

Mesurer le risque d'inondation en ville

Une modélisation sous contraintes

Sofia Guevara Viquez

DANS **TERRAINS & TRAVAUX** 2021/1 N° 38 , PAGES 47 À 70
ÉDITIONS **ENS PARIS-SACLAY**

ISSN 1627-9506

DOI 10.3917/tt.038.0047

Date de mise en ligne : 08/11/2021

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://shs.cairn.info/revue-terrains-et-travaux-2021-1-page-47?lang=fr>



Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...
Scannez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour ENS Paris-Saclay.

Vous avez l'autorisation de reproduire cet article dans les limites des conditions d'utilisation de Cairn.info ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Détails et conditions sur [cairn.info/copyright](https://shs.cairn.info/copyright).

Sauf dispositions légales contraires, les usages numériques à des fins pédagogiques des présentes ressources sont soumises à l'autorisation de l'Éditeur ou, le cas échéant, de l'organisme de gestion collective habilité à cet effet. Il en est ainsi notamment en France avec le CFC qui est l'organisme agréé en la matière.

Sofia Guevara Viquez

Mesurer le risque d'inondation en ville

Une modélisation sous contraintes

■■■ Résumé

Développés par des ingénieurs, les modèles hydrologiques constituent une méthode d'anticipation du risque d'inondation en aménagement du territoire. En simulant des inondations futures, ils définissent les champs des possibles du développement immobilier en milieu urbain, où les terrains disponibles à la construction sont rares. L'article examine l'élaboration et l'évaluation de ces modèles en éclairant les rationalités qui s'y confrontent, les hypothèses qui les sous-tendent, ainsi que les contraintes avec lesquelles les ingénieurs composent pour les rendre opérationnels. Les ingénieurs modélisateurs naviguent entre ambitions théoriques de maîtrise de l'incertain et difficultés pratiques inhérentes aux imprévus du réel et aux injonctions politiques et budgétaires associées aux projets de construction. À partir d'une enquête par entretiens auprès des praticiens à San José, Costa Rica, cet article illustre des tensions dans la maîtrise du risque d'inondation dans une métropole du Sud.

Mots clés : modèles hydrologiques, ville, inondation, risque, Costa Rica

■■■ Abstract

Measuring Flood Risk in Cities: Modeling under Constraints

Manufactured by engineers, hydrological models are a method of anticipating flood risk in land use planning. By simulating future floods, they define the possibilities of real estate development in urban areas, where land available for construction is scarce. The paper examines the fabrication and evaluation of these models by shedding light on the rationalities that confront them, the assumptions that underlie them, as well as the constraints with which engineers must deal to make them operational. Modeling engineers navigate between theoretical ambitions of mastering uncertainty and practical difficulties inherent to the unforeseen realities and to the political and budgetary injunctions associated with construction projects. Based on interviews with city practitioners in San José, Costa Rica, the paper illustrates tensions in the control of flood risk in a southern metropolis.

Keywords: Hydrological Models, City, Flood, Risk, Costa Rica

DÉPUIS LE XIX^e SIÈCLE, le corps des ingénieurs est au cœur de l'aménagement urbain, à une époque où l'exode rural s'intensifie en Europe et dans le continent américain (Chatzis, 1995), poussant les pouvoirs publics à améliorer les infrastructures collectives des villes (Paris, Londres, Boston), notamment dans le domaine du drainage urbain. Un siècle plus tard, le rôle des ingénieurs se voit confirmé par le renforcement des réglementations environnementales partout dans le monde (Winchester, 2006), qui se traduit par la mise en place de procédures bureaucratiques, de conventions et d'études d'impact (Mormont, 2013), dans lesquelles leur savoir est mobilisé pour concilier objectifs de conservation, d'aménagement, de gestion du risque et de sécurité des infrastructures. Ils incarnent une expertise par l'anticipation (Aykut, Demortain & Benbouzid, 2019) au service de l'action publique environnementale.

Cet article s'intéresse au rôle des modèles hydrologiques, l'un des outils de ces professionnels dans le développement de la ville. Nous verrons que si la raison modélisatrice des ingénieurs est déployée dès la fin du XIX^e siècle pour réduire les inondations en milieu urbain, elle a connu de multiples évolutions, suscitant de nouvelles promesses de sécurisation des infrastructures (Sivapalan et Blöschl, 2017) et renforçant le statut des ingénieurs dans la production de la ville. Avec le développement de l'informatique, des *big data* et des techniques d'analyse mathématique au cours du XX^e siècle, les capacités analytiques de la modélisation se sont étendues dans un contexte de pression foncière exacerbée dans les grandes métropoles. À partir, notamment, de données pluviométriques et de lois statistiques, les modèles hydrologiques permettent en effet de simuler le risque d'inondation futur dans une zone exposée et d'adapter le développement immobilier en conséquence. Ils fournissent des projections sur la fréquence des débordements et permettent, ce faisant, d'intégrer le risque d'inondation dans le dessin du bâti, d'orienter la surélévation des constructions et les mesures de protection (tels des digues et dragages de rivières) en fonction (Gralepois et Guevara, 2015). Ces outils sont mobilisés pour aiguiller le développement de projets en zone inondable, dans un contexte où le foncier disponible est rare (Haghe, 2010 ; Moulin, Deroubaix et Hubert, 2013).

Produits par les ingénieurs pour informer la prise de décision en aménagement, les modèles hydrologiques constituent un moyen par lequel les pratiques de quantification intègrent les politiques publiques (Martin, 2020 ; Desrosières, 2008). Or, la littérature montre que leur élaboration et leur évaluation sont soumises à de multiples négociations et conflits. Les travaux sur les politiques de gestion du risque d'inondation en milieu

urbain en France soulignent, par exemple, les tensions entre les services techniques de la mairie et ceux de l'État en matière d'aménagement territorial (Gralepois, 2011). Ces dernières portent en particulier sur les données de référence utilisées pour déterminer la plus haute crue connue, à partir de laquelle les plans de prévention du risque inondation (PPRI) sont réalisés. Cette référence détermine l'étendue de la zone interdite à la construction, ainsi que les zones à risques modérés où des règles de construction doivent être respectées par les promoteurs. Les tensions entre services concernent donc les possibilités d'investissement immobilier.

En tant que dispositifs sociotechniques, les modèles hydrologiques peuvent être par ailleurs analysés à l'aune des travaux qui articulent STS¹, sociologie de la quantification et sociologie de l'action publique (Demortain, 2019a). Pour produire les modèles, il faut en effet collecter, mettre en équation et agréger des données chiffrées (Demortain, 2019b). Leur construction peut constituer une arène de concurrence entre des groupes cherchant à influencer le politique. Dans cette perspective, Aykut et ses collègues ont examiné le processus de fabrication et d'évaluation de ces outils, invitant à analyser les relations réciproques entre expertise et politique (Aykut, Demortain et Benbouzid, 2019). Les principes et choix méthodologiques qui sous-tendent les modèles déterminent en effet leurs résultats et donc la prise de décision (Dolez, Granjou et Louvel, 2019). Dans le cas de la prévention des inondations en Angleterre, Landström, Whatmore et Lane (2011) ont montré que l'architecture des modèles est déterminée par des facteurs autres que scientifiques, notamment le cadre de contractualisation défini par l'Agence de l'environnement anglaise, ainsi que par le choix de *softwares* qu'elle impose.

Dans la continuité de cette littérature, et partant du principe que malgré leurs limites connues, les modèles hydrologiques gardent une place centrale dans la conception de mesures de prévention du risque d'inondation en milieu urbain au Nord comme au Sud, cet article interroge les conditions matérielles d'élaboration de ces dispositifs au Costa Rica. Avec le renforcement des normes environnementales dans les années 1990, le recours aux modèles y est devenu obligatoire pour toute demande de construction en zone inondable. La modélisation passe ici par le biais d'études d'impact imputées aux budgets des promoteurs privés, lesquels doivent prouver au ministère de l'Environnement et

1. *Science and Technology Studies* (Études des sciences et technologies).

aux mairies que leur opération immobilière n'accentuera pas le risque dans des zones exposées. Nous verrons que, dans la construction des modèles, les ingénieurs préposés à leur élaboration et à leur évaluation doivent articuler des lois mathématiques à des injonctions de gestion environnementale, à des volontés politiques de développement territorial et à des limitations budgétaires des promoteurs. Ainsi, en contrepoint des discours sur la puissance calculatoire des modèles, fondés sur des technologies computationnelles de pointe et des *big data*, ce texte éclaire la manière dont leur usage s'inscrit dans des champs de force marqués par des impératifs économiques. Il montre, en outre, que la modélisation doit s'articuler à d'autres formes d'expertises, notamment juridique et réglementaire. Malgré leur sophistication, les modèles ne sont, *in fine*, que rarement mobilisés pour interdire des nouvelles constructions.

Cet article vise ainsi à donner à voir la raison modélisatrice en action, à partir d'une enquête conduite à San José, au cœur de l'espace métropolitain du Costa Rica, lequel s'étend sur 2000 km² dans la vallée centrale du pays. Cet espace concentre près de trois millions de personnes et plus d'une trentaine de communes. L'aire métropolitaine de cette capitale est, par ailleurs, traversée d'un réseau hydrographique important, nourri par un régime pluviométrique intertropical de précipitations annuelles allant de 1950 à 2820 mm en moyenne (Solano et Villalobos, 2005). Comme dans nombre de métropoles en Amérique latine, la Grande aire métropolitaine (GAM) de San José est le fruit d'une croissance urbaine rapide et non planifiée à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle (Carvajal et Vargas, 1983 ; Hardy, 2005). Cela se traduit par un étalement urbain et une imperméabilisation intensive des sols, conduisant à une modification des conditions de ruissellement des bassins-versants. Les inondations découlent d'un processus environnemental, au sens tout à la fois d'un système de relations tissées dans un contexte climatique et morphologique, et d'une construction sociale, c'est-à-dire le fruit de l'action conjuguée des acteurs de la ville (habitants, acteurs publics, acteurs privés).

Nous nous appuyerons ici sur des entretiens réalisés dans le cadre d'une thèse de doctorat sur les dispositifs participatifs de gestion du risque à San José, au cours de laquelle nous avons réalisé une analyse documentaire, des observations participantes et une cinquantaine d'entretiens avec des gestionnaires de la ville et des habitants (Guevara, 2020). Nous mobiliserons ici l'analyse des documents réglementaires d'aménagement du territoire, ainsi que des entretiens réalisés avec des ingénieurs participant à l'élaboration de modèles hydrologiques et à leur évaluation, soit six

entretiens individuels et un entretien collectif². Leur parcours académique est semblable : diplômés d'ingénierie civile à l'Université du Costa Rica, ils ont pour la plupart rejoint la fonction publique après avoir travaillé comme consultants. L'entretien collectif a été réalisé au sein du ministère de l'Environnement, avec un ingénieur d'État et son collègue géographe qui collaborent à l'évaluation des modèles présentés pour toute demande de permis de construire. Quant aux entretiens individuels, ils ont été conduits avec un professeur d'ingénierie civile à l'Université exerçant également en consultant, un ingénieur travaillant dans le département du réseau d'assainissement de la municipalité de San José, deux ingénieurs exerçant uniquement en consultant, et enfin deux ingénieurs d'État travaillant dans la gestion des eaux souterraines et ayant exercé en tant que consultants pendant des dizaines d'années³.

Dans la première partie, nous reviendrons sur le rôle historique et hégémonique des ingénieurs en hydrologie dans le développement des villes. Nous dresserons les grands traits de leur pratique, qui doit concilier des objectifs de modernisation avec les moyens budgétaires des projets d'infrastructures dès la fin du XIX^e siècle. Nous analyserons ensuite, à partir du cas du Costa Rica, la manière dont le rôle de ces professionnels, en tant que réseau d'expertise légitimé par le pouvoir des chiffres (Martin, 2020), a vu sa place renforcée dans les démarches d'obtention des permis de construire en zone inondable, ainsi que dans la définition des mesures de conservation de l'environnement. Dans un troisième temps, nous ouvrirons la « boîte noire » des modèles, attirant l'attention sur les bricolages méthodologiques opérés pour les construire et les évaluer, afin de montrer enfin que, loin d'exprimer une représentation objective de la réalité, ils découlent d'une négociation entre pairs représentant des échelles territoriales différentes (État, mairie, promoteur), aux intérêts divergents. Le débat entre professionnels ne se joue pas uniquement sur des impératifs de prévention et de conservation, il est également conditionné par les moyens budgétaires des projets immobiliers. La quantification du risque d'inondation et donc la définition des mesures pour le prévenir sont ainsi fonction du prix de sa prévention⁴.

2. Six entretiens sont réalisés entre avril 2016 et décembre 2017. Le dernier a été réalisé en avril 2021.

3. Tous les entretiens sont traduits de l'espagnol au français par l'auteur de l'article.

4. Cet article a bénéficié de la relecture de deux évaluateurs et des coordinateurs du numéro. Je les remercie sincèrement de leurs conseils éclairants. Je remercie aussi les praticiens rencontrés pendant le travail de terrain.

■ L'hydrologie dans l'histoire des villes : moderniser *raisonnablement*

Le développement des infrastructures de drainage urbain est façonné par les ingénieurs qui modélisent depuis la fin du XIX^e siècle. La pluie fait progressivement l'objet d'une mise en équation, afin de concevoir des infrastructures d'assainissement dans un contexte de forte urbanisation. Si cette expertise modélisatrice éclaire de longue date les pratiques d'aménagement, elle s'est construite entre injonctions politiques, controverses scientifiques et limitations budgétaires.

Au Costa Rica, tout comme dans nombre de pays d'Europe et d'Amérique, les ingénieurs sont au cœur de la conception des systèmes de drainage des eaux urbaines dès le XIX^e siècle (Chatzis, 1995 ; Quesada, 2011). Dans son ouvrage sur le développement urbain de San José pendant la période 1870-1930, Quesada (2011) évoque l'échange de savoirs entre les ingénieurs des pays industrialisés et les professionnels costariciens. En 1907, parmi les trois projets considérés par le Congrès costaricien pour améliorer le système d'égouts joséphien et mettre ainsi fin aux problèmes d'inondation de la voie publique, celui qui est sélectionné est le projet proposé par les Américains Howard Barnes et Leonard Metcalf, alors grande référence de l'hydrologie urbaine dans le monde⁵ (Metcalf et Eddy, 1914). Le savoir des ingénieurs est au service du projet modernisateur des classes dominantes au Nord, comme dans les grandes agglomérations latino-américaines (Quesada, 2011).

La modélisation hydrologique se consolide dans un contexte où la société demande des meilleures infrastructures collectives pour la gestion des eaux et des inondations urbaines (Sivapalan et Blöschl, 2017). L'objectif est de quantifier la pluie et les débits des ruissellements, afin de modéliser leur relation sur un bassin donné pour en déduire le dimensionnement des réseaux de drainage. L'usage des pluviomètres permet la première opération de normalisation par l'accumulation de données, l'identification des extrêmes et des moyennes, qu'il faut ensuite mettre en relation avec des débits observés. À partir de l'usage de nouvelles techniques statistiques, on intègre ensuite le concept d'intensité, ce qui permet de se détacher des seules données empiriques. Chatzis (1995 ; 2002) montre les controverses scientifiques au sein des réseaux d'ingénieurs européens et nord-américains à cette période au sujet des méthodes de mise en équation des précipitations,

5. Ce projet rectifiait le projet de l'ingénieur costaricien Luis Matamoros, réalisé quelques années auparavant, et faisant partie des trois propositions analysées par le Congrès (Quesada, 2011 : 92).

avant qu'une norme ne s'installe universellement à partir de 1910. Ces débats opposent, d'une part, les défenseurs des méthodes de modélisation dites « empiriques », qui calculent le débit d'évacuation d'un point du réseau en prenant en compte la pluie la plus importante enregistrée sur un site. Ces méthodes partent d'une base de données pluviométriques. Le raisonnement est inductif, reposant sur la moyenne d'eau tombée lors d'une précipitation. D'autre part, les défenseurs de la méthode dite « rationnelle » reprochent à leurs interlocuteurs de sous-estimer les fluctuations d'intensité de la pluie au cours d'une même averse. Pour calculer le débit maximal, ils prennent en compte non pas la moyenne, mais l'intensité maximale d'un épisode. Le postulat est d'imaginer un épisode de pluie d'une intensité maximale constante, se déversant uniformément sur l'ensemble du bassin. En simulant une précipitation qui n'existe pas à partir d'un raisonnement maximaliste et déductif, l'approche rationnelle permet de créer un système d'assainissement pluvial avec moins de données empiriques⁶. Elle devient l'une des méthodes majeures de la modélisation en hydrologie par la suite, encore utilisée aujourd'hui.

Au tournant du xx^e siècle, les débats entre ingénieurs concernent donc l'existence des données, les méthodes d'analyse et la montée en généralité. Mais les professionnels doivent également composer avec des contraintes de type économique. Chatzis (1995 : 66) montre que dès le xix^e siècle, la raison modélisatrice doit intégrer les moyens économiques de réalisation d'un ouvrage dans ses calculs : « L'ingénieur ne se contente pas à l'instar du savant de modéliser un phénomène physique [...], il procède en physicien et en économiste en dessinant des chances et des risques. » L'idée d'une protection absolue des zones habitées, prenant comme seule référence les précipitations maximales pour dimensionner les ouvrages, laisse place à une protection « raisonnable », prenant en compte principalement les pluies ordinaires. « Si les villes se munissent de collecteurs et d'égouts de taille suffisante pour transporter en sécurité les pluies ordinaires [...], c'est tout ce que la loi est en mesure d'exiger⁷. » L'ingénieur doit peser la balance entre les coûts des dommages générés par les épisodes fréquents et ceux générés par des phénomènes extraordinaires et rares. Des épisodes de référence « raisonnables » s'imposent comme des standards dans les pratiques (Chatzis, 1995 ; Yates et Murphy, 2019). Au Costa Rica, l'État codifie des règlements prescrivant la prise en compte d'épisodes de

6. Pour plus de précisions sur cette controverse, voir Chatzis, 2002.

7. Archives de la Cour d'appel de New York, « *New York Court of Appeals* », New York, 1865, paru dans l'*Engineering Record*, le 8 juin 1912, cité par Metcalf et Eddy (1914 : 296) et Chatzis (1995 : 67).

précipitations minimales, tels que l'épisode de cinq ans⁸. Les municipalités, responsables du développement de leur commune, peuvent en revanche exiger un référentiel plus important⁹.

Les ingénieurs en hydrologie sont ainsi au cœur du dessin des villes depuis le XIX^e siècle. Or, au cours du XX^e siècle l'expansion des grandes agglomérations modifie les régimes des bassins-versants, mettant à l'épreuve les standards pratiqués par les professionnels. À San José, l'étalement urbain s'accélère après 1950¹⁰, sans prendre en compte le réseau de drainage urbain, lequel devient inadapté. L'expertise hydrologique doit faire face à ce contexte changeant en même temps que des nouvelles normes environnementales voient le jour.

■ Progrès techniques et contextes changeants : le renforcement du statut du modèle

Avec la croissance de son aire métropolitaine, San José souffre d'une multiplication des inondations urbaines, si bien que la Municipalité commande une mission d'expertise pour résoudre le problème au début des années 1970. Le rapport de cette étude (Estudios y Proyectos, S.A, 1979) souligne l'absence de planification, l'imperméabilisation intense des bassins-versants et le caractère obsolète des systèmes d'assainissement. L'expertise des ingénieurs doit composer avec ce contexte urbain évolutif et contraint.

Dans le même temps, les perspectives pratiques des modèles hydrologiques sont étendues par le développement de l'informatique partout dans le monde à partir des années 1970 (Sivaplan et Bloschl, 2017 : 8139). D'après les entretiens réalisés, la diffusion de ces technologies au Costa Rica se fait notamment à partir des années 1990. La numérisation des données topographiques, la diffusion des pluviomètres électroniques capables d'envoyer des données en direct et la libération des programmes de modélisation pouvant traiter des *big data* changent les conditions de travail des ingénieurs. Auparavant, la collecte était soumise au déplacement

8. Règlement 2006-730, *Institut national des aqueducs et des égouts*. L'épisode de cinq ans correspond à un niveau de précipitations tel qu'il ne se produit statistiquement qu'à la fréquence moyenne d'une fois tous les cinq ans.

9. D'après la Constitution de 1948 et de la loi de Planification de 1968, les communes sont responsables de l'aménagement de leur territoire.

10. Les normes de développement territorial au Costa Rica ne parviennent pas à réguler la croissance de la GAM (Hardy, 2005).

d'un professionnel pour les relevés et le traitement de données devait se faire « *manuellement*¹¹ ».

Aujourd'hui, il existe différentes méthodes pour calculer les précipitations. Il existe même des outils qui permettent de calculer les précipitations en temps réel, avec des calculs à chaque instant et des informations météorologiques de première qualité. Et vous pouvez combiner cela avec des méthodes de simulation hydraulique, avec des logiciels¹² tels qu'Iber par exemple ou autres, HEC. (Entretien réalisé en avril 2017 avec Pablo, fonctionnaire d'État)

Les méthodes de modélisation actuellement disponibles permettent donc de croiser rapidement des données diverses des terrains et de les extrapoler plus facilement.

Les possibilités offertes par les *big data* et les nouveaux outils logiciels donnent à la modélisation une place croissante dans la prévention des inondations. L'expertise des ingénieurs est mobilisée pour préciser notamment les données renseignées par la méthode d'évaluation du risque des géographes. En effet, les cartes des zones inondables réalisées par ces derniers¹³ renseignent les gestionnaires et les développeurs immobiliers sur les caractéristiques des terrains. À partir de ces cartes, la mairie peut exiger du promoteur la réalisation d'études techniques supplémentaires pour l'obtention du permis de construire, en fonction de la localisation de son projet. La raison modélisatrice entre alors en jeu afin de prédire l'impact de la future opération immobilière sur la dynamique de ruissellement du bassin (Teng *et al.*, 2017). L'objectif est d'orienter le dessin des futurs bâtiments, c'est-à-dire leur forme urbaine, afin qu'ils n'accroissent pas le risque.

11. Qualificatif employé par Santiago, ingénieur indépendant, lors d'un entretien individuel réalisé en avril 2021. Dans son récit, il évoque aussi les outils informatiques utilisés dans les années 1970-1980, notamment l'usage du seul ordinateur électronique du Costa Rica (l'IBM-1620, mod. 140, dénommé la *Matilde*), hébergé par l'Université du Costa Rica. Les praticiens n'avaient pas alors d'interaction directe avec l'équipement : ils apportaient les données sous forme de cartes perforées et récupéraient ensuite l'analyse. Bien que considérablement moins performants que les outils actuels, *Matilde* permettait d'analyser des matrices statistiques plus importantes (Feoli Escalante, 2018).

12. *Iber* est un logiciel libre développé en Espagne. Les logiciels *HEC-HMS* (*Hydrologic Modeling System*) et *HEC-RAS* (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*), libres également, ont été développés par le corps des ingénieurs des armées des États-Unis, dont les pratiques statistiques ont été étudiées par l'historien T. M. Porter (1995).

13. Réalisées depuis les années 1970-1980, les cartes de menace renseignent les zones potentiellement inondables à l'échelle de la commune. Fabriquées à partir des courbes de relief, elles identifient les plaines d'inondations et intègrent aussi les inondations historiques. Elles sont produites par des institutions technico-scientifiques (telles que la Commission nationale de gestion des situations d'urgence) ou par les services municipaux.

Ainsi, non seulement les capacités de calcul s'accroissent et s'articulent avec les méthodes qualitatives d'analyse du risque des géographes, mais aussi et surtout le cadre légal évolue et donne une place déterminante à la modélisation, *via* les études d'impact préalables. Les modalités de construction des projets immobiliers dépendent donc de ces études hydrologiques supplémentaires, réalisées par des ingénieurs consultants et validées par ceux de la Municipalité. Ces dernières deviennent obligatoires après la loi sur l'environnement¹⁴ en 1995. Auparavant, elles se faisaient en fonction du bon vouloir des municipalités :

Avant, l'on nous demandait d'analyser uniquement la zone concernée par le projet. [...] Jamais, personne, et là on parle des années 1980-1990, on s'en foutait où [dans quel système, type cours d'eau ou canalisations] est-ce qu'on allait déverser les eaux. Donc, c'est sûr, tout d'un coup, un projet industriel qui venait déverser ses eaux dans un système qui avait une certaine capacité, générerait des problèmes d'inondations. C'est donc à partir de ça que les municipalités commencent à la demander [l'analyse hydrologique de tout le système qui reçoit le déversement]. Depuis le milieu des années 1990, ça commence à être appliqué [...] Et à partir des années 2000, tout le monde [toutes les municipalités] la demande. (Entretien réalisé en avril 2016 avec Pedro, professeur d'université ayant réalisé des études pour des projets immobiliers privés).

Depuis 1995, lorsque le cours d'eau concerné relève du domaine public, ces études deviennent par ailleurs l'objet d'une révision supplémentaire du ministère de l'Environnement¹⁵. La loi centralise l'examen des modélisations. La figure 1 montre le processus de validation des permis de construire dans ce cas. Elle retrace la présence des ingénieurs dans les étapes de validation.

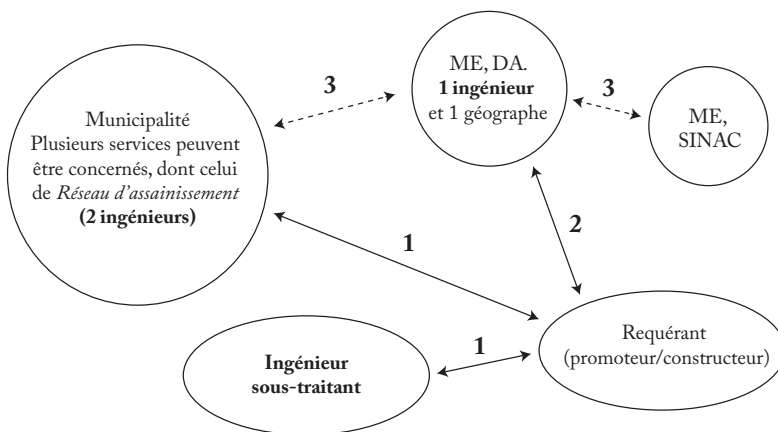
Ainsi, lorsqu'un projet implique un ouvrage sur un cours d'eau de domaine public (tels que la modification d'un lit de fleuve, la construction d'une digue, celle d'un pont, le dragage, la modification des versants, les déversements des eaux pluviales), la validation du ministère de l'Environnement constitue désormais l'un des prérequis pour l'obtention de permis de construire à l'échelle municipale. Le ministère s'assure que le futur projet immobilier ne bouleversera pas les conditions d'écoulement du bassin. Il vérifie la qualité des études et la conformité du projet à la norme environnementale, notamment le respect des zones de protection

14. Loi n° 7554, dite « *Orgánica del ambiente* », 1995.

15. Art. 67, Loi n° 7554, 1995.

des rivières¹⁶. Sa validation n'est pas nécessaire lorsque le projet déverse ses eaux sur le réseau d'assainissement pluvial géré par la ville. Dans ce cas, l'examen ne relève que du gouvernement local.

Figure 1 : Les ingénieurs dans le processus d'obtention d'un permis d'intervention sur cours d'eau au Costa Rica



Légende :

ME : Ministère de l'Environnement.

DA : Direction des Eaux

SINAC : Système national des zones de protection

↔ Relations entre acteurs pour chaque demande

⋯ Relations qui peuvent survenir directement ou indirectement en fonction de la demande

Étape 1. L'intéressé se présente à la Municipalité afin de connaître les différents prérequis pour obtenir les permis de construire. Parallèlement, et en ayant déjà une idée du projet, il commande une étude hydrologique à un ingénieur qui doit faire des recommandations pour la conception du projet.

Étape 2. L'étude hydrologique et hydraulique, ainsi que les dessins du projet suivant ses recommandations sont présentés au ME, dans le service appelé DA.

Étape 3. La relation entre la DA et la Municipalité peut avoir lieu dans un troisième temps, soit parce que cette dernière souhaite accélérer la procédure dans le cas d'une opération d'intérêt pour le projet territorial, soit parce que la DA demande au gouvernement local des informations supplémentaires. Cette relation peut se faire directement ou par le biais du requérant. Par ailleurs, la DA peut demander des validations supplémentaires au SINAC, autre service du ME, pour s'assurer que les zones de protection des cours d'eau sont respectées.

¹⁶. Frange de dix mètres sur chaque rive censée rester non constructible.

Le rôle du modèle hydrologique devient donc crucial dans l'obtention des permis de construire. Le professionnel sous-traitant en charge de le fabriquer, le professionnel des services de la ville en charge de demander cette étude et le fonctionnaire du ministère de l'Environnement en charge de le valider sont tous des ingénieurs. On constate avec Demortain (2019a) que l'usage des modèles dans la prévention du risque d'inondation constitue bel et bien une modalité par lequel des réseaux d'acteurs extérieurs à la décision politique influencent cette dernière, légitimés par le pouvoir des chiffres (Porter, 1995). En l'occurrence, le modèle permet de rendre mesurable le risque d'inondation et par conséquent d'envisager son contrôle. Dans l'un des quartiers analysés pendant la thèse, *Barrio Luján*, nous avons pu constater cette place privilégiée de l'expertise des ingénieurs dans la formulation de solutions aux problèmes des inondations. Les habitants s'opposent à la construction de trois tours d'appartements sur les rives de l'*Ocloro*, cours d'eau responsable de débordements fréquents. Cette opération d'envergure, au centre de la capitale est d'intérêt majeur pour la Municipalité. Or, les riverains craignent que les ouvrages réalisés dégradent leur situation. Un dossier est ouvert auprès des tribunaux. Un autre auprès de la Cour constitutionnelle, qui impose à la mairie de réaliser une étude hydrologique globale du bassin de l'*Ocloro*, et non pas uniquement à l'échelle du projet immobilier. Enfin, une commission interinstitutionnelle est mise en place pour faire médiation entre les parties. Sans entrer dans le détail de ce conflit, nous souhaitons attirer l'attention sur le rapport final de cette commission. Tout en concédant que « nombreux des arguments présentés par les habitants [...] sont valables, et correspondent à des arguments logiques et de sens commun, qui ont été considérés [...] », le document insiste à plusieurs reprises sur la scientificité de la deuxième étude commandée par la Municipalité, qui vient compléter celle présentée par l'entreprise immobilière pour les permis de construction :

L'étude [...] réalisée par les ingénieurs consultants s'appuie sur des informations de base, des modèles de dessin et une expérience professionnelle de grande qualité. C'est pourquoi elle est mobilisée comme une base valable, scientifique et objective pour la définition d'une feuille de route pour l'intervention nécessaire, la réalisation des ouvrages et la récupération du cours d'eau...¹⁷

17. Rapport de clôture de la Commission de coordination, 5 août 2019, archives du Comité de quartier de gestion de crise de *Barrio Luján*.

L'expertise contenue dans les chiffres est présentée comme la base de leur objectivité. S'il ne permet pas de clôturer la controverse¹⁸, le rapport montre comment la raison modélisatrice des ingénieurs devient l'argument d'autorité légitime pour contrebalancer les discours des riverains.

Tout comme leurs prédécesseurs de la fin du XIX^e siècle, les ingénieurs disposent aujourd'hui d'un rôle déterminant dans la conception d'une opération immobilière en zone inondable. Leurs modèles, appuyés désormais sur des techniques informatiques pour traiter des *big data*, doivent pallier les imprécisions des cartes et mesurer le risque à une échelle plus fine, en prenant en compte un plus grand nombre de paramètres physiques et météorologiques. Afin de s'assurer de leur validité, ces modèles sont examinés par des ingénieurs de l'échelle municipale et par les agents de l'État, laissant espérer une forte fiabilité de l'analyse.

Pourtant, malgré ce statut hégémonique du modèle, nous allons voir que, pour le construire, les praticiens mobilisent des données de qualité hétérogène et sont obligés de réaliser de multiples approximations pour le rendre opérationnel, c'est-à-dire pour fonder la formulation des mesures de prévention à partir de simulations d'inondations futures.

■ Bricoler l'objectivité : les zones d'ombre des modèles hydrologiques

Afin de réaliser la modélisation hydraulique et hydrologique, les ingénieurs consultants ne disposent pas d'une méthodologie prédéfinie. S'il existe une norme au Costa Rica qui impose des études pour obtenir des permis de construire à proximité d'un cours d'eau, il n'y en pas pour définir la méthode de collecte des données, ni les formules de calculs pour les mettre en relation ou encore les *softwares* à utiliser (Landström, Whatmore et Lane, 2011).

Au Costa Rica, il n'y a aucun document qui mette tout le monde dans la même ligne [...]. C'est quelque chose qui devrait être déterminé par la municipalité, ou le collègue des ingénieurs, mais sinon c'est selon le jugement du professionnel. (Entretien réalisé en février 2017 avec Santiago, ingénieur consultant)

18. La controverse se poursuit toujours sur un registre juridique, autour du respect de l'invasion des zones de protections.

Pour construire les modèles, les professionnels sont donc obligés de faire des choix. Or, la littérature en génie civil souligne les différentes limites méthodologiques des opérations de modélisation, alors même que ces dernières nourrissent une promesse de maîtrise de l'aléa (Barroca, 2006). Nombre d'auteurs ont montré, à partir d'expérimentations et de mises en comparaison de plusieurs méthodes, que les données qui sous-tendent les modèles peuvent être approximatives (Pappenberger *et al.*, 2008 ; Dimitriadis *et al.*, 2016 ; Teng *et al.*, 2017), limitant les promesses de sécurisation des constructions.

Comme dans toute analyse des risques, la modélisation hydrologique nécessite de collecter, de mesurer et d'agréger une pluralité de données (Demortain, 2019b ; Mennicken et Espeland, 2019). En l'occurrence, cette mise en relation des données chiffrées vise, d'une part, à calculer les débits du cours d'eau dans le temps et les périodes de retour d'une inondation¹⁹ (modélisation hydrologique), et, d'autre part, à calculer la vitesse de ces débits en suivant les lois de la physique (modélisation hydraulique). Les ingénieurs doivent collecter des données météorologiques qui permettent de créer une carte des différentes zones de précipitation²⁰. Ils associent également des données géomorphologiques et topographiques relatives à l'usage du sol pour évaluer le comportement du ruissellement dans le bassin. Si ce dernier est très imperméabilisé, comme c'est le cas en milieu urbain, le ruissellement sera d'autant plus important. Afin d'estimer la vitesse de saturation du lit du cours d'eau, ils prennent en compte par ailleurs l'aire et le périmètre du bassin-versant (et la relation entre ces deux données)²¹, son degré de déclinaison, ou encore le temps de concentration²². L'ensemble de ces données sont mises en relation, le plus souvent par le biais de logiciels, afin de comprendre l'impact d'une nouvelle construction sur le ruissellement et les débordements.

Toutefois, les données mobilisées ne sont pas toutes produites par les mêmes institutions, ni générées à la même échelle, ou à celle qui serait pertinente pour le projet de construction. Deux exemples permettent d'éclairer cette difficulté méthodologique. Premièrement, prenons les

19. Intervalle temporel statistique entre deux événements de précipitation d'une même intensité. Elle permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'une crue sur X années.

20. Appelée carte d'isohyètes. Elle délimite des zones en fonction de la quantité de la précipitation tombée sur une période.

21. L'idée est d'identifier la forme géométrique du bassin, partant du principe que le ruissellement ne sera pas le même selon sa taille et sa forme.

22. Distance-temps parcourue par une goutte d'eau depuis le point le plus lointain du bassin jusqu'au lit du fleuve.

données météorologiques. La localisation et la densité du réseau des stations de l'Institut météorologique national ne permettent que rarement de générer un modèle idéal dans lequel figurent les précipitations extrêmes et moyennes, notamment dans l'aire métropolitaine de San José qui s'étend sur 2000 km². Soit les stations se situent très loin du périmètre du bassin qui intéresse l'ingénieur, soit elles n'ont pas analysé les mêmes périodes car elles n'ont pas toutes été construites au même moment.

*C'est la première limitation que l'on a, le réseau hydrométéorologique [...] de l'Institut météorologique National, qui est maigre. Donc, de la même façon que j'ai déjà dû faire des études avec une station de mesure de précipitation située pratiquement à côté de la zone de l'étude ; j'ai déjà dû faire des études avec une station localisée à 10 kilomètres. C'est une limite [des modèles] parce que c'est quelque chose qui va sûrement affecter les calculs. [...] L'autre limite c'est l'éten-
due du registre. [...] C'est un réseau [...] qui dans certains points est jeune [...].
Donc bon, certaines municipalités travaillent avec 25 ans de période de retour [précipitation maximale ayant eu lieu une fois tous les 25 ans]. Mais parfois vous devez travailler avec des stations qui n'ont que 15 ans d'enregistrement.
(Entretien réalisé en avril 2016 avec Pedro, Professeur d'université)*

Dans le discours des ingénieurs, les limites concernant la qualité des données sont courantes. Les professionnels doivent *faire avec* afin de répondre à des problématiques concrètes dans le développement de la ville. Pour les surmonter, ils font appel à ce qu'ils nomment la « loi de l'homogénéisation²³ », selon laquelle il existe des régularités dans le fonctionnement de la nature qui permettent de construire des modèles à partir de quelques données. Ce faisant, ils estompent la spécificité des contextes locaux de façon à prendre des décisions heuristiques :

Il y a une homogénéité dans le comportement des choses. [...] Si vous analysez les précipitations des districts distincts situés à une dizaine de kilomètres l'un de l'autre dans la vallée centrale, vous allez trouver la même chose [à une même époque]. [...] Elles sont influencées par les mêmes courants [d'air]. Donc ce qui pointe c'est une homogénéité, ça a du sens. Si l'on voulait faire une détermination précise, il faudrait prendre chaque endroit, et établir exactement comment faire le calcul dans chaque cas, et chaque cas deviendrait une thèse d'au moins 10 ans. [...] Je veux dire, vous partez de beaucoup de présupposés pour pouvoir

23. Elle considère que les objets suivent un même comportement à une échelle macro, bien que cela ne se vérifie à l'échelle micro.

résoudre un problème de manière plus ou moins homogène. (Entretien réalisé en avril 2017 avec Pablo, fonctionnaire d'État)

Le postulat de l'homogénéité permet d'expliquer des approximations et de fonder des rapprochements de situations en apparence lointaines. Si ce présupposé théorique donne un sens pratique à la modélisation, puisqu'elle permet d'appréhender le risque, le récit de cet ingénieur se nuance au fur et à mesure de l'entretien :

Mais c'est vrai que parfois, par manque d'information, vous prenez des décisions erronées. Je vais vous raconter en bref un cas. [...] Il y a un ruisseau [dans la commune X], qui a débordé et inondé un périmètre immense [...], il y a eu plein de problèmes dans les tribunaux [...]. J'ai décidé d'examiner cette situation en me servant de la station [météorologique] historique que je pensais être la plus proche. Et quand j'ai pris les données, je me suis dit : « Tiens [...], les données ne collent pas. Elles ne correspondent pas à la réalité. » [...] Je suis allé voir une autre station plus proche de la zone d'étude, tenue par l'université du coin [...] et ça marchait. Donc, l'influence météorologique qui se jouait était différente. Mais ça, [...] si vous voulez mesurer aussi finement, il faudrait construire un modèle pour chaque chose. Mais oui, il y a une variabilité dans l'espace et dans le temps, et en plus il y a le temps futur. (Entretien réalisé en avril 2017 avec Pablo, fonctionnaire d'État)

Les praticiens sont pris dans une tension, entre, d'une part, les présupposés théoriques qui permettent d'envisager des possibles en termes de mesures de prévention et, d'autre part, la rugosité et la variabilité du réel. La citation montre que ce n'est pas tant la cohérence mathématique du modèle que les choix des praticiens pour surmonter les obstacles méthodologiques qui peuvent décider des mesures de protection (notamment les dimensions des ouvrages).

Nous avons cité les limites associées aux données météorologiques, mais les mêmes constats peuvent s'appliquer pour les données topographiques. Dans le cas des bassins urbains de San José, les cours d'eau générant des débordements sont généralement des rivières mineures à périmètre réduit, des ravines. Or, les cartes mises à disposition du public par l'Institut géographique national (IGN) ont une échelle de 1 : 50 000 ou de 1 : 10 000, soit une échelle trop imprécise par rapport au périmètre d'étude (souvent localisé au niveau d'un îlot). Les cartes utilisées par les ingénieurs consultants pour réaliser leur modélisation sont principalement les cartes à l'échelle 1 : 50 000, mises gratuitement à disposition par l'IGN. Pourtant,

elles recouvrent un territoire trop large par rapport à un bassin-versant mineur. À ce sujet, un représentant du ministère de l'Environnement affirme :

Comme la plupart des sollicitations d'ouvrage sur lit sont des sections transversales dans des bassins urbains, qui sont des bassins très petits, on ne s'explique pas comment l'on va modéliser un bon dieu de bassin de 26 km², avec une [carte à] échelle de 1 : 50 000. [...] À cette échelle-là, tu vas avoir des courbes de niveau sensiblement espacées, qui ne vont pas te permettre de distinguer quel sera le comportement d'écoulement, dans une distance très courte, en bassin aval. (Entretien réalisé en avril 2017 avec Andrés, géographe au ministère de l'Environnement, dans le cadre d'un entretien collectif)

Les ingénieurs se confrontent donc à des difficultés métrologiques pour collecter des données, qui proviennent de différentes entités et qui n'ont pas toutes les mêmes conditions de fabrication, pour les agréger ensuite (Desrosières, 2008). Tout en cultivant une impression de sûreté, les modèles sur lesquels se fondent les mesures de prévention des inondations dépendent de multiples approximations. L'opération de mise en quantification du risque d'inondation repose ainsi uniquement sur ce qu'il est possible de mesurer, c'est-à-dire sur les données disponibles :

Donc tout ça, tout cet enchevêtrement de conditions défavorables que vous avez au début, qu'est-ce que ça nous donne ? D'emblée, ça va vous générer une modélisation qui n'est pas, à mon sens, suffisamment réelle pour traduire les conditions naturelles du bassin [...]. Cela étant dit, c'est ce qu'on a. C'est ce qu'on a pour travailler, et puis dans tous les cas c'est nécessaire ! [...] C'est ce avec quoi on peut travailler, et c'est ce avec quoi le requérant travaille aussi, l'ingénieur qui est sur le terrain, l'entreprise sous-traitante qui est sur le terrain, et puis d'autres encore. C'est l'information qui est à disposition pour travailler. (Entretien réalisé en avril 2017 avec Andrés, géographe au ministère de l'Environnement, dans le cadre d'un entretien collectif)

Cette mise en discours du risque donne une impression de maîtrise, bien qu'elle repose sur des présupposés théoriques qui ne seront mis à l'épreuve qu'une fois le projet construit. L'extrait ci-dessus montre que le caractère artisanal du modèle ne passe pas inaperçu aux yeux des ingénieurs, qui tout en admettant le caractère limité de l'outil, le considèrent comme nécessaire. Les praticiens sont simultanément convaincus des présupposés théoriques et réflexifs face aux imprévus d'une ville toujours en mouvement.

■ Des normes *en pratique* aux obstacles budgétaires

Afin de limiter les écueils dans la construction des modèles, il existe d'une part un examen entre pairs, imposé par les procédures de permis de construire. D'autre part, les enquêtés évoquent la mise en place de « facteurs de sécurité ». L'enquête montre toutefois que ces protocoles de sauvegarde peuvent être redéfinis au cours des négociations entre professionnels, ainsi que par les limitations budgétaires des projets immobiliers, dans un contexte métropolitain contraint.

D'après la réglementation, dans le cadre d'un projet immobilier en zone inondable, le choix des méthodes de modélisation hydrologique doit faire l'objet d'un examen entre pairs (cf. Figure 1). Cette validation peut avoir lieu à différentes échelles (mairie ou ministère de l'Environnement). Nous allons citer ici deux exemples de négociation entre pairs lors de ces examens.

Lorsque les praticiens du ministère de l'Environnement, fondés sur leur expérience, leurs données et la littérature, ne valident pas la méthodologie employée par le requérant des permis de construire, ils prescrivent des corrections ou sollicitent des réunions avec ce dernier afin de discuter de la méthodologie choisie. L'entretien avec José illustre ce type d'échange. Ici, le requérant est l'institution publique pour laquelle il travaille :

J'ai pris une thèse d'une ingénieure [qui analyse le comportement des précipitations des stations météorologiques automatisées] et j'ai proposé ici que l'on fasse un travail simple [...], que l'on monte un petit programme, et donc vous venez ici et l'on calcule n'importe quoi en deux secondes. Vous le mettez dans le programme et vous avez le résultat [du débit] d'un coup. [...] L'on perdait beaucoup de temps sinon [en allant chercher les données de précipitation et en les traitant]. [...] Le premier à le remettre en cause [le programme] a été le ministère de l'Environnement. [...] Donc nous avons demandé un rendez-vous avec tous leurs ingénieurs, et moi j'étais disposé à répondre à toutes leurs questions et ils ont dû l'accepter. Parce que c'est pas quelque chose qui est normé au Costa Rica. (Entretien réalisé en avril 2017 avec José, fonctionnaire d'État, ayant travaillé de nombreuses années en tant que consultant)

L'extrait montre que la modélisation sur laquelle repose la validation doit susciter l'accord entre professionnels. En l'occurrence, la méthode proposée était nouvelle pour les ingénieurs du ministère, mais elle a dû être acceptée car elle a passé l'examen mathématique. Tout comme dans l'évaluation du risque dans d'autres domaines, les modèles sont évalués en fonction

de leur cohérence, leur robustesse mathématique (Demortain, 2019b). On constate la place unique des ingénieurs dans la construction de cette cohérence. L'entretien avec Pedro ci-dessous restitue ce type de négociation à une autre échelle, entre l'ingénieur sous-traitant et le gouvernement local. Dans ce cas, l'extrait porte sur la qualité des données associées au réseau d'assainissement :

J'ai dû faire des études pour [Nom d'entreprise immobilière], où l'entreprise était censée collecter les données du système d'assainissement pluvial [...]. [La municipalité X] était en train de demander l'analyse de tout le réseau d'égouts. Je leur ai dit : « Écoutez, ça c'est impossible. Tout d'abord, vous avez les données vous ? Des diamètres, des dénivelés des terrains, du niveau des puits ? » [En imitant son interlocuteur] « Non, on les a pas. » « Bon, donc comment allez-vous faire payer toute cette collecte de données à l'entreprise qui veut développer ce projet ? Ça coûte super cher. [...] » Et donc, en négociant, nous avons réussi à réduire l'analyse, à un segment du système, qui était la ligne principale des égouts, et donc on a dû supposer que ce qui arrivait là [en termes de débit], arrivait bien et que ça convergerait vers ces points-là... (Entretien réalisé en avril 2016 avec Pedro, professeur d'université)

Plus que des outils de prévention, les modèles constituent des objets de médiation (Hégron et Lévy, 2018) entre ingénieurs intervenant à des échelles territoriales distinctes (entreprise privée, commune, État). Les modèles permettent de négocier autour d'une opération de quantification du risque. Dans cet extrait, la médiation porte sur le décalage entre les données demandées et les données disponibles, mais aussi sur le coût pour les collecter. Les moyens budgétaires du requérant, pour les ouvrages et les études, ou en l'occurrence ici les moyens de la mairie, en constituent un facteur déterminant de la définition du risque. L'intérêt du projet immobilier n'est pas remis en cause dans l'échange rapporté. Il conditionne la fabrication du modèle.

L'ensemble des entretiens montrent par ailleurs que si chaque professionnel appartient au corps des ingénieurs, leurs intérêts peuvent être divergents. Alors que les ingénieurs du ministère de l'Environnement visent à assurer une conservation environnementale et à vérifier la solidité des calculs, l'ingénieur de l'échelle municipale et l'ingénieur consultant peuvent quant à eux poursuivre des objectifs de développement immobilier. La question des limitations budgétaires renvoie dans ce cadre à la formulation du risque « raisonnable », déjà évoquée, dans laquelle des injonctions politiques de développement territorial doivent s'accorder avec des moyens financiers.

La négociation entre professionnels pour définir ce risque « raisonnable » se déroule à partir d'accords, des normes *en pratique*, visant à pallier l'incomplétude des données dans un contexte très urbanisé. Les « facteurs de sécurité » constituent une illustration de ce type de conventions (Desrosières, 2008). Le principe est d'amplifier artificiellement les exigences physiques qui pèsent sur les infrastructures afin de les sécuriser davantage. De nombreuses municipalités demandent d'appliquer des facteurs de sécurité aux requérants, c'est-à-dire de considérer la croissance démographique future ou d'envisager des périodes de retour plus élevées, de 25 à 50 ans, dans l'analyse des précipitations. Cependant, lorsque le coût des ouvrages devient très élevé, ces précautions peuvent être revues à la baisse afin de rentrer dans les budgets d'un projet.

Les normes en ingénierie vous les faites avec des facteurs de sécurité. Mais les facteurs de sécurité, vous savez, en ingénierie hydraulique [...], presque personne les met en œuvre. [...] Un facteur de sécurité ce qu'il fait c'est par exemple de dire : le sol doit avoir deux fois la capacité de supporter un bâtiment au-dessus. [...] Ça c'est pour le sol, mais avec l'eau [...], il n'y en a pas, parce que tous les ouvrages en hydraulique sont très chers. [...] Donc si vous faites les calculs et que les données sont très hautes, vous dites « C'est apocalyptique. Il faut l'enlever. » Donc, on gère l'information de façon à réduire les données, parce qu'avec des critères fondés, il est possible de modifier les données... (Entretien réalisé en avril 2017 avec Pablo, fonctionnaire d'État)

La visée préventive des modèles se heurte donc au caractère limité des budgets, dans un contexte métropolitain où le foncier disponible est rare. Les ouvrages de prévention d'envergure y sont chers. Les arbitrages méthodologiques et les extrapolations, opérés par les praticiens, sont dès lors moins déterminés par des postulats mathématiques, que par la faisabilité budgétaire des ouvrages et des projets immobiliers. Par ailleurs, ce dernier extrait renseigne également sur le caractère autoréférentiel des modèles hydrologiques, se suffisant à eux-mêmes par leur cohérence mathématique.

■ Conclusion

L'article invite à d'autres recherches sur la place des experts dans la fabrication de la ville et la gestion du risque. L'étude des méthodes développées par les praticiens pour *dire* le risque d'inondation par l'usage

des modèles hydrologiques montre en effet que sa prise en compte n'a jamais vocation à interdire la construction au Costa Rica, bien au contraire. La modélisation constitue un moyen pour limiter l'inondation, sans entraver complètement le développement immobilier. Pour effectuer leurs modélisations, les ingénieurs collectent une série de données en provenance de diverses institutions. Ils réalisent des simulations afin de limiter les débordements ou l'avènement d'une catastrophe. Cependant, cette collecte est marquée par de nombreuses incertitudes liées aux conditions variables de leur production. Malgré la promesse de précision et d'expertise de la modélisation, celle-ci n'est pas dépourvue de zones d'ombre, excluant toute maîtrise absolue du risque d'inondation (Barroca, 2006). Une validation entre pairs se met en place, mais non sans négociation concernant les facteurs de sécurité et les calculs réalisés. Des débats peuvent certes surgir entre professionnels, portant sur les données, sur leur mise en relation, mais aussi et notamment sur les moyens budgétaires disponibles pour assurer une prévention sans entraver le développement immobilier. Le modèle, dont la fiabilité est fondée sur sa cohérence mathématique, vérifiée par les agents de la commune et par le ministère de l'Environnement, permet ainsi de légitimer techniquement la réalisation de projets immobiliers. L'expression des inondations est ainsi déterminée en dehors du débat démocratique (Lorrain, 2006), dans des espaces clos où n'interviennent que les savants du chiffre.

Dans la lignée des travaux sur les outils d'anticipation du futur et en sociologie de la quantification (Aykut, Demortain et Benbouzid, 2019 ; Demortain 2019a), nous avons analysé la modélisation du risque d'inondation en milieu urbain comme un processus de bricolage constant, conditionné par les limites méthodologiques de collecte de données, mais aussi par les injonctions politiques de développement territorial et par les moyens économiques des projets immobiliers, soit en d'autres termes, par des facteurs exogènes aux données empiriques et aux techniques mathématiques qui sous-tendent l'outil. Ainsi, en attirant l'attention sur la dimension matérielle du travail de modélisation, l'article permet aux études sur les pratiques de quantification dans l'action publique (Martin, 2020 ; Desrosières, 2008 ; Porter, 1995) de nuancer le rôle des chiffres. Plus que des outils absolus de prévention et en dépit de leur puissance calculatoire, les modèles restent façonnés par des facteurs autres que mathématiques, constituant en cela un moyen de négociation entre acteurs (Lévy, 2017 ; Hégron et Lévy, 2018), en l'occurrence entre des ingénieurs représentant des intérêts territoriaux différents et réalisant des arbitrages sur la conception des mesures de prévention du risque.

■■■ références

- Aykut S. C., Demortain D., Benbouzid B.**, 2019. The Politics of Anticipatory Expertise: Plurality and Contestation of Futures Knowledge in Governance. Introduction to the Special Issue, *Science & Technology Studies*, 32 (4), 2-12.
- Barroca B.**, 2006. *Risque et vulnérabilités territoriales. Les inondations en milieu urbain*, Thèse pour le doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, Champs-sur-Marne.
- Carvajal G., Vargas J.**, 1983. *Proceso de metropolización en el valle central de Costa Rica: 1940-1980*, Informe de investigación, Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA), San José (Costa Rica).
- Chatzis K.**, 1995. La pluie (1870-1930). Petite histoire d'une modélisation, *Annales des Ponts et Chaussées*, 73, 58-68.
- Chatzis K.**, 2002. Formules empiriques contre méthode rationnelle (1890-1920). Une controverse dans l'assainissement urbain, *La Houille blanche*, 88 (45), 161164.
- Demortain D.**, 2019a. Les jeux politiques du calcul. Sociologie de la quantification dans l'action publique, *Revue d'anthropologie des connaissances*, 13 (4), 953-972.
- Demortain D.**, 2019b. Modèles d'effets, effets des modèles. Calcul des doses et pouvoir industriel dans la gouvernance des produits chimiques, *Revue d'anthropologie des connaissances*, 13 (4), 1063-1096.
- Desrosières A.**, 2008. *Pour une sociologie historique de la quantification. L'Argument statistique I*, Paris, Mines ParisTech Les Presses.
- Dimitriadis P., Tegos A., Oikonomou A., Pagana V., Koukouvinos A., Mamassis N., Koutsoyiannis D., Efstratiadis A.**, 2016. Comparative Evaluation of 1D and Quasi-2D Hydraulic Models Based on Benchmark and Real-World Applications for Uncertainty Assessment in Flood Mapping, *Journal of Hydrology*, 534, 478-492.
- Dolez A., Granjou C., Louvel S.**, 2019. On the Plurality of Environmental Regimes of Anticipation. Insights from Forest Science and Management, *Science & Technology Studies*, 32 (4), 78-96.
- Estudios y Proyectos, S. A.**, 1979. *Estudio DRENACA*, Informe, IFAM y Municipalidad de San José, Litografía Berenfeld, S. A., México, D. F.
- Foeli Escalante M.**, 2018. *Matilde un ícono. Testimonios de la historia del primer computador electrónico de la Universidad de Costa Rica*, San José (Costa Rica), Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Gralepois M.**, 2011. Négociation et controverse des périmètres de prévention des risques, in V. November, M. Penelas, P. Viot (dir.),

- Habiter les territoires à risques*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 121-140.
- Gralepois M., Guevara S.**, 2015. L'adaptation aux risques d'inondation façonnée par les métiers de la ville. Tensions à l'échelle du projet d'aménagement. *Développement durable & territoires*, 6 (3), <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11014>.
- Guevara S.**, 2020. *De l'instabilité de la notion du risque en milieu urbain. Habitants et gestionnaires face aux inondations à Barrio Luján et la Carpio (San José, Costa Rica)*, Thèse pour le doctorat en aménagement de l'Université Paris-Est, Paris.
- Haghe J.-P.**, 2010. Penser l'eau. Contribution à une généalogie des idées à travers l'exemple français, in G. Schneier-Madanes (dir.), *L'Eau mondialisée*, La Découverte, 47-60.
- Hardy S.**, 2005. Environnement urbain des capitales centraméricaines, in S. Hardy, L. Medina-Nicolas (dir.), *L'Amérique Latine*, Nantes, Éditions du temps, 152-175.
- Hégron G., Lévy J.-P.**, 2018. *Point d'information national ville. Position sur la recherche et l'innovation urbaine*, I-SITE FUTURE.
- Landström C., Whatmore S. J., Lane S. N.**, 2011. Virtual Engineering: Computer Simulation Modelling for Flood Risk Management in England, *Science & Technology Studies*, 24 (2), 3-22.
- Lévy J.-P.**, 2017. Ville/environnement, pour un changement de paradigme, in B. Landau, Y. Diab (dir.), *Le Génie urbain revisité : innovations, expérimentations. Actes de l'Université d'été de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris 2016*, Paris, Presses des Ponts, 25-32.
- Lorrain D.**, 2006. La dérive des instruments. Les indicateurs de la politique de la ville et l'action publique, *Revue française de science politique*, 56 (3), 429-455.
- Martin O.**, 2020. *L'Empire des chiffres. Une sociologie de la quantification*, Malakoff, Armand Colin.
- Mennicken A., Espeland W. N.**, 2019. What's New with Numbers? Sociological Approaches to the Study of Quantification, *Annual Review of Sociology*, 45, 223-245.
- Metcalf L., Eddy H. P.**, 1914. *American Sewerage Practice*, New York, Mc Graw-Hill Book Company.
- Mormont M.**, 2013. Écologisation. Entre sciences, conventions et pratiques, *Natures Sciences Sociétés*, 21 (2), 159-160.
- Moulin E., Deroubaix J.-F., Hubert G.**, 2013. La constructibilité des zones inondables ou la négociation territoriale de la règle PPRI, *Géocarrefour*, 88 (3), 173-182.

- Pappenberger F., Beven K. J., Ratto M., Matgen P.**, 2008. Multi-Method Global Sensitivity Analysis of Flood Inundation Models, *Advances in Water Resources*, 31 (1), 1-14.
- Porter T. M.**, 1995. *Trust in Numbers: The Pursuit of Objectivity in Science and Public Life*, Princeton, Princeton University Press.
- Quesada F.**, 2011. *La modernización entre cafetales. San José, Costa Rica, 1880-1930*, San José (Costa Rica), Editorial UCR.
- Sivapalan M., Blöschl G.**, 2017. The Growth of Hydrological Understanding: Technologies, Ideas, and Societal Needs Shape the Field, *Water Resources Research*, 53 (10), 8137-8146.
- Solano J., Villalobos R.**, 2005. *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*, San José, San José, Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.
- Teng J., Jakeman A. J., Vaze J., Croke B. F. W., Dutta D., Kim S.**, 2017. Flood Inundation Modelling: A Review of Methods, Recent Advances and Uncertainty Analysis, *Environmental Modelling & Software*, 90, 201-216.
- Winchester L.**, 2006. Desafíos para el desarrollo sostenible de las ciudades en América Latina y El Caribe, *EURE (Santiago)*, 32 (96), 7-25.
- Yates A., Murphy C. N.**, 2019. *Engineering Rules: Global Standard Setting since 1880*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.



Sofia Guevara Viquez est postdoctorante au Laboratoire Cités, Territoires, Environnement et Sociétés (Université de Tours), au sein du projet Solaris Elle est chercheuse associée au Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (Université Gustave Eiffel) où elle a soutenu sa thèse en décembre 2020 sur les dispositifs participatifs de gestion du risque face aux inondations urbaines au Costa Rica.

■ guevara.sofia@enpc.fr ; sofia.guevara@univ-tours.fr

