

MODÉLISATION ET SIMULATION DU RISQUE D'INONDATION EN MILIEU URBAIN MÉDITERRANÉEN

Damienne PROVITOL (Doctorante, A.T.E.R. à l'U.N.S.A.) : U.M.R. E.S.P.A.C.E., Université de Nice Sophia-Antipolis.

E-mail : provitol@unice.fr

RESUME. *Nouvel objet de recherche dans le monde des scientifiques, le risque, qu'il soit d'origine naturelle, technologique, économique ou sanitaire ne cesse d'inquiéter la société. Dans le cadre de cette communication, nous portons notre attention sur un aspect essentiel du risque, à savoir sa complexité, car il associe l'aléa et la vulnérabilité. La modélisation en dynamique de système permet d'appréhender cette complexité. Elle est donc retenue pour construire des modèles de risque. Cette méthodologie permet non seulement d'intégrer la composante vulnérabilité dans le système risque mais aussi de dépasser la césure entre nature et société. Elle offre surtout la possibilité de dépasser la vision statique des phénomènes pour préférer les étudier en tant que systèmes dynamiques. Dans ce cadre, le logiciel STELLA 5.1 Research est utilisé afin de modéliser et simuler l'ensemble des équations de stocks et de flux relatives au système risque.*

ABSTRACT. *Natural, technological, economical, or sanitary risk, whatever origin it has, is a constant concern to our society. In this communication, we shall focus our attention on a key aspect of risk, that is its complexity in associating random and vulnerability. Modelisation in a dynamic system allows to apprehend such complexity: thus, it has been chosen to build up risk models. This methodology not only permits to integrate the vulnerability factor in the risk system but also to obliterate the break between nature and society. Above all, it offers the opportunity to go beyond the static vision of phenomena and study them as dynamic systems. In this context, software STELLA 5.1 Research is used for modelising and simulate the general unity of stock and flows equations concerning risk system.*

MOTS CLEFS : *modélisation, simulation, dynamique de système, risque inondation, milieu urbain méditerranéen.*

KEYS WORDS: *modelisation, simulation, dynamic system, flood risk, mediterranean urban area.*

Les risques potentiels ou les catastrophes bien réelles sont des phénomènes complexes. Cette complexité remarquable a plusieurs origines. Elle découle de la multitude de composantes, d'origine physique et humaine, et de l'emboîtement de niveaux d'organisation ou de niveaux d'échelles. Elle est parfois due au comportement complexe d'un système simple, comportement bien expliqué par l'effet amplificateur de lois non linéaires.

Cette complexité n'est pas toujours bien rendue dans les modèles de risque du fait de la prégnance des théories sectorielles. En effet, " ces études disciplinaires ne permettent ni d'établir des comparaisons entre les différentes catégories de risque, ni de considérer leur relation d'interdépendance " (A Dauphiné, D. Provitolo, 2001), ni d'étudier le risque dans toute son exhaustivité. Or, le risque potentiel ne dépend pas uniquement de l'aléa. La vulnérabilité, seconde composante du risque, ne peut être délaissée. Si tel était le cas, et trop souvent ce le fut, les modèles seraient relatifs à l'aléa et non au risque. De plus, au sein des villes méditerranéennes, notre espace d'étude, le risque prend un aspect particulier du fait de la topographie, de la morphologie urbaine... De ce fait, le système exposé, outre les relations de causalité liant l'aléa et la vulnérabilité au risque, intègre les spécificités des villes méditerranéennes. En effet, celles-ci contribuent à renforcer ou, plus rarement, à atténuer le risque en agissant directement soit sur l'aléa, soit sur la vulnérabilité, soit sur l'une et l'autre de ces composantes.

Cet article s'articule autour de trois parties. La première présente un modèle sectoriel complexifié, car fondé sur l'aléa et la vulnérabilité, celui du risque d'inondation en milieu urbain méditerranéen. En France, en Espagne et en Italie, les inondations représentent en effet le risque naturel le plus courant. La deuxième expose un métamodèle à vocation cognitive : la simulation d'un effet domino, l'inondation à l'origine d'un comportement de panique et de troubles, permet de l'illustrer. La troisième enfin souligne le détail des simulations les plus représentatives de ces modèles.

1. Un modèle disciplinaire complexe : le risque d'inondation en milieu urbain méditerranéen, le cas de la ville de Nice

Jacques de Saint Seine (1995) met l'accent sur le " régime hydrologique très contrasté " des rivières du pourtour méditerranéen, régime " qui leur confère naturellement un lit large dans lequel, le plus souvent, coule un maigre filet d'eau qui n'est pas suffisant pour combattre l'envahissement de leur lit par les mauvaises herbes ou pour diluer les différents rejets plus ou moins sauvages d'eaux industrielles ou domestiques ". De même ces cours d'eau modestes ont été couverts et sont le jeu d'une forte anthropisation. La spécificité du risque d'inondation en milieu urbain méditerranéen ne réside donc pas dans la nature de l'aléa mais davantage dans le régime contrasté des pluies, leur impact et le sentiment d'oubli de la population à l'égard des crues. Ces spécificités se doublent du particularisme du relief méditerranéen qui favorise le ruissellement et la concentration rapide des eaux aux points bas des vallées, de la morphologie des voies de communication « en rateau » qui restreint les échappatoires.

Dans ce contexte, le modèle présenté, qui retranscrit les conséquences d'une crue du Paillon sur l'agglomération niçoise, pourrait être appliqué à d'autres villes du pourtour méditerranéen, notamment celles de Barcelone et de Gênes.

1.1. Le module aléa crue et inondation

La première figure est une représentation graphique du module aléa. Cette composante du système risque est un ensemble de stocks et de flux inspiré des modèles hydrologiques. Dès 1974, P. Dubreuil insistait sur les innombrables facettes de la modélisation des crues, de ce que nous qualifions d'aléa. Dans un chapitre de synthèse, il décrivait brièvement pas moins de dix étapes successives pour prendre en compte les paramètres essentiels permettant de prédéterminer les crues exceptionnelles.

Les hypothèses de départ sont les suivantes :

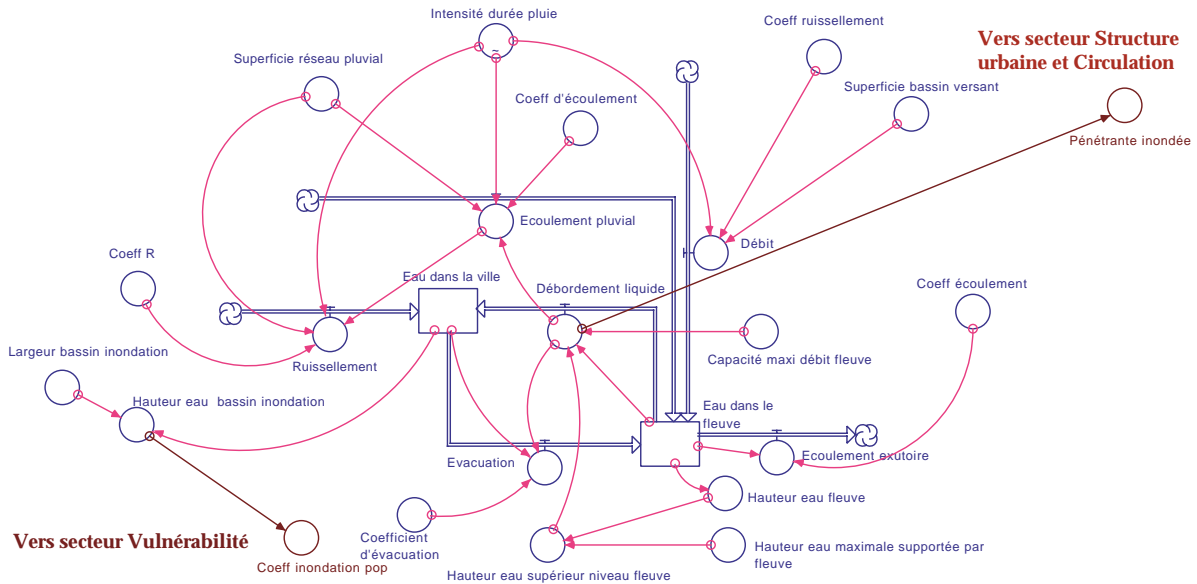
- au sein des zones urbaines méditerranéennes étudiées, l'inondation résulte du débordement du fleuve et du processus de ruissellement urbain,
- " l'intensité-durée " des précipitations correspond à des épisodes pluvieux de quelques heures,

- les pluies tombent de manière homogène sur l'ensemble du bassin versant,
- l'inondation est étudiée non pas sur l'ensemble du bassin versant mais sur la zone urbaine traversée par le fleuve. Toutefois, la crue débordante est le résultat du débit issu du bassin versant à l'amont de la confluence,
- un délai de deux heures est établi entre le début des précipitations et la crue du cours d'eau principal. Ce délai correspond au temps moyen de propagation des débits de l'amont à l'aval du cours d'eau,
- l'inondation se régle en fonction de la décrue du fleuve.

Le diagramme stock-flux du secteur aléa (figure 1) comprend deux variables d'état (l'eau dans le fleuve et l'eau dans la ville) et six variables de flux (respectivement le débit, l'écoulement pluvial, le débordement liquide, le ruissellement, l'évacuation et l'écoulement à l'exutoire).

Sans entrer dans le formalisme des équations différentielles sous-jacentes aux variables, nous explicitons le cycle hydrologique sous l'angle de la modélisation en Dynamique de Systèmes. Ce diagramme stock-flux formalise un modèle physique d'inondation qui relie "l'intensité-durée" des précipitations au débit, à l'écoulement pluvial et au ruissellement de l'eau sur la zone urbaine.

Figure 1 : Le diagramme stock-flux de l'aléa crue et inondation



La variation du volume d'eau dans le fleuve est fonction de deux flux d'entrée (le débit et soit l'écoulement pluvial soit l'évacuation) et de deux flux de sortie (le volume écoulé à l'exutoire et le débordement liquide). Ainsi, si le stock diminue, le volume des sorties sera supérieur au volume des entrées ; si le stock augmente, le volume de sortie sera inférieur au volume des entrées. Selon le principe de l'équation différentielle, les valeurs de cette variable d'état au temps t dépendent :

- du niveau de la variable d'état au temps t-1,
- des flux d'eau qui alimentent la variable d'état,
- des flux d'eau qui "vident" le fleuve.

D'où :

$$\text{Eau dans le fleuve (t)} = \text{Eau dans le fleuve (t-dt)} + (\text{Débit} + \text{Ecoulement pluvial} + \text{Evacuation} - \text{Débordement liquide} - \text{Ecoulement exutoire}) * dt$$

Toutefois, l'ensemble de ces flux ne jouent pas en même temps à l'exception du débit qui ne peut être contraint par le processus d'inondation. Le débit est un flux qui représente l'ouverture du système dans sa composante hydrologique. En effet, cette variable de flux dépend du produit de trois variables auxiliaires que sont "l'intensité-durée" de la pluie (une variable sous la forme d'une fonction tabulée selon le temps), le coefficient de ruissellement et la superficie du bassin versant. L'écoulement pluvial quant à lui est une entrée tant que le fleuve ne déborde pas. Ce flux correspond au cheminement de l'eau qui tombe sur la zone urbaine et qui aboutit comme le débit, mais par la voie urbaine souterraine, dans le réseau hydrographique. Le début de l'averse correspond au départ de l'écoulement. Ce dernier est piloté par une règle logique conditionnelle de type IF THEN ELSE. Cette règle stipule que l'écoulement pluvial est activé si, et seulement si, le fleuve ne déborde pas. Dans le cas contraire, l'écoulement est "neutralisé" et alimente l'inondation par la voie du ruissellement. De même, l'évacuation de l'eau présente sur la zone urbaine est un flux qui alimente ce réservoir si deux conditions sont réunies : le bassin d'inondation potentiel est effectivement inondé et le fleuve amorce sa décrue.

La deuxième variable d'état, l'eau dans la ville, est un réservoir d'eau qui varie en fonction de deux flux d'entrées, respectivement le débordement liquide du fleuve et le ruissellement sur la zone urbaine, et qui se vide par un flux d'évacuation. Ce dernier fonctionne à partir du moment où le réseau pluvial n'est pas saturé. Dans ce cas, il quitte le stock auquel il est attaché pour entrer dans le stock Eau dans le fleuve. Ainsi, à chaque intervalle de temps, le niveau d'eau dans la ville détermine le flux "évacuation" qui à son tour affecte le volume d'eau du fleuve, volume qui, par le biais du débordement du fleuve alimente le réservoir d'eau dans la ville. Une boucle de rétroaction est ainsi établie entre les deux variables d'état de la composante "aléa".

De même que l'écoulement pluvial, le flux de "débordement liquide" est régi par une règle logique conditionnelle (IF THEN ELSE). Ce flux correspond à la différence entre le débit maximum supporté par le fleuve et le volume d'eau dans le fleuve. Ainsi, le débordement du fleuve sera effectif, si et seulement si, la "capacité maximale de débit supporté par le fleuve" est atteinte. Le flux de débordement à l'instant t dépend donc de l'état du stock "Eau dans le fleuve" à l'instant précédent. Il y a l'action en retour de la variable d'état sur la variable de flux puisque le flux modifie la valeur du niveau qui modifiera la valeur de flux. Une boucle de rétroaction régit donc les relations entre le réservoir et le flux.

Ces modèles en Dynamique de Systèmes intègrent un des principes fondamentaux de la thermodynamique, celui de la conservation de la masse. En effet, les volumes d'eau apportée par les pluies se déplacent dans le temps et dans l'espace, mais ne disparaissent pas. Cette notion de conservation de la masse implique des interactions entre les volumes d'eau qui ruissellent dans le fleuve, sur le sol urbain et la zone urbaine affectée par ces masses d'eau.

Afin de mieux cerner la réalité d'une inondation en milieu urbain méditerranéen, le modèle relativement classique du cycle de l'eau est enrichi non seulement de la deuxième composante du risque, la vulnérabilité (section 1.2) mais aussi des difficultés de circulation dans les quartiers de Nice menacés par le fleuve et des problèmes d'évacuation qui en résultent (section 1.3).

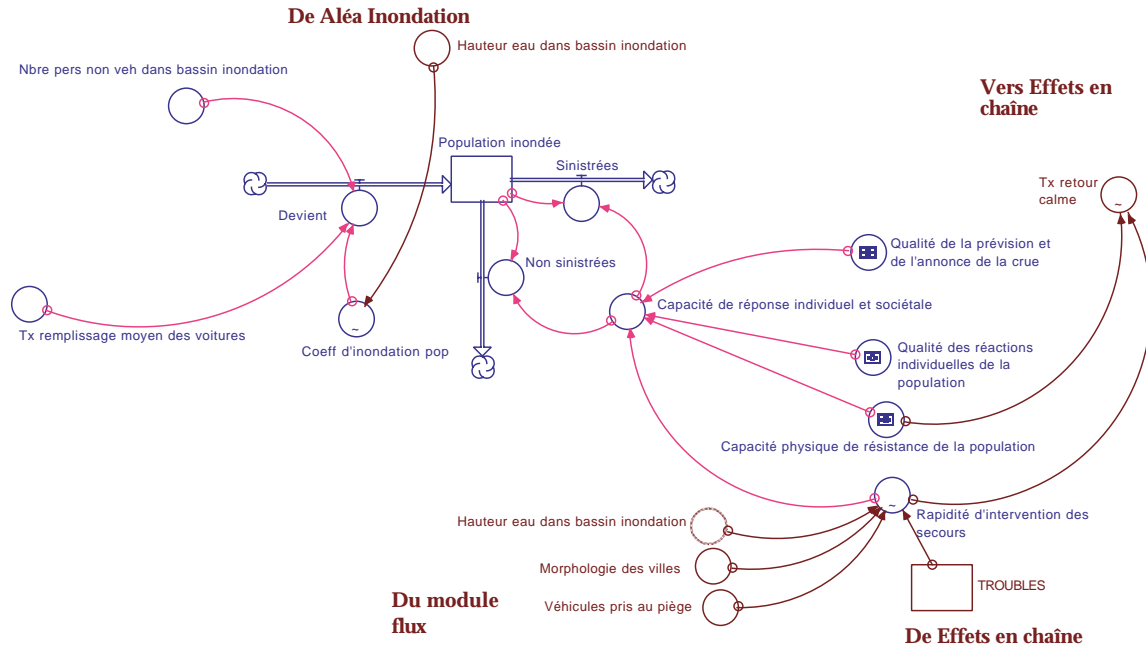
1.2. La vulnérabilité, le deuxième volet du risque

Le module vulnérabilité s'établit dans une relation avec l'aléa et les flux de circulation. Ce diagramme stock-flux (figure 2) reproduit une approche quantitative (endommagement potentiel des personnes) et qualitative (capacité de réponse à des crises) de la vulnérabilité humaine.

Nous faisons 4 hypothèses de départ sur le fonctionnement de cette composante :

- la population n'est pas constante durant la période considérée,
- le passage d'une population non inondée à une population inondée dépend des effectifs de piétons et d'automobilistes présents sur le bassin d'inondation,
- une partie de la population inondée est sinistrée tandis que l'autre partie ne subit aucun des dommages liés à la crue débordante. Cette distinction s'effectue par l'introduction des facteurs de vulnérabilité. L'approche systémique permet donc de relier les éléments vulnérables et les facteurs de vulnérabilité,
- les populations non inondées, inondées et sinistrées sont uniformément réparties sur l'espace d'étude. C'est une des grandes limites de ces modèles à l'heure actuelle.

Figure 2 : Le diagramme stock-flux du module vulnérabilité



La variable d'état " population inondée " est établie dans le rapport de ses trois variables de flux, respectivement le flux d'entrée " devient " et les deux flux de sortie de la population inondée " sinistrée " et " non sinistrée ".

Le flux qui alimente le réservoir " population inondée " est le produit de la population présente sur le bassin d'inondation (piétons et automobilistes) et du coefficient d'inondation de la population. Ce coefficient varie selon la hauteur d'eau dans le bassin d'inondation. Une jonction est ainsi établie entre le module aléa et le module vulnérabilité. Paramétré entre 0 et 1, ce coefficient permet d'effectuer des scénarios relatifs à l'ampleur de l'aléa. Dans un premier temps, la vulnérabilité des individus est donc fortement dépendante de l'ampleur de l'inondation. Or, l'étude de la vulnérabilité ne peut se limiter à la prise en compte de la violence de l'aléa. En effet, la vulnérabilité est le produit du degré d'exposition à l'aléa et de la capacité de réponse individuelle et sociétale face à un risque. Cette notion ne pouvant s'affranchir d'une démarche semi-qualitative, il convient d'étayer ce module par l'introduction d'un coefficient rendant compte de l'inégalité des citoyens face à un risque. Ce coefficient de capacité de résistance individuelle et sociétale est désagrégé afin de retranscrire la diversité des facteurs qui le composent (biologique, socio-économique, institutionnel, de gestion de crise), et de tester, lors des phases de simulation, la sensibilité de ces paramètres. Pour rendre compte de la vulnérabilité différentielle des individus face à un risque, il faut donc distinguer deux types de population inondée : celle " inondée et sinistrée ", celle " inondée et non sinistrée ". Cette distinction nécessite le recours à deux variables de flux en sortie de la " population inondée ". Ce stock sert donc de base pour générer ses propres flux de sortie. Ces deux flux permettent le passage d'une approche quantitative à une approche semi-quantitative puisqu'ils sont le produit des éléments vulnérables et des facteurs agissant sur la vulnérabilité des individus. L'ensemble des coefficients intervenant dans le module vulnérabilité sont gradués sur une échelle qualitative bornée à 0 pour la limite inférieure et à 0.25 pour la limite supérieure. Par exemple, une mauvaise sensibilisation de la population au risque est égale à 0 et une excellente sensibilisation correspond à une valeur de 0.25. Il est alors possible de tester leur sensibilité et d'effectuer différents scénarios d'impacts lors de la simulation. Le détail des facteurs modifiant les valeurs de ces coefficients n'est pas retranscrit sauf en ce qui concerne la rapidité d'intervention des secours. La rapidité d'intervention des secours est une variable sous la forme d'une fonction graphique dépendant de la hauteur d'eau dans le bassin d'inondation, des véhicules pris au piège, de la morphologie urbaine et des troubles. Des chaînons d'information relient les secteurs vulnérabilité, flux de circulation et effets en chaîne. En effet, les difficultés de circulation et l'encombrement de l'espace jouent défavorablement sur l'intervention des services de secours et donc sur la gestion de crise.

Nous avons choisi de distinguer la composante vulnérabilité de celle des flux de circulation et d'engorgement afin de mettre en lumière l'impact (certes encore partiellement retranscrit) de la ville méditerranéenne sur le risque. Les inter-relations entre la dynamique du risque et la dynamique de la ville sont ainsi révélées. A ce stade

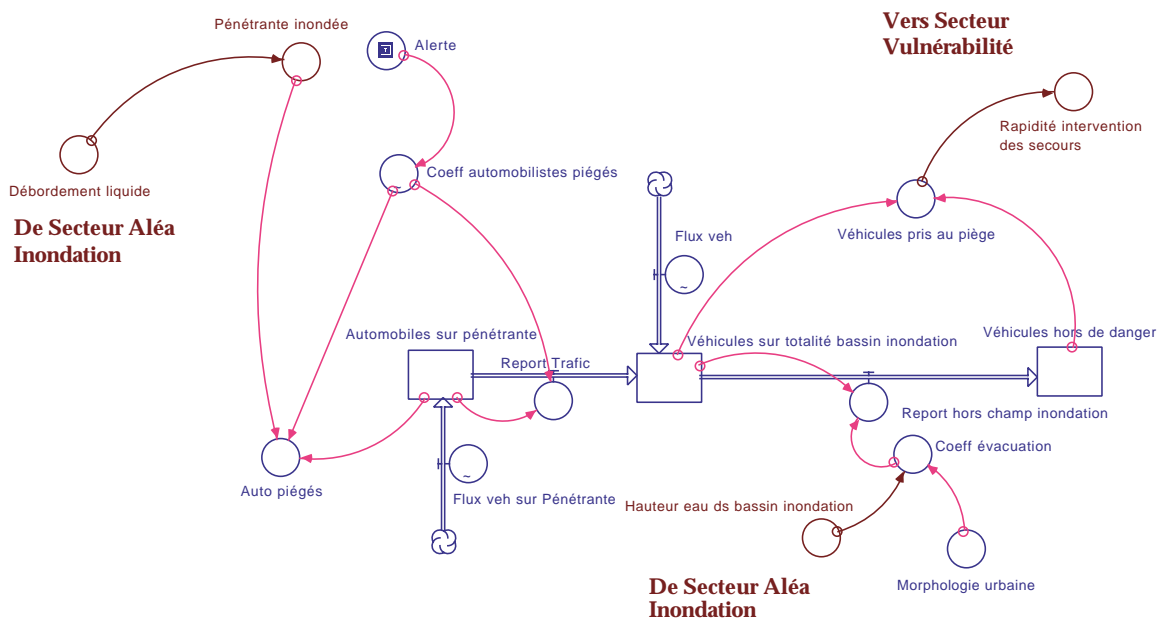
de la modélisation, ce sont donc les flux de circulation qui focalisent notre attention. En effet, comme le fait remarquer J.C. Lavigne, le risque urbain est celui " de l'interruption des flux ", interruption participant à bloquer la situation catastrophique et à la voir se détériorer. C'est donc le rapport entre le risque et le flux qui est mis en valeur dans cette troisième section.

1.3. Le rapport risque/flux de circulation et l'engorgement de l'espace urbain

Ce module (figure 3) intègre la circulation automobile en milieu urbain, car ces flux jouent un rôle important dans la dynamique du risque. A Nice, la vallée du Paillon, axe à la circulation dense, axe cumulant tout à la fois les flux routiers intra et extra-urbain, n'échappe pas aux problèmes de congestion, de saturation des voies de communication (de nombreux navetteurs travaillent dans l'agglomération niçoise). De ce fait, nous pouvons soulever le problème de l'impact d'une crue débordante sur l'encombrement de l'espace urbain, des conséquences de l'interruption des flux sur la gestion de crise et par là-même sur les pertes humaines et matérielles.

Deux scénarios d'impact sont effectués par le biais d'un interrupteur appliqué à l'alerte. Comme son nom l'indique, cet interrupteur permet d'actionner ou de désactionner l'alerte. Il rend ainsi compte du comportement du système lors de deux situations distinctes.

Figure 3 : Le diagramme stock-flux du module flux de circulation et engorgement



Trois variables d'état régissent ce module :

- les automobiles sur la pénétrante,
- les véhicules sur la totalité du bassin d'inondation,
- les véhicules hors de danger,

Deux idées maîtresses gouvernent la modélisation. La première est que l'inondation de la pénétrante est conditionnelle. La voie sur berge est inondée si le débordement liquide du fleuve atteint un seuil. La seconde est issue de la première. Si la crue est débordante, les automobilistes présents sur cet axe de communication sont soit bloqués (défectuosité de l'alerte) soit évacués avant l'inondation. Dans ce second cas, le trafic de la voie sur berge se reporte sur les autres artères de circulation et alimente le réservoir de " véhicules sur la totalité du bassin d'inondation ". Par un effet en chaîne, l'ensemble des automobilistes présents dans le bassin d'inondation tente de rejoindre des zones sûres, en l'occurrence, pour les villes méditerranéennes, les collines. La réussite de cette " fuite " est intrinsèquement liée au coefficient d'évacuation. Ce dernier est une synthèse des facteurs

pénalisants. Parmi ces facteurs, on trouve la hauteur d'eau dans le bassin d'inondation, la morphologie des villes méditerranéennes (étroitesse des rues, nombreux sens interdits, contrainte de stationnement en doubles files...). La différence entre les deux variables d'état de ce module permet ensuite d'implémenter la variable "véhicules pris au piège". Ces derniers contraignent alors la rapidité d'intervention des secours.

Cette famille de modèles a l'avantage d'être plus réaliste que des modèles disciplinaires simples. En effet, elle englobe bien les deux parties fondatrices du risque, l'aléa et la vulnérabilité. En revanche, ce qui est gagné en extension est perdu en compréhension. Il faut multiplier les études de sensibilité pour mieux percevoir les effets de seuil qui sont essentiels à l'étude et à la gestion des risques.

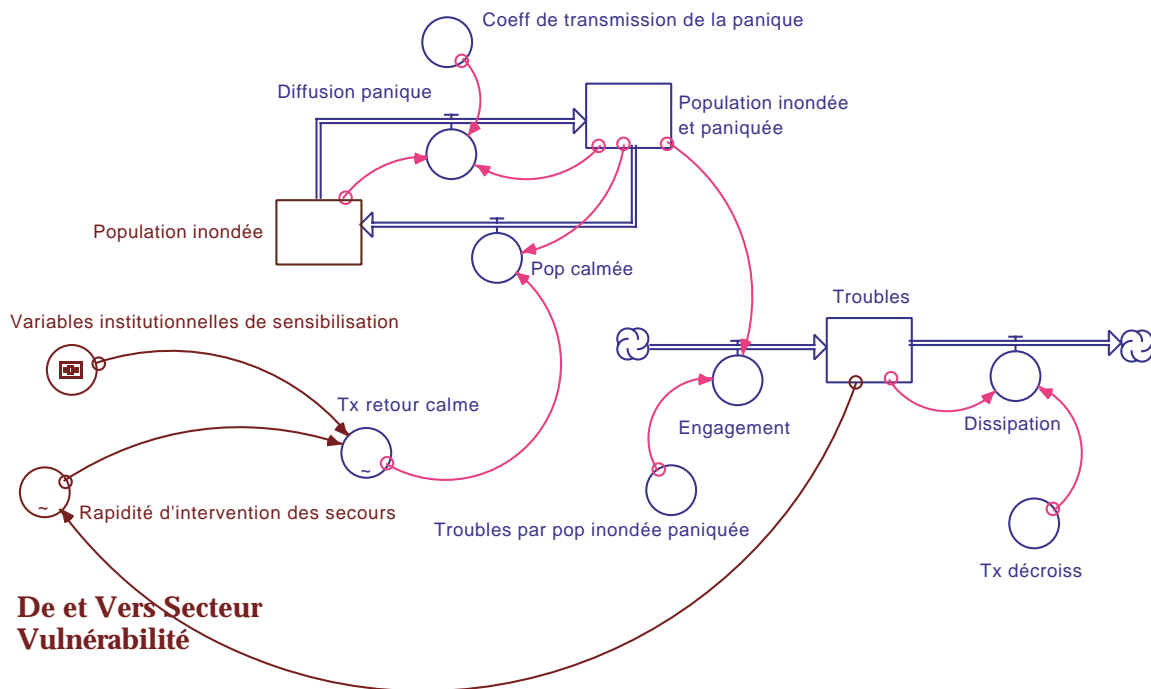
Ces modèles restent toutefois mono-risque c'est-à-dire centrés sur un seul type de risque, ici celui d'une inondation. Un métamodèle a donc été construit afin de mieux comprendre les mécanismes communs à de très nombreux risques. Rarement mis en exergue dans les recherches sur les risques et les catastrophes, le modèle de la panique et des troubles permet de construire un modèle transdisciplinaire de catastrophes prenant en compte des effets de dominos.

2. Un métamodèle à vocation cognitive : l'inondation à l'origine de la panique et de troubles

Ce modèle illustre dans un second temps un effet en cascade entre une inondation, la panique et les troubles qu'elle génère. Ce modèle transdisciplinaire, né de la volonté de transgresser les barrières disciplinaires, permet d'intégrer les aspects naturel et social du risque.

La figure 4 illustre cet effet domino : une inondation à l'origine de mouvements de panique et de troubles. Le sous-modèle de la panique simule notamment le comportement des automobilistes prisonniers des eaux dans leurs véhicules. Cette situation n'a rien d'extraordinaire. Ainsi, elle cause, depuis une vingtaine d'années, le plus grand nombre de victimes recensées lors des inondations aux Etats-Unis.

Figure 4 : Le diagramme stock-flux du risque d'inondation à l'origine de la panique et des troubles



Trois variables d'état régissent le fonctionnement de ce système pluridisciplinaire. Il s'agit de la "Population inondée", de la "Population inondée et paniquée", et des "Troubles". Le réservoir "Population inondée" fait la jonction entre ce diagramme et le module de vulnérabilité. Comme au sein du module aléa, le principe de conservation de la masse est introduit. En effet, c'est l'état de la population qui se modifie mais cette population ne disparaît pas. Ce principe de conservation de la masse implique des interactions entre les volumes de population non paniquée et de population paniquée, interaction à l'origine de troubles. Ces derniers vont eux-mêmes rétroagir sur le secteur vulnérabilité en faisant varier la rapidité d'intervention des secours.

Il est intéressant de comprendre la modélisation de la diffusion de la panique, modélisation construite sur des équations différentielles. Le fonctionnement du processus de diffusion de la panique se fonde sur la propagation de la panique d'un individu à un autre. Il y a donc deux types de populations : la population inondée non paniquée et la population inondée paniquée. Ces deux groupes prennent contact et propagent la panique. Cet effet de contact permet d'introduire l'une des particularités des espaces urbains, où du fait de fortes densités de population accentuant les coefficients de contact, la contagion de la panique est collective. La variation du stock de population inondée susceptible d'être "contaminée" est donc fonction du produit de ce stock et du réservoir "population inondée paniquée", le tout multiplié par le coefficient de transmission de la panique. La boucle de rétroaction du stock de population inondée et paniquée vers le flux qui lui est rattaché représente un phénomène bien connu : plus la population infectée est importante (ici, la population inondée et paniquée), plus celle susceptible d'être paniquée contractera la panique. De plus, nous supposons qu'un individu paniqué peut le rester ou retourner à un état de calme. Une partie des individus paniqués réintroduit donc le stock d'individus non paniqués. C'est donc l'étendue de la diffusion de la panique à l'intérieur de la population qui est considérée. Dans une phase ultérieure, la propagation de la panique à l'ensemble de la population de la ville sera analysée. En effet, si une inondation isole tout un quartier ou un ensemble de quartiers, il n'en demeure pas moins que la panique peut se diffuser à l'ensemble de la population de la ville et non uniquement à la population des quartiers isolés.

Ce module, à enrichir, illustre un enchaînement de catastrophe et de feedback.

Le modèle réalisé dépasse la simple représentation graphique. L'ensemble des modules est en effet sous-tendu par des équations différentielles. Afin de modéliser le fonctionnement du système dans son intégralité, les diagrammes stocks-flux des secteurs aléa, vulnérabilité et flux de circulation sont connectés les uns aux autres. De ces liaisons intersectorielles naît toutefois un problème de respect du principe dimensionnel, problème partiellement résolu par l'emploi de connecteurs. Ces derniers¹ sont à l'image de passerelles mathématiques joignant les sous-modèles. Il s'agit de canal d'information permettant de connecter entre eux des variables du système aux unités de mesure distinctes.

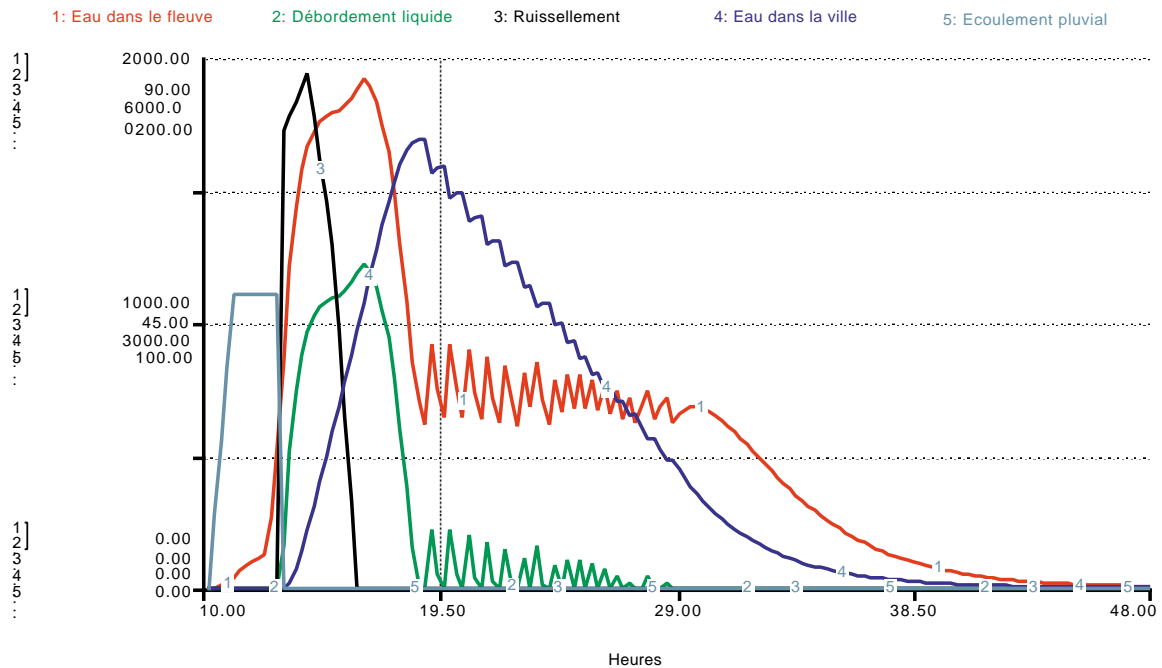
3. Quelques résultats de simulation du risque d'inondation

Les scénarios présentés ci-après illustrent les différentes dynamiques des éléments du système modélisé. La ville de Nice sert de référence pour les valeurs de calage. Les simulations s'effectuent sur un pas de temps égal à 0,25. La succession d'états dans le temps représente l'évolution du système. Des tests de sensibilité et d'impact sont effectués au cours des phases de simulation. Les premiers permettent de découvrir dans un modèle les paramètres sensibles, soit ceux dont la variation conduit à une variation fondamentale du comportement de la dynamique. Les deuxièmes, en supprimant ou enclenchant une action, permettent d'en tester l'impact sur le comportement dynamique du système.

La figure 5 présente le comportement de l'aléa inondation sur la zone de Nice. Il s'agit de pluies violentes qui se déroulent sur un laps de temps court, d'une durée de 4 heures entre 11 h et 15 h. C'est un modèle de pluie torrentielle.

¹ Sur les diagrammes, les connecteurs sont repérables par la couleur marron

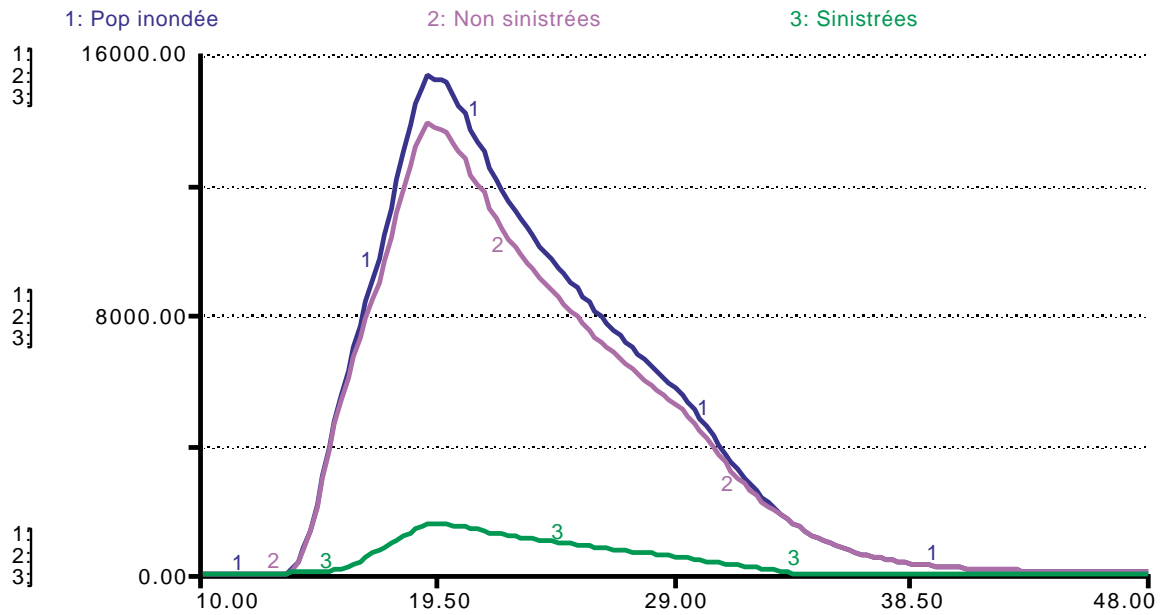
Figure 5 : Résultats de simulation de l'aléa inondation en milieu urbain méditerranéen, le cas de la ville de Nice



Tout processus de simulation commence à partir d'un état spécifié du système. Afin de lancer les calculs, nous devons indiquer les conditions initiales pour chacune des variables d'état du système à l'instant $t = 0$. La variable d'état "Eau dans la ville" est initialisée à 0 (il n'y a pas eu de pluies précédant cet épisode pluvieux). Comme le montre la figure 5, la forme générale des courbes de crue et d'inondation reflète correctement la réalité, celle de fleuves méditerranéens aux crues rapides et brutales, celle de villes rapidement submergées par les eaux qui parviennent, dans des durées relativement courtes, à évacuer les flux d'eau s'écoulant le long de leurs artères. L'ensemble des courbes de ce cycle hydrologique présente la même allure : une forte croissance suivie d'un effondrement moins brutal. Cela signifie que les phénomènes d'eau dans la ville et d'eau dans le fleuve ont une dissymétrie positive, c'est-à-dire que les niveaux d'eau dans le fleuve et dans la ville montent plus vite qu'ils ne descendent. On dit également que la loi est "hypnormale". On remarquera également un phénomène d'intermittence entre les variables "eau dans le fleuve", "débordement liquide" et "eau dans la ville". Il est le résultat d'une boucle de rétroaction établie entre ces trois variables fonctionnant en vases communicants et qui rend compte du phénomène suivant : dès que le fleuve amorce sa décrue, l'eau dans la ville s'écoule vers le fleuve, ce qui stoppe alors sa décrue et fait à nouveau déborder l'eau du fleuve. Ces résultats de simulation illustrent la transition d'un comportement à rétroaction positive à un comportement à rétroaction négative. Ils signifient que le système s'autorégule. Des phénomènes de ce type ont été observés lors des inondations en Picardie en 2001.

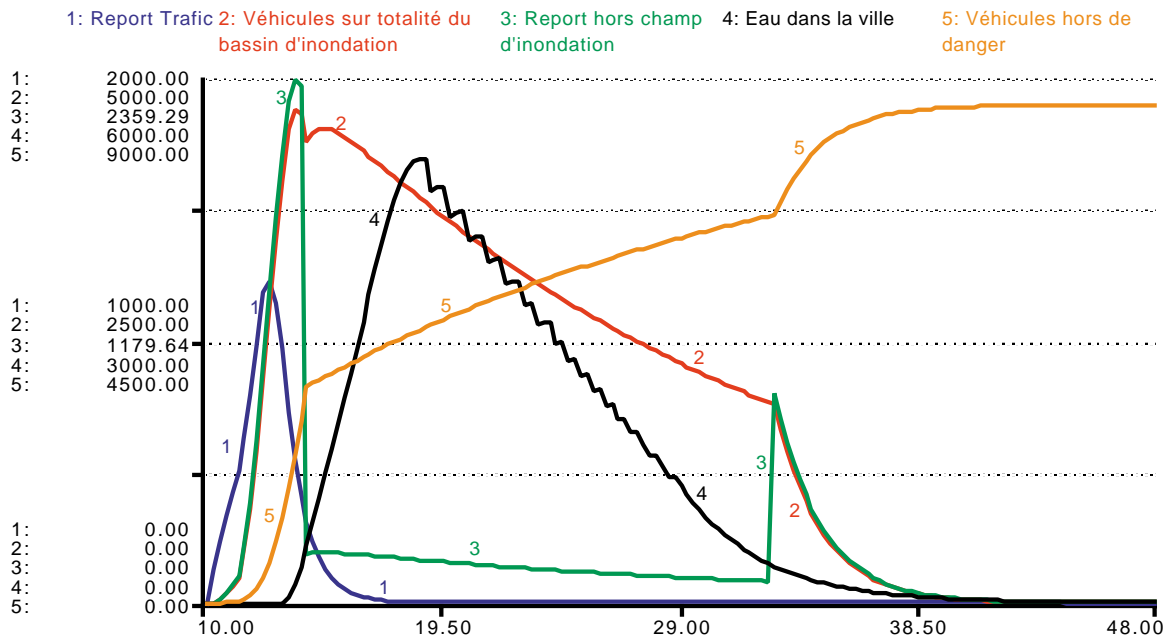
La figure 6 précise l'étendue de la population inondée, de la "population sinistrée" et "de la population non sinistrée". Initialement la population inondée est nulle. La simulation est effectuée pour des coefficients (la qualité de la prévision et de l'annonce de la crue, la qualité des réactions individuelles de la population, la capacité physique de résistance de la population) implémentés aux extrêmes supérieurs. Les individus sont soumis à l'inondation lorsque le fleuve débute sa crue débordante. Il existe en effet un décalage temporel entre le début des précipitations et de l'inondation des personnes. Chacune de ces courbes (1, 2 et 3) croît à partir de l'origine, égale à zéro, atteint un maximum puis décroît lentement pour tendre vers une valeur nulle. Le profil de ces courbes est particulièrement intéressant en un point bien précis, leur dissymétrie positive. Cette dissymétrie signifie que les effectifs de population inondée, de population sinistrée et non sinistrée montent plus vite qu'ils ne descendent. Le rôle joué par les services de secours dans la gestion d'une catastrophe, ici une inondation, est indéniable.

Figure 6 : Résultats de l'impact de l'inondation sur la vulnérabilité humaine



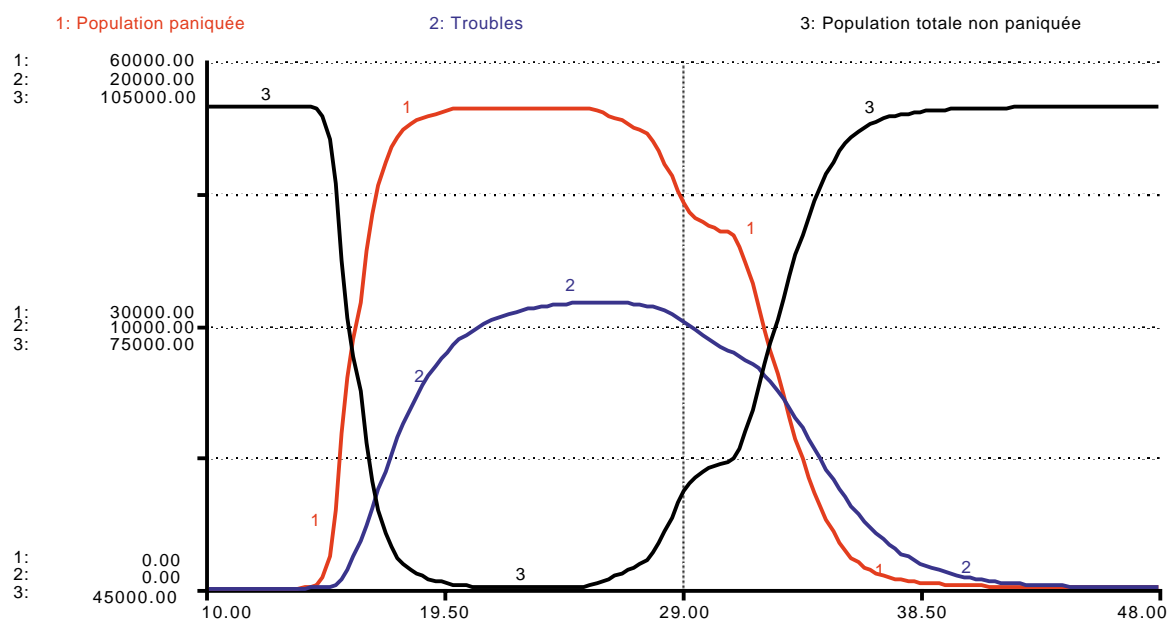
Les résultats de simulation présentés à la figure 7 retranscrivent le scénario d'impact de l'alerte. Le profil de la courbe 1 présente une croissance avec un effondrement brutal. Cet effondrement correspond à l'ensemble des véhicules évacués de la voie sur berge qui alimentent la croissance de la variable d'état "véhicules sur totalité du bassin d'inondation". La croissance du flux des véhicules qui quittent le champ d'inondation (courbe 3) est très brutale, s'effondre tout aussi violemment, stagne durant toute la période de l'inondation puis elle recommence à croître avant de décliner à nouveau. Il y a donc un double jeu de rétroactions positive et négative décalées dans la temps. Le déclin brutal du coefficient d'évacuation entraîne la diminution du flux "report hors champ d'inondation", flux qui, par le jeu d'une boucle de rétroaction, fait à nouveau croître le stock "véhicules dans le bassin d'inondation" auquel il est attaché. En retour, ce dernier crée une nouvelle croissance du flux.

Figure 7 : Résultats du scénario d'alerte en cas d'inondation sur les flux de circulation



Quant aux résultats de simulation de la panique et de troubles (Figure 8), ils retranscrivent bien l'évolution de phénomènes sociaux à savoir une évolution brutale des événements suivie d'un effondrement tout aussi brutal. Notons qu'entre ces phases de croissance et de décroissance, la population paniquée se stabilise sur une période de plusieurs heures. Les deux premières phases de cette courbe correspondent à une croissance logistique en S avec une phase de démarrage suivi d'une phase de saturation. Cette croissance logistique concerne tous les processus de diffusion (par exemple les épidémies, les révolutions...).

Figure 8 : Résultats de simulation du risque d'inondation sur la panique et les troubles



Ces quelques résultats succincts doivent être enrichis. Il convient en effet de faire tourner le modèle aux extrêmes, d'effectuer d'autres simulations en modifiant la longueur des pas de temps.

La modélisation en dynamique de système décrit l'évolution du "système risque" dans le temps et permet d'appréhender les boucles de rétroaction établies au sein du système. Comme ces boucles correspondent à des mécanismes d'origine différente, physique, socio-économique et même culturelle, elles sont à l'origine des effets dominos. Si ces effets dominos sont considérés comme essentiel par tous les spécialistes des risques, nous ne disposons d'aucun modèle les mettant en situation. La panique et les troubles qui en découlent est un exemple unique de l'émergence d'un effet domino dans le domaine de la catastrophe urbaine. Comme la vulnérabilité, cet effet de panique a une dimension transdisciplinaire. Il est donc transposable à d'autres cas. Ainsi, le modèle présenté prend en compte la dimension transdisciplinaire inhérente aux risques et aux catastrophes urbains. L'intérêt de la modélisation en Dynamique de Système est d'offrir au chercheur une méthodologie lui permettant de concevoir et d'analyser des systèmes de risques aussi bien physiques que sociaux et de simuler leur comportement.

BIBLIOGRAPHIE

ARACIL J., 1984, *Introduction à la Dynamique des Systèmes* ; traduit de l'anglais par M Ossandon, Lyon, Presses Universitaires de Lyon.

CHERY J.-P., 1998, *Modélisation d'un système spatial en zone frontalière franco-suisse : adéquation de la dynamique de système aux problèmes de la différenciation spatiale*, Thèse de Géographie, Université de Grenoble I.

DAUPHINE A., 2001, *Risques et catastrophes*, Paris, Armand Colin.

DAUPHINE A, PROVITOLLO D., 2001, *La théorie de l'auto-organisation critique et les risques*. Colloque international Risques et Territoires, 16-18 mai 2001, ENTPE, Vaulx-en-Velin.

DUBREUIL P., 1974, *Initiation à l'analyse hydrologique*, Paris, Masson.

FORRESTER J.-W., 1984, *Principes des Systèmes* ; traduit de l'anglais par P. Sylvestre-Baron, Lyon, Presses Universitaires de Lyon.

LAVIGNE J.-C., 1988, « *Au fil du risque, les villes : une approche symbolique de la gestion urbaine* », Les annales de la Recherche Urbaine, 40, p. 11-16.

SAINT SEINE J., 1995, Monographie hydrologique et hydraulique du Paillon de Nice en vue de la gestion du risque inondation, Thèse docteur-ingénieur en Sciences Physiques, Grenoble.

Stella Research Technical Documentation, 1997, Hanover, High Performance Systems.

Stella Research An Introduction to Systems Thinking, 1997, Hanover, High Performance Systems.