est positive.

La condition de marché sur les prix maximaux  $p$  s'écrit alors:

$$p = \frac{I}{a(i) - \psi} [s^{\alpha-1} + Acc(i)/s]$$

$s$  représente la surface par tête et  $Acc$  l'accessibilité.

Quand les taux immobiliers sont très bas, comme actuellement, le terme en  $a(i) - \psi$  devient très petit et les prix s'envolent, alors que les loyers, souvent contraints par des baux assez longs, sont relativement stables.

Ce qui est très important, c'est l'introduction explicite de l'accessibilité dans la fonction de prix, ainsi que la conservation du coût marginal.

Mais le message est clair: cette mécanique de formation des prix conduit à transférer l'ensemble des surplus dans le prix de l'immobilier!

#### *Prise en compte du risque vis-à-vis de la valorisation de l'immobilier*

Compte tenu de l'importance du capital immobilier, il y a lieu de valoriser une prime de risque.

Les décisions d'investissement immobilier dans un ménage sont complexes dans la mesure où il n'est pas possible de « tronçonner » ces opérations en un grand nombre de petits projets indépendants, dont les risques se « diluent ».

La prise de risque d'un ménage lorsqu'il se lance dans un « projet immobilier » dépend de la taille relative de l'investissement: à partir d'une certaine taille, c'est l'existence même du ménage qui est en jeu en cas d'échec lourd dans la réalisation du projet immobilier considéré.

Certes, un ménage cherche des projets immobiliers qui lui permettent de se développer et d'augmenter son patrimoine; *mais il cherche surtout à survivre*: cela se traduit par une « aversion au risque », que l'on doit trouver à l'égard des projets qui par leur taille risquent de mettre en péril l'existence même du ménage.

Ainsi, dans le cas d'un gain espéré positif, il est raisonnable d'identifier *l'utilité* d'un projet pour le ménage à son avantage actualisé; par contre dans les cas de gains négatifs, ou tout au moins inférieurs à la valeur escomptée, il est raisonnable de valoriser de manière beaucoup plus importante la perte qui peut, si elle est de grande ampleur, conduire le ménage à la faillite.

Le « bon » critère d'analyse du projet pour le ménage est donc de chercher à maximiser non pas son gain le plus probable, mais son utilité espérée, compte tenu du risque encouru. Ce qui s'écrit simplement:

$$C = \int u(t) \cdot \ln(t, m, \sigma) dt$$

où:

—  $u(t)$  est la fonction d'utilité du ménage pour un niveau de revenu actualisé donné;

—  $\ln(t, m, \sigma)$  est la distribution de probabilité suivant une loi normale de moyenne  $m$  et d'écart type  $\sigma$ .

Cette valeur  $C$  est donc « l'équivalent certain » à prendre en compte dans les modèles financiers et dans le modèle Pirandello, permettant de tenir compte de la taille relative du ménage et du projet immobilier.

La correction sur les prix n'est pas négligeable, et est d'autant plus forte que la surface est grande.

## Typologie des emplois

Dans la version initiale du modèle, les catégories d'emplois étaient assez sommaires, et ne tenaient pas assez compte de la géographie. Nous avons radicalement modifié leur description, en prenant en compte de nouveaux paramètres, plus physiques ceux-là.

### *Loi de spatialisation avec taille de marché exogène*

On distingue deux types d'emplois:

— les emplois de services, généralement de proximité (emplois « présentiels »);

— les autres emplois.

Cette distinction correspond à la séparation de deux mécanismes distincts: le premier est une attractivité de type service, la somme des deux correspond au bassin d'emplois.

### Accessibilité des résidents aux emplois

Chaque emploi, à un titre ou à un autre, est une destination possible, ainsi que chaque résident. C'est la possibilité de rencontres qui définit ici l'effet d'agglomération.

On définit une fonction d'utilité pour chacune de ces destinations:

— pour les populations:  $u(i) = u_0 - t_{ij} + \varepsilon$

— pour les emplois, il faut prendre en compte le fait qu'un même individu ne peut occuper plus d'un poste à la fois; il s'ensuit un mécanisme de concurrence entre les résidents pour occuper les mêmes emplois en priorité; soit  $p^*$  la probabilité de pouvoir occuper cet emploi, on a:  $u(i) = u_0 \cdot p^* - t_{ij} + \varepsilon$

— pour les services, on prend en compte pour chacun des emplois concernés une utilité spécifique. On a donc  $u(i, j) = u_0(j) - t_{ij} + \varepsilon$

$$Acc(i) = \frac{1}{\gamma} \log \left[ \sum_{pop} e^{u(j)} + \sum_{emplois^*} e^{u(j)} + \sum_{emplois\_locaux} e^{u(j)} \right]$$

### Accessibilité des emplois de service

C'est typiquement une activité « B to C », et l'on prendra un périmètre « population + emploi ».

### Accessibilité des autres emplois

C'est typiquement une activité « B to B », et l'on prendra un périmètre « k.population +emploi ».

### *Endogénéisation du marché de l'emploi*

Enfin, et pour finir sur les emplois, nous avons approché la question des emplois créés par une meilleure accessibilité des pôles d'intérêt de l'agglomération. La démarche se fait en deux temps:

— on analyse les lois de spatialisation d'un marché de l'emploi de taille exogène, c'est-à-dire donné comme entrée dans le modèle;

— on généralise cette loi au cas de marché de l'emploi variable, avec une évaluation de la création d'emplois suite à une amélioration de l'accessibilité.

En supposant ensuite un ratio emplois/population constant, on aura la pleine mesure de l'effet économique d'un investissement public améliorant l'accessibilité (6).

### Loi de spatialisation avec taille de marché exogène (donnée externe du nombre d'emplois)

Les emplois cherchent en se localisant à maximiser leur efficacité, tout en tenant compte des places disponibles. Pour un stock d'emplois  $N$ , on considère une affectation des emplois suivant une loi logit (7).

### Loi de spatialisation avec taille de marché endogène (calcul du nombre d'emplois ajusté par le modèle)

Mais si l'hypothèse de taille du marché de l'emploi exogène est valide dans le processus de reconstitution des comportements de localisation en situation de calibrage, elle est beaucoup plus discutable en situation projet à l'équilibre, où chaque emploi possible (c'est-à-dire dont la productivité marginale reste supérieure à son coût) peut être créé. Il y a donc lieu de modifier le programme d'optimisation de l'entreprise.

C'est par cette approche que l'on évaluera la création d'emplois due à l'amélioration d'un réseau de transports, ou de toute autre cause d'amélioration de l'accessibilité. Elle revient à prendre en compte une élasticité du nombre d'emplois à l'accessibilité globale, dont les variations dépendent principalement du gain de temps (champ de vitesses). Nous avons calé l'élasticité en utilisant l'enquête INSEE ALISSE.

## Marché des bureaux

L'équilibre urbain est en réalité la résultante d'un grand nombre d'opérations de localisation de la part des ménages et des emplois, effectués sur une longue période. En règle générale, les surfaces construites sont remplies. Il y a une exception « mécanique » à cette règle: ce sont les surfaces libres pour changement de propriétaire, qui représentent environ 5 % des surfaces totales, et qui sont par ailleurs un bon indicateur de la tension sur le marché de l'immobilier. On parlera du cas où toutes les surfaces sont utilisées *en équilibre urbain saturé*.

Mais les emplois étant incompressibles (la surface des bureaux dépend en fait du droit du travail), ils ne peuvent ajuster leur surface par tête à la place disponible. On peut donc envisager des cas de figure où l'offre est inférieure à la demande, mais ce ne sont pas des cas d'équilibre, car alors il y a automatiquement augmentation des surfaces, ou, si les surfaces totales restent insuffisantes, il n'y a pas de solution. On peut aussi envisager des cas de figure où l'offre de bureaux est excédentaire par rapport à la demande: on appellera cette configuration un *équilibre urbain insaturé*.

À partir du moment où la place offerte n'est plus égale à la demande de place, il faut valoriser la place libre à l'intérieur d'une zone. En effet, celle-ci procure un choix supplémentaire à chaque déménagement, et il est nécessaire de prendre en compte ce nouvel univers de choix pour modéliser la localisation des emplois et le service rendu.

*Calculs dans le cas d'un équilibre urbain saturé*

On définit une fonction d'utilité  $u(i)$  pour chacun des sites:

Pour les populations:  $u(i) = u_0 - t_{ij} + \varepsilon$

Pour les emplois, on peut considérer qu'il y a un marché unique au niveau de l'aire d'étude, qui est obtenu par la répétition

d'un choix « LOGIT » à intervalle régulier. Soit  $\phi$  le taux de renouvellement pour une période considérée des bureaux. Ce taux est supposé uniforme.

*Calculs dans le cas d'un équilibre urbain insaturé*

Dans le cas d'un équilibre urbain insaturé, au moment du choix, les emplois en quête de localisation tiennent compte des espaces libres, c'est-à-dire de l'écart entre le nombre total d'emplois possibles et le nombre réel d'emplois.

L'équation représentative de cette loi conduit comme précédemment à un point fixe, qui est *l'équilibre insaturé*. Cette relation favorise les zones peu chargées, et a donc tendance à équilibrer les emplois de manière réaliste. Elle est de forme implicite, ce qui est déjà le cas de la formule précédente, l'utilité dépendant de l'accessibilité, qui dépend des emplois. Une fois encore, la solution est nécessairement numérique.

## Prise en compte des objectifs financiers des acteurs urbains

### Équation des maires

Il s'agit là de représenter le comportement des responsables de l'utilisation du terrain dans les communes. Nous symboliserons la procédure et les acteurs par la symbolique du « maire » et appellerons donc « l'équation des maires » celle qui représente un comportement optimisant la valeur foncière des terrains de la commune. On a supposé un comportement rationnel d'un maire qui cherche à valoriser au mieux un bien fini: la surface des terrains de sa commune.

*Principe proposé*

Le principe est de considérer que le maire cherche à maximiser l'utilité de ses terrains dans le temps: c'est une manière de traiter l'intérêt général et de penser à sa réélec-

tion... On a ici un problème analogue à celui de la maximisation d'un bien non renouvelable, qui a été initié par Hotelling.

Formellement, cela s'écrit, en temps continu:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^N p_i n_i e^{\gamma t_i}$$

où:  $n_i$  est le nombre de  $m^2$  libérés l'année  $i$   
 $p_i$  le prix anticipé de l'année  $i$

$\gamma$  le taux d'actualisation psychologique des maîtres (en € constant)

$N$  la superficie totale disponible au niveau de la commune (ou de la zone)

En calculant les conditions de maximisation de ce programme par rapport aux variables  $n_i$ , on obtient des conditions sur  $p(i)$ , hors inflation:

$$p(i) = p(0) e^{\gamma t_i}$$

Cette relation indique que la recherche de l'optimisation de la libération des surfaces constructibles se fait en prenant en compte un prix du  $m^2$  de terrain de plus en plus élevé dans le temps.

À ce niveau, on dispose de la loi sur les prix, alors qu'on recherche une loi sur les surfaces libérées. On introduit une relation de demande exponentielle, qui introduit le paramètre de croissance de la consommation finale des ménages (CFM)  $\chi$  dans la mesure où des analyses sur longue période ont montré que le prix du  $m^2$  croissait comme la CFM (8). Elle indique que plus le prix est élevé, moins de sites sont envisageables, car ces prix imposent des contraintes supplémentaires aux promoteurs (gamme de produit plus élevée par exemple) (voir figure 3).

### ICI FIGURE 3

Avec cette stratégie, la commune mettra en vente des terrains en 2030 dont le prix de vente est augmenté de 56 % par rapport à la hausse moyenne nationale. C'est en soi

un résultat utile pour les exercices de prospective.

### Mise en œuvre pratique

Cette technique permet par ailleurs de faire facilement des tests de sensibilité sur le paramètre psychologique des maîtres et sa stabilité dans le temps.

Sa mise en œuvre est simple, dans la mesure où elle se limite à l'introduction dans Pirandello de deux nouveaux coefficients :

— le ST (n), qui est la part de superficie disponible à l'horizon n ;

— le coefficient de croissance des prix du foncier, qui entre dans l'équation du promoteur, pour analyser la faisabilité de chaque opération.

### Équation des promoteurs

On cherche à introduire les prix de construction et les subventions pour lancer immédiatement pour répondre à des questions du type réalisabilité immédiate d'une opération immobilière.

Deux possibilités sont envisagées ci-dessous :

— on laisse les acteurs économiques privés intervenir seuls, ce qui est une démarche par les prix : on compare en cours de simulation le coût de construction au prix de vente ; on en déduit la fraction des opérations réalisables ;

— on cherche la subvention publique nécessaire pour réaliser complètement un projet donné, ce qui est une démarche par les quantités (surfaces) : on regarde *a posteriori* le montant des subventions nécessaires.

### Opérations privées

Les coûts d'évolution de la ville peuvent être résumés à l'équation suivante, qui indique qu'une opération n'est réalisée par des partenaires privés que si elle procure un avantage au propriétaire, et que l'opération

est dans une zone constructible déterminée par son « cos » :

$$S_i P_i + S_f C_f < S_f P_f$$

$$S_f < CSA \text{ Surface\_zone } \cos$$

où : CSA est le coefficient de surface habitable actuel

$S_i$  est la surface de logement ou de bureaux initiale

$S_f$  est la surface de logement ou de bureaux finale

$C_f$  est le coût de construction du  $m^2$

$P_f$  est le prix de marché du  $m^2$

On écrit ici simplement que le coût d'acquisition et de construction est inférieur au prix de marché et que la surface totale rentre dans le règlement d'urbanisme.

Lorsque les surfaces sont construites sur des terrains nouvellement ouverts à la construction,  $p_i = 0$  (il n'y a pas d'expropriation).

On suppose par ailleurs que les coûts de construction sont distribués entre deux valeurs uniformément, pour prendre en compte l'hétérogénéité des situations rencontrées :

$$C_i = C_{\text{inf}} + (C_{\text{sup}} - C_{\text{inf}})u$$

Le modèle peut ainsi estimer le pourcentage compris entre 0 % et 100 % de travaux réalisables à terme, en fonction du prix de marché et de l'état initial. Ce principe peut être généralisé à toute distribution linéaire par morceaux (et même, mais cela paraît moins souple, à toute distribution de probabilité).

La construction ne peut commencer que si (on suppose l'opération homogène) :

$$C_{f\text{min}} < P_i \cdot \frac{S_f - S_i}{S_f}$$

Le modèle peut ainsi calculer pour chacune des zones le pourcentage de nouvelles surfaces habitables ou de bureaux. Le reste du modèle est inchangé.

*Remarque importante :* le caractère distribué des coûts évite de rentrer dans des problèmes de type combinatoire, tout en sachant que ce principe conduit à saupoudrer plus que dans la réalité les nouvelles surfaces.

On pourra ainsi sur un même graphique visualiser simultanément le prix de marché et le prix de construction, suivant un graphique analogue à celui-ci (voir figure 4).

### ICI FIGURE 4

*Remarque importante :* on réalise ici une extension significative au principe d'équilibre retenu jusqu'ici dans Pirandello (qui ignore le passé), dans la mesure où le résultat final dépend des conditions initiales (par le terme  $S_i P_i$ , qui prend en compte à la fois les surfaces précédentes et les prix de marché initiaux). Cela ne remet pas en cause le principe du modèle, mais nécessite de prendre en compte deux états (un état initial et un état final). On ne peut cependant rien déduire du chemin qui sera réellement pris.

Le supplément de PIB et de bien-être généré par cette opération se calcule aisément. Cela constitue un guide à la décision publique de faire ou non des opérations immobilières.

### Opérations publiques

Dans le cas des opérations avec intervention publique, on cherche simplement le montant de la subvention correspondant à la réalisation de l'ensemble du projet. La démarche est la suivante :

— on définit un coût de réalisation par  $m^2$  *a priori* nul dans les paramètres d'entrée de Pirandello. C'est un moyen détourné pour garantir la réalisation complète de l'opération ;

— on fait tourner Pirandello jusqu'à obtention de l'équilibre urbain ; le modèle calcule notamment le prix d'équilibre du projet ;

— on récupère les prix de marché, et les prix initiaux (on suppose que les expropriations sont faites au départ...), et l'on fait le calcul *a posteriori* de la subvention d'investissement nécessaire, le cas échéant. Ce calcul fait intervenir le coût de réalisation réel cette fois :

$$\text{Subvention} = S_f P_f - S_i P_i - S_f C_f$$

Comme dans le cas précédent, on peut calculer le supplément de PIB (et de *welfare*) et rapporter le PIB supplémentaire et la recette fiscale liée à la TVA à la subvention donnée localement pour permettre la réalisation du projet.

---

## LES CALAGES ET LES VÉRIFICATIONS

---

### Calage du modèle

Le calage d'un modèle urbain est très délicat car il consiste à caler d'abord un modèle de transports multimodal, en incluant les modes doux et le stationnement. Cette nécessité de faire un calage multimodal complet a été montrée par l'impossibilité de reconstituer convenablement le comportement des ménages avec un modèle « en ordre de grandeur ». En effet, nombre de déplacements sont courts, et les choix résidentiels prennent en compte la possibilité de faire un maximum de déplacements soit à pied, soit en mode doux, notamment pour les populations les moins favorisées.

La seconde difficulté consiste à disposer d'une bonne description de la réalité du bâti (logements et bureaux) alors que les statistiques ne sont pas toujours aisément disponibles, soit pour raison de confidentialité, soit par absence de consolidation des valeurs disponibles.

Bien entendu, une modélisation urbaine ne peut pas se limiter à la représentation d'une seule ville, cela lui enlèverait de l'intérêt.

Comme le modèle Pirandello est en fait un modèle comportemental, dans la mesure où nous restons dans la même « civilisation », le modèle devrait s'appliquer de la même façon. C'est pourquoi nous avons travaillé avec deux villes de tailles différentes et de structures urbaines différentes : l'agglomération lyonnaise et celle de Montpellier.

### Cas lyonnais : aire d'étude

L'aire d'étude retenue s'étend sur une surface de 7370 km<sup>2</sup> et intègre les villes de Saint-Étienne, Villefranche sur Saône et Vienne, soit 2,6 M d'habitants et 1,1 M d'emplois (voir figure 5).

#### ICI FIGURE 5

Les populations, concentrées à plus de 50 % dans l'aire urbaine lyonnaise, ont une distribution socio-économique qui se distingue de celle de l'Île-de-France, plus aisée (16 % contre 25 % de cadres et prof. sup.) et plus jeune (81 % contre 83 % de la population inférieure à 60 ans).

La répartition des emplois (1,1 M) fortement concentrée dans Lyon (31 %) caractérise la compétitivité de la ville au sein de l'aire d'étude.

Dans le cas lyonnais, il a fallu plusieurs mois pour disposer d'un ensemble cohérent de données. Mais maintenant les qualités prédictives du modèle sur la localisation des populations et des emplois par zones se sont confirmées avec une très bonne précision et permettent de faire des simulations (voir à la fin de l'article les effets d'un péage cordon urbain).

### Montpellier

Le périmètre d'analyse de l'étude actuellement en cours sur l'agglomération de Montpellier s'étend de Nîmes à Béziers, soit environ un million d'habitants, 450000 actifs (9) et une densité d'environ 300 habitants/km<sup>2</sup>. La population est assez

jeune : plus de trois personnes sur quatre ont moins de 60 ans. Une part importante concerne des cadres et professions intermédiaires (41 % des actifs de plus de 15 ans). La communauté d'agglomération de Montpellier comporte quant à elle 370000 habitants et plus de 800 habitants/km<sup>2</sup>.

La modélisation de l'agglomération de Montpellier avec Pirandello a pour but de mesurer les effets socio-économiques de plusieurs projets comme ceux présents dans le SCOT, les lignes de tramways, la nouvelle ligne de TGV ou encore le bouclage du contournement de l'agglomération.

À ce stade, les résultats de simulation des différents projets ne sont pas encore connus. Le calage du modèle sur le périmètre d'étude est en cours et donne des premiers résultats satisfaisants. Les graphiques 6 et 7 illustrent à ce titre les premiers résultats de la comparaison entre le prix du logement estimé et le prix du logement observé ; le nombre d'emplois estimé et le nombre d'emplois observé.

#### FIGURE 6

#### FIGURE 7

### Le calage intertemporel sur l'Île-de-France : la demande croissante de surfaces dans le temps

Faire un modèle calé sur une date précise est une chose, dire que ce modèle représentera le futur en est une autre. C'est pourquoi il nous a paru indispensable de vérifier que le modèle représentait correctement ce qui s'était passé depuis quelques décennies en Île-de-France, la disponibilité des données permettant de faire ce test suprême de validation.

Le point clé s'est avéré être la croissance de la surface de logement par personne. L'objectif est alors de trouver une relation à partir de certains critères qui permettent de

déterminer la surface désirée de référence « So » utilisée dans Pirandello et son évolution historique. De même qu'il est devenu courant de faire varier la valeur du temps dans les modèles de trafic, de même dans Pirandello, il y a lieu de faire évoluer un certain nombre de paramètres en fonction du temps, pour tenir compte de facteurs exogènes, dont essentiellement :

- la taille des ménages,
- le revenu des ménages.

Deux approches sont *a priori* possibles, l'une par analyse des comportements des différents ménages à un horizon donné (analyse synchronique) et l'autre en essayant de reconstituer le passé (analyse diachronique). Cette seconde technique pose un problème ensuite dans les reconstitutions du passé, dans la mesure où cela reviendrait à utiliser une partie de la variable expliquée comme variable explicative, ce qui n'est pas très satisfaisant. On se concentrera ici sur la première approche.

On va considérer que la surface désirée par individu dépend d'une part de la taille du ménage (plus le ménage est nombreux, plus la surface par personne est petite), d'autre part des revenus du ménage.

Pour analyser cette dépendance on va utiliser des données de surface par personne en Ile-de-France croisées par la taille et la classe de revenu du ménage issues de la dernière EGT (2001) (voir figure 8).

### ICI FIGURE 8

Compte tenu des résultats des observations de l'EGT, on propose une fonction du type :

$$S = k \cdot r^\alpha \cdot t^\beta$$

où  $S$  est la surface moyenne par habitant (en  $m^2$ ),  $r$  est le revenu des ménages (en milliers de francs),  $t$  est la taille des ménages et  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  sont les trois paramètres à déterminer.

La deuxième partie de l'étude consiste à récupérer les données historiques des deux variables qu'on a utilisées (taille et revenu des ménages) pour inférer les valeurs de la surface de référence dans le passé et analyser son évolution.

On considère que la taille moyenne des ménages décroît exponentiellement vers une valeur asymptotique  $C$  à déterminer et on utilisera une formule de type :

$$t = k \cdot e^{\alpha(n-n_0)} + C$$

Pour l'évolution des revenus des ménages, faute de données disponibles pour l'Ile-de-France, on a utilisé des données pour la France entière.

Il s'agit en particulier du revenu moyen disponible des ménages à partir de 1970, dont les données ont été rassemblées par l'INSEE à partir des enquêtes revenu fiscaux et sociaux.

On essaye d'ajuster les données à partir de 1975 avec une droite de la forme :

$$r = a \cdot (n - n_0) + b$$

À partir des données historiques, on peut donner une estimation de la surface de référence en appliquant la formule déduite précédemment.

On observe une variation de 19 % du paramètre  $S_0$  (surface de référence) entre 1970 et 2008, qui est due à la fois à l'augmentation progressive du revenu moyen des ménages ainsi qu'à la diminution de la taille moyenne des ménages (voir figure 9).

### ICI FIGURE 9

#### Zoning et calcul

Après plusieurs années de tests et d'améliorations du logiciel, et une reconstitution satisfaisante du passé, nous avons constaté qu'il était indispensable d'avoir une très bonne précision des temps de transports, ainsi qu'une grande stabilité des résultats. Pour ce faire, un découpage fin est nécessaire, le nombre de zones ne pouvant pas

descendre en dessous de 300 pour la région Ile-de-France.

Compte tenu du découpage en tranches de revenus et en types d'emplois, nous sommes donc conduits à travailler avec une segmentation de la population et des emplois représentant plus de 4000 comportements élémentaires. La détermination de l'équilibre, qui est la résultante de ces 4000 comportements de recherche d'optimum, est très consommatrice de temps de calcul. Dans la version initiale, il fallait une vingtaine d'heures de calcul, ce qui n'est pas opérationnel. Nous avons donc eu recours aux techniques de parallélisation (Open MP), ce qui a divisé par cinq le temps requis, avec l'utilisation d'une machine à 24 processeurs.

---

## USAGE DU MODÈLE ET DÉVELOPPEMENTS EN COURS

---

### La nouvelle contrainte de la dette

Telle la « patate chaude », la dette se cache de multiples façons : titrisation, assurances, CDS, comptabilité publique qualifiée de créative, garanties diverses, engagements hors bilan, et nous en passons. L'idée est soit de revendre la dette le plus rapidement possible, soit de mutualiser le risque d'une façon telle que plus personne n'ait le temps de vraiment comprendre les collatéraux d'une dette. Cela dure depuis des décennies et a permis un montant de dépenses largement supérieur au revenu de l'ensemble des organismes (ménages, entreprises, États...). Cette configuration est bonne si les investissements réalisés sont économiquement sains (rentables), ou que les dépenses sont sociologiquement indispensables et quasiment assimilables à des investissements (éducation par exemple), mais c'est plus grave dans le cas contraire.



Nous n'allons pas ajouter des considérations supplémentaires aux centaines de milliers de pages écrites sur le sujet; nous allons simplement insister sur un point: le futur ne peut plus être comme le passé. Les gouffres financiers ont été bouchés, d'abord directement par les structures publiques, puis par les emprunts par lesquels elles se refinancent. Mais aujourd'hui la mécanique est cassée, les paradigmes ont changé et il faut travailler autrement (10) (11).

Mais comment? Avec une meilleure connaissance du fonctionnement des villes pour optimiser l'usage de l'existant, c'est évident. Donc une meilleure connaissance des comportements des habitants, et des coûts des services en ville.

On voit déjà les grands opérateurs de réseaux informatiques (IBM, CISCO) arriver sur les sujets urbains en ce qui concerne les fluides et les transports. Il restait à modéliser le comportemental, et Pirandello participe à cet effort.

Il ne reste plus alors qu'à faire des hypothèses réalistes sur les grands paramètres (revenus des ménages, PIB et dette globale) pour avoir une assise solide et tenter d'avoir une représentation du futur urbain.

La pression croissante sur les budgets publics pourrait conduire à mettre du péage – urbain de zone par exemple – par analogie à ce qui peut exister dans d'autres villes, de façon à récupérer des recettes budgétaires. Mais si les questions de transport urbain se ressemblent, les situations sociales urbaines sont très différentes d'une ville à l'autre et les propositions techniques ne sauraient être copiées sans discernement. En est témoin le test théorique réalisé sur les agglomérations de Paris et Lyon et présenté ci-dessous.

#### *Cas lyonnais avec simulation d'un péage urbain*

Une illustration de l'application de Pirandello sur le cas lyonnais est la mise en place d'un péage routier autour de Lyon

(Piron et Delons, 2011). L'évaluation de ce péage a été réalisée dans un horizon de long terme, c'est-à-dire prenant en compte les hypothèses du SCOT de l'aire urbaine de Lyon.

Le principal résultat issu de cette simulation est la densification du centre au détriment de la première couronne qui voit sa population se réduire substantiellement. Deux arguments sont avancés pour expliquer ce mouvement migratoire.

La faible densité du centre-ville lyonnais génère un écart réduit de l'utilité du confort domestique entre le centre et la périphérie.

L'accessibilité du centre, caractérisé par une part importante des populations et emplois est faiblement impactée par le péage par rapport à l'accessibilité des zones périphériques (voir figure 10).

#### FIGURE 10

La population lyonnaise croît significativement et de manière hétérogène dans le centre (>5%) et décroît fortement en première couronne (>10% – forte perte en terme d'accessibilité). La population croît plus légèrement (<0%-5%>) et de manière plus homogène dans le reste de l'aire d'étude malgré quelques exceptions en périphérie, pouvant être assimilées à des « effets de bord ».

Compte tenu de la valorisation croissante du temps en fonction du revenu, l'effet centralisateur du péage masque une répartition hétérogène des populations. Les populations à faible revenu tendent à quitter la première couronne pour se concentrer dans le centre alors que les tranches de revenus élevés suivent un schéma inverse pour se regrouper en périphérie.

#### Travailler sur le coût global de fonctionnement des villes

Il est clair que la partie « investissements » dans une ville ne représente qu'une petite

partie des coûts totaux. Il nous a semblé donc essentiel de développer la connaissance des coûts de fonctionnement de la ville, tous organismes confondus. En effet, il est rare d'avoir de façon consolidée sans doubles comptes, les dépenses par type de services et par nature de collectivités (ménages, entreprises, collectivités publiques, organismes sociaux, État).

Bien entendu, les collectivités publiques, les organismes sociaux et l'État n'ont pas de recettes propres: la France n'a pas de pétrole... Donc dire que les collectivités et les organismes sociaux payent n'a guère de sens: il s'agit de transferts et ce sont les entreprises et les ménages qui payent *in fine*. Beaucoup de discussions disparaîtraient ainsi pour le bénéfice de tous si cette réalité était bien assimilée...

Les financements croisés étant un sport national, décroiser ces flux de façon à savoir combien coûtent les principales fonctions est un objectif peu aisé à réaliser. Il est en cours aujourd'hui et devrait clarifier considérablement la collectivité publique sur les conséquences à long terme de ses décisions. L'approche des contrats de partenariat et des concessions a déjà conduit de nombreux acteurs à prendre conscience du coût réel d'un investissement. Dans un monde incertain, et de plus en plus incertain du point de vue financier, savoir combien coûtent les choses à long terme avant de prendre une décision devient vraiment utile! La leçon des « subprimes » aura servi au moins à cela, du moins peut-on l'espérer pour les quelques années qui viennent.

Le travail est en cours à l'heure actuelle et devrait être achevé à la fin de l'année.

#### **Améliorer l'accessibilité par modification de la localisation des emplois et par la fluidification du marché du logement**

Il y a bien des manières d'améliorer l'accessibilité et le bien-être des habitants. L'investissement en bâtiments de services

(écoles, hôpitaux, stades, prisons, musées, universités) est une façon de le faire.

Mais il y en a d'autres, notamment en recherchant à *minimiser* les déplacements à bien-être constant. Et donc agir sur la répartition fine des services par rapport à la demande de la population; et en précisant quels services pour quelle population!

La comparaison entre Paris et Londres a été faite sous tous les angles possibles, et l'un des points significatifs qui rend Londres si attractif (400 000 Français aujourd'hui, parmi les plus jeunes et dynamiques) est la flexibilité du logement (location de courte durée). N'est-ce pas une autre façon de travailler l'accessibilité?

---

## CONCLUSION

---

La recherche d'une augmentation du bien-être et d'une réduction des coûts n'est pas incompatible avec la programmation d'infrastructures de transports supplémentaires par rapport à ce qui existe aujourd'hui.

Notamment en Ile-de-France, le projet du Grand Paris porte en lui l'existence d'un regard nouveau, volontariste, sur une agglomération qui se développe moins vite que ses concurrentes, et s'appuie sur le fait que la poursuite de la tendance actuelle – à sous-investir – conduit à une impasse:

— investissements routiers quasiment interdits;

— investissements publics largement en retrait de ce qui devrait être fait pour maintenir une qualité de service à la population comparable à celle offerte par les autres capitales;

— choc démographique avec les départs à la retraite en dehors du système économique francilien, et donc perte de ressources financières pour l'Ile-de-France.

Bref, il est temps de repenser le système de façon « durable », et d'avoir une approche socio-économique de qualité, de façon à ce que les projets ne conduisent pas à des investissements sans rapport avec leurs bénéfices. C'est une bonne façon de prendre sérieusement en compte la question de la dette globale.

Ce n'est qu'en sommant avantages et inconvénients, calculés sur une longue période, et en recherchant une *situation d'équilibre*, qu'on peut réellement évaluer l'impact d'un projet, que ce soit un projet de transports ou un projet d'urbanisme. Enrichir tout projet d'une approche sociale, comportementale servira à une meilleure compréhension des effets complexes d'une infrastructure complémentaire, d'une tarification nouvelle, d'un quartier nouveau, d'une rénovation urbaine. C'est pour cela que le modèle Pirandello a été retenu par la Société du Grand Paris pour effectuer une évaluation de la « Perspective Paris 2050 ».

Le modèle a été conçu pour cela, et il donnera sa pleine ampleur à cette occasion ■