

MODELISATION DE L'ETALEMENT URBAIN

LE CAS DE TIJUANA AU MEXIQUE

Michel LE PAGE (informaticien - géographe urbain) Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex ORSTOM)

Email : lepage@teledetection.fr

RÉSUMÉ. : L'article propose trois approches pour la modélisation de l'expansion urbaine en se basant sur le cas de Tijuana au Mexique. En premier lieu, une observation empirique de la structure, des fonctions et de l'évolution du système urbain nous amène à une première cartographie. Ensuite, une méthode statistique est développée à partir des deux constituants que sont l'attraction du centre et l'effet localisé de la topographie. La troisième technique consiste en l'utilisation d'un automate cellulaire.

ABSTRACT : Three approaches are taken for the modelization of the urban growth on the special case of Tijuana, Mexico. First, an empirical observation of the structure, functionality and evolution of the urban system come to a primary cartography. Next, a statistical method based on the downtown attraction and localized effect of the topography is developed. The third technique consists in the use of a cellular automaton.

MOTS CLEFS : Tijuana, Expansion spatiale, Croissance urbaine, Automate cellulaire.

KEYWORDS : Tijuana, Spatial expansion, Urban growth, Cellular automata

Introduction

En Europe, l'étalement urbain est un phénomène qui est perçu négativement et qui coûte cher, sa maîtrise est un enjeu important depuis les années 70. Les mesures mises en place sont variées, mais le contrôle autoritaire de l'espace par le zonage est une solution privilégiée. Dans les pays en voie de développement, un véritable contrôle foncier est rendu difficile par la faiblesse des autorités locales et la pression des populations et des promoteurs. Les villes s'étaient donc outrageusement dans des périphéries inconsistantes.

Avec 1,2 millions d'habitants en 2000, la ville de Tijuana au Mexique semble vouloir regrouper à la fois les écueils urbains du tiers-monde mais aussi tous les méfaits d'une surconsommation plus en accord avec les pays développés et en particulier leurs proches voisins du Nord.

Située à l'intersection physique d'un pays du Sud qui a connu de gros revirements économiques et le puissant état de Californie, la ville est tiraillée depuis longtemps par les effets de la globalisation.

La mise à disposition d'une main d'œuvre bon marché, la position stratégique, et le programme maquiladora¹ ont impulsé une croissance époustouflante depuis les années 70. Dans le contexte de nouveaux marchés comme le NAFTA² ou l'accord Mexique-Union Européenne, quel est le futur qui est réservé à cette ville ? Quelles sont les possibilités d'expansion dans un site peu propice où le liquide vital, l'EAU, est extrêmement rare ?

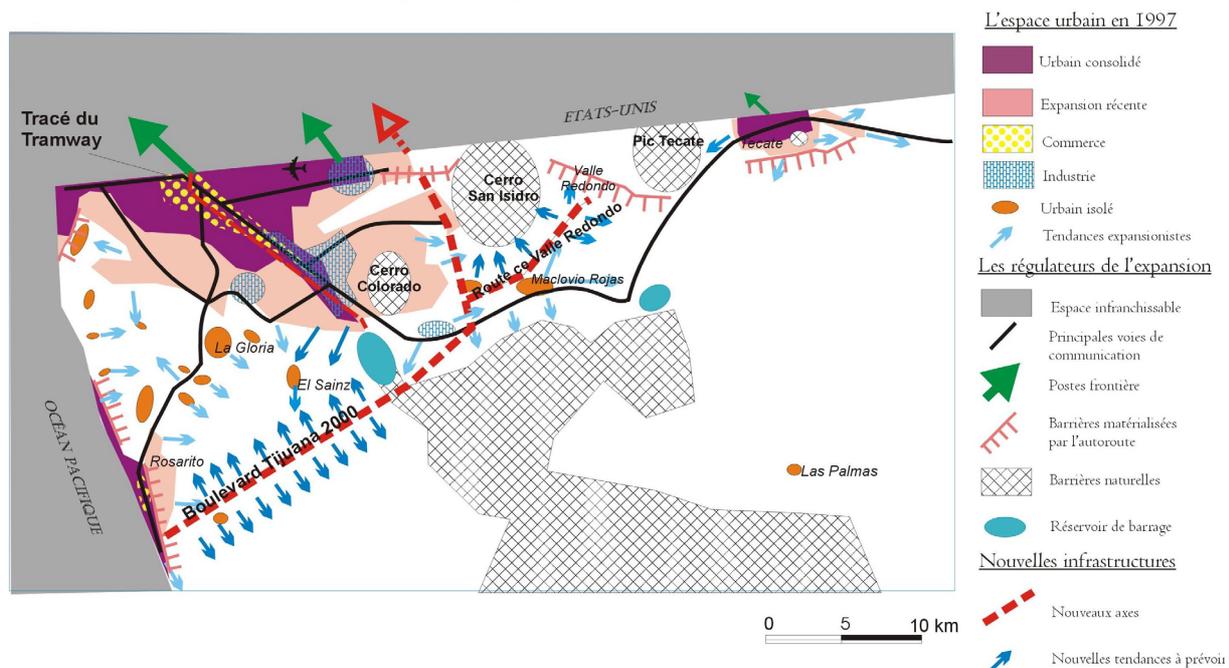
Alors que l'étude dont est extrait cet article s'attache d'abord à analyser les paramètres exogènes de la croissance puis les aspects locaux de l'expansion spatiale passée, nous nous focaliserons ici sur la modélisation de la croissance spatiale future.

1. L'expansion urbaine

1.1. Configuration spatiale du système (Fig 1)

La morphologie de Tijuana est façonnée par le paysage. Les zones les plus aptes se trouvent encerclées par de grandes expansions urbaines en voie de consolidation tant au niveau des services (eau, rue, électricité), comme des aspects sociaux d'une population largement marginalisée. Le cœur de la ville est constitué par un long boulevard industrio-commercial, les grands espaces de travail se trouvent concentrés dans des parcs industriels dans l'actuelle périphérie mais aussi sur le boulevard. Quelques axes routiers de grand débit constituent

Figure 1 : Synthèse du système urbain



l'ossature du système urbain et sont prolongés vers Tecate et Rosarito qui semblent faussement faire office de satellites. Chaque entité présente pourtant des dynamiques bien différentes : A l'est, Tecate est pour le moment assoupi et éprouve des difficultés à dépasser les barrières que représentent l'autoroute et quelques régions montagneuses. Au sud, Rosarito fait preuve d'un grand dynamisme qui lui a permis de s'étendre le long des côtes et finalement de dépasser la barrière autoroutière. Les conflits sur la possession du sol y ralentissent pour le moment un développement qui pourrait être explosif.

Divers petits développements périurbains apparaissent en détachement des grands centres. Principalement d'origine agricole, ils sont pratiquement dépourvus de toutes facilités urbaines.

Certains éléments montagneux paraissent insurmontables. Le Cerro Colorado (500m.) est déjà inséré dans la superficie urbaine. A l'est, le Cerro San Isidro (820m.) est encore plus imposant et laisse place à une vallée agricole avant de retrouver le Pic Tecate. Au sud-est de la ville, des collines s'alignent sur plusieurs kilomètres rendant impossible une extension en cette direction.

Enfin, dernier élément de la carte, les flèches indiquant les tendances d'expansions sont inscrites en fonction des nouvelles expansions urbaines observées sur les photos aériennes récentes et sur le terrain ainsi que les réseaux de chemins de terre. La vision générale nous donne l'impression que l'espace situé à l'ouest de la voie reliant Tijuana à Rosarito devrait se combler rapidement, que Tijuana devrait s'épandre également vers le sud en tache d'huile mais aussi en suivant l'axe formé par la voie Tijuana-Rosarito. La troisième voie d'expansion se situe à l'est de la ville en suivant la route de Tecate, mais est rapidement stoppée au sud par l'alignement montagneux. La situation géographique de Tecate ne semble pas devoir favoriser un développement rapide.

L'expansion vers l'Est est donc pour le moment canalisée et ne devrait pas affecter l'hinterland entre Tecate et Las Palmas avant une cinquantaine d'années.

1.2. Observation empirique des phases de l'expansion

La fondation officielle de la ville remonte seulement à 1889. La puissance d'étalement a depuis varié dans le temps et semble liée à divers facteurs qui ont été identifiés empiriquement comme la motricité ou la capacité de déplacement, la vitesse de consolidation des territoires urbanisés, la résistance à la topographie.

Les deux premières variables sont elles-mêmes fonctions des développements technologiques, de l'économie publique et privée et des disponibilités foncières en périphéries. Donc, en fait rien de très différent par rapport aux travaux de Burgess en 1927, sinon que la dimension temporelle doit prendre en compte les développements technologiques.

Ces facteurs sont en réalité peu quantifiables, nous avons donc recours à l'artefact de l'attraction du centre urbain par rapport aux densités de population. Le modèle gravitationnel de JQ Stewart en 1948, le modèle exponentiel inverse de l'économiste Clark en 1951, ou encore la variation qu'en propose Newling en 1969 sont toutes empiriquement intéressantes.

Chaque étape de croissance possède bien sur des qualités intrinsèques. Les statistiques suivantes permettront d'obtenir un panorama général de leur état actuel concernant la situation démographique et physique.

1.2.1. Distribution de la population actuelle dans les phases de croissance (tableau 2)

La répartition de la population par phase de croissance est sensiblement la même que celle de la surface occupée (colonnes 3 et 5), la plus forte variation entre les deux répartitions se situant au niveau des phases 50-70 avec 83-97.

Les densités brutes ne semblent pas indiquer de tendance, toutefois si l'on supprime de chaque phase les infrastructures de surfaces très importantes, on observe alors une augmentation de la densité jusqu'à la phase 1935-50, qui descend progressivement vers les extensions plus récentes. Le nombre réduit de phases de croissance et leur dissymétrie pourraient pourtant nous induire vers de fausses interprétations.

¹ Le Programme d'Industrialisation Frontalier (PIF) ou programme maquiladora débute en 1965. Il autorise les zones de libre-échange (duty-free) à importer des matériaux bruts et des capitaux sans restrictions, et la création d'entreprises avec des capitaux 100% étrangers, dans la mesure où ils sont réexportés. En 1998, on évalue que ce sont plus de 150.000 employés qui travaillent sous ce régime à Tijuana.

² NAFTA : North American Free Trade Agreement. Traité de libre échange entre le Mexique, les Etats-Unis et le Canada signé en 1994.

Tableau 2 : Population actuelle répartie dans chaque étape de croissance

PHASE	Population totale	% pop	Surface	% surface	Densité	Surface - Airport	Densité bis	
1889-1925	7621	0.8	147.8	0.8	51.6	147.8	51.6	
1925-1935	21393	2.3	438.3	2.3	48.8	300.0	71.3	Agua Caliente =140 Ha
1935-1950	50917	5.4	905.1	4.7	56.3	670.0	76.0	Airport = 230 ha
1950-1970	280957	30.0	5017.7	25.8	56.0	5017.7	56.0	
1970-1983	188352	20.1	4049.4	20.8	46.5	3080.0	61.2	Airport= 250 ha.
1983-1997	386451	41.3	8903.7	45.7	43.4	8903.7	43.4	
	935690 ^a		19461.9 ^a			18119.1		

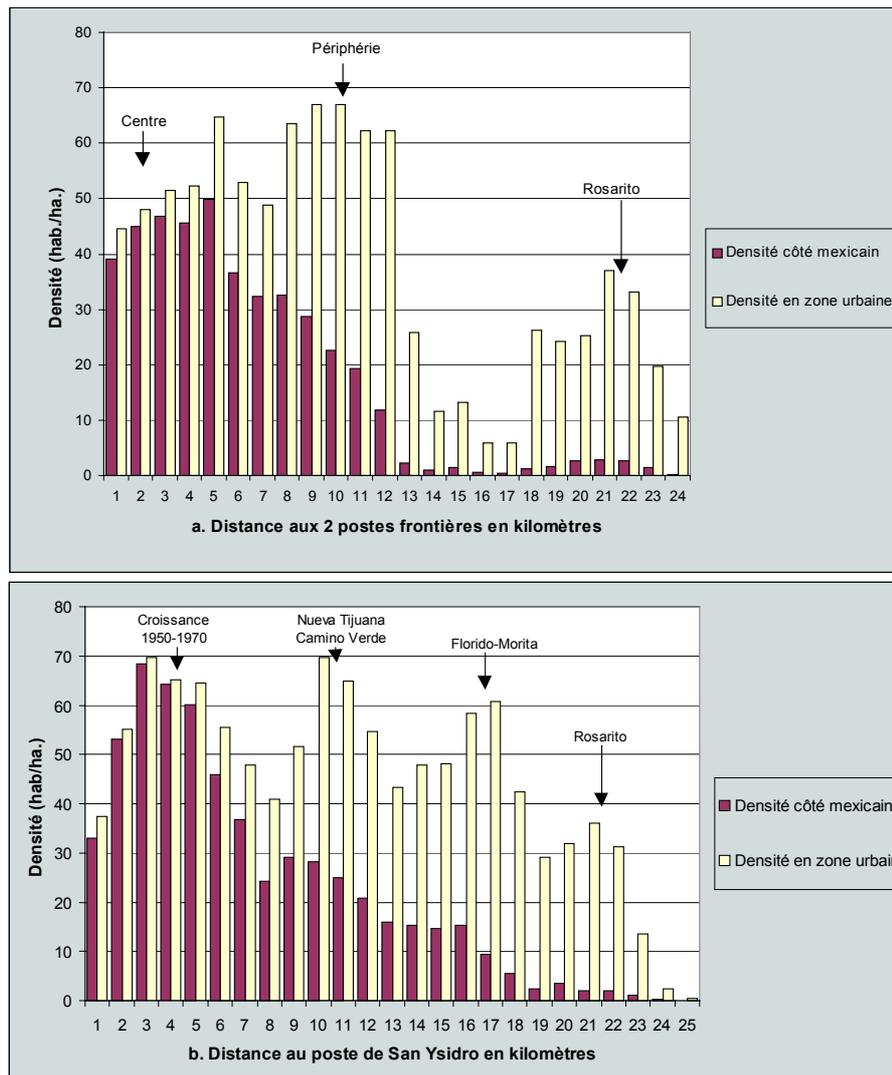
a. Il manque le sud de Rosarito

1.2.2. Première évaluation de l'attraction du centre

L'histogramme 2a est calculé en répartissant la population selon la distance euclidienne aux deux postes frontières. Bien que cet indicateur ne prenne pas en compte les difficultés auquel sont confrontés les habitants pour se rendre à ces destinations (sous dimensionnement du réseau, revêtement routier, transports publics, embouteillage à la frontière, etc.), il permet de compiler les observations faites auparavant à propos de la proximité du centre à la frontière, et implicitement l'importance vitale que représentent ces postes commercialement et psychologiquement dans l'implantation du résident frontalier..

La densité par rapport à la surface totale montre clairement l'importance de la proximité à la frontière. Elle augmente jusqu'à 50 hab/ha au kilomètre 5 puis diminue continuellement pour atteindre des niveaux presque nuls à partir du kilomètre 13. Pourtant, si l'on considère seulement la surface urbanisée, la densité reste très élevée jusqu'aux franges de la ville. Cette tendance s'explique facilement : Les zones très proches des postes frontières ont été peu à peu dépeuplées au profit notamment du commerce dans le centre historique, des finances dans la zone Río, et des industries sur la Mesa de Otay. Les fortes densités dans les zones plus périphériques ne peuvent s'expliquer que par une similarité du type d'habitat entre les trois dernières phases de croissances. La ville plus petite et rurale de Rosarito reste, quant à elle, à des densités inférieures.

Si l'on observe maintenant la distribution de la population avec la distance à San Ysidro (le poste frontière historique) dans la figure 2b, on observe l'apparition de discontinuités cycliques dans la répartition de la population.

Figure 2 : Distance aux postes frontières en kilomètres

1.2.3. Le facteur topographique (figure 3)

La topographie peu propice de la région entraîne une rapide extension vers des terrains de plus en plus difficiles. Dès la troisième étape de croissance, des pentes supérieures à 15% commencent à être utilisées (18% de l'extension de cette phase), mais c'est surtout à partir des années 70 que la ville s'étend désespérément sur des versants très escarpés (>35%), que les instances locales elles-mêmes considèrent inapte à l'urbanisation. Aujourd'hui, 7% de la ville se trouve sur des pentes supérieures à 35%.

1.2.4. Stabilité des terrains (figure 4)

Le reclassement des formations affleurantes en fonction du comportement interne (cohésion, cimentation) vis-à-vis des forces gravitaires nous donne une échelle de stabilité-instabilité des pentes en six classes : les alluvions récents et anciens des lits de rivières qui sont relativement stables, les couches sédimentaires argileuses et pierreuses qui montrent deux degrés de fortes instabilités, et finalement le socle divisé en stable (roches volcaniques et intrusives) et moins stable (roches métamorphiques et volcano-sédimentaires).

On remarque clairement le changement qui s'est opéré au cours du siècle. Les espaces très stables se sont très vite amoindris, laissant peu à peu une place prépondérante aux sols instables. Ce sont d'abord les sédimentaires pierreux qui ont été colonisés, pour ensuite laisser une place plus importante aux sédimentaires argileux. Près de 80% des nouvelles surfaces occupées entre 1983 et 1997 sont ainsi distribuées sur ces deux sols relativement instables.

Aujourd'hui, c'est 68% de la surface urbaine qui y est installé, soit près de 800.000 personnes (78%), alors que les zones d'alluvions qui seraient elles très sensibles au phénomène de liquéfaction d'un possible séisme reçoivent 200.000 personnes.

Figure 3 : Classes de pente par phase de croissance

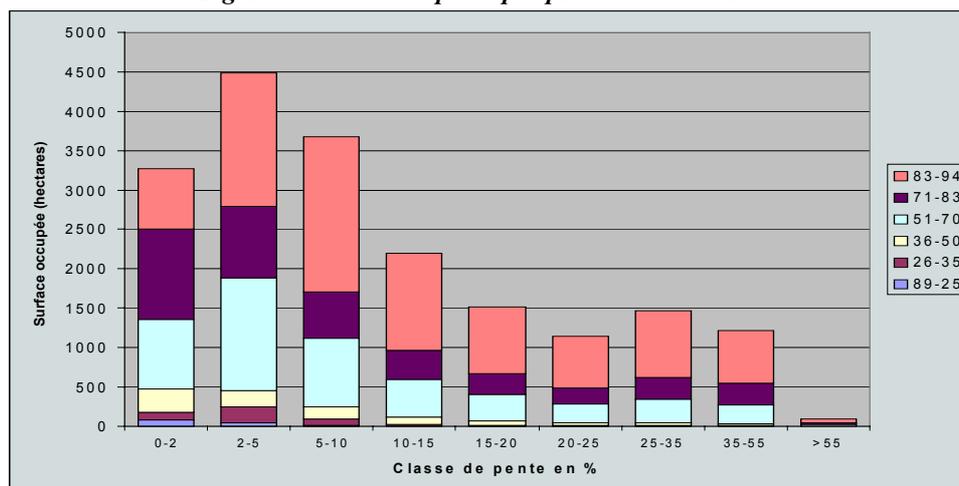
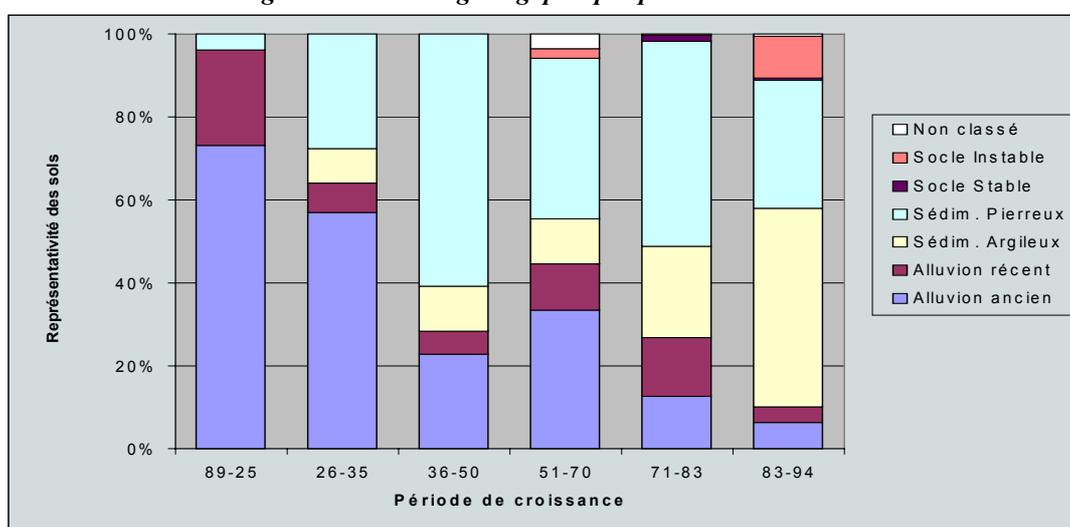


Figure 4 : Couches géologiques par phase de croissance



2. Modélisation de l'expansion spatiale par l'élaboration d'un modèle statistique "déterministe"

Cette méthode relativement conventionnelle consistera à utiliser des comportements «connus» pour les transformer en une équation mathématique et réaliser une combinaison qui signifiera la probabilité d'un espace à être urbanisé. Les deux thèmes choisis sont l'attraction du centre et l'effet localisé de la pente.

Le problème est que le type de relation qui existe entre l'implantation d'une nouvelle zone urbaine et ces thèmes n'est pas forcément bien connue. La forme de la distribution est donc assignée empiriquement.

2.1. L'attraction du centre

Clark fût le premier à trouver que la densité des villes monocentriques obéit à une équation exponentielle. Mais il est ici évident qu'au cours de son évolution, la ville a développé des pôles (industriels, commerciaux) dont le poids véritable est difficile à situer, le dilemme consiste donc véritablement dans le choix du «centre» unique. Divers scénarios ont donc été envisagés : Le centre historique, les passages frontaliers, les centres de gravités de chaque phase. Le centre historique, qui a le mérite d'être un point stable dans le temps et de présenter peu de variation par rapport à la courbe exponentielle, est sélectionné.

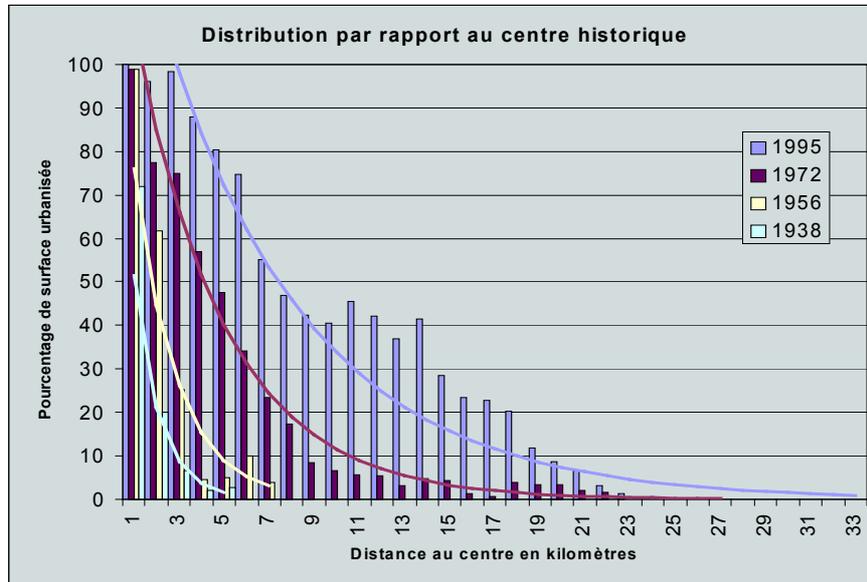
La variation des paramètres Alfa et Beta de l'équation exponentielle dans le temps de l'occupation de l'espace urbanisé est étudiée. Alfa semble varier linéairement alors que Beta suit une courbe qui peut être expliquée par un exponentiel.

L'équation de la distance dans le temps sera donc :

$$F(D) = \alpha * \exp(-\beta * D)$$

où D est la distance au centre historique en kilomètres

Figure 5 : Distribution par rapport au centre historique et courbes exponentielles



$$\alpha = (-0.5387 * x) + 122.28$$

$$\beta = 0.9043 * \exp(-0.0319 * x)$$

où x = (Année_en_cours - 1938)

2.2. L'effet localisé des pentes

L'analyse de l'occupation des pentes par période de croissance peut s'effectuer de deux façons : Selon la proportion ou selon la surface totale occupée. La seconde option qui permettra ensuite de pondérer les probabilités obtenues par la surface totale de la ville est privilégiée.

Une équation exponentielle inverse explique alors très bien la distribution des pentes :

$$F(\text{pente}) = \alpha * e^{-\beta * \text{Pente}\%}$$

où Pente% : est la pente locale en pourcentage.

Bien que nous ne disposions que de quatre dates, la variation des paramètres α et β de l'équation exponentielle dans le temps nous indiquent les tendances futures de la croissance en fonction de la pente, ceux-ci sont ici expliqués par des polynômes du second degré.

Donc, l'équation pour la pente en fonction du temps sera :

$$F(P) = \alpha * \exp(-\beta * P)$$

où P = Pente en %

$$\alpha = 6.3093x^2 - 32.492x + 1279.8$$

$$\beta = 0.00003x^2 - 0.0037x + 0.2118$$

où x = (Année_en_cours - 1938)

Cette équation qui calcule en réalité une surface par classe de pente doit être ramenée à une probabilité. Considérant que les pentes inférieures à 5% sont totalement favorables, l'équation est pondérée par la moyenne des surfaces utilisées entre 0 et 5% de pente (X_p). Donc la formule finale de la pente est :

$$F2(f(p)) = \min(f(p) / X_p * 100 ; 100)$$

L'observation du comportement de cette équation dans le temps montre que hormis les deux premières périodes, qui y étaient visiblement plus sensibles, la courbe semble vouloir se stabiliser. On pourrait donc presque abandonner la variable temporelle.

2.3. Cartographie et commentaire des résultats

Le résultat final est obtenu par le produit non-pondéré des deux équations antérieures et varie donc de 0 à 10 000. Le calcul effectué dans Excel est reversé dans Arc/View pour obtenir la cartographie des quatre dates historiques et dans le futur. Huit classes sont déterminées visuellement qui correspondent approximativement à 5 grandes classes de propension à s'urbaniser. Les statistiques calculées pour 1995 (tab 2) montrent comment chaque classe s'est comportée par rapport à la véritable extension de la ville. Ainsi, c'est 91.2% de la classe VIII qui est urbanisée, puis 64.3% de la classe VII, jusqu'aux 0.2% de la classe I.

Les résultats correspondent en général assez bien à la réalité. L'émergence de Rosarito n'est pas expliquée par ce modèle monocentrique, mais à partir de 2010, cette terrasse côtière devient très favorable pour l'accroissement de Tijuana. Pour 2010, la croissance s'effectuerait donc principalement en direction de l'ouest, créant entre Rosarito et Tijuana un tissage urbain presque continu. En 2030 (fig 3), cette tendance est confirmée, mais en plus la ville s'étend vers l'est en direction de Tecate conquérant ainsi les vallées encore disponibles. Cette dernière carte effraierait plus d'un planificateur, la ville qui triplerait dans ce cas sa surface urbanisée occuperait en réalité un énorme espace non continu, entrecoupé ici et là par l'âpreté de la topographie.

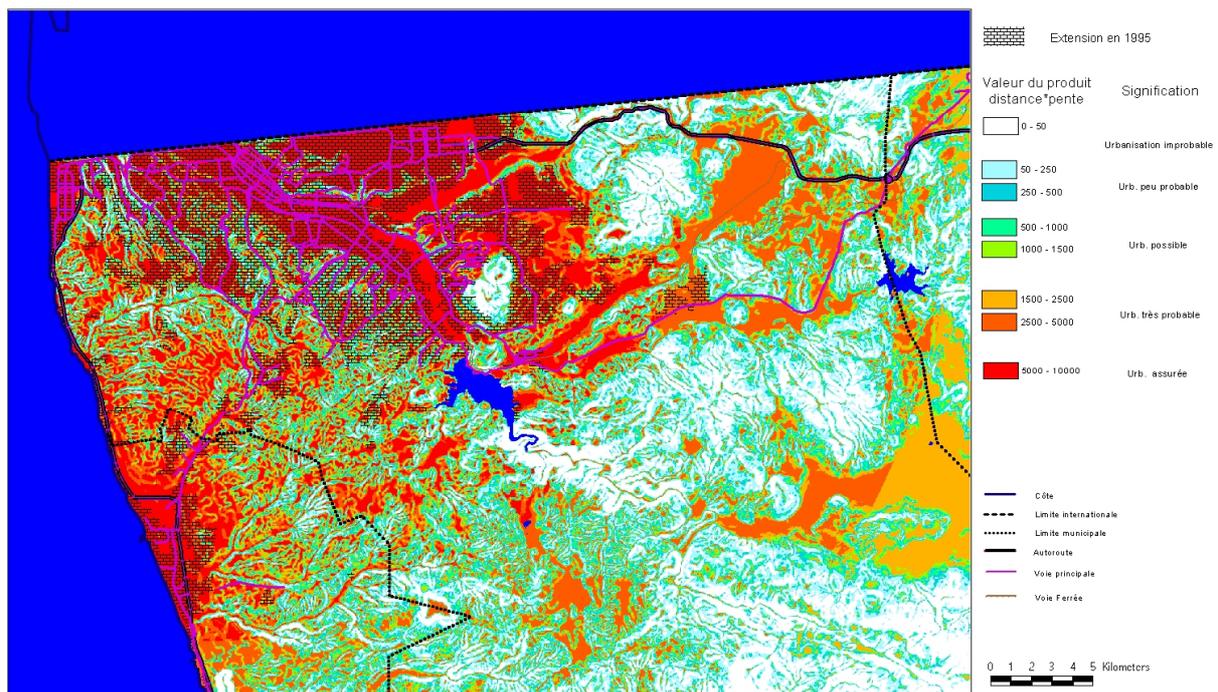
Les surfaces du tableau 2 sont obtenues en pondérant la surface de chacune des 8 classes par la probabilité d'urbanisation précédemment observée pour 1995. On obtient ainsi la surface supputée urbanisée dans chacune

Tableau 2 : Statistiques sur les surfaces obtenues

	Classe et stat95	1972	1995	2010	2030
Surface urbanisée en km2 obtenue par pondération avec les proportions calculées en 1995	I (0,2%)	2.7	1.8	0.9	0.5
	II (3%)	4.6	9.1	14.5	9.3
	III (13%)	6.4	15.1	26.7	23.5
	IV (29%)	11.3	31.7	45.0	58.3
	V (40%)	9.9	27.1	37.2	59.7
	VI (49 %)	8.0	28.3	51.7	92.8
	VII (64%)	12.9	39.6	77.0	125.8
	VIII (91 %)	16.1	48.2	91.7	191.3
TOTAL (km2)		71.9	200.8	344.6	561.3
Population calculée		391672	1070999	1837672	2992882
Surface Réelle (TJ+Ros)		65.2	194.7		
Population réelle		355000	1038188		
Densité réelle		5448.12	5332.51		

des classes. La somme nous révèle la surface totale espérée. En 1972 et 1995, l'erreur est respectivement de

Figure 6 : Probabilités d'urbanisation pour 2030



9.3% et 3% en plus de la surface réelle. Finalement on peut évaluer la population totale grâce à la densité de population de 1995. On obtient ainsi des approximations de 1.8 millions d'habitants en 2010, et près de 3 millions en 2030, ce qui correspond bien aux prospectives obtenues par les méthodes démographiques.

Cette méthode permet d'obtenir assez rapidement des résultats intéressants, mais mérite d'être approfondie. Certains détails techniques (limitations logicielles, nombre réduit de phases) peuvent induire des variations considérables. D'autre part, l'usage de variables inamovibles empêche pour l'instant l'usage prospectif de ce modèle avec par exemple l'utilisation de l'attraction aux réseaux de voiries, ou un modèle polycentrique pondéré, les centralités étant clairement évolutives.

3. Modélisation de l'expansion spatiale par utilisation de l'automate cellulaire UGM

3.1. Description du modèle

L'automate cellulaire développé depuis 1994 par l'équipe de Keith C. Clarke pour la modélisation de la croissance urbaine a d'abord pris le nom de HILT pour *Human Induced Landuse Transformation* comme une contribution au programme de recherche sur le changement global des États-Unis (USGS, 1994). L'étude recherche à comprendre la transition urbaine d'un point de vue historique et multi-scalaire pour modéliser et prévoir les configurations régionales de l'urbanisation 100 ans dans le futur. A l'intérieur du projet Gigapolis, le modèle a évolué et se nomme désormais *Clarke Urban Growth Model* (UGM).

Lors de la 3^{ème} conférence de SIG et modélisation à Santa Fe en 1996, Keith C. Clarke dit : "Le modèle que nous avons développé est un automate cellulaire indépendant de l'échelle. Les règles de croissance sont uniformes dans une représentation maillée de l'espace géographique et sont appliquées cellule par cellule. Toutes les cellules de la matrice sont mises à jour synchroniquement à la fin de chaque période de temps. Les principes de base des règles de croissance, basés sur le modèle de propagation de feux de Clarke (Clarke et al, 1995), sont assez généraux pour décrire n'importe quel genre d'expansion organique ; ils ont été modifiés dans ce modèle pour décrire l'expansion urbaine. Les règles de croissance sont intégrales au jeu de données utilisé parce qu'elles sont définies en fonction de la nature physique du lieu d'étude, de ce fait produisant un modèle indépendant de l'échelle."³

Cinq facteurs contrôlent le comportement du système : un facteur de diffusion (*diffusion*), qui détermine la «dispersivité» extérieure globale de la distribution ; un coefficient de développement (*breed*), qui indique la probabilité avec laquelle un établissement isolé nouvellement produit pourra commencer son propre cycle de croissance ; un coefficient d'étalement (*spread*), qui contrôle comment l'expansion organique se produit à partir d'établissements existants, un facteur de résistance à la pente (*slope resistance*), qui régule la probabilité d'extension vers des pentes plus escarpées ; et un facteur de gravité en fonction de la route (*road gravity*) qui attire les nouveaux établissements le long de celles-ci. Ces valeurs, qui affectent le nombre de tirages aléatoirement, sont décidées par l'utilisateur. Ces facteurs sont combinés dans quatre règles de croissance dénommées "spontanée", "diffusive", "organique", et "influencé par les routes".

Afin de modéliser le taux de croissance typique d'une courbe en S de l'expansion urbaine, un deuxième niveau nommé auto-modification, est engagé par un taux de croissance exceptionnellement élevé ou bas.

3.2. Préparation des données

La phase la plus importante de la mise en place du modèle UGM est celle de la préparation des données. Ce sont trois couches statiques (la pente, les zones exclues, et un ombrage), et deux couches qui renseignent sur l'évolution historique de la croissance urbaine : l'usage du sol et le réseau routier.

Toutes les couvertures sont préparées dans Arc/View v3.2, avec l'extension qui lui permet de travailler le format raster : Spatial Analyst v1.1. Dans un premier temps, la résolution du pixel est fixée à 30 mètres. Elle ne semble ainsi ni trop petite (précision illusoire, compatibilité entre les couches, trop grande quantité d'information), ni trop grande (compatibilité avec l'échelle urbaine). La couverture topographique est composite entre un modèle numérique de terrain (MNT) urbain de résolution fine et un MNT des zones encore naturelles. La couche des zones exclues à toute urbanisation est réalisée en extrayant les lacs d'une couche hydrographique, puis la zone nord-américaine, et enfin la zone couverte par l'océan Pacifique.

Pour la réalisation des cartographies historiques de la tâche urbaine et du développement routier, quatre dates sont choisies en fonction des disponibilités de couvertures cartographiques, photographiques et satellitaires: 1938, 1956, 1972 et 1995.

³ Ce qui s'est avéré faux !

Concernant l'usage du sol, depuis l'intégration du modèle Deltatron dans UGM, celui-ci peut théoriquement calculer des matrices de transition vers un nombre d'usage du sol supérieur à 2. Mais dans un souci d'efficacité, le modèle sera d'abord testé binaires : urbain et non-urbain.

La réalisation des quatre couvertures de transport est certainement la plus compliquée. Il s'agit en effet de pondérer les réseaux suivant l'importance qu'ils vont jouer pour la croissance spatiale. Celle-ci sera effectuée manuellement sur les cartes en fonction du bitumage, des notions de priorité et de fonctionnalité

3.3. Calibrage

Le calibrage est le processus qui consiste à ajuster au mieux les paramètres du modèle pour que celui-ci effectue le calcul de croissance à partir de la date initiale (1938) jusqu'à la date actuelle (1995). L'enjeu étant d'obtenir du modèle, des stades de croissances le plus proche possible de ceux disponibles pour les différentes périodes du passé. De nombreux essais auront été nécessaires pour calibrer les paramètres du modèle, mais aussi pour corriger certains défauts...

Parmi les étapes importantes, on notera :

- le choix d'une résolution moins fine : 200m.,
- l'abandon de la méthode statistique de calibrage,
- le passage de la version 2.1 à la version 3.0 beta du modèle,
- la correction de certaines erreurs manifestes de programmation,
- l'introduction de l'attraction du centre et des zones inondables.

La simulation de l'attraction du centre et des zones inondables se fait par le biais de la matrice d'exclusion. Dans le programme source, celle-ci indique en effet une probabilité à ne pas être urbanisée ; donc 100% signifie l'impossibilité d'urbaniser et 0% l'absence de toute impossibilité. Les valeurs intermédiaires n'ont pas jusqu'à présent été exploitées. Une matrice de distance au poste frontalier de San Ysidro est calculée. Elle est pondérée linéairement de façon à ce que chaque kilomètre parcouru fait diminuer de 1,5% l'attraction.

A partir d'un calcul de dénivelé par rapport aux cours d'eau principaux, une délimitation des principales zones de risque d'inondation est effectuée. Après quelques tentatives, un coefficient de 50% paraît correspondre au comportement de ces zones à risque. Ces deux matrices sont combinées avec l'ancienne matrice d'exclusion.

Si finalement la comparaison visuelle est satisfaisante, les proportions entre superficie réelle et superficie supputée ne correspondent pas vraiment avec la signification des classes (probabilité par tirage de Monte-Carlo)

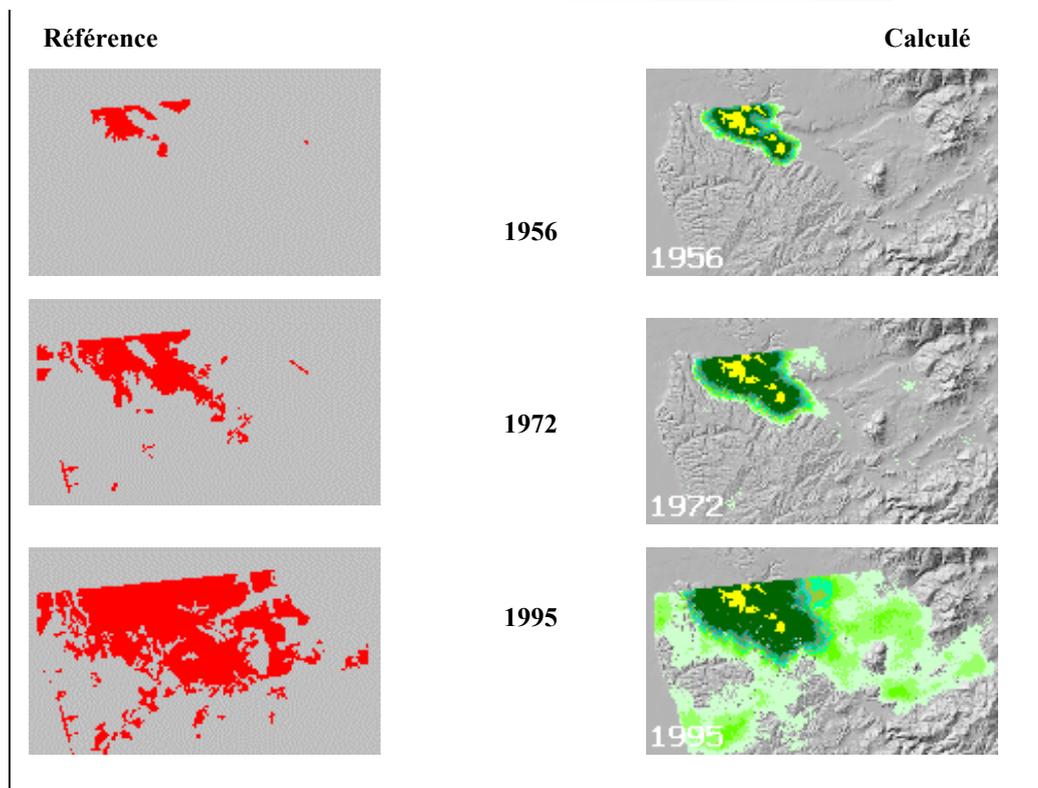
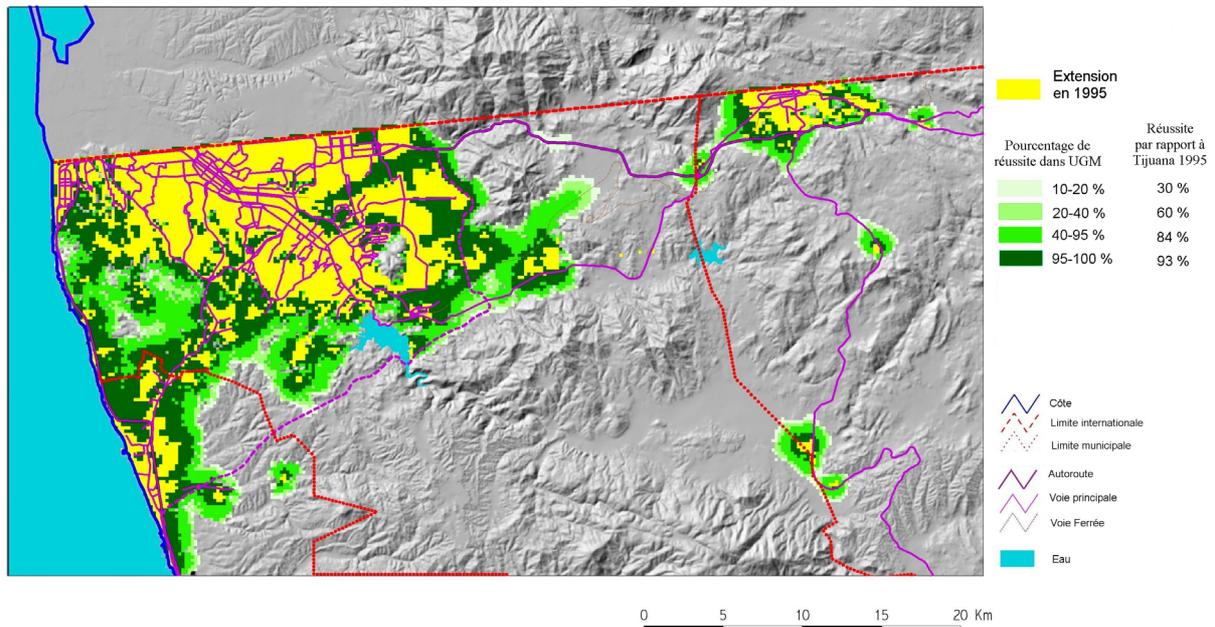
La comparaison des valeurs intrinsèques des paramètres entre elles est peu significative, car ils sont trop dépendants de leur gestion au sein du programme. Il serait certainement intéressant de comparer les valeurs obtenues sur d'autres villes.

3.4. Projection

Deux essais ont été réalisés : l'un avec le réseau routier actuel, l'autre avec les nouveaux axes routiers actuellement en prévision. Ces derniers ont finalement un impact très réduit sur le fonctionnement du modèle, ce qui doit sans doute être attribué à la faible connectivité que présente le tracé de ces nouvelles voies avec le reste du réseau considéré.

La projection spatiale met clairement en évidence les nouvelles déficiences que pourraient engendrer cette

Figure 8 : Résultat de la projection obtenue par UGM pour 2030



hypothétique urbanisation : Le risque de l'inadaptation du projet de "périphérique sud" aux véritables nécessités

locales, le bétonnage de la frange côtière, les nouveaux risques d'inondation, des risques accrus de glissements de terrain, l'inadaptation potentielle du réseau de voirie...

Conclusions

Trois approches ont été utilisées pour essayer de visualiser l'expansion spatiale à moyen terme : Une méthode empirique, une méthode statistique, et enfin l'automate cellulaire. Il apparaît évident que toutes trois ont leurs forces et leurs faiblesses :

- La première essaie de prendre en compte un grand nombre de paramètres et les combine spatialement pour obtenir une idée approximative des tendances d'expansion.
- La seconde méthode est plus rigoureuse, mais seulement deux paramètres ont été considérés.
- La troisième méthode n'a pas fait ses preuves par une approche rigoureusement statistique, le calibrage visuel est donc fait sous la responsabilité de l'opérateur qui introduit ses à priori dans l'évaluation, grand débat éthique en perspective...

Les trois méthodes devraient pouvoir être combinées pour optimiser l'obtention de résultats plus rigoureux et moins variables.

L'approche par automate cellulaire semble bien adaptée à la croissance spatiale de la ville, mais le diagnostic préalable doit être capable de fournir des éléments supplémentaires. De la même façon que l'essai statistique a mis sous formule l'attraction du centre et la résistance aux pentes, des études séparées devraient étudier la résistance (ou propension) de telle ou telle forme de propriété à être urbanisée. Le même type d'étude doit être suivi pour les différentes couches cartographiques qui permettent de contrôler l'usage du sol. L'automate cellulaire doit enfin être amélioré pour mieux correspondre à la réalité urbaine : prise en compte de plusieurs usages du sol, de centres secondaires, développer une mathématique de la zone d'influence de chaque cellule qui dépasserait le strict voisinage adjacent.

Bibliographie sélectionnée

- ANONYME (1989), “ Historia de Tijuana, 1889-1989”, Universidad Autónoma de Baja California, Gobierno del estado de Baja California, XII Ayuntamiento de Tijuana
- ALEGRIA TITO (1992), “Desarrollo urbano en la frontera de México –Estados Unidos”, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes
- BEAUCIRE FRANCIS, E. DUFLOS, S ROSALES-MONTANO, I. TURCHETTI (1999), “Stratégies urbaines et outils de planification de la ville et des transports”, Agence d’urbanisme pour le développement de l’agglomération lyonnaise
- CLARKE KEITH C., STACY HOPPEN, LEONARD GAYDOS (1996), “Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth” in Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling CD-ROM, Santa Fe, New Mexico, USA, January 21-25, 1996
- FULONG WU (1998), “Simland : A prototype to simulate land conversion through the integrated Geographical Information System and Cellular Automata with Analytical Hyerarchy Process-derived transition rules”, pp63-82, in International Journal of Geographical Information Science, 1998, vol. 12, n°1
- GOBIERNO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA (1984), “Plan de Desarrollo urbano centro de población cd. Tijuana”
- HIERNAUX DANIEL (1986), “Urbanización y autoconstrucción de vivienda en Tijuana”, Centro de Ecodesarrollo, 1986
- LE PAGE MICHEL, A. WINCKELL (1997), “Del AGEB a la manzana : el cambio de escala de la información estadística urbana, Aplicación en la ciudad de Tijuana”, Symposium Asociación Mexicana de Sistemas de Información Geograficos, Mexico
- O’SULLIVAN DAVID , PAUL TORRENS (2000), “Cellular models of urban systems”, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, Working Paper Series
- RANFLA GONZALEZ ARTURO & GUILLERMO ALAVEZ DE LA TORRE (1985), “Expansión física, formas urbanas y migración en el desarrollo urbano de Tijuana 1900-1984”, en Cuadernos de ciencias sociales serie 3, n°2, Universidad Autónoma de Baja California
- TINOCO TELLEZ HERMILA (1994), “ La Regulación de los Usos del Suelo en Tijuana 1984-1990”, Thèse de mastère en développement régional, El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana
- XVI AYUNTAMIENTO DE TIJUANA (1999), “Plan Municipal de Desarrollo 1998-2001”