



HAL
open science

Caractéristiques structurelles des mégapoles et vulnérabilité hydrique urbaine

Thomas Bolognesi

► **To cite this version:**

Thomas Bolognesi. Caractéristiques structurelles des mégapoles et vulnérabilité hydrique urbaine. *Économie appliquée : archives de l'Institut de science économique appliquée*, 2013, LXVI (1), pp.95-123. halshs-00813075

HAL Id: halshs-00813075

<https://shs.hal.science/halshs-00813075>

Submitted on 15 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ÉCONOMIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE

Caractéristiques structurelles des mégapoles et vulnérabilité hydrique urbaine

Thomas Bolognesi

mars 2012

Cahier de recherche EDDEN n° 8/2012

Thomas Bolognesi
EDDEN-UPMF CNRS-Université de Grenoble
thomas.bolognesi@upmf-grenoble.fr
04 76 82 54 10

Caractéristiques structurelles des mégapoles et vulnérabilité hydrique urbaine

Mots clés : Mégapoles, Vulnérabilité, Risques naturels, Analyse statistique

Classification JEL : C18 ; R00 ; Q54

Les catastrophes hydriques naturelles touchant les territoires urbains se multiplient et la vulnérabilité des villes aux risques hydriques augmente. L'article propose une analyse de ce phénomène dans les mégapoles. La démarche est exploratoire et débute avec la construction d'une base de données renseignant les 595 mégapoles existantes dans le monde. Ensuite, une analyse multifactorielle détermine les traits caractéristiques de ces mégapoles. Au final, la recherche identifie trois composantes structurelles des mégapoles (maturité, anthropisation et centralité) puis les corrèle avec des variables de risques. Ainsi, elle distingue des groupes de villes selon leur structure et des facteurs de vulnérabilité.

Structural characteristics of megacities and urban water vulnerability

We are facing a multiplication of urban water hazards and the urban water vulnerability increases. This paper focuses on megacities and offers an analysis of this process. The approach is exploratory and begins by constructing a database on the 595 existing megacities. Next a multifactorial analysis specifies the main characteristics of these megacities. In the end the study identifies three structural components (maturity, anthropisation and centrality) then correlates them with hazards data. Thus it distinguishes groups of cities according to their structure and factors of vulnerability.

I INTRODUCTION

L'ouragan Katrina a engendré 149 milliards de dollars de pertes [Hallegatte S. (2008)] et, suite aux sécheresses redondantes, la ville de Melbourne se voit contrainte à 2 milliards d'euros d'investissement dans des usines de dessalement afin de maintenir un approvisionnement en eau potable stable [Government of Victoria (2011)]. Ces deux exemples illustrent l'ampleur gigantesque que peuvent prendre les dommages socio-économiques endurés par les mégapoles lorsqu'une catastrophe hydrique naturelle les frappe.

Ces deux cas s'insèrent dans une tendance généralisée : les catastrophes hydriques naturelles touchant les territoires urbains se multiplient et la vulnérabilité des villes aux risques hydriques augmente. Le changement climatique, dont l'impact sur les événements hydriques extrêmes vient d'être démontré [Zwiers F.W. *et al.* (2011)], attise ce phénomène. Dès lors, une réelle demande des décideurs publics auprès des scientifiques pour traiter de la vulnérabilité des villes face aux aléas¹ naturels naît. La vulnérabilité se définit comme « *la propension d'un enjeu humain, matériel, environnemental, etc. à subir un dommage* » [Gleyze J.F. et Reghezza M. (2007), p.17]. Elle est problématisée de deux manières différentes dans le cas des villes. La première approche traite l'impact des risques naturels sur la ville [Bouchon S. (2006) ; Praskievicz S. et Chang H. (2009)]. La seconde s'intéresse à l'impact du développement urbain sur les populations [November V. (1994) ; D'ercole R. *et al.* (1994) ; Pelling M. (2003)].

La majorité des travaux prennent la forme d'étude de cas. Trois objets sont principalement étudiés : les villes des pays en développement, celles des pays développés et des catastrophes identifiées. La littérature sur les villes des pays en développement montre la fragilité de ces villes et anticipe l'impact des changements climatiques [Adger N. (1999) ;

¹ La notion d'aléa renvoie à la probabilité d'occurrence d'un événement alors que celle de risque naturel est plus englobante, elle réfère à la probabilité d'occurrence d'un type d'événement, les dommages potentiels et la perception de la population vis-à-vis de l'événement. Pour une discussion approfondie de ces concepts le lecteur peut se référer à Fussel H.M. (2007) et Kermisch C. (2012).

Adger N. *et al.* (2003) ; Varis O. *et al.* (2006a) ; Varis O. *et al.* (2006b)]. Concernant les villes des pays développés, la construction de méthodes d'évaluations permettant d'assister les décideurs publics dans la gestion des risques représente un enjeu scientifique majeur [Cross J.A. (2001) ; Renard F. et Chapon P.M. (2010)]. Enfin, lorsqu'un type de catastrophe défini centre la focale, ce sont les impacts et les possibilités de rétablissement de la ville qui sont étudiés [Campanella T.J. (2006) ; Hallegate S. (2008)]. Empruntant à l'épistémologie des particuliers [Castree N. (2005)], ces auteurs mènent plusieurs études de cas qui, mises en commun, saisissent à la fois des aspects transversaux et la diversité des situations traitées. Néanmoins, cette méthodologie produit des résultats spécifiques difficilement généralisables aux cas hors de l'étude.

Le manque de méthode systématique produisant un savoir générique et traitant un grand nombre de cas freine la connaissance précise du fait urbain [Otto-Zimmerman K. (2011)]. Par comparaison à d'autres domaines, peu de données urbaines existent et leur comparabilité internationale reste faible. Ainsi, la construction de données comparables entre les différentes villes du monde apparaît aujourd'hui comme un élément essentiel à la compréhension du fait urbain. C'est donc la critique d'une difficulté des outils économiques à saisir la ville [Hurriot J.M. (2009)] et le constat d'un manque d'études comparatives avec un large éventail qui motive cette communication. À travers une approche statique comparative, l'article propose une analyse de la vulnérabilité des villes aux risques hydriques. L'approche adoptée nécessite la construction d'une base de données regroupant l'information utile à l'appréhension des mégapoles. L'étude évacue les petites villes puisqu'elles ne relèvent pas des mêmes mécanismes en termes de vulnérabilité face aux risques naturels que les mégapoles [Cross J.A. (2001)]. Dès lors, afin de faciliter la collecte de données et de rendre possible une étude comparative, nous choisissons ici de ne traiter que des mégapoles. Afin de sélectionner l'échantillon nous nous référons aux travaux des Nations-Unies et retenons

l'ensemble des villes de plus de 750 000 habitants recensées par l'organisation en 2010. Les inondations et les sécheresses figurent parmi les risques naturels les plus fréquents dans le monde. Ils représentent 37% des catastrophes naturelles entre 1990 et 2007 [EM-DAT (2007)]. À ce titre, l'étude se concentre sur ce type de catastrophes.

L'analyse relève d'une démarche exploratoire et articule deux étapes principales. L'observation de l'objet étudié constitue la première étape. À cette fin, une base de données éclairant la structure des mégapoles et leur exposition aux risques hydriques est construite. Notre base de données harmonise les différentes informations collectées et, de ce fait, supporte une comparaison des différentes mégapoles du monde. La seconde étape de l'analyse parachève ce travail comparatif. Elle vise à se détacher de la spécificité du terrain afin d'obtenir des résultats génériques. Nous exploitons la base de données au moyen d'une analyse multifactorielle. La recherche identifie ainsi des facteurs de vulnérabilité et des groupes de villes. Un socle pour la construction d'une typologie en découle.

L'article présente cette analyse en trois sections avant de conclure. La première section présente la méthodologie utilisée. Nous détaillerons le processus de construction (choix des variables, sources) et d'exploitation (choix des techniques statistiques, déroulement) de la base de données. La deuxième partie expose les résultats obtenus. Nous verrons que trois facteurs structurants émergent de l'analyse multifactorielle. Ils délimitent les principales classes d'une typologie urbaine en leur associant un niveau de vulnérabilité standard. Enfin, la troisième partie discute l'ensemble de l'analyse en la confrontant avec la littérature.

II MÉTHODOLOGIE

La recherche s'articule en trois étapes. Pour commencer, nous construisons une base de données regroupant l'information nécessaire à l'étude (I.1). Ensuite, les données sont traitées au moyen d'une analyse multifactorielle. L'analyse extrait alors les traits

caractéristiques de l'échantillon (I.2). Enfin, les résultats de l'analyse multifactorielle servent à élaborer une typologie et à évaluer les facteurs de vulnérabilité (I.3).

II.1 UNE BASE DE DONNÉES SUR LES MÉGAPOLES ET LA VULNÉRABILITÉ HYDRIQUE

La base de données s'intègre dans une démarche comparative des mégapoles mondiales et son rôle réside dans le stockage d'une information variée susceptible de servir de base à cette comparaison. Comme l'analyse s'attache uniquement aux tendances profondes animant les villes, seules des variables structurelles et naturelles nous intéressent. La base de données traite toutes les villes mondiales de plus de 750 000 habitants en 2010, selon les Nations-unies (Cf Tableau I.1). L'analyse comparative des villes au niveau international se confronte à un problème majeur de données en termes d'accès et de cohérence. En effet, il existe une diversité de définitions et délimitations de la ville, ce qui influe sur la mesure des indicateurs statistiques (densité, aires administratives, etc.). Les données que nous empruntons aux Nations-Unies représentent les agglomérations urbaines. Ces agglomérations sont délimitées en fonction de leur densité, elle « *réfère de facto à la population contenue au sein des contours d'un territoire contigu habité selon différents niveaux de densité urbaine sans regard au frontières administratives* » [UN (2010)]².

Classiquement, le seuil de 1 millions d'habitants sert de démarcations entre les villes et les mégapoles. Ici, nous l'abaïssons à 750 000 pour deux raisons. D'abord, le World urbanization prospects de 2009 propose un focus sur ces villes, ce qui simplifie l'accès aux données et en assure l'harmonie. Ensuite, nous nous trouvons en posture d'identifier un éventuel effet de seuil aux environs de 1 millions d'habitants. Au final, 31 variables caractérisent les 595 villes retenues. Les variables rendent compte de cinq différents aspects des villes. De ce fait, elles se regroupent en cinq catégories renseignant la structure et la

² Cette définition est issue du « Glossaire sur les termes démographiques » de UN-habitat, consultable à l'adresse suivante : http://esa.un.org/unpd/wup/Documentation/WUP_glossary.htm. Les sources des chiffres sont disponibles à l'adresse : <http://esa.un.org/unpd/wup/CD-ROM/Data-Sources.htm>.

vulnérabilité des villes ; nommément le Pays, la Ville, le Climat, les Risques et le Bassin versant.

Quatre variables composent la catégorie Pays. Le PIB et le PIB en parité pouvoir d'achat renseignent le niveau de développement national. Pour la même raison, le taux d'urbanisation de 2010 et sa projection pour 2020 sont pris en compte. La catégorie Ville donne la taille de la ville, en nombre d'habitants pour 2000, 2010 et 2020 ; ainsi que sa localisation selon trois modalités, « côte », « delta » ou « autre ». Les données économiques proviennent de la Banque mondiale et les données démographiques des Nations-unies (2010). La catégorie Climat ne comprend que la variable climatique. Basée sur la classification Köppen-Geiger et sur la carte produite par Peel, Finlayson et McMahon (2007) de l'université de Melbourne, elle indique le type de climat dans lequel se situe la ville. Cette classification et cette carte ont été choisies car, d'une part, elles font référence dans le monde des climatologues du fait de leur précision et, d'autre part, les données utilisées par les calculs sont disponibles.

La catégorie Risque a pour rôle de refléter la vulnérabilité des mégapoles, elle intègre les dimensions aléa et dommage associées aux catastrophes naturelles prises en compte. Elle recense les inondations et les sécheresses subies par un territoire entre 1980 et 2009, ainsi que leurs conséquences humaines et financières³. Cette période de trente ans permet d'avoir un nombre important d'occurrences, plus de 3 000 dans le monde soit 7 000 évènements intégrés dans notre base⁴. Les données brutes proviennent du CRED division EM-DAT et contiennent les caractéristiques principales de chaque catastrophe (date, durée, lieu, impact, *etc.*). Le CRED n'utilise pas la ville comme unité géographique. Un aménagement est nécessaire pour les intégrer dans la base. Lorsqu'une ville se situe dans l'aire géographique touchée par la

³ Au regard de l'attention portée aux crues centennales par exemple, la période observée peut sembler faible, cette étendue s'explique principalement par des contraintes informationnelles (accès, qualité, *etc.*). Des études ultérieures pourraient alors viser à élargir le spectre temporel analysé ici.

⁴ Les désastres donnés par le CRED touchent une zone, ainsi ils peuvent concerner plusieurs villes en même temps.

catastrophe, nous lui conférons les caractéristiques de la catastrophe⁵. Les données se présentent sous la forme de huit variables indiquant le nombre de catastrophes, le nombre de morts, le nombre de personnes affectées et la somme en dollars des dommages causés, ceci en distinguant les inondations des sécheresses.

La méthodologie du CRED pour la construction de la base de données sur les catastrophes mondiales se présente, en ce qui nous concerne, comme suit⁶. Les inondations sont considérées comme catastrophes hydrologiques alors que les sécheresses sont des catastrophes climatologiques. Les évènements intègrent la base de données en fonction de leurs conséquences. Chaque évènement répertorié répond à au moins un des quatre critères suivants : 10 morts ou plus comptabilisées, au minimum 100 personnes affectées, déclaration d'un état d'urgence et appel à l'aide internationale. Le nombre de morts est un chiffre officiel exact. Le nombre de personnes affectées est une estimation, il s'agit du nombre de foyers affectés multiplié par la moyenne nationale de la taille d'un foyer. Enfin, il n'existe pas de méthode standard dans l'estimation des coûts. Dès lors, le CRED compose avec celles que ses sources lui proposent. Les sources sont de toutes natures : agences internationales, États, ONG, *etc.*

La Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) repose sur l'unité du bassin versant. Aussi, à l'heure où la GIRE représente l'un des principaux paradigmes mobilisés par les acteurs et étudiés par les scientifiques, la base de données se doit d'informer cette échelle territoriale et rendre compte de sa couverture des sols [Levin S. *et al.* (1998)]. 14 variables jouent ce rôle et composent la catégorie Bassin versant : aire, densité, nombre de villes de plus de 100 000 habitants, offre d'eau par personne, degré de fragmentation des rivières,

⁵ Cette méthode possède une limite principale. L'aire peut être beaucoup plus large que la ville et donc les impacts ne se concentreraient pas sur la ville. Cependant, comme nous voulons avant tout connaître le degré de vulnérabilité du territoire dans lequel la ville s'installe plutôt que les dégâts effectivement subis, nous nous en accommodons.

⁶ Pour plus de détails voir la page du CRED : <http://www.emdat.be/explanatory-notes>, consultée le 02-05-2011 ainsi que les articles de Sapir *et al.* (2006) et Scheuren *et al.* (2008).

nombre de barrages de plus de 15 mètres et huit modalités de taux de couverture des sols. Les données proviennent de l'application *watersheds of the World* créée par plusieurs instances internationales de l'eau sous la direction du *World resources institute*. Cette application vise à fournir un accès simple et rapide aux principales caractéristiques des bassins versants. Seuls les 154 plus grands bassins versants entrent dans l'application. Par conséquent, 200 des villes de la base de données sont concernées. La base de données regroupe l'information afin de comparer les villes, la suite de l'analyse exploite la base de données ainsi construite.

Tableau I.1 : Contenu de la base de données

<i>Catégories de variables</i>	<i>de</i>	<i>Pays</i>	<i>Ville</i>	<i>Climat</i>	<i>Risque</i>	<i>Bassin Versant</i>
Nombre variables	de	4	4	1	8	14
Variables		PIB ; PIB PPA ; Taux d'urbanisation	Population ; Localisation	Type de climat	Inondations ; Sécheresses	Aire ; Densité ; Nombre de villes > 100 000 hab ; Offre d'eau/pers ; Degré de fragmentation des rivières ; Nombre de barrages > 15m ; Taux et types de couvertures des sols
Nombre villes renseignées	de	595	595	595	595	192
Echelle		\$/pers ; \$/pers ; %	Milliers d'hab ; « côte », « delta », « autre »	Classification Köppen-Geiger	Unité ; Nombre de morts ; Nombre de pers touchées ; Dégats en \$	Divers
Source		Banque mondiale (2008) ; Nations unies (2010)	Nations unies (2010)	Peel, Finlayson, Mc Mahon (2007)	CRED DAT	EM-World Resources Institute

Source : Construction de l'auteur.

II.2 UNE ANALYSE MULTIFACTORIELLE DES CARACTÉRISTIQUES DES MÉGAPOLES

Une analyse multifactorielle permet de traiter un grand nombre d'informations en même temps. Le but est de synthétiser l'information en créant des composantes principales

qui résumant alors le comportement de l'échantillon et contribuent ainsi à l'extraction de sens. Ce type d'analyse convient à notre recherche car elle décrypte l'information de la base de données. L'analyse se déroule en trois temps. D'abord, les données doivent être préparées au traitement. Ensuite, des choix dans la procédure d'analyse doivent être opérés. Enfin, le chercheur décide du niveau de dimensionnalité souhaité. Durant le premier temps, nous classons les variables pour les conformer aux conditions d'une analyse multifactorielle. La construction des échelles du classement a lieu comme suit. Lorsque des seuils naturels ou consensuels dans la littérature apparaissent ils sont repris, en cas inverse, les quintiles de chaque variable établissent les différentes classes. L'échelle construite est ensuite validée par le calcul de l'alpha de Chronbach, coefficient en charge de mesurer la cohérence interne d'une échelle. Supérieur à 0,7 il autorise une analyse exploratoire et lorsqu'il excède 0,8 une recherche fondamentale est envisageable [Nunnally J. et Bernstein I. (1994)].

Le deuxième temps de l'élaboration de l'analyse multifactorielle nous conduit à choisir les modalités de la procédure sur deux points critiques. Le premier attrait au seuil de représentativité des variables considérées. Ce seuil sert à conserver ou rejeter une variable. Le second choix porte sur la méthode d'extraction de l'information. Comme niveau minimal de représentation, ou d'extraction, nous retenons 0,65. Avec ce niveau, il est admis que les composantes intègrent une partie assez importante de l'information contenue dans les variables [Evrard Y. *et al.* (2003)]. Ensuite, nous optons pour une extraction des données selon la méthode Varimax. Cette méthode procède par rotations orthogonales des axes. Ce mode de calcul minimise le nombre de valeurs ayant des contributions élevées sur un axe et simplifie l'interprétation des facteurs. De plus, comme le plan demeure orthogonal, la structure factorielle est très claire. Cette méthode met en avant toutes les variables influentes. Elle convient donc particulièrement à une approche exploratoire comme la notre.

Troisième temps de l'exploitation des données, le choix du niveau de dimensionnalité relève d'un compromis entre clarté du message de l'analyse et précision de l'information synthétisée. En effet, plus la dimensionnalité est réduite, et donc lisible, moins les phénomènes périphériques apparaissent ce qui implique de la perte d'information. Le nombre de facteurs⁷ retenus tient de ce compromis et s'appuie sur une analyse de la variance. Il s'agit d'observer à la fois la variance totale expliquée et la variance expliquée par chaque facteur supplémentaire. Nous retenons le plus petit nombre de facteurs expliquant au moins 60% de la variance totale [Hair J. *et al.* (2006)]. Un nouveau tri des variables s'avère nécessaire afin de créer des facteurs représentatifs et non corrélés entre eux. Ainsi, toutes les variables ayant un coefficient explicatif supérieur à 0,3 pour au moins deux facteurs et n'ayant pas un seul coefficient supérieur à 0,5 sont évacuées. Enfin, l'indice Kaiser-Mayer-Olkin (KMO) valide, ou rejette, la structure factorielle obtenue. Cet indice évalue la cohérence de l'ensemble construit ainsi que l'efficacité de mesure des notions. Il s'agit essentiellement d'un test de corrélations partielles. Il accepte la solution lorsque l'indice dépasse 0,3 mais reste inférieur à 0,7, au-delà le modèle souffre d'auto-déterminisme. L'analyse se poursuit en utilisant les facteurs ainsi calculés.

II.3 UNE TYPOLOGIE DES MÉGAPOLÉS À PARTIR DES NOTIONS CONSTRUITES

Les notions construites par l'analyse multifactorielle présentent différentes facettes des villes étudiées. C'est pourquoi, elles permettent de distinguer les éléments explicatifs d'un phénomène, les facteurs de vulnérabilité dans notre cas, et servent de fondement à la création d'une typologie. Chaque composante d'une analyse multifactorielle identifie une caractéristique des villes. Dès lors, placées sur un axe gradué, les composantes classent les villes les unes par rapport aux autres. Puisque nous avons opté pour la méthode orthogonale

⁷ Dans une analyse multifactorielle les termes composante, facteur et dimension ou notion sont presque synonymes. La composante est l'objet de calcul. Elle devient facteur lorsque les variables sont positionnées. Enfin dimension, ou notion, s'utilise lorsque l'on s'éloigne des chiffres et que la signification est mise en avant.

VARIMAX, les axes ne sont pas corrélés entre eux. Les croiser permet donc de présenter un phénomène ou une caractéristique nouvelle. Ainsi, des types de villes émergent de l'analyse. La distinction des villes selon ces différents types participe à la construction d'une typologie. Cette typologie permet une analyse positive comparative. Par conséquent, à partir des notions de l'analyse multifactorielle, nous pouvons caractériser les villes et construire des faits stylisés utiles à une démarche explicative ultérieure.

Corréler les notions construites avec des variables de risques rend compte, au moins en partie, de la vulnérabilité des villes. En effet, si une relation significative existe entre une composante de l'analyse multifactorielle et un type de risque nous concluons d'une causalité. La relation de causalité se déduit du statut même des facteurs. Par construction, ils représentent des dimensions structurelles des villes. Ils ne peuvent donc pas être les conséquences d'évènements aléatoires et incertains. Nous formulons alors l'hypothèse qu'ils en sont les causes. Les notions caractérisant les villes deviennent ainsi des facteurs aggravant ou atténuant de leur vulnérabilité face au risque hydrique. De là, un niveau et une forme type de vulnérabilité s'associe à chaque groupe de villes défini par la typologie.

En résumé, notre analyse procède en trois temps. La construction d'une base de données permet de collecter de l'information propre à notre objet d'étude, les villes et les risques hydriques (inondations et sécheresses). Un traitement statistique multifactoriel permet d'exploiter la somme d'informations recueillies et d'élaborer des facteurs, ensuite appelés notions, caractérisant les villes. Enfin, après corrélation avec des variables de risques, le croisement des notions structure une typologie et définit des facteurs de vulnérabilité. Voyons les résultats subséquents à cette méthode.

III RÉSULTATS

L'analyse multifactorielle forme trois facteurs. Les trois sous-sections suivantes présentent chaque facteur selon leur significativité, leur signification et leur corrélation au

risque (II.1 ; II.2 ; II.3). Une dernière sous-section expose la typologie découlant de ces facteurs (II.4).

III.1 FACTEUR 1 : LE DEGRÉ DE MATURITÉ DES MÉGAPOLES

La solution factorielle retenue produit trois facteurs (Tableau II.1). Huit variables les construisent. La solution explique 61,3% de la variance de l'échantillon total et 83,2% de la variance de l'échantillon final. L'indice KMO s'élève à 0,627. Il reste donc entre les bornes de valeurs attestant que la solution factorielle constitue un ensemble cohérent et mesurant de manière adéquate les notions. Pour la majorité, la qualité de représentation des variables dans les facteurs est excellente, sinon elle reste bonne. Les facteurs ne sont pas corrélés entre eux car chaque variable retenue ne contribue à la construction que d'un facteur. Le premier facteur explique 33,4% de la variance totale et reflète la tendance la plus lourde suivie par l'échantillon.

Tableau II.1 : Matrice des composantes après rotation

	Composantes		
	1 Maturité	2 Anthropisation	3 Centralité
Variance expliquée (%)	33,4	29,8	18,8
PIB/hab 2008	,939	,064	-,082
% urbanisation 2010	,942	-,139	-,085
Taille ville/pop urb2010	-,189	-,104	,955
Taille ville/ pays2010	,022	-,090	,972
Cultures	,214	,784	,089
Cultures irriguées	-,128	,780	-,258
Dynamisme ville	-,875	,038	,013
Densité bassin versant	-,202	,872	-,097

Source : Construction de l'auteur.

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.

Le facteur 1 rend compte de la maturité de la ville au sein de la nation et nous l'appréhendons dans la perspective d'un processus de développement de la ville. Le degré de maturité renvoie à la place d'une ville dans un processus « de cycle de vie urbain » resitué

dans le contexte national de celle-ci. Ce degré reflète donc la phase de développement dans laquelle s'insère la ville, petite ville à croissance forte ou ville développée en stagnation, par exemple ; ainsi que les caractéristiques de développement national influant sur cette ville. Il se compose de variables Pays et de variables Ville : le PIB/hab en 2008, le taux d'urbanisation en 2010 et la projection du dynamisme de la ville entre 2010 et 2020. La projection du dynamisme se base sur la mesure du rapport de l'accroissement démographique de la ville et de l'accroissement démographique national. Il permet d'évaluer les flux de population vers la ville. Faisant l'hypothèse d'une croissance démographique naturelle homogène sur l'ensemble du territoire national, les différences sont perçues comme des migrations. Le premier facteur représente bien cette variable (0,768) et excellemment les deux autres (0,893 et 0,913). Les variables de Pays et de dynamisme agissent dans un sens opposé. Ainsi, l'éventail des situations considérées commence par une ville ultra-dynamique par rapport à son pays non, ou peu, développé jusqu'à une ville confondue dans un développement national élevé. Cet axe représente une dynamique urbaine. Il présente le développement du pays et la place de la ville dans ce développement et, également, le rôle de la ville dans la phase d'urbanisation du pays. Il mesure l'effet d'entraînement des villes pour le développement national.

L'exemple des États-Unis permet de mieux comprendre ce phénomène de polarisation et diffusion du développement. Les États-Unis sont un pays riche et fortement développé. Ainsi, toutes les villes américaines enregistrent une valeur élevée de ce facteur, au moins supérieur à 0,7 et en moyenne autour de 1,2. Par opposition, Mogadiscio, capitale somalienne, se situe à l'abscisse -1,24 de l'axe car elle est dans un pays connaissant un faible niveau de développement. Ensuite, l'écart de contribution au développement peut s'appréhender lorsque l'on situe une ville par rapport à la moyenne nationale. Lorsque la ville est en dessous elle est fortement dynamique et inversement.

Ainsi, Pittsburg détient le niveau le plus élevé des États-Unis pays avec 1,43. Cette ville a connu un formidable essor industriel durant le XIX^{ème} siècle grâce à ses mines, le développement de la sidérurgie et des voies ferrées. Elle constituait alors pour la Pennsylvanie et les États-Unis un formidable pôle de dynamisme économique et de développement. Cependant, à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, l'activité se réduit et la ville perd son dynamisme, la population quitte l'aire, *etc.* Désormais, le développement de Pittsburg se confond avec celui des États-Unis, voire est légèrement inférieur. D'où un indice supérieur à la moyenne. El Paso, au Texas, se trouve dans la position opposée. Son abscisse de 0,9 montre le fort dynamisme de la ville. En effet, depuis la ratification de l'ALENA en 1993, cette région américaine devient très dynamique, notamment du fait du développement des *maquilladoras*. Par ailleurs, comme les conditions de vie sont difficiles, notamment à cause de la proximité d'un désert, une grande ville proposant de nombreuses infrastructures attire fortement. La polarisation sur El Paso en est amplifiée. D'où un indice inférieur à la moyenne nationale.

Ce facteur est négativement corrélé avec les variables de risques (Tableau II.2). La diffusion du développement sur le territoire réduit la vulnérabilité des villes. Cette tendance n'influe pas avec la même puissance sur chaque variable⁸. Ainsi, en termes d'aléa, seule la probabilité d'évènements de sécheresse décroît à mesure que le développement se diffuse. Un coefficient négatif de -0,222** lie les deux phénomènes⁹. Par contre, qu'ils soient causés par des inondations ou des sécheresses, les impacts humains se résorbent. La corrélation entre le facteur 1 et le nombre de personnes affectées par les inondations est de -0,220**. Elle s'élève à -0,251** en cas de sécheresse. Les coûts induits par les sécheresses s'amenuisent dans la

⁸ Par commodité de lecture nous ne présentons que les impacts significatifs. Ainsi, la corrélation entre les variables non citées et le facteur traité est proche du nul.

⁹ Par convention, * indique une corrélation significative au niveau 0,05 (bilatéral) et ** une corrélation significative au niveau 0,01 (bilatéral).

proportion d'un coefficient de $-0,182^*$. La vulnérabilité des villes diminue à mesure que le pays se développe et partage ce développement entre les habitants.

Observons cet effet en Chine. Pour un niveau de conséquences des inondations comparable, environ 400 millions de personnes affectées sur la période, le nombre d'aléas varie du simple au double selon que la maturité soit forte ou non. Par exemple, Guangdong est une ville chinoise dont la maturité est relativement élevée pour la Chine, $-0,45$ par rapport à une moyenne de $-0,7$. Sur la période, plus de 400 millions de personnes ont souffert des 28 inondations subies. Durant le même temps, Luoyang, avec un faible niveau de maturité ($-1,02$), en a subi 12 pour un nombre comparable de personnes affectées. Nous voyons que l'intensité de l'impact des événements diminue à mesure que la maturité de la ville augmente.

III.2 FACTEUR 2 : LE NIVEAU D'ANTHROPISATION

Le deuxième facteur explique 29,8% de la variance totale. La tendance qu'il reflète est légèrement plus faible que celle du premier facteur. Le deuxième facteur rend compte de l'anthropisation du bassin versant dans lequel se situe la ville. Il se compose de trois variables de bassin versant. La densité du bassin est excellemment représentée ($0,812$) et détermine le plus fortement le facteur ($0,872$). Les deux autres variables, part du territoire utilisé pour la culture et pour la culture irriguée, sont bien représentées ($0,668$ et $0,691$) et ont un effet presque semblable ($0,784$ et $0,780$). Ce facteur montre le phénomène d'utilisation du bassin versant par les hommes. En effet, plus la valeur assignée à la ville s'élève plus son territoire est modifié et occupé par l'activité humaine. Cet axe porte donc sur les usages et l'occupation des sols. L'éventail des situations commence avec un bassin versant vierge de toute activité humaine et s'étend jusqu'à une forme totalement artificielle du sol (un polder par exemple).

Ainsi, les villes situées sur des bassins versants dont la densité est plutôt élevée se trouvent sur la droite de l'axe. L'ensemble des villes européennes ainsi qu'une partie de celle d'Asie ont les abscisses les plus élevées. Le cas européen illustre bien ce phénomène

d'anthropisation. La maîtrise des sols apparaît comme un souci majeur pour le développement des sociétés européennes. Ainsi, en France le décret du 14 frimaire an II (4 décembre 1793) décide l'assèchement des marais de la République afin de stopper la reproduction des moustiques et des maladies qu'ils véhiculent, et de développer l'agriculture [(Mathevet R. (2011)]. De même, le second pilier de la Politique agricole commune reconnaît la multifonctionnalité de l'agriculture et assigne un rôle d'entretien de la nature aux agriculteurs. Il y a donc intervention humaine. Par opposition, aux États-Unis la tendance va plutôt vers la création de grands parcs nationaux limitant toute empreinte humaine à travers la mise en place du programme *Leave no trace*¹⁰. Les bassins versants américains ont un faible niveau d'anthropisation. Par conséquent, les villes américaines se positionnent dans la gauche du plan.

L'anthropisation du bassin versant favorise les risques hydriques. Le nombre d'inondations et l'anthropisation sont positivement corrélés dans la mesure d'un facteur de 0,265**. De même, l'impact augmente. Le nombre de personnes affectées et les dégâts occasionnés s'amplifient dans une proportion de 0,301** et de 0,248** en fonction de l'anthropisation. Ainsi, l'anthropisation assujettit les villes à plus d'inondations tout en accroissant leurs impacts éventuels. Ce phénomène développe également la sensibilité des villes face aux sécheresses. Le coefficient de corrélation entre l'anthropisation et le nombre de personnes affectées par les sécheresses s'élève à 0,342**. Donc, l'anthropisation accentue la vulnérabilité des villes face aux risques hydriques. Pour illustration, les 37 villes ayant un indice d'anthropisation inférieur à -1,1 ont fait face à 4 inondations, en moyenne sur les trente ans. Les 31 villes dont l'indice est supérieur à 1 ont subi en moyenne 10 inondations. De plus, dans le premier cas le groupe est assez homogène, en termes de catastrophes connues (trois

¹⁰ <http://www.lnt.org/>, consulté le 05-05-2011.

cas supérieurs à 6), alors que dans le second la dispersion est forte (de nombreux cas au dessus de 20 et un maximum de 37).

Tableau II.2 : Corrélations des facteurs aux risques

		Diffusion développement	Anthropisation	Centralité
Inondations	Corrélation de Pearson	-,064	,265**	-,422**
	Sig. (bilatérale)	,379	,000	,000
	N	192	192	192
Morts	Corrélation de Pearson	,039	,068	,153*
	Sig. (bilatérale)	,595	,350	,034
	N	192	192	192
Personnes touchées	Corrélation de Pearson	-,220**	,301**	-,279**
	Sig. (bilatérale)	,002	,000	,000
	N	192	192	192
Dommages en \$	Corrélation de Pearson	-,099	,248**	-,280**
	Sig. (bilatérale)	,170	,001	,000
	N	192	192	192
Sécheresses	Corrélation de Pearson	-,222**	,085	-,197**
	Sig. (bilatérale)	,002	,243	,006
	N	192	192	192
Morts	Corrélation de Pearson	-,050	-,002	,099
	Sig. (bilatérale)	,493	,975	,171
	N	192	192	192
Personnes touchées	Corrélation de Pearson	-,251**	,342**	-,240**
	Sig. (bilatérale)	,000	,000	,001
	N	192	192	192
Dommages en \$	Corrélation de Pearson	-,182*	,095	-,289**
	Sig. (bilatérale)	,011	,191	,000
	N	192	192	192

Source : Construction de l'auteur.

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

III.3 FACTEUR 3 : LE DEGRÉ DE CENTRALITÉ DANS LE RÉSEAU URBAIN

Le troisième facteur explique 18,8% de la variance totale. La tendance révélée s'avère moins puissante que celle des deux facteurs précédents. Avec environ dix points de moins que le deuxième facteur, ce facteur rend compte du degré de centralité de la ville dans le pays. Il représente de manière excellente les deux variables qui le composent, la taille de la ville dans la population urbaine (0,959) et la taille de la ville dans la population nationale (0,953). La cause principale de cet écart relatif de capacité d'explication réside dans le fait que seulement

deux variables le composent alors que les autres facteurs sont alimentés par trois variables. Cette fois-ci l'échelle d'observation est celle de la ville. Les deux variables agissent quasiment de manière identique sur la création du facteur (0,955 et 0,972). Ce facteur mesure le poids de la ville dans l'ensemble du pays. L'éventail des possibilités s'étend donc d'une ville insignifiante dans le pays jusqu'à une Cité-État.

Ce facteur présente l'importance d'une ville dans l'ensemble du territoire national. Par exemple, en France une forte asymétrie dans la répartition de la population apparaît. Paris possède l'un des degrés de centralité les plus élevés de l'échantillon total (1,6) tandis que les autres mégapoles françaises se positionnent toutes au niveau de l'ordonnée. Cette forte centralité de la capitale est le fruit de la tradition centralisatrice du pays. Par contre, ce phénomène de centralité ne transparaît pas dans la structure urbaine russe. En Russie, le poids est parcimonieusement réparti entre les mégapoles. En effet, leur degré de centralité se situe entre -0,5 et -0,8. Cet équilibre dans l'occupation du territoire russe fut une volonté affirmée des politiques soviétiques.

Le caractère central de la ville réduit significativement les risques hydriques qu'encourt la ville, à une exception près. En effet, si tous les risques diminuent, le nombre de morts dues aux inondations augmente selon un coefficient de -0,153* en fonction de la centralité de la ville. Par contre, la centralité réduit considérablement la probabilité d'inondations. Le coefficient de corrélation est de -0,422**. Dans une proportion moindre (-0,197**) l'effet est le même en ce qui concerne les sécheresses. La centralité résorbe également l'impact des catastrophes. Sur le plan humain, le nombre de personnes touchées par une inondation est négativement corrélé à la centralité par un coefficient de -0,279**, et de -0,240** en cas de sécheresse. Les coûts engendrés par les catastrophes s'amenuisent à mesure que la centralité augmente selon un facteur de -0,280** en cas d'inondations et de -0,289** en cas de sécheresses. L'analyse montre que le degré de centralité des villes est un facteur

atténuant la vulnérabilité urbaine face aux risques hydriques. Il touche sept des huit variables de risque. Il s'agit donc du facteur ayant la plus large gamme d'effets. Notons également que l'impact n'est pas monotone puisque le facteur aggrave l'impact mortel des inondations.

III.4 TYPOLOGIE DES VILLES À PARTIR DES AXES DE L'ANALYSE MULTIFACTORIELLE

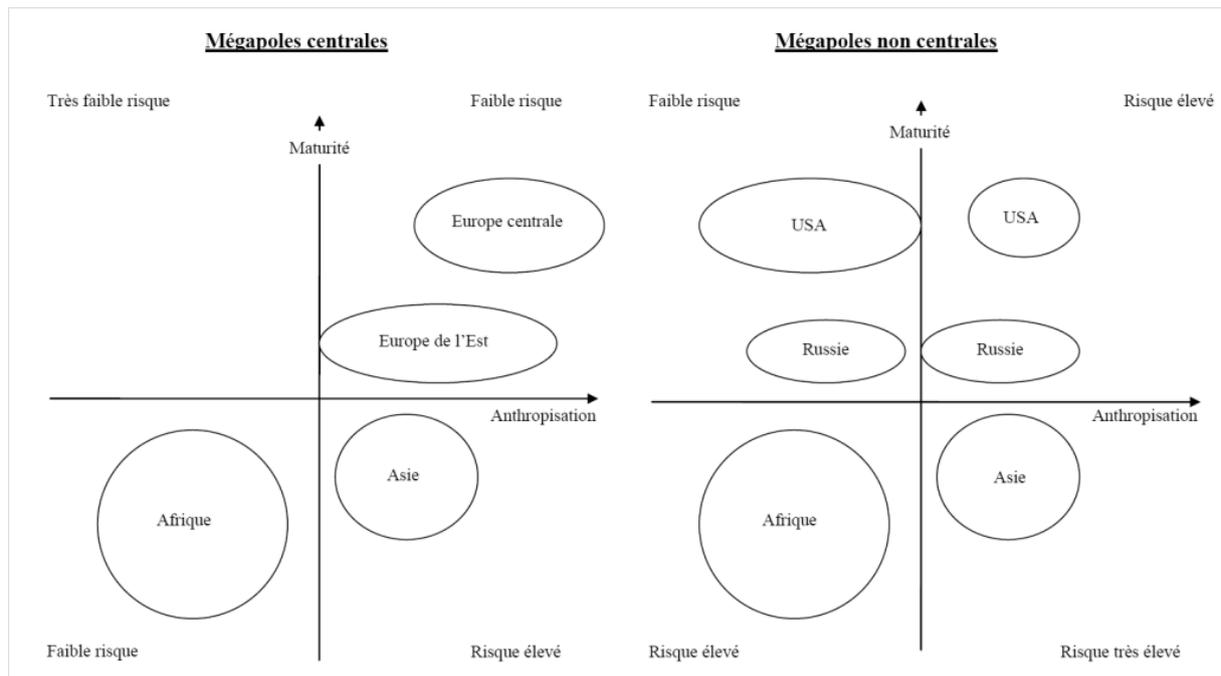
Les trois notions présentées ci-dessus constituent les premiers éléments d'une typologie. Avec notre niveau d'information 192 villes peuvent être classées. Si chaque ville est classée de manière binaire, la typologie propose une classification selon huit profils de villes. Une présentation graphique dans un seul plan s'avère complexe à lire. Aussi, nous préférons montrer les différents cadrans avec les villes qu'ils abritent (Tableau II.3). Par contre, un ordre d'idée de la répartition des villes par caractéristique offre une vue d'ensemble intéressante. Dans 54,2% des cas, les villes sont dans un pays dont le développement est diffus sur le territoire, la maturité du réseau urbain est élevée. Dans 43,2% des cas, les bassins versants apparaissent plutôt anthropisés. Enfin dans 40,1% des cas, les villes occupent une place centrale dans le pays. Les huit profils de villes correspondent à quatre niveaux de risque potentiel: très faible, faible, fort, très fort. La ville-type atténuant le mieux les risques est une ville centrale dont l'homme a peu modifié le bassin versant et comprise entre les frontières d'un pays avec un niveau de développement élevé et partagé. Seules 12 villes possèdent ces caractéristiques. Elles sont éparpillées sur le globe sans lien logique apparent. A l'opposé, 42 villes réunissent toutes les conditions aggravant les risques. Il est à noter que ces 42 villes sont toutes asiatiques, principalement indiennes et chinoises.

Le croisement des axes propose huit cases de classification. En prenant en compte la localisation géographique des villes, nous constatons des similarités entre les villes de même zone. Ainsi, nous retrouvons six groupes géographiques. Les villes asiatiques, nord-américaines, africaines, russes, européennes (occidentales, d'une part, et orientales, d'autre part) se distinguent les unes des autres selon nos critères. En effet, les villes asiatiques

combinent un facteur 1 négatif et un facteur 2 positif. Elles sont donc plutôt dans des pays au développement polarisé sur quelques villes dynamiques et aux bassins versants anthropisés. Les villes nord-américaines partagent un facteur 1 positif et un facteur 3 négatif. La diffusion du développement est donc relativement homogène sur le territoire et les villes ne sont pas très centrales. Des facteurs 1 et 2 négatifs caractérisent les villes africaines. Celles-ci s'étalent sur un territoire faiblement anthropisé et polarisent un développement encore faible. Les villes russes sont également faiblement centrale (facteur 3 négatif) mais partagent un développement plus élevé (facteur 1 positif). L'Europe occidentale abrite des villes centrales sur un territoire anthropisé dans lequel le développement est diffus. Les villes d'Europe orientale ont les mêmes caractéristiques à l'exception près que le développement demeure polarisé et faible.

Insistons sur le fait que ces groupes classent les villes considérées par l'analyse multifactorielle. Il n'est donc pas certains qu'ils s'appliquent pertinemment à l'ensemble des villes de plus de 750 000 habitants. De plus, des villes peuvent apparaître comme des « exceptions statistiques ». Pour ces deux raisons, cette typologie n'est qu'un point de départ. Néanmoins, étant donné le grand nombre de villes intégrées (environs le tiers des mégapoles existantes), il nous apparaît possible de généraliser. Avant d'être achevée, la typologie requerra un regard plus détaillé des villes et de leur territoire. Par exemple, réinsérer des études de cas dans les différentes cases et les groupes éclaircirait la lecture et la validité. Augmenter le nombre de variables produira ces mêmes effets. Néanmoins, la typologie en l'état actuel fournit déjà une première information : des profils urbains continentaux existent.

Tableau II.3 : Répartition des villes selon les notions construites



Source : Construction de l'auteur.

Trois notions se dégagent de l'analyse multifactorielle : la maturité, l'anthropisation du bassin versant, et le degré de centralité dans le pays. Elles caractérisent la structure dans laquelle se situent les villes. Ces trois notions représentent également trois dimensions différentes des villes et n'agissent pas de la même manière sur les risques hydriques menaçant l'échantillon. L'anthropisation accroît le risque tandis que les deux autres dimensions le réduisent. La typologie établie, à partir de ces caractéristiques, huit différents profils de villes et retient quatre degrés de vulnérabilité. Ces considérations proviennent de l'unique lecture de l'analyse statistique. Afin, d'enrichir l'analyse, il convient de se détacher de ces résultats puis de les discuter au regard d'apports externes.

IV DISCUSSION

Nous allons discuter tour à tour les facteurs et les résultats issus de notre analyse. La littérature existante sur l'étalement urbain (III.1), l'empreinte hydrique urbaine (III.2) et les réseaux de villes (III.3) servira de mise en perspective. Nous montrerons notamment une complémentarité entre cette littérature et nos résultats.

IV.1 L'OBSERVATION DE L'ESSOR ET DU DÉCLIN URBAIN

En mesurant la maturité du territoire urbain, le premier facteur de l'analyse multifactorielle rend compte de l'essor et du déclin des villes. Notre analyse offre un regard sur la dimension structurelle de ce phénomène. La littérature traitant de l'étalement urbain précise une des dimensions de l'expansion urbaine. De ce fait, elle apparaît complémentaire à notre analyse et ses résultats, en particulier le premier facteur représentant la diffusion et la polarisation du développement. Depuis le développement et la récente diffusion des données satellitaires (Nasa, Global Land Cover Facility), la forme urbaine typique des différentes régions du monde devient observable. Les méthodes quantitatives peuvent alors être mobilisées afin de décrire et classer les formes urbaines examinées. Ces nouvelles informations affinent l'opposition entre la ville américaine étalée et la ville européenne compacte [Ewing R. (1997) ; Brueckner J.K. *et al.* (2001) ; Johnson M.P. (2001)]. La plupart des travaux s'intéressent à l'étalement urbain des pays développés, dont Wassmer (2000) offre le cadrage méthodologique consensuellement utilisé pour mesurer et comparer le phénomène. Ensuite, des indicateurs cherchent à capturer les différentes dimensions du phénomène [Galster G. *et al.* (2001)] ou à le mesurer, en particulier aux États-Unis [Ewing R. *et al.* (2002)].

Aux États-Unis ce processus est ancien et significatif. Il découle de ce fait, et du lien entre la Nasa et les organismes de recherche, la production de données délimitant l'ampleur du phénomène. Les résultats de l'analyse de ces données montrent une inversion de la répartition de la population urbaine américaine entre 1950 et 1990. Elle passe de 65 % dans les centres et 35 % dans les banlieues à 20 % dans les centres et 80 % dans les banlieues [Nechyba T.J. et Walsh R.P. (2004)]. En même temps, la surface occupée par les banlieues augmente de 250 % et la densité des centres diminue de 25 %, passant de 10 000 hab/km² à 6 000 hab/km². La forte croissance économique, le développement des infrastructures

facilitant la mobilité automobile et l'essor des quartiers résidentiels constituent les principaux moteurs de cet étalement. Au même moment, les villes européennes ne profitent pas d'une expansion similaire. Elles restent marquées par la guerre et s'engagent dans un processus de reconstruction dans lequel les transports publics assurent la mobilité au sein de la ville. Pour illustration, en 1970 un ménage allemand possède autant de voiture qu'un ménage américain de 1920 [Glaeser E. et Kahn M. (2003)].

Néanmoins, depuis le début des années 1990, le phénomène d'étalement urbain se généralise sur le territoire européen [EEA (2006)]. L'espace occupé par les villes européennes croît en moyenne de 7,46 % alors que leur population n'augmente que de 0,34 %, entre 1991 et 2001 [Patacchini E. *et al.* (2009)]. L'étalement urbain ne touche pas uniformément le territoire européen. Le quartile des villes les plus peuplées tend à voir ses habitants partir, - 1,05 %, et sa surface stagner, 0,30 %. Les villes du quartile opposé gonflent faiblement en population, 2,47 %, et fortement en superficie, 23,28 %. De cette manière, l'Europe occidentale se divise en deux zones selon l'intensité de l'étalement urbain en cours. D'un côté, les villes du Nord, déjà grandes, évoluent peu. Les *shrinking cities* est-allemandes illustrent à l'extrême ce phénomène en allant jusqu'à la contraction. De l'autre côté, les villes du Sud de la zone, originellement plus petites, apparaissent très dynamiques. Le facteur de notre analyse rend compte de cette dynamique de déclin et d'essor. Les villes localisées à droite de la moyenne nationale stagnent ou tendent à décliner alors que celles à gauche de cette moyenne croissent fortement. Les exemples d'El Paso, Pittsburg et de la côte Est chinoise évoqués plus haut illustrent ce processus.

IV.2 LES LIENS AVEC L'ANALYSE EN TERMES D'EMPREINTE ET LA VULNÉRABILITÉ

L'analyse en termes d'empreinte hydrique corrobore nos résultats sur l'anthropisation et l'artificialisation des sols. La notion d'empreinte hydrique appliquée au cas de l'eau l'approche en termes d'empreinte écologique [Wackernagel M. et Rees W.E. (1996) ; Folke

C. *et al.* (1997)]. Cette approche calcule le lien entre l'activité humaine et l'écosystème en estimant la surface permettant de fournir de manière durable les services écosystémiques requis [Wackernagel *et al.* (2002) ; York *et al.* (2003)]¹¹. Les résultats des analyses de Jenerette [et Larsen L. (2006) ; *et al.* (2006)] confirme nos résultats. Les mégapoles modèlent fortement le territoire en fonction de leur besoin et ce processus s'avère particulièrement puissant en Europe occidentale et sur la côte Est chinoise. Les auteurs s'intéressent à l'empreinte hydrique de l'urbanisation des différentes régions du monde, ils évaluent la surface nécessaire pour répondre aux usages en eau des villes de plus de 750 000 habitants. Selon leurs estimations, l'empreinte hydrique urbaine augmente dans le monde. Évaluée en moyenne à 29 937 km² par ville en 1950, elle s'étend sur 35 397 km² en 2000, soit une croissance de 18 %, et est estimée à 38 400 km² en 2015, soit une augmentation de 28 % par rapport à 1950. Globalement, l'élargissement de l'empreinte hydrique des mégapoles s'accélère. Régionalement, les villes indiennes et chinoises seront celles avec la plus grande empreinte en 2015. Les villes européennes se situent dans la moyenne basse. Cependant, comme les mailles du réseau urbain européen sont plus resserrées qu'ailleurs, il apparait que les mégapoles européennes marquent de leur empreinte hydrique l'ensemble du territoire de l'Europe occidentale. Ainsi, le territoire européens est plus sollicité, et donc plus artificialisé, que les territoires des autres régions du monde.

S'ajoutant à l'anthropisation des bassins versants et à l'augmentation de l'empreinte des villes sur leur territoire, les changements climatiques exacerbent la vulnérabilité hydrique des villes. Les liens entre eau, changements climatiques et ville ne sont pas encore clairement identifiés [Praskievicz S. et Chang H. (2009)] ; les principales interrogations se concentrent autour de la variabilité des événements (nombre et intensité) et des modifications induites

¹¹ Les 3 principales critiques de l'empreinte écologique et de sa mesure sont 1/ la confusion de plusieurs services produits par le même écosystème ; 2/ l'échange de service interrégional et ; 3/ l'hétérogénéité spatiale des consommations et offres de services.

dans les bassins versants. Néanmoins, un consensus existe pour dire que les changements climatiques s'exprimeront à travers une multiplication des événements extrêmes plutôt qu'un changement moyen homogène dans le temps et dans l'espace. Pour les villes européennes, la principale menace réside dans l'augmentation en fréquence et en intensité des inondations et des sécheresses. Par exemple en France, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prévoit une augmentation des précipitations de 30 % dans la région centre et une diminution de 10 % à 20 % en bordure méditerranéenne [PNUE (2007) à partir de données du GIEC]. A l'inverse, le niveau de stress hydrique connu en Angleterre devrait fortement croître [Environment Agency (2008)]. Les projections indiquent que la population de la côte est-anglaise augmentera de 20 % à 40 % tandis que le flux des rivières diminuera de 80 % durant l'été. Ainsi, les études en termes d'empreinte hydrique corroborent notre constat d'une artificialisation des territoires sur lesquels se situent les mégapoles. Ce phénomène, que nous appelons anthropisation, accroît la vulnérabilité des villes et les changements climatiques risquent d'amplifier celle-ci dans les années à venir.

IV.3 L'IDENTIFICATION DE LA STRUCTURE ET DE LA FORME DU TISSU URBAIN

Le facteur 3 fait ressortir le caractère central des différentes mégapoles étudiées. Ainsi, il contribue à l'analyse de la structure hiérarchique des tissus urbains. Les notions placent la ville dans un système de villes [Pumain D. (1992)]. Bien qu'une ville soit un système à part entière, elle s'insère dans des réseaux plus larges l'englobant et la formation de systèmes de villes en découle. Le facteur 3 place la ville dans ces systèmes et les appréhender explicitement permet de mieux qualifier la ville analysée. Depuis Christaller (1933) et Gibrat (1931) la centralité s'impose comme une notion essentielle à la caractérisation des villes. Sans chercher à l'expliquer, notre analyse montre que, en effet, il s'agit d'un trait significatif du profil urbain. Par ailleurs, ce constat de centralité renvoie à des aspects structurant des

systèmes urbains. En effet, la centralité détermine en grande partie la polycéphalie ou macrocéphalie d'un territoire [Wackerman G. (2000)].

Nous avons souligné le fort degré de centralité des villes européennes. Cela signifie qu'une structure centre/périphérie hiérarchise le territoire. Par conséquent, comme l'illustre Lisbonne, Vienne et Paris, parmi les 15 villes les plus centrales de l'analyse, le tissu urbain européen se caractérise par sa macrocéphalie. Il se compose de peu de grandes villes constituant d'importants pôles nationaux et de nombreuses villes petites et moyennes proches les unes des autres [Wackermann G. (2000) ; Carrières J.P. (2008)]. Ainsi, « *pour une population urbaine supérieure de 30 % à celle des États-Unis, la seule communauté urbaine européenne compte trois fois plus d'agglomération de plus de 10 000 habitants (3 500 contre 1 000)* » [Cattan N. *et al.* (1994), p. 23]. Au final, les différents systèmes urbains d'Europe ne distribuent pas les villes harmonieusement selon une loi Zipf, à l'inverse du système urbain américain par exemple.

Cette structuration du système de ville européen confirme la thèse du maintien des villes européennes [Sassen S. (1991) ; Bretagnolle A. *et al.* (2000), Pumain D. (2006) ; Le Gallès P. (2011)]. Cette thèse défend l'idée selon laquelle le maillage urbain européen conserve sa forme dans le temps ; les villes importantes du moyen-âge restent les centres d'aujourd'hui. Ensuite, du fait de cette stabilité et du caractère macrocéphale du système, les villes européennes obtiennent de l'autonomie dans la gestion des affaires locales vis-à-vis de l'État. Elles n'entrent cependant pas en opposition avec le pouvoir national. Notre analyse et l'étude du facteur illustrent et mesurent ce maintien de la forme du réseau urbain européen. Ensuite, une comparaison avec d'autres réseaux urbains apparaît envisageable, notamment ceux établis en Chine et aux États-Unis qui semblent plus dynamiques.

V CONCLUSIONS ET PROLONGEMENTS

L'utilisation d'une analyse multifactorielle s'avère effectivement utile à la comparaison de l'ensemble des mégapoles mondiales. L'analyse menée traite un échantillon de 595 villes renseignées par 31 variables. Il découle des procédures opérées trois notions caractérisant 192 villes différentes. Ces notions sont la maturité, le niveau d'anthropisation du bassin versant et le degré de centralité de la ville. Elles réunissent les villes en six groupes. Après les avoir corrélées aux risques hydriques, nous obtenons une fonction globale de vulnérabilité urbaine ainsi que quatre différents niveaux d'intensité. Ces résultats peuvent servir de socle à la construction d'une typologie.

Nous observons six groupes géographiques ayant un classement homogènes : Asie, Amérique du Nord, Afrique, Russie, Europe occidentale et Europe orientale. Ce résultat conforte la structuration de la littérature autour des blocs continentaux. Notre apport réside dans l'étendue des cas pris en compte. En effet, l'analyse menée inclue 192 villes différentes, soit le tiers des mégapoles du monde. Dès lors, une généralisation des résultats sur d'autres villes n'apparaît pas imprudente. D'autre part, nous confirmons l'importance structurante des notions de développement économique et de centralité dans la caractérisation des villes. À cela, nous proposons d'inclure la notion d'anthropisation qui semble également déterminante. Ces notions font écho à la littérature sur l'étalement urbain, l'artificialisation des sols et les réseaux de villes. Nous rendons compte et mesurons ces phénomènes à partir d'une analyse structurelle des mégapoles ce qui génère un certain niveau de généralité. La littérature analysée pointe précisément des aspects qui entrent dans notre cadre d'analyse et confirme nos résultats. Ainsi, nous soulignons une complémentarité entre ces travaux et les nôtres : nos résultats relèvent plutôt d'une méta-analyse que la littérature existante renforce avec des études de cas précises.

Ce faisant, nous proposons de poursuivre les recherches dans trois directions différentes. D'abord, il convient de cibler des parties de l'échantillon afin de produire des messages de plus en plus fins. L'objectif est d'approfondir la typologie d'un groupe à chaque étape de la construction. Allant de pair avec ce processus de focalisation, nous souhaitons augmenter le nombre de variables prises en compte, notamment le PIB des villes. Enfin, pour éviter un aveuglement statistique de la réalité, l'incorporation et la confrontation des résultats à des études de cas apparaissent nécessaires.

Adger N. [1999], « Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam », *World Development*, vol 27, n° 2, p. 249-269.

Adger N. *et al.* [2003], « Adaptation to Climate Change in the Developing World », *Progress in Development Studies*, vol 3, p. 179-195.

Banque mondiale : <http://econ.worldbank.org/>

Bouchon S. [2006], « L'application du concept de vulnérabilité aux infrastructures critiques : quelles implications pour la gestion territoriale des risques? », *Responsabilité et environnement*, vol 43, p. 35-42.

Bretagnolle A. *et al.* [2000], « Long-Term Dynamics of European Towns and Cities : Toward a Spatial Model of Urban Growth », *Cybergeo*, vol 137.

Bruceckner J.K. *et al.* [2001], « Urban Sprawl : Lessons from Urban Economics [with Comments] », *Brooking-Wharton Papers on Urban Affairs*, p. 65-97.

Campanella T.J. [2006], « Urban Resilience and the Recovery of New Orleans », *Journal of the American Planning Association*, vol 72, n° 2, p. 141-146.

Carrières J.P. [2008], « Les villes intermédiaires européennes et l'Europe polycentrique », *Réalités industrielles*, février, p. 18-25.

Castree N. [2005], « The Epistemology of Particulars: Human Geography, Case Studies and Context », *Geoforum*, vol 36, p. 541-544.

Cattan N. *et al.* [1994], *Le système des villes européennes*, Economica, Paris.

Christaller W. [1933], *Die Zentralen Orte in Suddeutschland*, Iéna ; traduit par C.W. Baskin [1966], *Central places in Southern Germany*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Cross J.A. [2001], « Megacities and Small Towns: Different Perspectives on Hazard Vulnerability », *Environmental Hazards*, vol 3, n° 2, p. 63-80.

D'Ercole R. *et al.* [1994], « Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse », *Revue de géographie alpine*, vol 82, n° 4, p. 87-96.

Décret du 14 frimaire an II (4 décembre 1793) sur l'assèchement des étangs de la République.

European Environment Agency [2006], « Urban Sprawl in Europe », *EEA Report*, n° 10.

EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database: <http://www.emdat.net>
Université catholique de Louvain, 2010.

Environment Agency [2008], « Water Resources in England and Wales – Current State and Future Pressure », *Rapport*, Décembre.

- Evrard Y. [2003], *Market, études et recherches en marketing*, Dunod, Paris.
- Ewing R. [1997], « Is Los Angeles-Style Sprawl Desirable ? », *Journal of the American Planning Association*, vol 63, p. 107-126.
- Ewing R. *et al.* [2002], « Measuring Sprawl and its Impacts », *Smart Growth America*, n° 42, p. 1-42.
- Folke C. *et al.* [1997], « Ecosystem Appropriation by Cities », *Ambio*, vol 26, n° 3, p. 167-172.
- Fussler H.M. [2007], « Vulnerability: A Generally Applicable Conceptual Framework for Climate Change Research », *Global Environmental Change*, vol. 17, p. 155-167.
- Galster G. *et al.* [2001], « Wrestling Sprawl to the Ground : Defining and Measuring an Elusive Concept », *Housing Policy Debate*, vol 12, n°4, p. 681-717.
- Gibrat R. [1931], *Les Inégalités économiques. Applications : aux inégalités des richesses, à la concentration des entreprises, aux populations des villes, aux statistiques des familles, etc., d'une loi nouvelle: la loi de l'effet proportionnel*, Sirey, Paris.
- Glaeser E. et Kahn M. [2003], « Sprawl and Urban Growth », *NBER Working Paper*, n° 9733.
- Gleyze J.F. et Reghezza M. [2007], « La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement », *Géocarrefour*, vol 82, n° 1-2, p. 17-26.
- Government of Victoria [2011], « Desalination Project », *Government Programs*, <http://www.water.vic.gov.au/programs/desalination>, consulté le 09-02-2012.
- Hair J. [2006], *Multivariate Data Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Hallegatte S. [2008], « An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina », *Risk Analysis*, vol 28, n° 3, p. 779-799.
- Huriot J.M. [2009], « Villes et économie : les infortunes du savoir », *Géographie, économie et société*, vol 11, n° 1, p. 23-38.
- Jenerette D. et Larsen L. [2006], « A Global Perspective on Changing Sustainable Urban Water Supplies », *Global and Planetary Change*, vol 50, p. 202-211.
- Jenerette, D. *et al.* [2006], « Contrasting Water Footprints of Cities in China and the United States », *Ecological Economics*, vol 57, p.346-358.
- Johnson M.P. [2001], « Environmental Impacts of Urban Sprawl : a Survey of the Literature and Proposed Research Agenda », *Environment and Planning*, vol 33, n° 4, p. 717-735.
- Kermisch C. [2012], « Vers une définition multidimensionnelle du risque », *VertigO* [en ligne], vol 12, n° 2, consulté le 22 novembre 2012.

- Leave No Trace, <http://www.lnt.org/>, consulté le 05-05-2011.
- Le Gallès P. [2011], *Le retour des villes européennes*, Sciences Po. Les Presses, Paris.
- Levin S.A. *et al.* [1998], « Resilience in Natural and Socioeconomic Systems », *Environment and Development Economics*, vol 3, n° 2, p. 221-262.
- Mathevet R. [2011], « Resilience of Wetlands with Multiple Uses- Example in Petite Camargue », *Workshop Resilience, Water and Foresight*, 18-19 janvier, Montpellier.
- Nechyba T.J. et Walsh R.P. [2004], « Urban Sprawl », *The Journal of Economic Perspectives*, vol 18, n°4, p. 177-200.
- November V. [1994], « Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur la nature et le rôle du risque dans l'espace urbain », *Revue de géographie alpine*, vol 82, n° 4, p. 113-123.
- Nunnally J. et Bernstein I. [1994], *Psychometric Theory*, New York, McGraw Hill.
- Otto-Zimmermann N. [2011], « Discours d'ouverture », *Conférence Resilient Cities 2011*, Bonn.
- Patacchini E. *et al.* [2009], « Urban Sprawl in Europe », *Brooking-Wharton Papers on Urban Affairs*, p. 125-149.
- Peel, M. C. *et al.* [2007], « Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification », *Hydrological Earth Systems Science*, vol 11, n° 5, p. 1633-1644.
- Pelling M. [2003], *The Vulnerability of Cities. Natural Disasters and Social Resilience*, Earthscan, Londres.
- PNUE [2007], *Global Environment Outlook*, Nations-unies, Genève.
- Praskievicz S. et Chang H. [2009], « A Review of Hydrological Modelling of Bassin-Scale Climate Change and Urban Development Impacts », *Progress in Physical Geography*, vol 33, n° 5, p. 650-671.
- Pumain D. [1992], « Les systèmes de villes » *in* Bailly A. *et al.*, *Encyclopédie de Géographie*, Economica, Paris.
- Pumain D. [2006], « Villes et systèmes de villes dans l'économie », *Revue d'économie financière*, vol 86, p. 29-46.
- Renard F. et Chapon P.M. [2010], « Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise », *L'espace géographique*, vol 1, p. 35-50.
- Sapir *et al.* [2006], « Data on Disasters: Easier Said Than Done », *Disaster and Development*, vol 1, n° 1.
- Sassen S. [1991], *The Global City*, Princeton University Press, Princeton.

Scheuren J.M. *et al.* [2008], « The Numbers and Trends 2007 », *Annual Disaster Statistical Review*, CRED: Brussels.

UN-habitat [2010], *World Urban Prospect* : <http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm>, consulté le 09-02-2012.

Varis O. *et al.* [2006a], « Megacities and Water Management », *International Journal of Water Resources Development*, vol 22, n° 2, p. 377-394.

Varis O. *et al.* [2006b], « Editorial », *International Journal of Water Resources Development*, vol 22, n° 3, p. 395-398.

Wackerman G. [2000], *Les très grandes villes du monde*, Ellipses, Paris.

Wackernagel M. et Rees W.E. [1996], *Our Ecological Footprint : Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Publishers, Philadelphie.

Wackernagel M. *et al.* [2002], « Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy », *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, vol 99, p. 9266-9271.

Watersheds of the World: <http://www.wri.org/publication/watersheds-of-the-world>

Wassmer R.W. [2000], *Urban Sprawl in a U.S. Metropolitan Area: Ways to Measure and a Comparison of the Sacramento Area to Similar Metropolitan Areas in California and the U.S.*, CSUS Public Policy and Administration Working Paper No. 2000-03.

York R. *et al.* [2003], « Footprints on the Earth : the Environmental Consequences of Modernity », *American Sociological Review*, vol 68, p. 279-300.

Zwiers F.W. *et al.* [2011], « Human Contribution to More-Intense Precipitation Extremes », *Nature*, vol 470, p. 378-381.