



HAL
open science

Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité

Damienne Provitolo

► **To cite this version:**

Damienne Provitolo. Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité. Prévention des risques naturels, Jan 2003, Orléans, France. pp.232-268. halshs-00261165

HAL Id: halshs-00261165

<https://shs.hal.science/halshs-00261165>

Submitted on 6 Mar 2008

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.

Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité

Damienne Provitolo

Université de Nice-Sophia Antipolis

U.M.R. E.S.P.A.C.E. 6012. Équipe Dynamiques Territoriales

98 Bd E. Herriot. B.P. 3209 - 06204 Nice Cedex 3

provitol@unice.fr Tél/Fax : 04 93 37 54 64

Résumé

Notre article porte sur la complexité des risques et des catastrophes urbains. Cette complexité est notamment générée par la conjonction de deux composantes de nature différente, l'aléa et la vulnérabilité. Si l'aléa a fait l'objet de nombreuses analyses, plus rares sont les études portant sur la vulnérabilité. Or, dans une ville, comme la vulnérabilité est essentielle, c'est bien sûr l'aspect socio-économique qui compte plus que l'aléa physique.

Face à ce constat, nous proposons un modèle complexe de catastrophe urbaine, celui d'une inondation. Il est l'un des rares modèles mathématiques associant aléa et vulnérabilité synthétique. Une méthode de modélisation et de simulation, la dynamique de système, a été retenue. Elle donne la possibilité de dépasser la vision statique des phénomènes pour préférer les étudier en tant que systèmes dynamiques et de réaliser différents scénarios de simulation. Ce type d'approche permet de déboucher sur une compréhension approfondie et qualitative d'une catastrophe.

Mots clés

risque, catastrophe, vulnérabilité, modélisation, dynamique de système, simulation, inondation.

Introduction

Les risques potentiels et les catastrophes bien réelles sont des phénomènes complexes pour deux raisons essentielles. D'abord, ils couplent l'aléa et la vulnérabilité, souvent assimilés à la composante physique et à la dimension sociale des catastrophes. Ensuite, certaines lois du système sont non linéaires : de petites causes produisent de grands effets. Dans cet article, nous abordons l'un de ces deux types de complexité en réalisant un modèle mathématique de catastrophe combinant l'aléa et la vulnérabilité.

Si l'aléa fait l'objet de nombreuses analyses, plus rares sont les études portant sur la vulnérabilité. Or, comme cette vulnérabilité est surtout révélée lorsqu'une catastrophe éclate,

il convient de s'interroger également sur la dimension humaine de cet événement. Face à ces nouvelles préoccupations, la vulnérabilité a donné lieu à un débat scientifique. Considérée comme un ensemble désagrégé de variables, elle est définie comme une vulnérabilité analytique. Ainsi, pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, « la vulnérabilité au sens le plus large exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux ». Mais cette définition est désormais considérée comme restrictive. La vulnérabilité n'est pas une somme de variables désagrégées mais un état sans cesse modifié par l'action humaine. Elle dépend de la capacité de réponse des sociétés (R. d'Ercole, 1994). Il est alors possible de parler de vulnérabilité synthétique.

Quelques analyses de la vulnérabilité analytique ont été réalisées. Si ces recherches sont opératoires, elles ont l'inconvénient d'être empirique et valable pour une seule situation locale. A.-C. Chardon (1994) a calculé la vulnérabilité de Manizales face aux risques naturels.

Délaissant les formes désagrégées et analytiques de la vulnérabilité, pertinentes pour une seule situation locale, nous proposons un modèle mathématique de vulnérabilité synthétique. Ce besoin est ressenti par de nombreux spécialistes des risques, mais nous n'en connaissons pas d'exemple à ce jour.

Une méthode de modélisation et de simulation, la dynamique de système, est retenue. Elle permet d'élaborer un modèle de stocks et de flux associant l'aléa et la vulnérabilité synthétique (1^{ère} partie) pour simuler la dynamique d'une catastrophe d'origine naturelle, une inondation (2^{ème} partie).

I. Un modèle urbain d'inondation qui intègre l'aléa et la vulnérabilité synthétique

Nous présentons un modèle général d'inondation par crue débordante.

1.1. Le sous-système de l'aléa crue

Nous avons construit un modèle très général d'aléa (fig. 1). Il comprend un flux, intitulé débit et mesuré en m^3/s , et une fonction tabulée relative aux km^2 inondés selon les débits.

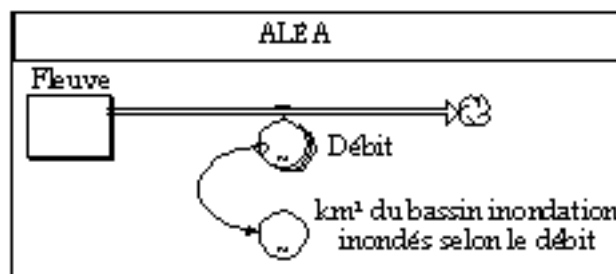


Figure 1. Formalisation d'un modèle général de crue débordante

Nous avons opté pour une solution simplificatrice afin de mieux cerner la réalité d'une inondation urbaine, celle de prendre en compte des phénomènes liés par des relations de nature différente. Nous avons donc enrichi le modèle relativement classique du cycle de l'eau de la deuxième composante du risque, la vulnérabilité synthétique. Nous lui accordons une place essentielle car le caractère meurtrier des inondations est plus le résultat d'une forte vulnérabilité que d'une méconnaissance de l'aléa.

1.2. Un premier modèle de vulnérabilité synthétique

Le système de vulnérabilité synthétique se compose d'éléments vulnérables et de facteurs de vulnérabilité (fig. 2). Cette vulnérabilité synthétique, contrairement à l'aléa qui a toujours une origine « disciplinaire », est sans doute commune à plusieurs risques. Le modèle présenté prend en compte cette dimension transdisciplinaire. Il est donc opérationnel pour étudier d'autres types de catastrophes.

La population est retenue comme l'élément vulnérable. Ce choix est à mettre en relation avec la nature de l'aléa étudié, l'inondation, et le constat fait par d'autres spécialistes du risque et de la catastrophe. À l'échelle du globe, au cours du XX^{ème} siècle, les inondations furent à l'origine de 20 000 pertes humaines et affectèrent 75 millions de personnes.

Le module vulnérabilité désagrège la population en cinq catégories et il simule donc bien la dynamique de la vulnérabilité dans le temps. Ces cinq stocks représentent en effet les différents états par lesquels transite la population exposée à une catastrophe. La liaison entre les sous-systèmes aléa et vulnérabilité s'établit par le biais d'un canal d'information qui relie la population exposée aux km² de la zone inondée.

La seule représentation visuelle de ce modèle montre qu'il existe deux façons essentielles de lutter contre un événement catastrophique. La première vise à freiner l'accroissement de population vulnérable en amont de la catastrophe, à faire porter les actions sur les entrées. La seconde consiste à intervenir sur la population affectée par l'inondation. Pour ces deux stratégies, différentes solutions sont envisageables. Ainsi, avant la catastrophe, les mesures de prévention et de réduction des risques telles la prévision et l'annonce de la crue, la perception du danger permettent de limiter le stock de population vulnérable. Au contraire, pendant la catastrophe, les facteurs fonctionnels concernant la gestion de la crise ou ceux liés aux réactions individuelles et à la capacité physique de résistance ont pour effet de modifier les masses de la population inondée, sinistrée ou décédée.

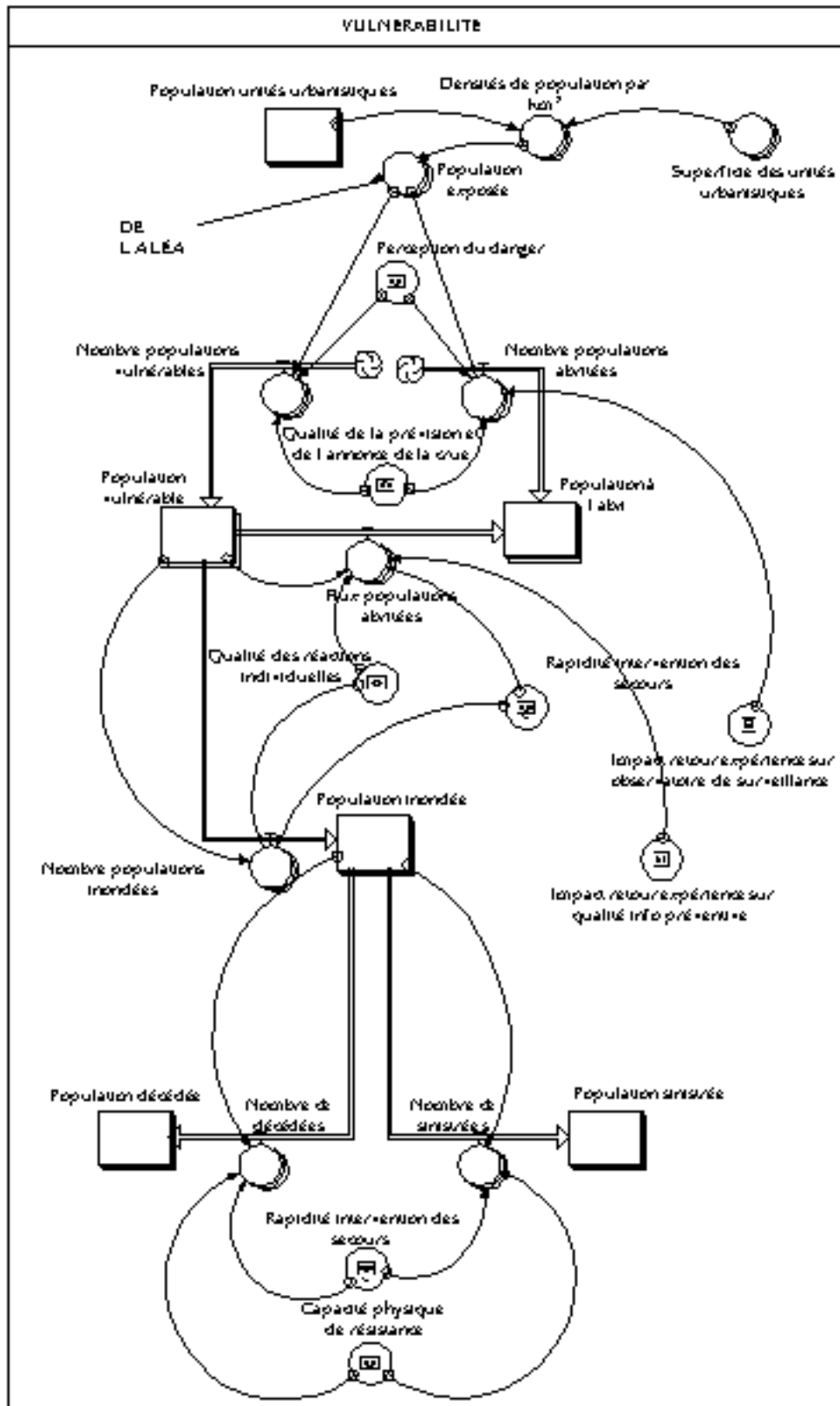


Figure 2. Le sous-système de la vulnérabilité dans sa liaison avec l'aléa

Les modules graphiques des figures 1 et 2 sont traduits en un ensemble d'équations différentielles écrites en langage Dynamo (D. Provitolo, 2002). Ce langage mathématique permet de réaliser des scénarios de simulations.

II. Implémentation du modèle de catastrophe urbaine et résultats de simulations

Les scénarios présentés ci-après illustrent les différentes dynamiques des éléments du système modélisé. L'objectif de cette modélisation n'est pas de donner une estimation quantitative de la catastrophe dans le but de prévisions déterministes. Cela nécessiterait de disposer de données fiables relatives à la vulnérabilité. Or, ces dernières sont rares ou inexistantes.

Si on ne dispose pas de ces données, les sorties graphiques obtenues sont tout aussi exactes, mais dans un autre sens. Certes, elles n'autorisent pas de prévision. Mais, appréciées de façon qualitative, les courbes illustrent très bien le comportement du système. Nous comprenons parfaitement la dynamique du système étudié sans disposer de conditions initiales connues avec précision.

Cependant, nous empruntons aux services météorologiques des données fiables pour caler le module aléa. Nous présentons quelques résultats de simulation pour la zone urbaine de Gênes affectée par la crue du Bisagno le 8 octobre 1970. Le fleuve déborde à partir de 120 m³/s à la station La Presa. Ce débit est à l'origine des 1,35 km² de superficie urbaine inondée. Pour cette zone, la densité de population atteint près de 22 000 hab/km² en 1971.

Le modèle fait l'objet de simulations en prenant comme jeu de conditions initiales des situations moyennes et des situations extrêmes. Trois scénarios de simulation sont réalisés :

- scénario 1 : l'ensemble des coefficients du sous-système de la vulnérabilité sont implémentés aux extrêmes supérieurs, soit à 0.5 (qualité maximale),
- scénario 2 : l'ensemble des coefficients du sous-système de la vulnérabilité sont implémentés aux extrêmes inférieurs, soit à 0 (qualité minimale),
- scénario 3 : l'ensemble des coefficients du sous-système de la vulnérabilité sont implémentés pour des valeurs moyennes égales à 0.25 (qualité moyenne).

2.1. Lors d'une catastrophe, l'aléa a un effet direct et très rapide sur la vulnérabilité

Le scénario retenu correspond à une situation extrême. Tous les coefficients sont égaux à 0.5. D'abord, les simulations sont réalisées uniquement sur le modèle de la vulnérabilité, c'est-à-dire sans lien direct avec l'aléa (fig. 3). Puis, ce même scénario est réalisé en liant les deux sous-systèmes du modèle de l'inondation : aléa et vulnérabilité (fig. 4).

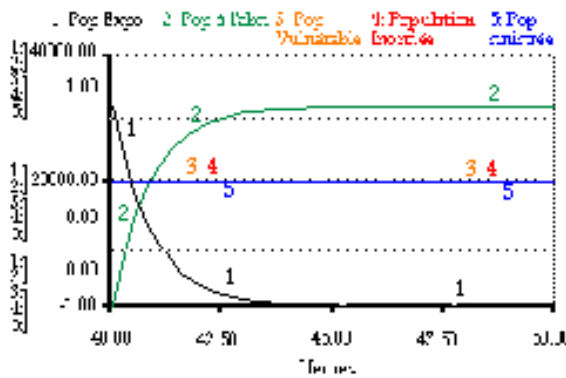


Figure 3. Scénario 1. La vulnérabilité n'est pas reliée à l'aléa

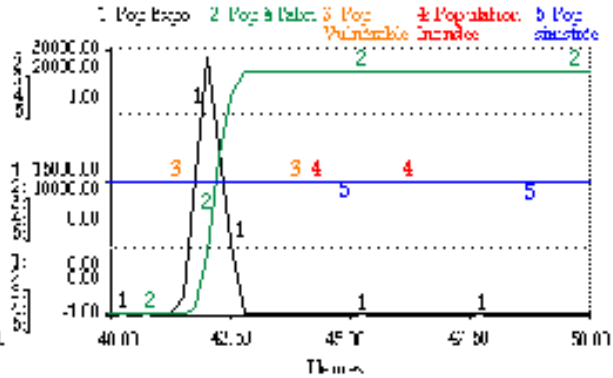


Figure 4. Scénario 1. La vulnérabilité est reliée à l'aléa

Quand nous introduisons l'aléa, il y a toujours des courbes de croissance –ou de décroissance- mais leur type est différent. En effet, à la figure 3, la population exposée suit une décroissance d'abord très rapide puis plus lente, tandis qu'à la figure 4, elle connaît une décroissance forte et linéaire. À la rapidité de la montée des eaux du fleuve et de son débordement, mais aussi de sa décrue, correspondent une croissance et une décroissance rapide de la population exposée. De même, lorsque l'aléa est connecté à la vulnérabilité, la population à l'abri ne suit plus une croissance de type Monod mais une croissance logistique. Ce constat n'est pas sans intérêt. Il tend à révéler qu'effectivement l'aléa modifie la vulnérabilité. Cette dernière n'est donc pas absolue mais relative.

De plus, l'aléa introduit un déphasage dans l'évolution des courbes : le stock « population à l'abri » se remplit avec un temps de retard par rapport au stock « population exposée ». Ce n'est pas surprenant. Cependant, et c'est plus original, ce déphasage tend à croître lentement au cours de l'évolution. L'aléa intervient donc sur la forme du comportement de la vulnérabilité et indirectement sur chacun des stocks de ce sous-modèle.

2.2. La prévention des risques et la gestion des catastrophes modifient la dynamique de la vulnérabilité

Nous réalisons deux nouvelles simulations sur le modèle global de l'inondation. L'une retranscrit le scénario 2 (fig. 5). L'autre correspond au scénario 3 (fig. 6). Les résultats obtenus sont riches d'informations. En effet, la variation de la valeur des paramètres entraîne des changements qualitatifs et/ou quantitatifs dans la dynamique du système.

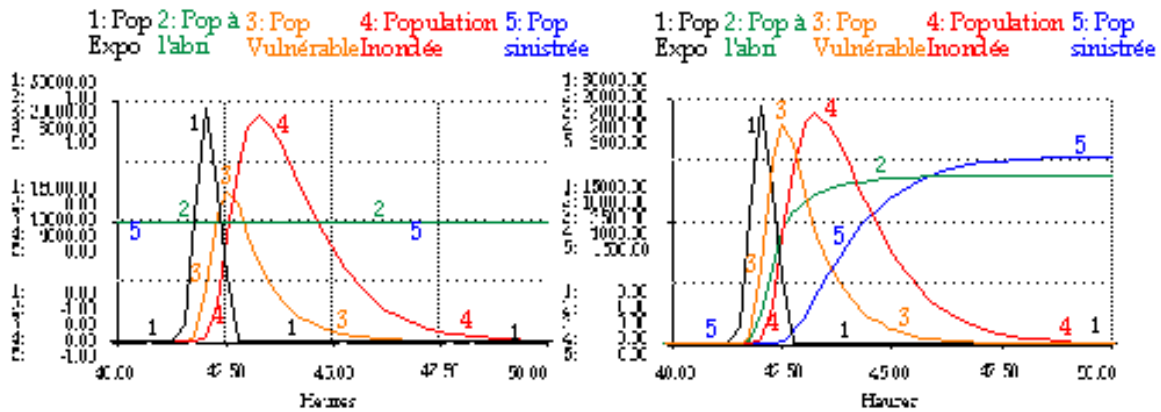


Figure 5. Scénario 2. La vulnérabilité est reliée à l'aléa Figure 6. Scénario 3. La vulnérabilité est reliée à l'aléa

Au scénario 1, les courbes relatives à la population vulnérable, inondée ou sinistrée, sont constantes et égales à zéro (fig. 4). En effet, elles sont régularisées par des paramètres affectés de valeurs maximales. Le modèle donne donc des résultats satisfaisants. En revanche, les courbes population vulnérable et population inondée, prennent une nouvelle allure pour les scénarios 2 et 3 (fig. 5 et 6). Elles croissent à partir de leur origine, atteignent un maximum puis décroissent lentement pour tendre vers une valeur nulle. Ces résultats démontrent le rôle essentiel de la prévention et de la gestion sur le déroulement de la catastrophe en général, et plus spécialement sur la dynamique de la vulnérabilité.

Si l'on compare les résultats obtenus aux scénarios 2 et 3, on constate que l'introduction de nouvelles valeurs de coefficients ne modifie pas la forme des courbes de la population inondée et la population vulnérable. En revanche, les seuils à partir desquels les courbes passent d'un phénomène de croissance à un phénomène de décroissance se modifient. Ces résultats tendent à signifier que le modèle est robuste et qu'il présente un comportement où les mécanismes de convergence sont dominants.

Enfin, pour les scénarios 1, 2 et 3, la population à l'abri (courbe 2) modifie son profil. Elle est constante et égale à zéro lorsque le scénario porte sur des simulations aux valeurs extrêmes minimales. Mais elle suit une croissance logistique pour les scénarios 1 et 3. Ce type de croissance est obtenu quand une boucle d'autorégulation négative parvient à freiner la croissance induite par une boucle d'autorégulation positive.

Ces résultats de simulation mettent en évidence le rôle déterminant de certaines variables qualitatives dans le système catastrophe urbaine. Ces variables, telles que l'alerte, l'intervention des secours, la perception du danger, la nature des réactions individuelles, dépendent des expériences passées mais également de la politique de prévention menée en période de risque mais dont les effets ne se mesurent qu'en temps de crise.

Conclusion

Ce modèle constitue une innovation dans le domaine des risques et des catastrophes. D'abord, cet article présente le 1^{er} modèle de vulnérabilité synthétique. Il est directement transposable pour simuler plusieurs catastrophes en changeant à peine certains flux ou paramètres. Ensuite, nous avons construit un modèle qui intègre conjointement les deux volets du risque, l'aléa et la vulnérabilité. Il a donc l'avantage d'être plus réaliste que des modèles disciplinaires simples. Enfin, si le modèle réalisé est avant tout explicatif, les enseignements tirés du modèle de vulnérabilité devraient permettre ultérieurement de proposer des outils de prévention des risques et de gestion des catastrophes intégrant notamment les contraintes de la maîtrise du temps lors d'un événement potentiellement catastrophique.

Cependant, comme le modèle de la vulnérabilité synthétique est totalement neuf, il présente les limites de tout modèle initial et nouveau. La première limite concerne le degré d'agrégation retenu. Le modèle « catastrophe » réalisé est nécessairement un modèle complexe car il intègre les composantes physiques et les dimensions sociales des phénomènes. En cela, il est parfaitement géographique. Mais il est évidemment moins désagrégé que les modèles hydrologiques classiques, élaborés sur les seuls aléas, ou que des modèles sociaux visant à rendre compte de la seule vulnérabilité. Ceci ne signifie pas que des modèles complexes plus fins ne soient pas concevables. Mais cela reviendrait à changer d'échelle et à délaissier l'objectif essentiel de cet article, étudier la vulnérabilité synthétique, sa dynamique.

La deuxième limite concerne la prise en compte de l'espace. Si la dynamique de système est un outil très efficace pour intégrer le temps et ses ruptures, elle ignore en partie l'espace. Si cette dimension n'est pas explicitement prise en compte, des recherches sont en cours pour y remédier.

Bibliographie

- P. Blaikie, T. Cannon, I. Davis, B. Wisner. 1994. *At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. London : Routledge. 284 p.
- A.-C. Chardon. 1994. « Étude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels ». *Revue de géographie alpine*, tome LXXXII, 4, p.97-111.
- A. Dauphiné. 2001. *Risques et catastrophes*. Paris, Armand Colin.288 p.
- R. D'Ercole. 1994. « Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse ». *Revue de géographie alpine*, tome LXXXII, 4, p.87-96.

- J.-W. Forrester.1984. Principes des Systèmes ; traduit de l'anglais par P. Sylvestre-Baron, Lyon, Presses Universitaires de Lyon. 404 p.
- M. Guigo. 1973. « Pluie et crue des 7 et 8 octobre 1970 dans la région gênoise ». Méditerranée, 1, p. 55-80.
- B. Hannon, M. Ruth. 1997. Modeling dynamic biological systems. New York : Springer-Verlag. 399 p.
- D. Provitolo. 2002. Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes.Thèse de doctorat. Université Nice-Sophia Antipolis. 365 p.