



HAL
open science

Aléas et risques naturels (inondations, mouvements de terrain) dans le Nordeste du Brésil : une approche géographique appliquée à la Région du Cariri (Crato et Barbalha, Ceará)

Alexandra de Oliveira Magalhães

► **To cite this version:**

Alexandra de Oliveira Magalhães. Aléas et risques naturels (inondations, mouvements de terrain) dans le Nordeste du Brésil : une approche géographique appliquée à la Région du Cariri (Crato et Barbalha, Ceará). Géographie. Université Sorbonne Paris Cité, 2019. Français. NNT : 2019USPCC058 . tel-02929182

HAL Id: tel-02929182

<https://theses.hal.science/tel-02929182>

Submitted on 3 Sep 2020

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

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

Aléas et Risques Naturels (inondations, mouvements de terrain) dans le Nordeste du Brésil

*Une approche géographique appliquée à la Région du Cariri
(Crato et Barbalha, Ceará)*

Alexandra de Oliveira MAGALHÃES

Thèse de doctorat de Géographie

Dirigée par Monique Fort

Co-Dirigée par François Bétard

Présentée et soutenue publiquement à Paris le 14 mai 2019

Présidente du Jury : GAUTIER Emmanuèle, Professeure à l'Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne

Rapporteurs : PIGEON Patrick, Professeur à l'Université Savoie Mont-Blanc

VERDUM Roberto, Professeur à l'Université Fédérale du Rio Grande do Sul (Brésil)

Examinatrice : BILODEAU Clélia, Maître de Conférences à l'Université Paris-Diderot

Directrice de thèse : FORT Monique, Professeure Émérite à l'Université Paris-Diderot

Co-directeur de thèse : BÉTARD François, Maître de Conférences HDR à l'Université Paris-Diderot

Aléas et risques naturels (inondations, mouvements de terrain) dans le Nordeste du Brésil : une approche géographique appliquée à la région du Cariri (Crato et Barbalha, Ceará)

Résumé

Dans les pays du Sud comme ailleurs, la gravité croissante des conséquences des catastrophes naturelles traduit le rôle essentiel de l'augmentation de la vulnérabilité des populations et des biens, liée aux inégalités, à la croissance démographique et à l'insuffisance de planification. Au Brésil, des réponses législatives et opérationnelles spécifiques ont suivi les désastres survenus entre 2008 et 2011 dans plusieurs régions. Dans la préparation de tels dispositifs, l'apport des géographes devrait être essentiel, d'où cette thèse fondée sur une approche géographique de la question dans la région du Cariri (Nordeste). Elle comporte aussi une comparaison destinée à tirer les enseignements de l'expérience française en matière de traitement et de prévention des risques naturels, ainsi que les possibilités de les transposer dans le cadre brésilien. L'analyse des facteurs géographiques locaux conditionnant les types d'aléas et d'enjeux est suivie de celle des informations obtenues sur les inondations contemporaines de la recherche et antérieures. Elle comporte aussi des données originales sur les mouvements de terrain qui l'affectent. La perception et la gestion des risques sont abordées à travers une enquête menée auprès des populations riveraines des cours d'eau dangereux. Une partie des données est transcrite sous forme de cartes dans un essai de zonage des aléas, des enjeux et des risques à l'échelle locale, destiné à fournir aux décideurs des éléments utiles à l'élaboration d'une planification urbaine comportant la gestion et la prévention des risques naturels. Les résultats sont mis en perspective grâce à une revue des catastrophes et des risques concernant l'ensemble du Brésil, et des mesures prises à l'échelle fédérale et à des niveaux plus locaux. Elle sert aussi de substrat pour la brève étude comparative qui porte sur le traitement des catastrophes naturelles en France (Draguignan). Si les besoins en matière de délimitation des aires de risque sont les mêmes dans les deux pays, les conséquences qui en sont tirées sont différentes puisque, jusqu'à présent, on ne retrouve pas dans la région étudiée au Brésil l'équivalent du zonage réglementaire des PPRI français. Pourtant, si des enseignements peuvent être transposables d'un pays à l'autre, c'est surtout dans ce domaine réglementaire. Les orientations futures qui peuvent se dégager de ce travail résident surtout dans les améliorations de connaissances que l'on peut attendre de collaborations interdisciplinaires étendues et mieux ordonnées.

Mots-clés : Catastrophes naturelles, crues éclair, inondations, mouvements de terrain, prévention, risques naturels

Natural hazards and risks (floods, mass movements) in Northeast Brazil: a geographical approach applied to the Cariri region (Crato and Barbalha, Ceará)

Abstract

In the Southern countries as elsewhere, the increasing seriousness of the consequences of natural disasters illustrates the essential part of an increasing vulnerability of populations, property and infrastructures, linked with demographic growth, poverty, social disparities and insufficient planning. In Brazil, legislative and operational responses followed the disasters which had occurred between 2008 and 2011 in several regions. Geographers should play an essential part in the preparation of such measures. This is the scope of this thesis, which is based upon a geographical approach of the question in the Cariri region of Northeast Brazil. This work also includes a comparative approach, in order to analyze lessons from the French experience in the domain of risk management and prevention, and to study the possibilities of transposing them in the Brazilian context. The analysis of local geographical factors (types of hazards, population and property at risk) is followed by that of information obtained about floods which occurred in the study area during the time of our research work and before. It also includes original data on mass movements at various scales which were identified from field work. Risk perception and management are investigated by the means of a questionnaire submitted to residents neighbouring rivers identified as dangerous. Part of these data are transcribed in the form of maps, in an attempt to draw a zonation of hazards, population and property at risk at local scale, in order to provide useful elements for an urban planning including risk management and prevention. This work is put in perspective through a review of disasters and risks at national scale, and of the measures that were taken at federal and more local scales. This review is used as a basis for a comparative study which bears on the management of natural disasters in France (Draguignan). Although the needs in delimitation of areas at risk are the same in both countries, the consequences which are drawn are different since, until now, there is no equivalent of the regulatory zoning of the French « PPRI », at least in the study area. However, if lessons can be transposed from one country to the other, this is mainly in this regulatory domain. Future orientations that can be retained from this work are mainly found in improvements that can be expected from wider and better organized interdisciplinary collaborations.

Key words: Natural disasters, flash floods, floods, mass movements, prevention, natural risks

REMERCIEMENTS

Au Brésil, je n'ai pas choisi de naître dans la ville de Fortaleza (littoral du Ceará), mais c'est là que mes parents, José (†) et Sônia ont été amenés, encore enfants, par leurs familles comme migrants fuyant la sécheresse et l'extrême pauvreté qui ravagent de façon chronique le *Sertão* du Nordeste. Établis dans un quartier modeste et alors périphérique de la capitale, ils ont fondé une famille et, même sans savoir lire et écrire couramment, ils nous ont incitées, mes sœurs et moi, à étudier, pensant que c'était là le seul moyen d'échapper à la misère.

Depuis ma petite enfance, j'ai toujours adoré écouter les histoires puis lire les livres qui me permettaient de voyager en des lieux inconnus. Mais c'est à l'adolescence, peut-être influencée par certains enseignants du collège, que j'ai décidé, sans trop savoir pourquoi, que je serais un jour Professeure de Géographie. Admise au *Vestibular* (examen d'entrée) de l'Université Fédérale du Ceará (UFC), c'est là que je fis mes études de géographie (*Licenciatura* et *Bacharelado*), de 1991 à 1996.

Cette thèse n'aurait pas été menée à bien sans les connaissances acquises à l'UFC, où j'ai commencé mon parcours universitaire. C'est pourquoi je veux exprimer ici toute ma reconnaissance à mes professeurs et maîtres pour leurs enseignements : les Professeurs Cacau, Geralda, Clélia, Vlândia, Castelo, Tércia, Salete, Fátima, José da Silva, Jeovah, Eustógio, Levi, Paulo, Amaro entre autres. Parmi eux, je citerai en particulier le Professeur Cacau (Edson Vicente da Silva) qui m'a permis de faire partie de son équipe au sein du Laboratoire de Climatologie et Ressources hydriques ; c'est à lui que je dois l'orientation de mes premières recherches (*Bacharelado* et *Especialização*) en Géographie physique. Par la suite, pour le Mestrado, c'est la Professeure Vlândia, qui a accepté de diriger mon travail, avec la collaboration du Professeur Marcos Nogueira. Les sorties de terrain furent fondamentales pour moi, me donnant la possibilité de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises en cours et de tenter de déchiffrer les secrets de la nature cearense (littoral, montagnes, *sertão*) et ceux de régions plus éloignées.

Outre la participation à des projets universitaires élargis (Projet Fédéral Université Solidaire dans les états de Sergipe et de Bahia), le contact avec les communautés de la côte comme celle de Batoque et avec les Indiens Tapebas de la Région Métropolitaine de Fortaleza (Rios Ceará e Maranguapinho) m'a incitée à continuer mes recherches en Géographie Physique sans abandonner la Géographie Humaine. Ces premières expériences géographiques m'ont fait percevoir d'autres réalités extérieures aux murs de l'Université, par delà les connaissances scientifiques et académiques : la géographie qui ne s'apprend pas dans les livres ni dans les salles de cours, mais par l'expérience vécue.

Après la fin de ma formation initiale (*Graduação*) à Fortaleza, j'ai poursuivi mon parcours géographique en travaillant comme Professeure dans le cours de Géographie de l'Université Régionale du Cariri (URCA), dans la ville de Crato, de 2001 à 2016. J'y ai développé diverses activités comme

coordinatrice du *Laboratório de Análise Geoambiental* (LAGEO), une équipe incluant jeunes collègues et étudiants (Alexandra, Ândrea, Eliene, Regina, Cláudio, César Filho, Tadeu, Alysson, Tiago, Claudemária etc), et aussi comme responsable adjointe du *Département de Geociências* (DEGEO). Mais j'y ai surtout poursuivi mes recherches et direction de travaux d'étudiants en matière d'analyse et de zonage environnementaux. Influencée par les conseils du Professeur Jean-Pierre Peulvast, je me suis intéressée depuis la fin de mon Mestrado, réalisé à l'UFCE (2004-2006), à la question des risques naturels (crues, inondations, mouvements de terrain). C'est la thématique que j'ai choisie pour mon Doctorat. J'adresse mes plus vifs remerciements à tous ceux qui m'ont accompagnée dans ce parcours.

J'ai aussi reçu l'appui des Reitores (Présidents) de la URCA, André Herzog et Patrício Melo qui ont mis à ma disposition des moyens de transport sur le terrain et aussi l'auditorium du Geopark Araripe pour la tenue de conférences, compensant ainsi les moyens financiers limités dont je disposais (absence de bourse de recherche). Qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

Certains professeurs et étudiants du DEGEO m'ont accompagnée dans de multiples sorties de terrain dans la région du Cariri. Parmi eux, je citerai les Professeurs Chagas, Lourdinha, Socorro, Cássio, Josier, Simone, Frederico, Idalécio, Álamo, ainsi que les étudiants Roberto, Alexandra, Ândrea, Tadeu, entre autres. Parmi eux, je veux souligner l'aide que j'ai reçue de la Professeure Maria de Lourdes Carvalho Neta (Lourdinha) pour l'élaboration de plusieurs documents cartographiques. D'autres ont travaillé à l'organisation de nos séminaires et conférences (Prof. Juliana et ses étudiants). Les chefs, sous-chefs, coordinateurs et secrétaires du DEGEO (Jörn, Maria Soares, Glauco, Marcelo Moura, Rogério, Tarcísia et Valdir) ont veillé aux démarches administratives concernant mon détachement, de même que les responsables du Service du Personnel, Francy et Lúcia. À tous, je veux exprimer mes sincères remerciements.

La réalisation de mes sorties de terrain n'aurait pas été possible sans l'accueil chaleureux et l'appui logistique de mes chers amis Flávia, Arthur et Afonso ; Sirleis et Júnior ; Claire Anne et Valentin ; Chagas et Meire, Maria Soares et Ivan ; Josier et Jane ; Marta Maria; João César, entre autres.

Les informations qui ont enrichi le contenu de mon travail ont été obtenues auprès de représentants politiques, de fonctionnaires et de techniciens de divers organismes publics et privés, dont : Prefeitura Municipal (mairie) de Crato et de Barbalha, COGERH, IPECE, IBGE, UFC Cariri, Corpo de Bombeiros (corps de sapeurs pompiers), Defesa Civil, FUNCEME, CPRM, CENAD, CEPED, Ministério da Integração Nacional e das Cidades, etc. J'ai bénéficié aussi des informations directes et des références bibliographiques communiquées par divers collègues et jeunes chercheurs qui ont mené des travaux sur la thématique des risques dans la même région : Prof. Simone, Feliciano de Sá, Lima Neto, Moreira, Marciano, Denize entre autres. Cependant, la collecte des informations et surtout du matériel cartographique n'a pas toujours été facile ou même possible, ce qui a pu limiter le traitement de certains sujets pourtant utiles à la thèse.

Les données obtenues auprès des populations de Crato et de Barbalha ont été fondamentales pour la réalisation de mon travail, à travers un questionnaire que divers collègues (Cássio, Roberto entre

autres) et étudiants du cours de géographie de la URCA, ainsi que des personnels du collège Aduino Bezerra (Barbalha) m'ont aidée à soumettre aux habitants. Par ailleurs, M. Joaquim dos Bombons a mis à ma disposition des images originales des crues et inondations du Rio Granjeiro. À tous, je veux exprimer ma profonde reconnaissance.

En dehors du Ceará, j'ai eu le privilège de bénéficier des conseils et de l'amitié des Professeurs Ana Luíza Coelho Netto et André de Souza Avelar (Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ), et de l'expérience dans le domaine des risques qu'ils ont partagée lors de sorties de terrain et d'un colloque dans la région de Rio de Janeiro.

En France, la direction attentive et la disponibilité des Professeurs Monique Fort et François Bétard (Université Paris-Diderot) m'ont été particulièrement précieuses depuis le début de ce travail, que ce soit par les suggestions toujours pertinentes et les discussions scientifiques dont j'ai bénéficié au bureau ou sur le terrain, en France comme au Brésil, ou par les leurs encouragements et incitations à publier, à participer à des séminaires et colloques, et à me confronter ainsi à une communauté scientifique élargie. Je les remercie chaleureusement pour leur attention permanente et leur patience, surtout face aux retards dont ont souffert les dernières phases de la préparation de cette thèse, du fait des graves problèmes de santé que j'ai dû affronter. Je veux leur exprimer ma profonde gratitude et mon admiration pour leur compréhension et leur soutien qui m'ont aidée, jusque dans les moments les plus difficiles, à ne pas renoncer à mener à bien ce travail.



Mirante Granjeiro, Crato (août 2014)

La thèse a été préparée à l'Université Paris-Diderot, au sein du Laboratoire PRODIG, dont je tiens à remercier le Directeur, M. le Professeur Géraud Magrin. Je veux aussi remercier les Professeurs Clélia Bilodeau et Vincent Viel, ainsi que Mme Samira Bem Amar (Secrétaire de l'Ecole Doctorale) pour m'avoir soutenue et aidée dans les démarches administratives nécessaires aux inscriptions et ré-inscriptions en vue de l'achèvement de la thèse.

Je remercie également la mairie de Draguignan pour m'avoir communiqué un matériel bibliographique et cartographique qui m'a été très utile.

Ma reconnaissance va aussi à Mmes et MM. les Professeurs Clélia Bilodeau, Emmanuelle Gautier, Patrick Pigeon et Roberto Verdum qui ont accepté de participer à mon jury de soutenance.

Je ne pourrais pas terminer ces remerciements sans des mentions plus personnelles qui vont à des personnes proches qui m'ont apporté toute leur aide et leur affection tout au long de cette période. Parmi elles, Dona Auxiliadora (Brésil) et Fabienne Clément (France), qui m'ont littéralement adoptée comme leur « fille ». Je citerai aussi mes chers amis Ana Paula (†) et Michel Brault pour l'affection, les échanges passionnés et la culture franco-brésilienne que nous avons partagés. Mes remerciements vont également à Nathalie Boucly, qui m'a aidée à améliorer mon français.

Enfin, c'est au Professeur Jean-Pierre Peulvast (Université Paris-Sorbonne), mon époux, que je voudrais exprimer toute ma gratitude pour l'amour, les conseils et la complicité dont il m'a comblée pendant tout ce temps, ainsi que pour le soin vigilant qu'il a apporté aux corrections de mon texte en français. Et aussi pour être un super-Papa pour notre chère petite Marianne, qui nous accompagne dans nos expéditions géographiques et autres depuis ses premiers jours.

Je termine en présentant par avance mes excuses aux personnes que j'aurais pu oublier dans ces remerciements. Ma gratitude envers elles n'en est pas moins sincère.



Marianne Peulvast Magalhães à l'âge de 10 mois, lors d'une sortie de terrain dans le sud de la France (septembre 2013).

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ-ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS	5
TABLE DES FIGURES	17
TABLE DES TABLEAUX	25
LISTE DES ACRONYMES UTILISÉS	27
INTRODUCTION GÉNÉRALE	31
PREMIÈRE PARTIE. LA CHAPADA DO ARARIPE ET SON PIÉMONT NORD : DES ALÉAS NATURELS D'EXCEPTION DANS L'INTÉRIEUR SEMI-ARIDE DU NORDESTE	35
INTRODUCTION DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	35
CHAPITRE 1. PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE	37
1.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 1.....	37
1.2. CONFIGURATION GÉOGRAPHIQUE : PAYSAGES, RELIEF ET HYDROGRAPHIE.....	40
1.2.1. Caractéristiques géomorphologiques et géologiques.....	40
1.2.1.1. Un haut plateau sédimentaire et son piémont.....	40
1.2.1.2. Dispositif morphostructural.....	41
1.2.1.3. Les marques d'une érosion puissante et active.....	42
1.2.2. Organisation hydrographique : les sous-bassins versants amont du Rio Salgado.....	47
1.2.3. Des milieux contrastés.....	52
1.2.3.1. Sols et formations superficielles.....	52
1.2.3.2. Couverture végétale.....	54
1.3. UNE EXCEPTION HYDROCLIMATIQUE DANS LE SERTÃO SEMI-ARIDE.....	57
1.3.1. Particularités climatiques du Nordeste brésilien.....	57
1.3.2. Paramètres climatiques et régimes de précipitations dans la région d'étude.....	58

1.3.2.1. Précipitations.....	58
1.3.2.2. Régime thermique et bilan hydrique.....	62
1.3.3. L'hydrologie et ses excès: des torrents montagnards intermittents	65
1.4. OCCUPATION HUMAINE ET URBANISATION DE LA DÉPRESSION DU CARIRI CEARENSE ET DU FRONT DE LA CHAPADA DO ARARIPE.....	69
1.4.1. La ville de Crato : une expansion récente sur des sites variés.....	69
1.4.2. Barbalha, une expansion moins contrainte que celle de Crato.....	75
1.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 1.....	78
CHAPITRE 2. CRUES ET INONDATIONS DANS LA RÉGION DU CARIRI CEARENSE. ÉTUDE DE CAS ET SÉRIES HISTORIQUES.....	81
2.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 2.....	81
2.2. CRUES ÉCLAIR ET INONDATIONS : L'ÉPISODE DU 28 JANVIER 2011 À CRATO	81
2.2.1. Contexte et aspects méthodologiques.....	82
2.2.2. L'événement du 28 janvier 2011 : aspects météorologiques.....	82
2.2.3. La séquence pluviométrique antérieure à la crue.....	82
2.2.4. Analyse de l'inondation et des aires inondées.....	85
2.2.5. Facteurs et impacts de la crue-éclair	86
2.2.5.1. Facteurs naturels prédisposants et déclenchants : morphologie du bassin- versant, conditions de formation des crues.....	92
2.2.5.2. Facteurs aggravants.....	92
2.3. SÉRIES HISTORIQUES ET TEMPS DE RÉCURRENCE DES CRUES-ÉCLAIR : CRATO ET BARBALHA.....	94
2.3.1. La commune et la station de Crato	98
2.3.2. La commune et la station de Barbalha.....	98
2.3.3. Evolution de la fréquence des crues : pas de tendance claire faute de recul.....	107
2.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 2.....	113
	113
CHAPITRE 3. CRATO ET BARBALHA FACE AUX ALÉAS ÉROSION ET MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	115
3.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 3.....	115
3.2. RAVINEMENTS ET PETITS MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	115
3.3. GRANDS MOUVEMENTS DE MASSE DANS LES COMMUNES DE CRATO ET BARBALHA : DES ALÉAS A PRENDRE EN COMPTE ?.....	123
3.3.1. Identification de formes liées à de grands mouvements de masse	123
3.3.2. Types de formes et processus correspondants.....	127

3.3.2.1. Glissements de terrain et formes complexes.....	127
3.3.2.2. Identification de modelés et dépôts de Sturzstrom	130
3.3.2.3. Mouvements de masse liés aux topographies de dissection : coulées de débris et/ou laves torrentielles.....	133
3.3.2.4. Interprétation : types de dynamiques impliquées	137
3.3.3. Indications chronologiques.....	138
3.3.4. Facteurs des mouvements de masse, implications pour la question des aléas et des risques.....	140
3.3.4.1. Facteurs statiques et préparatoires : lithologie, hydrogéologie et conditions d'altération.....	140
3.3.4.2. Facteurs déclenchants : climat et tectonique.....	141
3.3.4.3. Vers une évaluation intégrée des aléas associés aux mouvements de terrain dans la région de Crato-Barbalha	141
3.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 3 ET DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	142
DEUXIEME PARTIE. DE LA PERCEPTION DES RISQUES À LA GESTION DES CATASTROPHES NATURELLES AU BRÉSIL : EXEMPLE DE LA RÉGION DU CARIRI (ÉTAT DU CEARÁ).....	145
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	145
CHAPITRE 4. PERCEPTION DU RISQUE DANS LA RÉGION DU CARIRI : ENSEIGNEMENTS D'UNE ENQUÊTE DE TERRAIN.....	147
4.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 4.....	147
4.2. LES CONSÉQUENCES HUMAINES DE LA CRUE-ÉCLAIR DU RIO GRANJEIRO LE 28 JANVIER 2011 A CRATO.....	148
4.3. UNE ENQUÊTE SUR LA PERCEPTION DES RISQUES À CRATO ET BARBALHA : CIBLES, ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES	150
4.3.1. Réalisation de l'enquête et caractéristiques des personnes interrogées.....	150
4.3.2. Expérience vécue des événements catastrophiques survenus dans la ville.....	153
4.3.3. Connaissance des dommages dus à la crue du 28 janvier 2011.....	154
4.3.4. La perception des risques par la population	156
4.3.5. Comment les habitants interrogés voient-ils la gestion des risques naturels ?.....	159
4.4. DE LA PERCEPTION DES RISQUES NATURELS À LA NÉCESSITÉ DE LEUR GESTION.....	161
4.4.1. Un cadre juridique ignoré	161
4.4.2. Les mesures techniques : avis et réalités.....	162
4.4.3. Des phénomènes de moins en moins exceptionnels ?.....	163

4.4.4. Des aléas aux risques : des phénomènes nouveaux liés à une croissance urbaine mal accompagnée.....	165
4.4.5. Le besoin ressenti d'une prévention des risques et d'une planification urbaine.....	167
4.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 4.....	168
CHAPITRE 5. TRAITEMENT DES RISQUES NATURELS DANS LE NORDESTE DU BRÉSIL : APPLICATION AUX VILLES DE CRATO ET BARBALHA.....	171
5.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 5.....	171
5.2. IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES NATURELS : RISQUES D'INONDATION ET RISQUES LIES A L'ÉROSION ET AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN (ALEAS, ENJEUX, VULNÉRABILITÉ).....	172
5.2.1. Identification des aléas.....	172
5.2.1.1. Caractérisation et délimitation des aires inondables.....	172
5.2.1.2. Délimitation des aires affectées par les phénomènes érosifs et les mouvements de terrain.....	176
5.2.2. Enjeux et vulnérabilité.....	183
5.2.2.1. Enjeux et vulnérabilité à Crato.....	183
5.2.2.2. Enjeux et vulnérabilité à Barbalha.....	192
5.2.3. Croiser aléas, enjeux et vulnérabilité : vers une cartographie des risques naturels à Crato et Barbalha.....	193
5.2.3.1. Principes et méthodes.....	193
5.2.3.2. Essai de cartographie des risques naturels à Crato et Barbalha.....	194
5.3. LE TRAITEMENT DES CATASTROPHES NATURELLES DANS LA RÉGION D'ÉTUDE : CADRE POLITICO-LEGISLATIF DE LA GESTION ET DE LA PRÉVENTION ...	201
5.3.1. Le cadre politique des décisions concernant les risques : prépondérance de l'État fédéral.....	201
5.3.2. Législation et organisation administrative au niveau de la Fédération, des États et de la commune (município).....	201
5.3.2.1. Organisation politico-administrative.....	201
5.3.2.2. Schéma d'alerte et de réponse aux catastrophes naturelles.....	203
5.4. L'ÉTAT ACTUEL DE LA GESTION DU RISQUE D'INONDATION À CRATO : GESTION DES CRISES ET SOLUTIONS TECHNIQUES.....	204
5.4.1. La gestion des crises, première réponse à la question du risque d'inondation.....	204
5.4.2. Solutions techniques : sécurité assurée ou illusoire ?.....	205
5.4.2.1. Le réaménagement du « canal » du Rio Granjeiro.....	205
5.4.2.2. L'aménagement de la voçoroca du Seminario	209

5.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 5 ET DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	211
TROISIÈME PARTIE: DISCUSSION GENERALE. LA GESTION DES RISQUES AU BRÉSIL ET EN FRANCE : ENSEIGNEMENTS D’UNE ANALYSE COMPARATIVE..	213
INTRODUCTION DE LA TOISIÈME PARTIE.....	213
CHAPITRE 6. LA QUESTION DES RISQUES NATURELS AU BRÉSIL : PRISE DE CONSCIENCE, CADRE DE LA GESTION ET DE LA PRÉVENTION.....	215
6.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 6	215
6.2. LES CATASTROPHES NATURELLES AU BRÉSIL : CONTEXTE ET EXEMPLES RÉCENTS	216
6.2.1. Un bref recensement général	216
6.2.1.1. Un pays largement touché par les catastrophes naturelles	216
6.2.1.2. Principaux facteurs physiques de répartition des catastrophes naturelles ...	219
6.2.1.3. Bilans des catastrophes naturelles	221
6.2.2. Les catastrophes naturelles au Brésil : contexte et exemples récents	223
6.2.2.1. Région Sud	223
6.2.2.2. Région Sud-Est	227
6.2.2.3. Région Centre-Ouest	234
6.2.2.4. Région Nord	235
6.2.2.5. La région Nordeste	236
6.2.3. Une augmentation récente du nombre de catastrophes naturelles ?	240
6.2.3.1. Une augmentation incontestable à l’échelle nationale brésilienne depuis les années 1990	240
6.2.3.2. Une conjonction de facteurs naturels et socio-économiques à l’heure du changement climatique global	242
6.3. PRÉVENTION ET GESTION DES RISQUES ET DES CATASTROPHES AU NIVEAU NATIONAL/ UNE QUESTION EN PLEINE ÉVOLUTION.....	244
6.3.1. Catastrophes récentes au Brésil : quelle prévention, quelle gestion ?	244
6.3.1.1. L’éveil récent d’un intérêt pour la question	244
6.3.1.2. La question du recensement officiel des catastrophes	247
6.3.1.3. La question des catastrophes naturelles vue à travers les incidences financières	252
6.3.2. Des textes aux actes : mise en place d’un système de prévention des risques et de gestion des catastrophes naturelles	254
6.3.2.1. Mise en œuvre du cadre législatif	254
6.3.2.2. Premières réalisations	257

6.3.2.3. Amélioration de l'information sur les catastrophes naturelles	260
6.3.2.4. Incertitudes quant à un changement culturel et politique en matière de risques naturels ?.....	262
6.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 6	263
CHAPITRE 7. ENSEIGNEMENTS D'UNE APPROCHE COMPARATIVE AVEC LE CAS FRANÇAIS POUR LA PRÉVENTION ET LA GESTION DES RISQUES NATURELS DANS LA RÉGION DU CARIRI	265
7.1. INTRODUCTION DU CHAPITRE 7	265
7.2. LA CATASTROPHE DES 15 ET 16 JUIN 2010 DANS LE VAR ET SES ENSEIGNEMENTS	265
7.2.1. Un événement pluvieux exceptionnel	267
7.2.2. Le bassin-versant de la Nartuby : une configuration propice à la formation de fortes crues	268
7.2.2.1. Le bassin versant de la Nartuby, un amont semi-montagnard de l'Argens aval	269
7.2.2.2. Contexte structural et géomorphologique	272
7.2.2.3. Caractères hydrologiques	275
7.2.3. Chronologie et extension de la crue des 15-16 juin 2010	275
7.2.3.1. En amont de Draguignan	275
7.2.3.2. Au niveau de Draguignan	277
7.2.3.3. Au niveau de Trans-en-Provence	279
7.2.4. Bilan de la crue du 15 juin 2010 dans la vallée de la Nartuby	280
7.2.5. Pourquoi des conséquences aussi graves ?	281
7.2.5.1. Facteurs naturels	281
7.2.5.2. Facteurs humains et problèmes de conscience du risque	282
7.3. MISE EN PLACE DE MESURES DE PRÉVENTION : MESURES D'URGENCE ET ÉLABORATION DU PPRI DE DRAGUIGNAN	284
7.3.1. Contexte national	284
7.3.2. Réponses à la crue du 15 juin 2010 dans le bassin-versant de la Nartuby	285
7.3.3. Gestion et prévention du risque : élaboration du PPRI de Draguignan	286
7.3.4. Cartographie du risque et zonage réglementaire	287
7.3.5. Les enseignements en termes de gestion et de prévention	297
7.4. COMPARAISON AVEC L'APPROCHE BRÉSILIENNE A TRAVERS LE CAS DU CARIRI	298
7.4.1. Instruments juridiques : intérêt et limites de l'expérience française	298

7.4.2. La prise en compte des risques dans les communes brésiliennes étudiées	299
7.4.3. Approches interdisciplinaires et enseignements croisés des cas brésiliens et français	300
7.4.3.1. Interactions entre scientifiques, professionnels et acteurs	300
7.4.3.2. Conditions différentes et options techniques divergentes (chenaux, bassins de rétention...)	302
7.4.3.3. Prévention des risques : place de l'approche géographique et rôle essentiel de la cartographie	304
7.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 7 ET DE LA TROISIÈME PARTIE	305
CONCLUSION GÉNÉRALE	307
BIBLIOGRAPHIE	313
ANNEXES	323

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1. Localisation de la région étudiée et vue du rebord de la Chapada do Araripe au-dessus de la ville de Crato	37
Figure 1.2. Les enclaves humides dans le nord du Nordeste brésilien	38
Figure 1.3. Carte topographique du bassin-versant du Rio Salgado	39
Figure 1.4. Bloc-diagramme des rentrants de Crato et Barbalha dans l’escarpement de la Chapada do Araripe	40
Figure 1.5. Carte géologique simplifiée et log stratigraphique du bassin Araripe	41
Figure 1.6. Crato, Barbalha et la Chapada do Araripe. Vue aérienne oblique	43
Figure 1.7. Profil hydrogéologique simplifié de la Chapada do Araripe dans le secteur de Crato	44
Figure 1.8. Mouvements de masse et affleurements rocheux sous la Chapada do Araripe	44
Figure 1.9. Cicatrice et masse glissée liée à l’avalanche de débris de Carretão (Crato)	45
Figure 1.10. Dépôts de coulées de débris ou de laves torrentielles à Crato	46
Figure 1.11. Incisions fluviales et chenaux rocheux en contrebas de la Chapada do Araripe .	46
Figure 1.12. Carte topographique de la zone métropolitaine CRAJUBAR	48
Figure 1.13. Carte topographique du rentrant érosif de Crato et du bassin-versant du Rio Granjeiro	49
Figure 1.14. Le Rio Granjeiro à Crato	51
Figure 1.15. Le chenal bétonné du Riacho do Ouro dans le centre-ville de Barbalha	52
Figure 1.16. Carte des sols dans les limites du Géoparc Araripe	53
Figure 1.17. Carte de la végétation et de l’usage des sols dans les limites du Géoparc Araripe	55
Figure 1.18. Formations végétales au pied de la Chapada do Araripe	56
Figure 1.19. Carte des précipitations dans l’État du Ceará	59
Figure 1.20. Totaux annuels et moyenne annuelle des pluies à Crato sur la période 1974 - 2016	60
Figure 1.21. Totaux annuels et moyenne annuelle des précipitations à Barbalha sur la période 1973-2014	60
Figure 1.22. Distribution des moyennes pluviométriques mensuelles à Crato sur le période 1974-2016	61
Figure 1.23. Précipitations mensuelles moyennes, maximales et minimales à Barbalha, sur la période 1973-2014	62

Figure 1.24. Diagramme ombrothermique de la station de Barbalha, 1974-2015	63
Figure 1.25. Bilan hydrique de la station de Barbalha, selon la méthode de Thorntwaite & Mather (1955)	65
Figure 1. 26. Parties amont du Rio Granjeiro, Crato	68
Figure 1.27. Evolution urbaine de Crato, jusque dans les années 1980	70
Figure 1.28. Plan du centre ville de Crato, date non précisée (probablement vers les années 1950)	72
Figure 1.29. Crato et sa périphérie rurale en 2017	73
Figure 1.30. Usage et occupation des sols dans le bassin-versant du Rio Granjeiro	74
Figure 1.31. Lotissements, clubs et <i>condomínios fechados</i> au pied de la Chapada do Araripe, à Crato	75
Figure 1.32. La chapelle Saint Antoine à Barbalha	76
Figure 1.33. Les quartiers de Barbalha	77
Figure 2.1. Précipitations journalières de janvier à mai 2011	83
Figure 2.2. Séquence de développement des systèmes nuageux et orageux dans la nuit du 27 au 28 janvier 2011	84
Figure 2.3. Précipitations journalières de décembre 2010 et janvier 2011	85
Figure 2.4. L'inondation du 28 janvier 2011 à Crato	87
Figure 2.5. Carte du centre-ville de Crato et des zones affectées par la crue du 28 janvier 2011	88
Figure 2.6. Extrait de la carte topographique au 1/10 000 de Crato	89
Figure 2.7. Le « canal » du Rio Granjeiro : géométrie et défauts d'entretien	90
Figure 2.8. Le canal du Rio Granjeiro après la crue du 28 janvier 2011	91
Figure 2.9. Lits fluviaux « naturels » sur le piémont NE de la Chapada do Araripe	95
Figure 2.10. Écoulements de fin de crue et embâcles dans le Rio Granjeiro	95
Figure 2.11. Le Rio Granjeiro à l'amont du canal	97
Figure 2.12. Histogramme des totaux annuels de précipitations à la station de Crato dans la période 1980-2017	99
Figure 2.13. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2004.....	101
Figure 2.14. Destruction partielle de maisons dans le quartier Batateira (Crato) lors des pluies de février 2004	102
Figure 2.15. Inondation de Crato, le 16 février 2004	103
Figure 2.16. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2008	103
Figure 2.17. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2014	105
Figure 2.18. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2015	105
Figure 2.19. Réparation de dégâts causés par le débordement du canal du Rio Granjeiro en	

avril 2015	106
Figure 2.20. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2016	106
Figure 2.21. Histogramme des totaux annuels de précipitations à la station de Barbalha dans la période 1980-2017	107
Figure 2.22. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2004 ...	109
Figure 2.23. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2007 ...	110
Figure 2.24. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2008 ...	110
Figure 2.25. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2009 ...	111
Figure 2.26. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2011 ...	112
Figure 2.27. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2015 ...	112
Figure 3.1. Mouvements de masse de petite taille dans l'escarpement de la Chapada do Araripe	116
Figure 3.2. Carte d'érodabilité des formations superficielles et cicatrices d'érosion dans le bassin-versant du Rio Granjeiro	117
Figure 3.3. Carte de susceptibilité aux processus d'érosion superficielle dans le bassin-versant du Rio Granjeiro	118
Figure 3.4. Morphologie de la base de l'escarpement gréseux de la Chapada do Araripe	119
Figure 3.5. Ravinements et <i>voçorocas</i> à Crato	120
Figure 3.6. Parois actives dans l'escarpement gréseux de la Chapada do Araripe	121
Figure 3.7. La tête de la <i>voçoraca</i> du quartier Seminário en mars 1999	122
Figure 3.8. <i>Voçorocas</i> du quartier Tupinambá à Barbalha	123
Figure 3.9. Topographie, formes et dépôts liés aux grands processus morphodynamiques dans la region de Crato-Barbalha	124
Figure 3.10. Glissements rotationnels (<i>slumps</i>) dans l'escarpement gréseux de la Chapada do Araripe	127
Figure 3.11. Glissements en translation dans l'escarpement NE de la Chapada do Araripe au S et au SE de Barbalha	129
Figure 3.12. Profils géologiques dans quelques grands glissements rotationnels de la region de Crato - Barbalha	130
Figure 3.13. Le tablier de débris aval du glissement de Carretão (Crato)	131
Figure 3.14. La nappe de cailloutis et les blocs de Muriti (Crato)	132
Figure 3.15. Grands blocs basculés de grès Exu sur le flanc nord d'une reculée ouverte dans l'extrémité ouest de la Chapada do Araripe	133
Figure 3.16. Morphologie superficielle et dépôts de coulées de débris dans la région de Crato-Barbalha	135
Figure 3.17. Coulées de débris multiphasées	136

Figure 3.18. Sédiments des coulées de débris : coupe naturelle dans la coulée inférieure du Rio Salamanca	137
Figure 3.19. Modelés superficiels chaotiques pouvant indiquer des mouvements de terrain récentes	139
Figure 3.20. Indices d’ancienneté de dépôts et formes de mouvements de masse	139
Figure 4.1. Rio da Batateira et <i>Pedra da Batateira</i>	147
Figure 4.2. Dommages causés à Crato par la crue du 28 janvier 2011	149
Figure 4.3. Barbalha. Image Google Earth, 2009	151
Figure 4.4. Histogramme des tranches d’âge des personnes interrogées à Crato	152
Figure 4.5. Histogramme de fréquence des réponses sur les types d’événements naturels subis depuis 2004	153
Figure 4.6. Le chenal bétonné du Riacho do Ouro, Barbalha, en août 2011	158
Figure 4.7. Le « canal » du Rio Granjeiro en reconstruction	163
Figure 4.8. Réparations du canal du Rio Granjeiro après la crue du 28 janvier 2011	166
Figure 4.9. Plan de requalification urbaine de Crato (2009)	168
Figure 5.1. Cartographie des aires inondables du bassin-versant du Rio Granjeiro pour une période de retour de 20 ans	173
Figure 5.2. La zone inondable du centre-ville de Crato en cas de crue centennale du Rio Granjeiro selon la modélisation de Cabral <i>et al</i> (2016)	174
Figure 5.3. Plaine alluviale (en bleu clair) et zones de risques géomorphologiques dans la zone urbaine de Barbalha	176
Figure 5.4. Défrichements, ruissellements et ravinements dans le haut bassin-versant du Rio Granjeiro, Crato	177
Figure 5.5. Le quartier Santo André à Barbalha	178
Figure 5.6. Ruissellement concentré et ravinement	179
Figure 5.7. Voirie, collecte des eaux de pluie et concentration des eaux de surface	180
Figure 5.8. Mouvements de terrain effectifs ou possibles en zones artificialisées	181
Figure 5.9. Fronts de grands glissements de terrain rotationnels	182
Figure 5.10. Occupation des sols dans la zone urbaine de Crato	184
Figure 5.11. Le quartier Centre de Crato	185
Figure 5.12. Le centre-ville de Crato et ses enjeux	186
Figure 5.13. Le quartier Lameiro à Crato	186
Figure 5.14. Dégradations de voirie aux abords du pont de Lameiro (Crato)	187
Figure 5.15. Le quartier Misericórdia à Crato	187
Figure 5.16. Le quartier Pimenta à Crato	188
Figure 5.17. Vulnérabilité des abords du canal du Rio Granjeiro dans les quartiers Pimenta et	

Seminário : destructions consécutives à la crue du 28 janvier 2011	189
Figure 5.18. Le quartier Seminário à Crato	189
Figure 5.19. Le quartier Sossego à Crato	190
Figure 5.20. Le quartier Granjeiro à Crato	191
Figure 5.21. Le hameau (distrito) de Belmonte à Crato	191
Figure 5.22. Le centre ville de Barbalha	192
Figure 5.23. Essai de délimitation des zones de risques naturels dans la zone urbaine de Crato et ses environs immédiats	196
Figure 5.24. Cartographie des secteurs de risques d'inondation (en rouge) dans les quartiers centraux de Crato	197
Figure 5.25. Essai de cartographie des secteurs de risques d'inondation dans les quartiers centraux de Barbalha	198
Figure 5.26. Les parties amont du bassin-versant du Riacho Seco, Barbalha	199
Figure 5.27. Grands lotissements en cours et zones imperméabilisées dans les parties amont du bassin-versant du Riacho Constantino (Crato)	200
Figure 5.28. Schéma représentant la procédure de déclaration de catastrophe naturelle au Brésil	203
Figure 5.29. Profil transversal du chenal du Rio Granjeiro immédiatement à l'amont de l'entrée du chenal bétonné	206
Figure 5.30. Le canal du Rio Granjeiro et sa reconstruction après la crue de janvier 2011.....	207
Figure 5.31. Reconstruction du chenal bétonné du Rio Granjeiro aux abords du Collège Objetivo	207
Figure 5.32. Profils transversaux du chenal bétonné du Rio Granjeiro et leur localisation	209
Figure 5.33. Travaux d'aménagement de la <i>voçoroca</i> du quartier Seminário en août 2014	210
Figure 5.34. Les aménagements de la <i>voçoroca</i> du quartier Seminário en janvier 2016	211
Figure 6.1. Carte politique du Brésil	217
Figure 6.2. Distribution des catastrophes naturelles (tous types confondus) enregistrées par la Défense Civile Nationale sur la période 1991-2012	217
Figure 6.3. Typologie et distribution régionale des catastrophes naturelles au Brésil	218
Figure 6.4. Carte pluviométrique du Brésil	219
Figure 6.5. Carte du relief du Brésil	220
Figure 6.6. Reliefs du Grand escarpement du sud-est et du sud du Brésil	221
Figure 6.7. Nombre de personnes affectées par les différents types de catastrophes naturelles au Brésil sur la période 1991-2012	222
Figure 6.8. Nombre et pourcentage de communes atteintes par des catastrophes naturelles en 2013 dans les différentes régions du Brésil	222

Figure 6.9. Pourcentage de communes atteintes par les différents types de catastrophes naturelles au Brésil en 2013	223
Figure 6.10. La presse couvre les catastrophes de novembre 2008	224
Figure 6.11. Centre ville de Itajaí et glissement de terrain à Blumenau (SC) en novembre 2008	225
Figure 6.12. Mouvements de terrain (coulée de boue, glissement de terrain) et inondations dans le Vale do Itajaí, Santa Catarina	226
Figure 6.13. Crue et inondations dans le Vale do Itajaí, Santa Catarina, septembre 2011	227
Figure 6.14. Nova Friburgo, Serra do Mar, État de Rio de Janeiro : Campo do Coelho, glissement de terrain survenu en juin 2011	228
Figure 6.15. Glissements de terrain catastrophiques à Angra dos Reis, RJ, janvier 2010	230
Figure 6.16. Entonnoir (cicatrice de glissement) et langue de débris formés à Niterói après des glissements provoqués par les pluies d’avril 2010	231
Figure 6.17. Image satellite à haute résolution de Nova Friburgo	232
Figure 6.18. Photo aérienne de Nova Friburgo après les pluies de janvier 2011: coulées de boue et de débris dans un quartier d’habitation	232
Figure 6.19. Nova Friburgo. Dômes rocheux, constructions concentrées dans une vallée resserrée et sur les bases de versants	233
Figure 6.20. Catastrophes à Rio de Janeiro et nombre de victimes mortes en 2008, 2010 (janvier et avril) et janvier 2011	234
Figure 6.21. Incendie de forêt dans la région centre-ouest du Brésil	235
Figure 6.22. Quartiers et secteurs de risques à Manaus (palafites sujets à inondations et occupation de talus affectés par des glissements de terrain)	236
Figure 6.23. Inondations brusques dans le État d’Alagoas, Villes de Santana do Mundaú et Branquinha, 2010	238
Figures 6.24. Inondations dans l’État du Pernambuco en 2010	239
Figure 6.25. Évolution du nombre de catastrophes naturelles au Brésil sur la période 1990-2012	241
Figure 6.26. Évolution des types de catastrophes naturelles sur les décennies 1990 et 2000 ...	241
Figure 6.27. Couverture de la revue <i>Veja</i> sur les événements de 2010 et 2011	245
Figure 6.28. Couverture des revues <i>Isto é</i> et <i>Epoca</i> 2011	245
Figure 6.29. Relatório de danos, materiais e prejuízos decorrentes dos desastres naturais no Brasil (1995-2014)	253
Figure 6.30. Communes surveillées par le CEMADEN dans le Nordeste brésilien	258
Figure 6.31. Plateforme de collecte de données hydrologiques (pluviométrie, hauteur d’eau, débit) installée en 2014 sur le Canal do Rio Granjeiro, Crato	259

Figure 7.1. Un épisode méditerranéen rapporté par la presse à destination du grand public : octobre 2016	266
Figure 7.2. Isohyètes maxima du 15 juin 2010 en Provence	267
Figure 7.3. Carte du bassin-versant de l'Argens	269
Figure 7.4. Carte du sous-bassin versant de la Nartuby	270
Figure 7.5. Le cadre géographique du bassin-versant de la Nartuby et des villes de Draguignan et Trans-en-Provence, vue perspective	271
Figure 7.6. La Nartuby à Trans-en-Provence	272
Figure 7.7. Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Argens	273
Figure 7.8. Extrait de la carte IGN à 1/100 000 n° 165, secteur de Draguignan et vallée de la Nartuby	274
Figure 7.9. La ville de Draguignan et la Nartuby	277
Figure 7.10. La crue du 15 juin 2010 à Draguignan	278
Figure 7.11. Trans-en-Provence et la Nartuby, vue oblique	279
Figure 7.12. Destruction partielle de la route D 955 dans la gorge de Châteaudouble à la suite de la crue de la Nartuby du 15 juin 2010	281
Figure 7.13. L'agglomération de Draguignan en 2004 et en 2017	283
Figure 7.14. Cartographie des unités hydrogéomorphologiques	288
Figure 7.15. Modélisation hydraulique de la Nartuby entre Rebouillon et Trans-en-Provence.	289
Figure 7.16. Schéma de déplacement des personnes dans l'eau	290
Figure 7.17. Grille de lecture des aléas inondation	291
Figure 7.18. Carte de l'aléa crue de référence, Commune de Draguignan	293
Figure 7.19. Carte des hauteurs d'eau, crue de juin 2010. Commune de Draguignan	294
Figure 7.20. Carte des vitesses d'écoulement, crue de juin 2010. Commune de Draguignan ...	295
Figure 7.21. Carte du zonage réglementaire, crue référence. Commune de Draguignan	296

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Bilan hydrique de la station de Crato	63
Tableau 1.2. Bilan hydrique de la station de Barbalha	64
Tableau 1.3. Bassins-versants représentatifs et stations de jaugeage dans le Cariri (1963 - 1966)	66
Tableau 1.4. Caractéristiques des crues dans les bassins-versants du bassin sédimentaire Araripe. Crues annuelles	66
Tableau 1.5. Caractéristiques des crues dans les bassins-versants du bassin sédimentaire Araripe. Crues décennales	67
Tableau 1.6. Lames d'eau écoulées annuellement et modules dans les bassins-versants du bassin sédimentaire Araripe	67
Tableau 2.1. Événements pluviométriques supérieurs à 100 mm, station de Crato (1980-2017)	100
Tableau 2.2. Événements pluviométriques supérieurs à 100 mm, station de Barbalha (1980-2017)	108
Tableau 3.1. Typologie des grands mouvements de masse identifiés dans le secteur Crato-Barbalha	126
Tableau 4.1. Événements pluvieux et crues du Rio Grangeiro, 2002-2012	165
Tableau 6.1. Corrélation temporelle des données climatologiques et des épisodes hydrométéorologiques survenus à Crato sur la période 1976-2016	243
Tableau 6.2 Arrêtés de reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique émis par région pour la période 2003-2010	248
Tableau 6.3. Arrêtés de Reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique émis par région sur la période 2011-2014	248
Tableau 6.4. Types d'événements catastrophiques par région (janvier à juin 2010)	250
Tableau 6.5. Types de catastrophes naturelles les plus fréquentes par État (janvier-juin 2010)	251
Tableau 6.6. Dépenses pour les programmes de prévention, de préparation et de réponse aux catastrophes naturelles dans la période 2006 – 2011	252
Tableau 6.7. Communes de la région Nordeste dotées de plans de prévention des risques.....	262

LISTE DES ACRONYMES UTILISÉS

Général

ENSO : El Niño Southern Oscillation
IDA : International Development Association
PIB : Produit Intérieur Brut
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ZCAS : Zone de Convergence de l'Atlantique Sud
ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

Brésil

AABEC : Associação Atlética Banco do Estado do Ceará
ABIN : Agência Brasileira de Inteligência
ANA : Agência Nacional de Águas
APA : Área de Proteção Ambiental
AVADAN : AVALiação de DANos
CAGECE : Companhia de Água e Esgoto do Estado Ceará
CEDEC : Coordenadoria Estadual de Defesa Civil
CEMADEN : Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CENAD : Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CENSIPAM : Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
CEPED - UFSC : Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil - Universidade Federal de Santa Catarina
CNM : Confederação Nacional de Municípios
COGERH : Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Ceará
COMDECs : Coordenadoria Municipal de Defesa Civil
CONAMA : Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONPDEC : Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil
CPDC : Cartão de Pagamento de Defesa Civil

CPRM : Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC : Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRAJUBAR : Conurbação Crato - Juazeiro do Norte - Barbalha
DETR : Departamento de Estradas e Rodagem
DEGEO: Departamento de Geociências
DNOCS : Departamento Nacional de Obras contra as Secas
ECP : Estado de Calamidade Pública
EMBRAPA : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FLONA : Floresta Nacional do Araripe
FUNCEME : Fundação Cearense de Meteorologia
FUNDETEC : Fundação de Desenvolvimento Tecnológico do Cariri
FUNCAP : Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GADE : Grupo de Apoio a Desastres
GIDES (Projeto) : Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais
IBAMA : Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE : Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET : Instituto Nacional de Meteorologia
INPE : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPECE (ex-IPLANCE) : Instituto de Pesquisas e Estratégias Econômicas do Ceará/Instituto de Planejamento do Ceará
LAGEO : Laboratório de Análise Geoambiental
MCTI : Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MI : Ministério da Integração Nacional
NOPRED : Notificação Preliminar de Desastres
PAC : Programa de Aceleração do Crescimento
PCDHidro : Plataforma de Coleta de Dados Hidrológicos
PDM : Plano Diretor Municipal
PMRR : Plano Municipal de Redução de Riscos
PNGRD : Plano Nacional de Gestão de Riscos e de Resposta as Catástrofes
PNPDEC : Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
PROURB : Programa de Urbanização
PRU : Plano de Requalificação Urbana
PNPDEC : Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
REDECs : Coordenadorias Regionais de Defesa Civil
SE : Situação de Emergência
SEDC : Sistema Estadual de Defesa Civil

SEPED : Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento

SIH : Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica

SINDEC : Sistema Nacional de Defesa Civil

SINDEP : Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil

SINPDEC : Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil

SUDENE-ASMIC : Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

SUS : Sistema Único de Saúde

S2ID : Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

UFCA : Universidade Federal do Cariri

URCA : Universidade Regional do Cariri

France

AZU : Autres Zones Urbanisées

CEMAGREF : CEntre national du MAchinisme agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CUD : Centre Urbain Dense

DREAL - ex-DIREN : *Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement - ex Direction Régionale de l'Environnement*

GEMAPI (loi) : GEstion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations

IGN : Institut Géographique National

PAPI : Programmes d'Actions de Prévention des Inondations

PGRI : Plan de Gestion du Risque d'Inondation

PPRI : Plan de Prévention des Risques d'Inondation

SCHAPI : Service Central d'Hydrométrie et d'Appui à la Prévision des Inondations

SDIC : Service Départemental d'Incendie et de Secours

SIAN : Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Nartuby

SNGRI : Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation

ZERMOS : Zones Exposées aux Risques de MOuvement du Sol et du sous-sol

ZPPU : Zones Peu ou Pas urbanisées

INTRODUCTION GENERALE

La question des risques naturels revient périodiquement et même de plus en plus souvent dans l'actualité, en particulier dans les pays du Sud. En témoignent, par exemple, les terribles bilans de phénomènes dévastateurs et meurtriers récents comme l'ouragan Irma qui a durement touché les îles de Saint Martin et Saint Barthélemy le 6 septembre 2017 (15 morts, 1,9 milliard d'euros de dégâts), ou encore la mousson particulièrement pluvieuse qui a provoqué des inondations record faisant plus de 750 victimes en Inde, au Népal et au Bangladesh en août 2018. Il semble bien, selon de nombreux travaux, que les risques pesant sur les régions habitées du globe et en particulier les pays du Sud se soient accrus dans les dernières décennies, que ce soit lié au changement climatique (Goudie, 2010 ; Debortoli *et al.*, 2017) ou à l'augmentation de la violence des phénomènes météorologiques (pour s'en tenir à cette catégorie de phénomènes). Cependant, la gravité accrue des conséquences d'autres types de catastrophes ou de désastres (Pigeon et Rebotier, 2016) sans rapport avec l'évolution du climat (séismes, tsunamis...) montre, d'une manière générale, le rôle essentiel de l'augmentation de la vulnérabilité des populations et des biens, liée à une forte croissance démographique ou à l'absence généralisée de planification urbaine et environnementale (Costa et Dantas, 2009 ; Bétard et Fort, 2014). Bien que les aléas naturels y soient assez comparables en nombre, en types et en intensité, la perception et la gestion des risques, parfois teintées de fatalisme, y sont plus ou moins différentes de celles qui caractérisent la plupart des pays du Nord. En effet, bien que ce soit avec des degrés de volonté et des succès variables d'un cas à l'autre, ceux-ci ont mis en place depuis quelques décennies des politiques d'aménagement et des programmes visant à la prévision, la protection et la prévention des risques naturels (Léone *et al.*, 2010).

C'est incontestablement en matière de vulnérabilité, en particulier d'ordre social, que se creuse la différence entre les deux groupes de pays, comme le montre la mesure de l'impact des catastrophes naturelles en termes de pertes de PIB et de décès ; en effet, selon l'Association Internationale du Développement (IDA), sur la période 1991-2005, 95% des personnes touchées par les catastrophes naturelles dans le monde vivaient dans des pays en développement, où étaient également enregistrés 9/10 des décès dus à ces causes (Bétard et Fort, 2014). Il serait cependant excessif de ranger tous les pays du Sud dans la même catégorie, dans la mesure où ils incluent – entre autres – des pays émergents où des politiques et programmes de prévision et de prévention des risques ont commencé à se mettre en place, généralement à des dates récentes qui ne laissent pas encore beaucoup de recul pour en apprécier l'efficacité. C'est le cas du Brésil, où les graves inondations et glissements de terrain

survenus en 2008, 2009 et 2011 dans l'État de Santa Catarina, et en janvier 2011 dans l'État de Rio de Janeiro, certaines des pires catastrophes naturelles de l'histoire du pays, ont accéléré la prise de conscience de l'acuité du problème et la construction d'un arsenal législatif, réglementaire et opérationnel adapté. Au sein de ce type de dispositifs, en particulier dans les volets cartographie et prévention, l'apport des géographes est essentiel (Bétard *et al*, 2014), et c'est ce que se propose de montrer notre thèse, avant tout fondée sur une approche géographique de la question des risques naturels. Cette étude nous a semblé tout naturellement devoir porter principalement sur la région du Cariri, dans le sud de l'État du Ceará, dans la suite de nos travaux personnels de « *mestrado* » sur le Rio da Batateira (Magalhães, 2006), issu d'une des montagnes humides (*brejos de altitude*) qui s'élèvent au-dessus des dépressions semi-arides du *sertão* Nordestin, la Chapada do Araripe (Bétard, 2007). Cette région, et en particulier la ville de Crato, siège de l'Université Régionale du Cariri (URCA), venait alors, peu avant le choix de notre sujet de thèse, d'être le théâtre d'une des plus violentes crues-éclair qui en inondent périodiquement les bas quartiers.

C'est une approche géographique comparative qui était initialement prévue pour constituer le cœur de ce travail, avec comme idée de départ la recherche des enseignements à tirer de l'expérience française en matière de traitement et de prévention des risques naturels et des possibilités de les transposer dans le cadre brésilien. En fait, il est apparu en cours d'élaboration de la thèse que l'ampleur de la recherche à mener du côté brésilien était telle, avec ses nombreuses voies nouvelles d'investigation, qu'elle justifiait une réorientation vers une approche plus centrée sur la principale région d'étude. Ceci d'autant plus que c'est pendant la même période, et suite à de grandes catastrophes survenues au même moment, que le Brésil a commencé à se doter d'une législation spécifique et d'organismes dédiés au traitement de cette question, à l'échelle nationale comme sur le terrain. Il convenait donc de prendre en compte ce nouveau contexte de façon approfondie.

Le choix des deux principaux sites étudiés au Brésil et en France – la commune de Crato mais aussi celle de Barbalha, dans la région du Cariri (Ceará), et la région de Draguignan, en Provence – s'était fait en fonction de la survenue alors récente (2010-2011) de catastrophes liées à des inondations brusques, malgré l'ampleur inégale de ces événements. Elles ont touché dans les deux cas des villes moyennes partiellement construites en fond de vallée à proximité de hauts plateaux d'où dévalent des cours d'eau encaissés et pentus au régime irrégulier, susceptibles de connaître des crues éclair alimentées par des pluies d'autant plus intenses qu'elles sont renforcées par des effets orographiques. Malgré la révision partielle des objectifs de notre travail, il a paru utile de conserver la comparaison, même plus limitée que ce qui était prévu, car elle montre dans les deux cas une forte réactivité des différents acteurs face à la gravité croissante du problème des risques naturels, et aussi des différences de stratégie dont il convient de chercher les facteurs. Une approche nécessaire avant d'envisager toute transposition d'un pays à l'autre, et qui pourrait d'ailleurs se faire dans les deux sens.

Les objectifs de la thèse ont donc évolué, incluant une définition plus étendue des aléas et des risques naturels (Veyret, 2007 ; Rebelo, 2010) auxquels la région d'étude brésilienne est exposée (des

inondations brusques, mais aussi des mouvements de terrain de plus ou moins grande ampleur), une étude de la façon dont ces risques sont subis, perçus et traités par la population et les acteurs locaux, et une analyse de la prise en compte des contextes nationaux, géographiques, juridiques et réglementaires dans lesquels cette question est abordée. C'est d'ailleurs à ce niveau que la comparaison avec le cas français devient la plus significative et que l'on peut passer de la recherche fondamentale - notre approche initiale - à un travail plus applicable.

La construction de la thèse reflète cette approche essentiellement géographique et la méthodologie mise en œuvre. Cette dernière repose avant tout sur un travail de terrain mené sur plusieurs années, de 2008 à 2015 (reconnaissance et cartographie des modelés et des dépôts liés aux différents phénomènes étudiés, ainsi que des lieux des catastrophes retenues en exemple ; étude sur place des aménagements et des modes d'occupation des sols ; enquêtes par questionnaire et collecte de témoignages auprès des populations concernées et des acteurs...). Mais ce travail, original par rapport à des pratiques universitaires locales où le terrain intervient souvent en second lieu, a été préparé et complété à l'aide de la collecte des documents disponibles (bases cartographiques : des cartes topographiques et thématiques pour la plupart disparates du côté brésilien, d'échelles variées et de qualité inégale ; photographies aériennes, images satellitaires – en particulier Google Earth –, données météorologiques et hydrologiques, bibliographie, articles de journaux, vidéos, textes législatifs, légendes écrites ou orales...). Des traitements statistiques et cartographiques simples permettent d'affiner l'interprétation des résultats et d'obtenir des documents (cartographie des aléas et des zones de risque) pouvant servir de base à l'évaluation des mesures de prévention déjà prises et à la mise en place d'une politique de prévention plus adaptée.

De manière classique, le plan suivi comporte tout d'abord une analyse des facteurs géographiques physiques et humains qui conditionnent les types d'aléas et les enjeux caractérisant la région d'étude, essentiellement les communes de Crato et de Barbalha et les bassins-versants des cours d'eau qui en traversent les secteurs les plus densément urbanisés (Rio Grangeiro, Riacho do Ouro ; Partie 1, chapitre 1). Reposant initialement sur une étude de terrain multidisciplinaire entreprise dans le cadre d'un travail de « Mestrado » (master) sur un autre cours d'eau de la commune de Crato (Magalhães, 2006), prolongée sur plusieurs années et complétée par de nombreuses données bibliographiques et iconographiques, cette analyse s'est accompagnée de la collecte de renseignements sur les événements survenus pendant la recherche (en particulier la crue éclair du 28 janvier 2011 à Crato) et antérieurement, auprès des acteurs locaux ou de la presse (chapitre 2). Pour sa part, le chapitre 3 apporte des éclairages nouveaux sur les aléas liés aux mouvements de terrain, certainement sous-estimés jusque là.

La perception et la gestion des risques (Partie 2) sont tout d'abord abordées au moyen d'une enquête menée auprès des populations riveraines des cours d'eau identifiés comme dangereux, sur le thème de la perception des risques (chapitre 4). Une partie des données compilées est retranscrite sous forme de cartes dans un essai de zonage des aléas, des enjeux et des risques dans les deux communes

choisies au sein de la région étudiée. Les autres thématiques (gestion de crise, réponses techniques, prévention des risques) font l'objet d'un exposé critique à l'échelle locale, conçu à partir d'observations originales ainsi que de l'examen des textes réglementaires et des rapports techniques sur les mesures de prévention consécutives aux événements analysés (chapitre 5).

L'élargissement de l'étude et la discussion effectués dans la Partie 3 comportent tout d'abord une revue des catastrophes naturelles et des risques concernant l'ensemble du Brésil et des mesures prises pour les recenser, les prévoir, les prévenir et les traiter à l'échelle fédérale et à des niveaux plus locaux (chapitre 6). Ce qui, en retour, permet de mieux comprendre les conditions et les difficultés que connaît leur mise en œuvre dans la région d'étude, et fournit aussi un substrat pour la brève étude comparative menée dans le chapitre 7. En effet, celle-ci porte principalement sur la façon dont les catastrophes naturelles sont traitées en France, à travers l'exemple de la crue du 15 juin 2010 dans le Var, et elle est surtout basée, comme dans la partie « brésilienne » de la thèse, sur une analyse des effets de cette crue et des mesures prises par la suite (Plan de Prévention des Risques d'Inondation, en particulier). Bien qu'une brève étude de terrain ait pu être menée à Draguignan, permettant de visualiser les lieux de cette catastrophe et de collecter des informations auprès des services locaux, cette analyse est surtout restée d'ordre bibliographique. Les données obtenues n'en sont pas moins utiles à une mise en perspective des expériences menées des deux côtés de l'Atlantique, tenant compte des spécificités de chaque pays et de chaque modèle socio-économique et politico-juridique, sans quoi toute tentative de transposition de mesures autres que purement techniques pourrait s'avérer vaine ou illusoire.

Première partie : La Chapada do Araripe et son piémont nord : des aléas naturels d'exception dans l'intérieur semi-aride du Nordeste brésilien

Introduction de la Première Partie

L'État du Ceará, dans le Nordeste brésilien, présente une mosaïque complexe de paysages, du littoral subhumide jusqu'aux plaines et aux montagnes du sertão semi-aride. Au sud de l'État, dans la région du Cariri, la partie orientale du haut plateau appelé Chapada do Araripe forme un îlot humide et forestier contrastant avec la sécheresse de la dépression et des plaines environnantes. Bénéficiant de ces conditions favorables, présentées dans le chapitre 1, la région métropolitaine du Cariri (CRAJUBAR) abrite une population en forte croissance sur le piémont NE de la Chapada. Les villes de Crato et de Barbalha (120.000 et 50.000 habitants) s'accroissent rapidement vers l'escarpement bordier de la Chapada, sans que les impacts sur le milieu naturel ni la plupart des risques encourus ne soient pris en compte dans la planification urbaine (Magalhães, 2014). En conséquence apparaissent des problèmes environnementaux préoccupants, liés aux impacts de cette occupation légale ou non de l'espace (déforestation, terrassements, exploitation anarchique des ressources hydriques, canalisation des cours d'eau, imperméabilisation des sols, pollution...) et aux risques encourus par la ville et ses habitants en relation avec le fonctionnement et les perturbations du milieu naturel.

Dans la littérature scientifique, on ne trouvait jusque récemment sur ces sujets que quelques travaux sur les crues et les mouvements de terrain de petite taille qui affectent les systèmes de glacis disséqués formant le site de Crato (Ribeiro et Guerra, 2003 ; Soares, 2006 ; Carvalho et Ribeiro, 2007 ; Silva *et al.*, 2017). Dans le haut escarpement gréseux qui les domine, seules étaient mentionnées des chutes de blocs, tandis qu'aucun grand mouvement de masse n'apparaît dans les documents historiques. Parmi les aléas naturels, seules les crues violentes qui se produisent périodiquement dans les deux villes ont reçu un traitement dans l'aménagement urbain, avec la canalisation des cours d'eau (Sousa *et al.*, 2006). L'analyse intégrée des aléas et risques associés qui est proposée dans les chapitres 2 et 3 est menée à plusieurs échelles d'espace et de temps et constitue une approche méthodologique nouvelle pour la région d'étude. La bibliographie traitant des crues, ravinements et mouvements de masse de petites dimensions est relativement abondante. Au contraire, les grands mouvements de masse sont restés ignorés jusqu'à ces dernières années, à cause des difficultés qui empêchent une identification précise des formes et des dépôts (couverture forestière, privatisation du sol, urbanisation, etc.). Dans le premier cas, les recherches scientifiques demeurent fragmentaires ou limitées aux échelles d'espace et de temps les plus petites. Dans le second cas, le manque de recul et de données historiques est aussi un obstacle, dans un contexte de temps de récurrence sans doute assez longs, la région n'ayant été colonisée qu'aux XVIIe et XVIIIe siècles.

Chapitre 1 : Présentation de la région d'étude

1.1. Introduction du chapitre 1

La Chapada do Araripe est un vaste plateau sédimentaire allongé E-O sur 120 km entre 39°00' et 40°50'W, et 7°05' et 7°39'S, à la frontière entre les États du Ceará et du Pernambuco (Fig. 1.1).

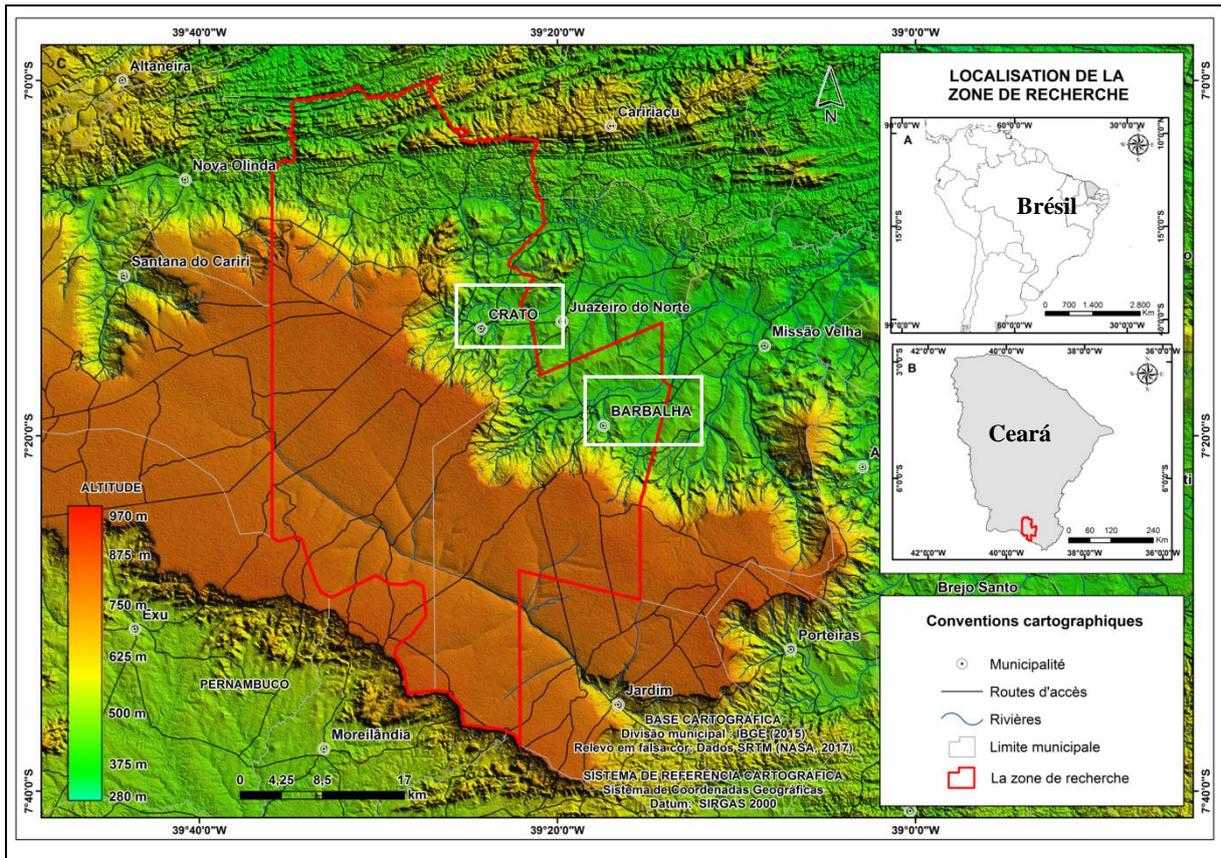


Figure 1.1. Localisation de la région étudiée avec les villes de Crato et Barbalha. (Elaboration : Carvalho Neta, M.L., 2019).

Avec des altitudes de 900 à 1002 m, la partie orientale de ce plateau domine la large dépression du Cariri par un escarpement spectaculaire de type cuesta. Couronné par une haute corniche gréseuse, cet escarpement profondément découpé fait face aux reliefs E-O du socle (Serra de São Pedro) qui se relèvent au nord de la dépression périphérique, formant les hautes terres du Ceará méridional. Les communes (*municípios*) de Crato et Barbalha s'étendent en majeure partie, ainsi que la ville de Juazeiro de Norte, dans la dépression, 500-600 m en contrebas de la crête de l'escarpement.

La bordure NE du plateau forme un des massifs humides (*brejos de altitude*) qui s'élèvent au-dessus des plaines semi-arides du *sertão* nordestin (Bétard, 2007 ; Fig. 1.2). Exposé aux alizés,

l'escarpement reçoit des précipitations élevées, de 1000 mm à 1200 mm par an ou plus en altitude, et porte une forêt sempervirente ou semi-décidue typique d'un environnement tropical sub-humide (Magalhães, 2006).

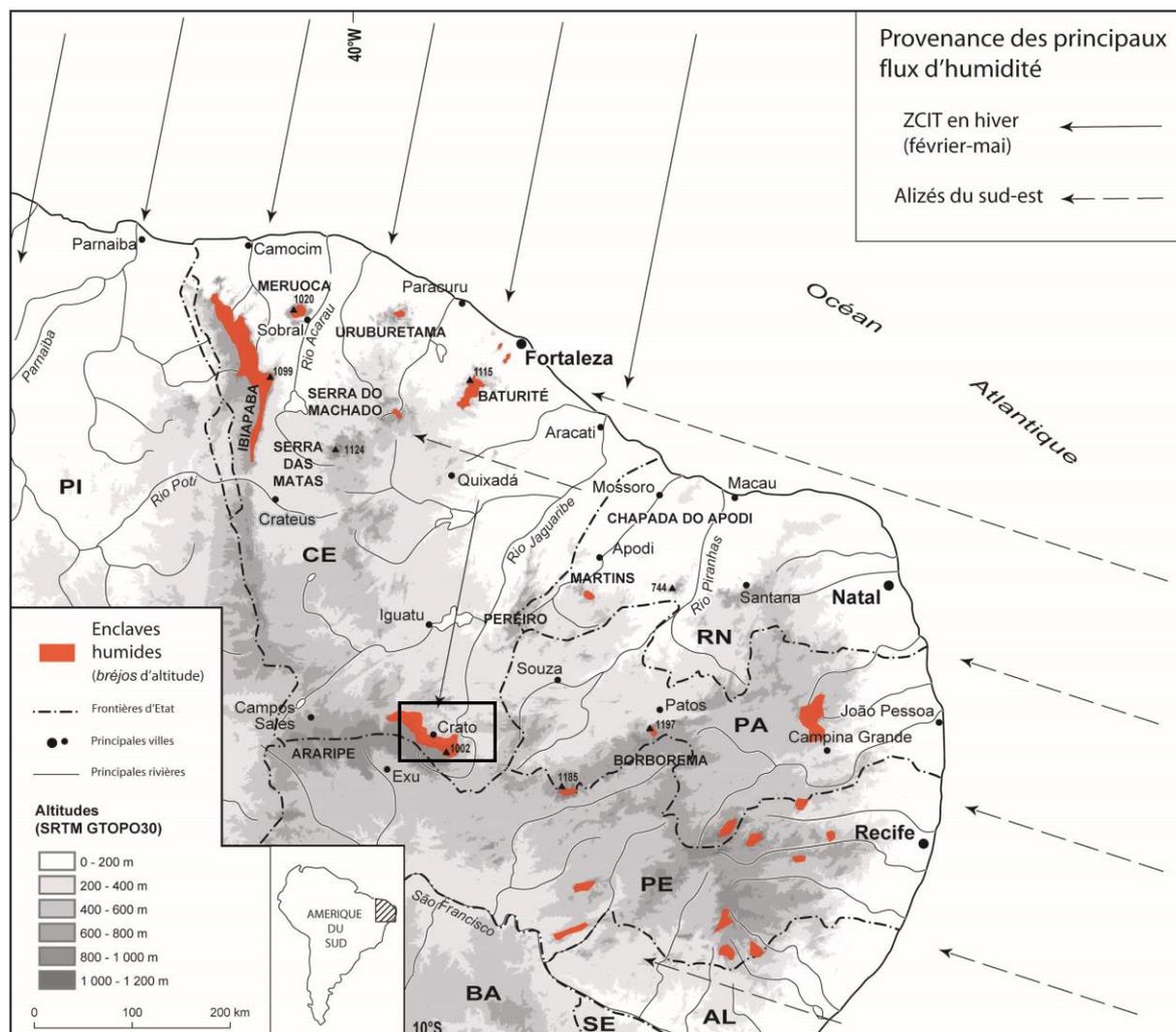


Figure 1.2. Les enclaves humides dans le nord du Nordeste brésilien (Bétard, 2007).

Occupé par les villes de Crato, Juazeiro do Norte et Barbalha, le fond de la dépression du Cariri s'étend à 400 m d'altitude et est drainé par un dense réseau hydrographique. Ses principaux cours d'eau, les rios Salamanca et Batateira, ainsi que leurs affluents, tous tributaires du Rio Salgado, lui-même affluent du Rio Jaguaribe (Fig. 1.3), naissent des nombreuses sources localisées à la base de la haute corniche gréseuse de la chapada. La plupart de ces rivières présentent des écoulements de type torrentiel dans leurs parties amont, avant de s'étaler dans les larges plaines alluviales situées à l'aval ; semi-permanentes à l'état naturel, elles sont sujettes à des crues fréquentes de type crue-éclair, à l'origine de risques d'inondation élevés dans les vallées urbanisées (Magalhães *et al.*, 2010). Comme

ce type de risque n'est probablement pas le seul à prendre en compte dans la région (Peulvast *et al.*, 2011), il apparaît nécessaire de présenter l'ensemble des données géographiques nécessaires à l'identification des aléas naturels et à l'appréciation de la vulnérabilité des populations, des infrastructures et des biens. C'est l'objectif de ce chapitre.

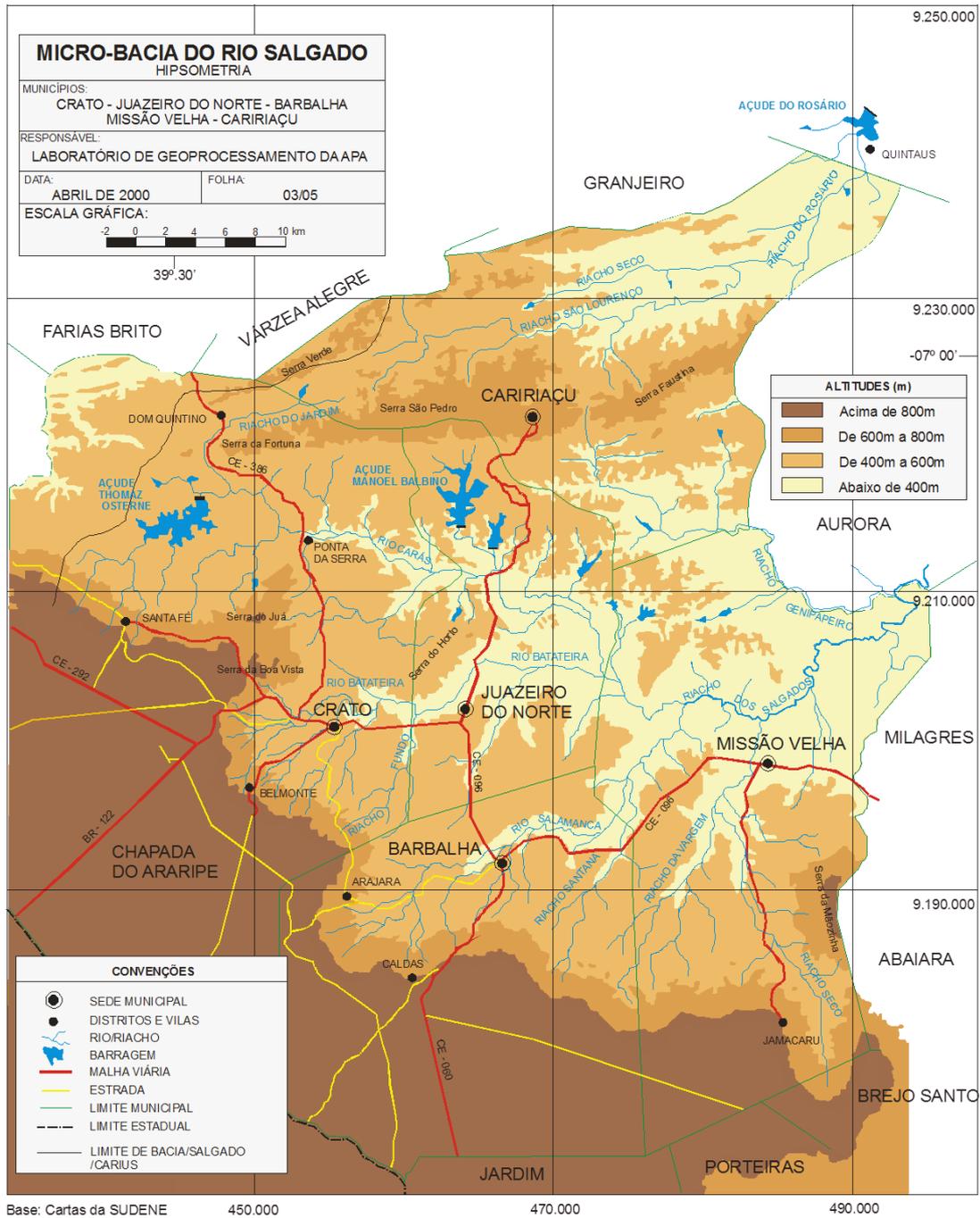


Figure 1.3. Carte topographique du bassin-versant du Rio Salgado. (Source : COGERH, 2007).

1.2. Configuration géographique : paysages, relief et hydrographie

1.2.1. Caractéristiques géomorphologiques et géologiques

1.2.1.1. Un haut plateau sédimentaire et son piémont

Sur 25 km de longueur, au SE d'un petit massif granitique adjacent à la *chapada* et partiellement coiffé de grès (Serra da Boa Vista), l'escarpement qui délimite la Chapada do Araripe dessine deux amphithéâtres adjacents de 8 à 10 km de diamètre chacun, ouverts au NE dans le plateau et séparés par un promontoire qui s'avance au sud de Crato (Fig. 1.4).

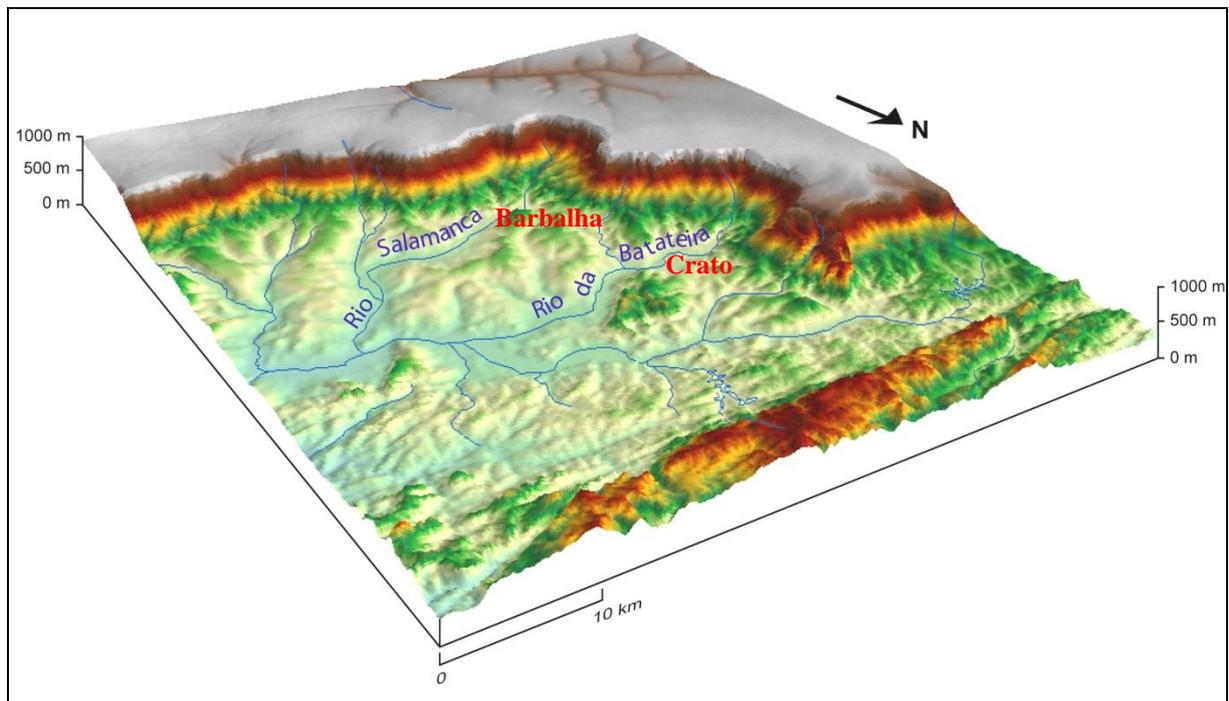


Figure 1.4. Bloc-diagramme des rentrants de Crato et Barbalha dans l'escarpement de la Chapada do Araripe. Traitement du MNT SRTM et visualisation 3D. (Elaboration : : F. Bétard., 2006)

Tantôt festonné par de profonds entonnoirs d'érosion (SO de Crato), tantôt régulièrement incurvé (S de Crato, SW de Barbalha : Macaúba, Caldas), cet abrupt couronné par une haute corniche se démultiplie localement en deux ou trois ressauts. Il s'élève de 300 m, par l'intermédiaire d'une concavité de raccord discontinue, au-dessus d'un large système de glacis étagés doucement inclinés vers le centre de la dépression sur 2 à 5 km (pente moyenne de 3,5%) et disséqués par des vallées pentues (>30 m/km) et peu profondes (40-60 m). Les versants et les promontoires qui délimitent les interfluves sont localement frangés par des terrasses étagées (Crato). Ces lanières de glacis sont prolongées, à l'est, devant le rentrant de Barbalha, par de larges interfluves plans qui atteignent leur développement maximum (4 à 8 km de longueur) au SO et au S de Juazeiro do Norte, entre 480 et 440

m d'altitude. Les plaines fluviales, généralement étroites, ne s'élargissent qu'à l'aval des dernières confluences, formant le fond de la dépression du Cariri (Rios Batateira et Salamanca : Fig. 1.3).

1.2.1.2. Dispositif morphostructural

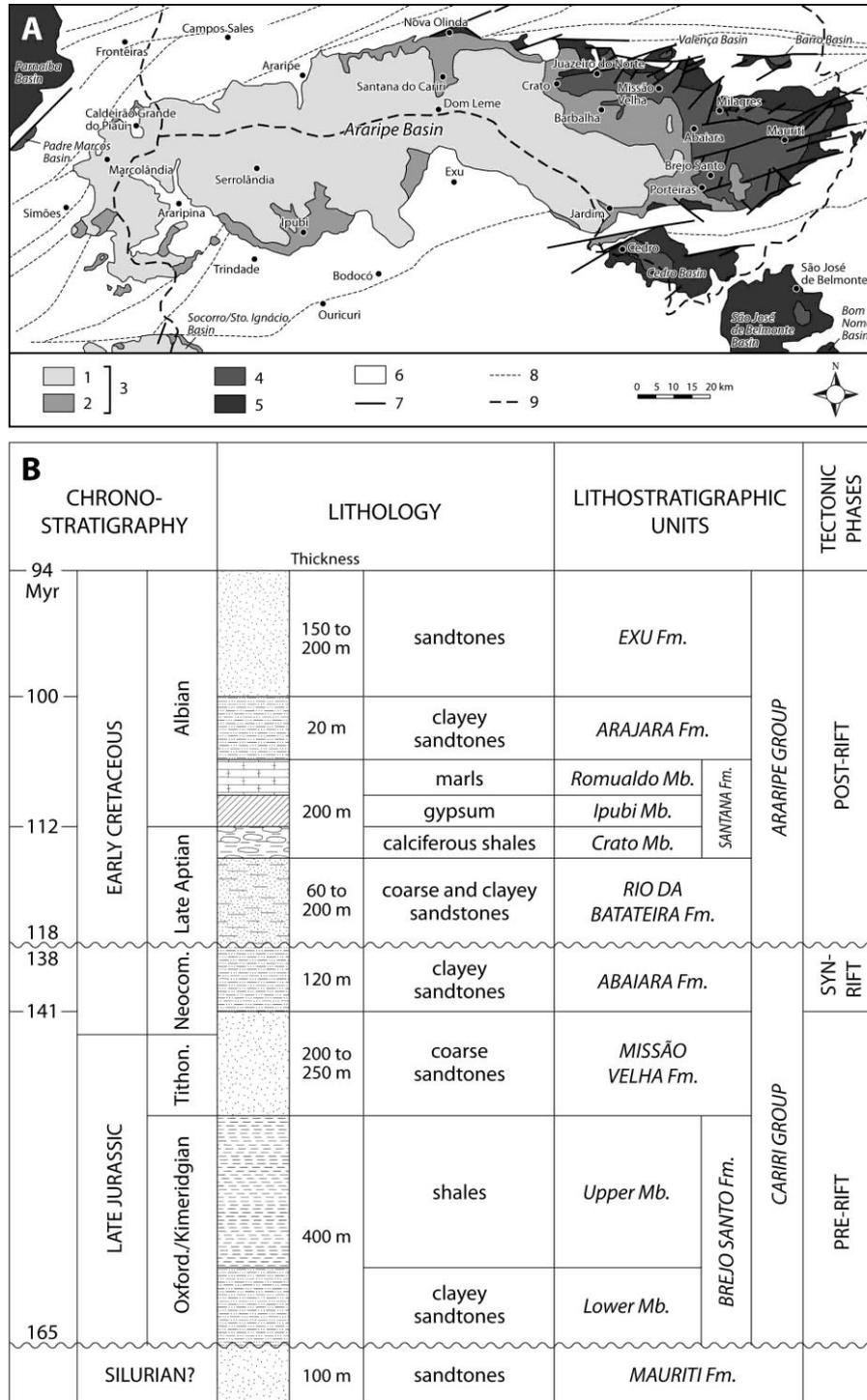


Figure 1.5. Carte géologique simplifiée et log stratigraphique du bassin Araripe. **A)** Carte modifiée d'après Ponte et Ponte Filho (1996), Assine (1994). Légende de la carte: 1: Formation Exu; 2: Formations Arajara, Santana, Rio da Batateira; 3: Groupe Araripe; 4: Groupe Cariri; 5: Formation Mauriti; 6: socle indifférencié; 7: faille; 8: linéament ; 9: frontière d'Etat. **B)** Log compilé d'après Ponte et Ponte Filho (1996), et Neumann (comm..orale, 2008) (traduction des termes géologiques: voir texte).

La région est façonnée dans les couches supérieures de la série mésozoïque qui occupe la partie orientale du bassin Araripe (Fig. 1.5). Les unités faillées du rift Cariri (Jurassique supérieur-Crétacé inférieur) y sont couvertes en discordance par les séries sédimentaires post-rift, exposées grâce à l'inversion de relief qui s'est produite depuis le Crétacé supérieur (Peulvast *et al.*, 2008 ; Peulvast et Bétard, 2015). Appelée Groupe Araripe (Ponte et Ponte Filho, 1996), cette série sub-horizontale est formée de sédiments fluviaux, lacustres, lagunaires et marins d'âge Aptien supérieur à Cénomaniens, regroupés dans les Formations Rio da Batateira, Santana, Arajara et Exu.

Cette pile sédimentaire comporte 250-280 m de roches tendres (Fig. 1.5 B) couvertes par des grès massifs et résistants (Formation Exu, 150-250 m) qui forment la corniche supérieure de l'escarpement. La concavité basale et les glacis disséqués sont respectivement sculptés dans les grès argileux de la Formation Arajara (20 à 80 m d'épaisseur) et dans les roches généralement peu résistantes des Formations Santana (80 à 180 m) et Batateira (60 à 200 m). Les bancs calcaires intercalés dans cette série (membre Crato de la Formation Santana, 20 à 70 m d'épaisseur) ressortent localement sous forme de replats ou de buttes (secteur de Macauba-Cabaceira, dans le rentrant de Barbalha), tandis que le sommet de la Formation Santana (membres Ipubi et Romualdo) renferme sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur des roches tendres et plastiques (gypse, argiles, marnes) favorables à des mouvements de masse de grande ampleur dont l'existence est restée ignorée jusque récemment (Peulvast *et al.*, 2011).

1.2.1.3. Les marques d'une érosion puissante et active

À l'échelle plurikilométrique, l'épaisseur particulièrement importante de la série sédimentaire et l'ampleur de l'inversion de relief qu'elle a subie dans le rebord NE de la Chapada expliquent le grand développement des rentrants érosifs de Crato et de Barbalha, beaucoup plus ouverts que la longue reculée de Santana do Cariri qui éventre le plateau plus à l'ouest (Peulvast et Bétard, 2015). Le sapement exercé par les nombreuses et importantes sources jaillissant au pied de l'abrupt gréseux est le principal processus impliqué dans leur formation. Il est aussi à l'origine des découpures mineures qui compliquent le tracé de l'abrupt à l'échelle hectométrique.

À l'intérieur des grands rentrants érosifs, plusieurs parties très découpées de l'escarpement présentent des topographies où alternent éperons et entonnoirs (Peulvast *et al.*, 2011; Fig. 1.6). Chaque entonnoir ou alcôve possède une ou plusieurs sources, à la tête de vallées incisées dans la concavité basale de l'escarpement. Jusqu'à 12 entonnoirs adjacents, dont certains subdivisés par des crêtes mineures, ont été observés dans chaque segment, avec des largeurs de 300 à 1000 m et des profondeurs de 200 à 250 m. Les petits ruisseaux qui en sortent contribuent à l'évacuation du matériel produit par l'altération des débris fournis par les parois. Plus bas, les fonds de vallées s'élargissent dans les sédiments plus ou moins tendres.



Figure 1.6. Crato, Barbalha et la Chapada do Araripe. Vue aérienne oblique, vers le SE. Découpage de l'escarpement en grands rentrants et en systèmes d'éperons et entonnoirs. (Photo : J.P. Peulvast, 1999).

La saturation permanente ou saisonnière en eau de plusieurs couches de sédiments contribue à l'importance de l'érosion mécanique dans cette série (Peulvast *et al.*, 2011). Deux aquifères sont recoupés par l'escarpement (Costa, 1999 ; Magalhães, 2006) (Fig. 1.6). Ils correspondent respectivement à l'ensemble grès Arajara-base des grès Exu, et au calcaire de la Formation Santana (membre Crato). Sous la surface sèche de la Chapada, où l'infiltration des eaux de pluie est facilitée par la perméabilité du grès Exu, le premier aquifère présente les caractéristiques d'un système karstique, comme la présence de grottes et de courtes rivières souterraines et celle de grosses exurgences localisées sur des zones de fractures. Sous ces couches, des strates d'argiles, de marnes et de gypse (membres Romualdo et Ipubi) forment un aquiclude (aquiclude Santana) et se comportent comme un niveau plastique dont la surface, quand elle apparaît, est souvent chaotique, impraticable en saison des pluies et affectée par des glissements de terrain superficiels dans les vallées et les talus routiers. Combinées avec la faiblesse mécanique du gypse, ces caractéristiques expliquent l'importance du sapement et des mouvements de masse profonds tout au long de l'escarpement (Fig. 1.7). Ainsi, sur plus de 25 km de longueur, les rentrants de Crato et Barbalha présentent les marques spectaculaires et diversifiées d'une évolution rapide et active (Peulvast *et al.*, 2011, Peulvast et Bétard, 2015). Des formes et des dépôts simples ou complexes liés à des mouvements de masse existent sous tous les segments concaves de l'escarpement.

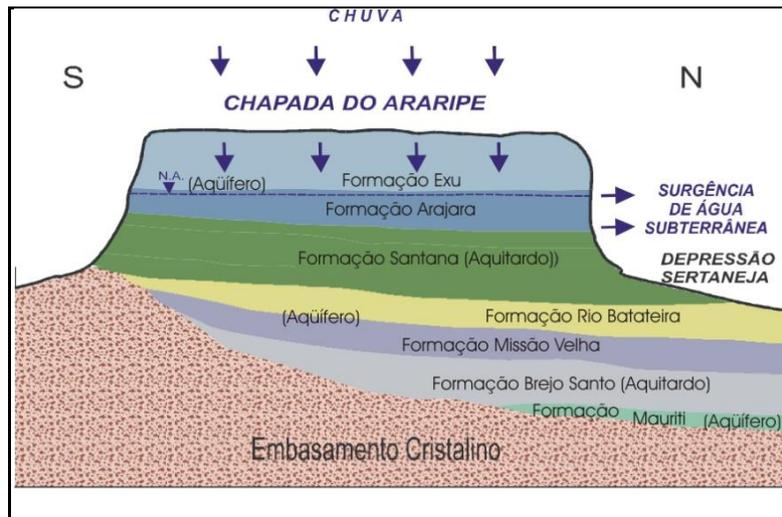


Figure 1.7. Profil hydrogéologique simplifié de la Chapada do Araripe dans le secteur de Crato. (Source : DNPM, 1996).

Le développement de ces dépôts est tel que le substrat affleure rarement en contrebas de l'escarpement (Fig. 1.8 A), sauf dans les chenaux rocheux localement entaillés dans les fonds de vallées et sur quelques replats structuraux armés par les calcaires en plaquettes du membre Crato de la Formation Santana, plus rarement par des bancs de grès indurés de la Formation Batateira (Fig. 1.8 B). Dans ces conditions, les processus d'écoulement (ruissellement) et d'érosion superficiels (ravinement, glissements de terrain...), les plus impliqués dans les aléas et les risques naturels connus, sont en grande partie contrôlés par les caractéristiques des formations superficielles plus que par celles du substrat.



Figure 1.8. Mouvements de masse et affleurements rocheux sous la Chapada do Araripe. **A.** Front de glissement de terrain de Coruja, Crato. Photo J.P. Peulvast, août 2008. **B.** Site de Cascata sur le Rio da Batateira, Crato : affleurement des couches de transition Fm da Batateira et Santana (Calcaire du membre Crato). Photo : A.O. Magalhães, 2009.

Près de l'escarpement, une partie importante de ces formations superficiales résulte de grands mouvements de masse, décrits plus en détail dans le chapitre 2. Partout, ces mouvements se sont produits le long des niveaux de faiblesse mécanique de la série sédimentaire (argiles, grès argileux, marnes, gypse). Au sud de Crato, l'avalanche de débris de Carretão, issue d'un vaste glissement rotationnel, au-dessous d'une cicatrice concave longue de 1,5 km et haute de 180 m (Fig. 1.9), a mis en place sur près de 10 km² un tablier de débris plus mince ayant couvert une topographie différenciée. Encore non datée, comme les autres grands mouvements de masse de la région, elle peut correspondre à un recul d'escarpement brutal sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres (Peulvast *et al.*, 2011).



Figure 1.9. Cicatrice et masse glissée liée à l'avalanche de débris de Carretão (Crato), 2011. Photo : J.P. Peulvast.

Les systèmes étagés de glacis et de terrasses montrent que plusieurs phases d'érosion linéaire et aréolaire par les cours d'eau et le ruissellement ont participé au façonnement du piémont et à l'évacuation des débris venus de l'escarpement. Cependant, les processus fluviaux ne sont pas les seuls en cause. Certaines vallées, surtout dans leurs parties amont, sont partiellement occupées par des langues très allongées (2.5 à 6.5 km) de matériel riche en blocs constituant des terrasses sur un ou plusieurs niveaux (jusqu'à 3 à Crato) interprétés comme des dépôts de coulées de débris ou de laves torrentielles provenant de l'escarpement (Peulvast *et al.*, 2011 ; voir aussi chapitre 3) (Fig. 1.10 A). La présence de terrasses étagées de dépôts similaires le long des vallées (Fig. 1.10 B) suggère que des événements répétés alternant avec des phases d'érosion fluviale comme celle actuellement en cours sur le Rio Granjeiro et les branches amont du Rio Salamanca (Fig. 1.11 A) ont participé à l'incision verticale des piémonts et accompagné ou suivi des phénomènes localisés de recul de l'abrupt supérieur.

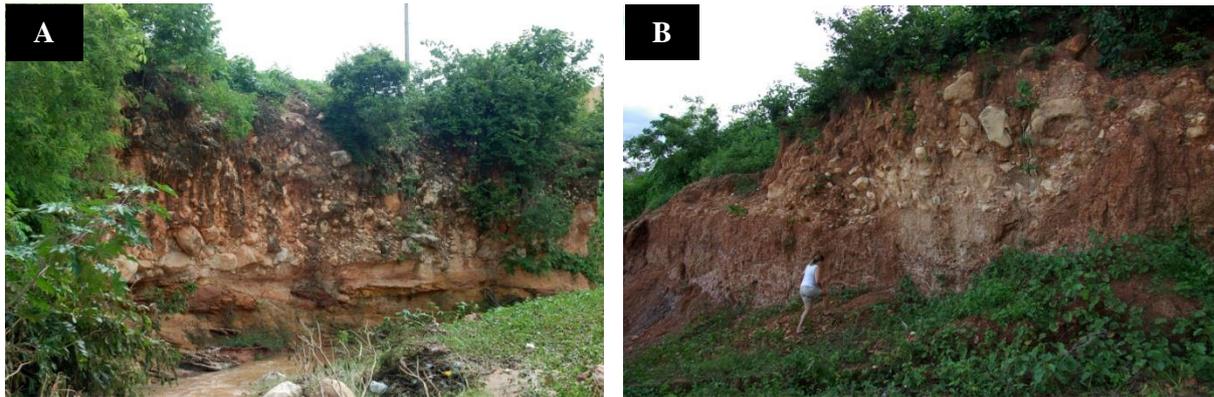


Figure 1.10. Dépôts de coulées de débris ou de laves torrentielles à Crato. **A.** Terrasse du Rio Granjeiro à l’amont du chenal bétonné. Photo A.O. Magalhães, 2007. **B.** Haute terrasse du Riacho das Piabas (affluent du Rio Granjeiro sous l’usine de la GRENDENE). Photo : J.P. Peulvast, 2008.



Figure 1.11. Incisions fluviales et chenaux rocheux en contrebas de la Chapada do Araripe. **A.** Riacho Saco, amont du Rio Salamanca, Barbalha. Photo J.P. Peulvast, 2014. **B.** Micro canyon du Rio da Batateira dans le parc du Sítio Fundão, Crato. Photo : A.O. Magalhães, 2007.

Le remplissage partiel de fonds de vallées par d’abondants dépôts de coulées de débris ou laves torrentielles a contribué à réorganiser le système de drainage des glacis. Alimenté par les sources du cirque de Luanda (Nascente, Clube Serrano), un cours d’eau - qui incise localement l’un ou l’autre des côtés du plancher de sa vallée - s’est déporté vers le bassin-versant voisin (Rio da Batateira) à la faveur d’un col surbaissé trouant l’interfluve de rive gauche à 530 m d’altitude. Il forme désormais l’actuel segment amont du Rio da Batateira et la gorge du Sítio Fundão, où une incision et une érosion régressive actives dans le grès tendre et les calcaires en plaquettes des Formations Batateira et Santana (Fig. 1.8 B et 1.11 B) reflètent probablement l’âge récent de la capture ou du déversement (Peulvast *et al.*, 2011).

Dans un tel contexte, l'identification des aléas auxquels est soumise la région d'étude doit évidemment dépasser la seule prise en compte des crues et des mouvements de terrain de petite taille. Elle justifiera un approfondissement de cette question au moment d'évaluer et de cartographier ces aléas et les risques correspondants.

1.2.2. Organisation hydrographique : les sous-bassins versants amont du Rio Salgado

Le secteur étudié, qui correspond à la partie N de la dépression périphérique du Cariri, appartient au bassin-versant du Rio Salgado, lui-même inclus dans le vaste bassin versant du Rio Jaguaribe, le principal fleuve du Ceará (Fig. 1.3). Les villes de Crato et Barbalha sont respectivement incluses dans les sous-bassins versants des rios Batateira et Salamanca.

Entre le petit massif cristallin de la Serra da Boa Vista et l'éperon de Romualdo, le rentrant érosif de Crato correspond au bassin-versant amont du Rio Batateira. Celui-ci se subdivise en trois unités, les sous-bassins du Rio da Batateira amont, du Rio Granjeiro, du Riacho Saco (ou Lobo), du Riacho Constantino et du Riacho Fundo, entaillés dans les glacis de piémont de la Chapada et en partie occupés par la ville de Crato (Fig. 1.12). Vers l'est, sur le plancher de la dépression, le segment aval du Rio da Batateira serpente dans une large plaine alluviale où il longe les quartiers nord de la ville de Juazeiro do Norte. Au SE, le rentrant érosif de Barbalha correspond au bassin-versant amont du Rio Salamanca, lui aussi tributaire du Rio Salgado. Le Riacho do Ouro, qui traverse la ville de Barbalha, draine le plus oriental et le plus petit des sous-bassins-versants inclus dans ce rentrant. Alors que ce ruisseau naît, comme le Riacho Fundo, dans des vallons faiblement encaissés dans les pentes inférieures de l'escarpement, la plupart des autres cours d'eau proviennent directement de la base de la corniche gréseuse et, sous les hautes parois de l'amont, présentent un aspect montagnard avec des chenaux rocheux pentus, coupés de cascades et de chaos de blocs que l'on retrouve jusque dans les parties moyennes du cours (Fig. 1.8). Compte tenu des thèmes présentés dans ce travail, l'analyse portera essentiellement sur les bassins versants des Rios Granjeiro et do Ouro, ce qui n'exclut pas des éléments de comparaison avec leurs voisins.

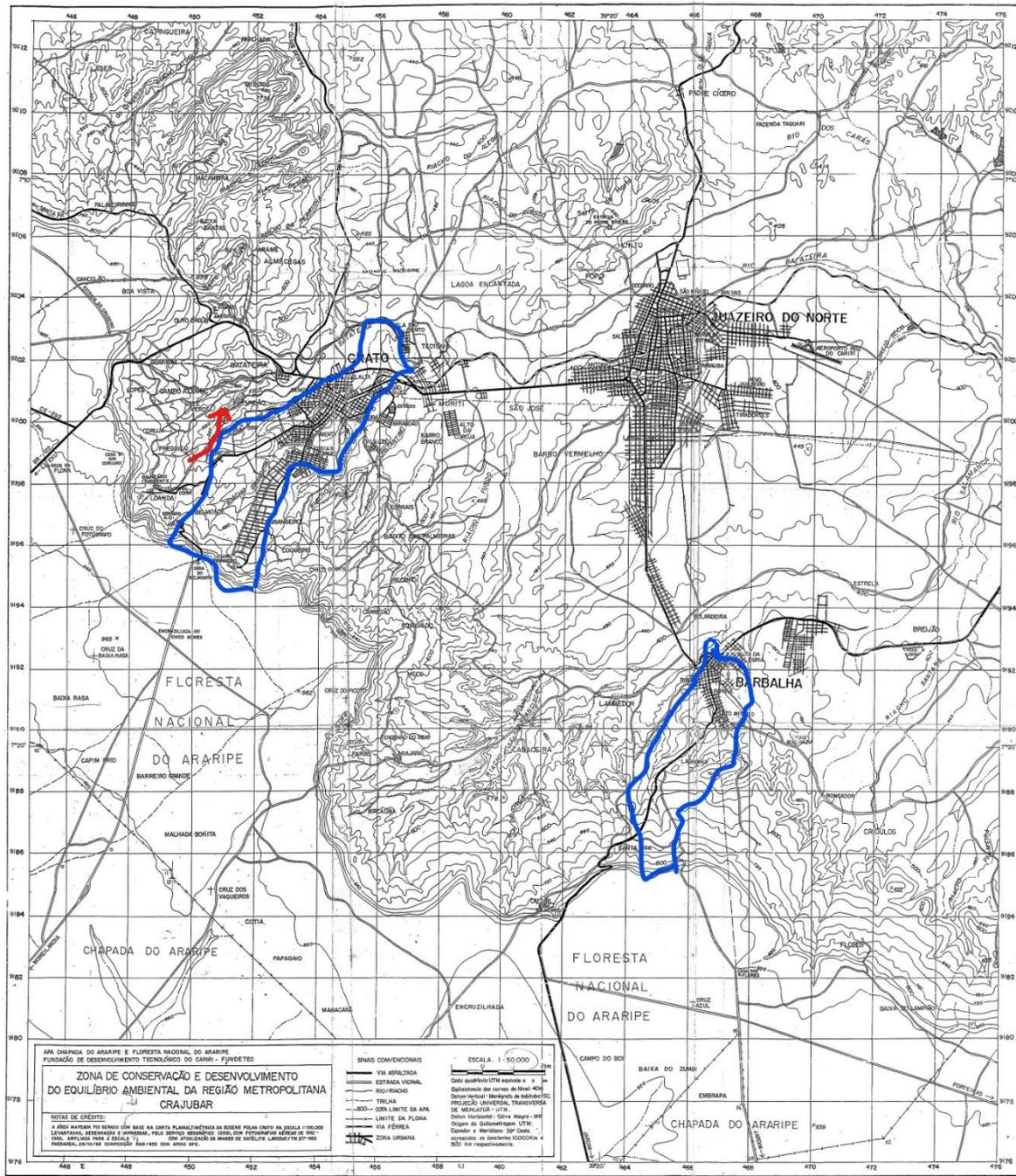


Figure 1.12. Carte topographique de la zone métropolitaine CRAJUBAR, modifiée ; échelle originale : 1 :50 000. FUNDETEC, 1998. En bleu : les bassins-versants du Rio Granjeiro (Crato) et du Riacho do Ouro-Riacho Seco (Barbalha). Flèche rouge : coude de capture d'un ancien tributaire amont du Rio Granjeiro vars le Rio da Batateira.

À la différence du Rio da Batateira, encore presque indemne d'urbanisation au nord de la ville, le Rio Granjeiro traverse la cité, qui est née sur ses rives à 3 km du pied de la *chapada* (voir *infra*, 1.4). Il s'agit de l'un des cours d'eau subparallèles qui dissèquent les glacis de piémont au NE de la Chapada do Araripe (Fig. 1.12). Pour une superficie estimée entre 18,35 et 20,96 km² selon les

À l'intérieur du bassin-versant du Rio Granjeiro, les fonds de vallées présentent des formes en berceau dans leurs parties amont, en avant des grands entonnoirs de sapement abrupts qui échancrent l'escarpement (Fig. 1.14 A). Une seule des sources qui jaillissent au pied de la corniche peut contribuer directement à l'alimentation du ruisseau, malgré les captages du XX^e siècle (Granjeiro : Fig. 1.14 B). La vallée principale se resserre dans la partie moyenne, la plus encaissée (quartiers Lameiro, Sossego et Pimenta ; Fig. 1.14 C). Le chenal principal, dont les méandres encaissés sont encadrés par des basses terrasses étroites constituées d'alluvions très hétérométriques et riches en gros blocs à peine émoussés (Peulvast *et al.*, 2011), s'élargit ensuite, brusquement, à l'aval du centre-ville de Crato. Il est artificialisé (chenal bétonné à ciel ouvert de section trapézoïdale) sur 2 km à la traversée de ce dernier (Fig. 1.14 D). À partir de là, le cours d'eau décrit un vaste méandre emboîté dans sa basse terrasse ici sableuse avant de confluer avec le Rio da Batateira (Fig. 1.14 E, Fig. 1.13).





Figure 1.14. Le Rio Granjeiro à Crato. **A.** Partie amont du bassin-versant, depuis Belmonte. **B.** Source du Rio Granjeiro. **C.** Partie moyenne de la vallée du Rio Granjeiro près de la confluence du Riacho das Piabas, quartier Lameiro. **D.** Le Rio Granjeiro canalisé en centre ville, depuis Seminario. **E.** Partie aval du Rio Granjeiro, à l'exutoire du chenal bétonné. Photos : A.O. Magalhães/J.P. Peulvast, 2007 et 2014.

Le rentrant de Barbalha, plus profondément indenté dans le rebord de la Chapada, correspond entièrement au bassin versant du Rio Salamanca, qui s'étend sur une superficie de 181,3 km² jusqu'à son confluent avec le Rio da Batateira à l'aval de Juazeiro do Norte, à 360 m d'altitude (Moreira *et al.*, 2013 ; Fig. 1.12). Assez large (jusqu'à 9 km), de forme ovoïde et allongé du SO au NE sur 13 km en ligne droite de l'extrémité de la reculée (Macaúba) à Barbalha (confluent du Riacho do Ouro), celui-ci est dissymétrique. Le drain principal, long de 29,5 km, ne reçoit des affluents des deux rives que dans sa partie amont, orientée SO-NE, tandis que la partie aval, orientée OE puis SO-NE, ne reçoit que les drains venus de la paroi sud de la reculée, dont le Riacho do Ouro, en rive droite. Au nord, le Rio Salamanca longe le pied du large interfluve plat qui le sépare des bassins-versants tributaires du segment aval du Rio da Batateira. L'amont du réseau est plus nettement organisé en système dendritique que celui de Crato.

Les tributaires de l'amont convergent vers le centre de la reculée de Barbalha à Cabaceira. À l'aval des systèmes de lobes et de langues de débris qui frangent de façon presque continue le pied de l'escarpement sur 1 à 2 km de largeur, de Meio à Santa Rita, ils s'encaissent vigoureusement dans la roche en place (calcaires de la Formation Santana, grès tendres de la Formation Batateira), au sein d'un large système de glacis entrecoupés, comme ceux de Crato, de replats, de buttes et de ressauts structuraux (Peulvast et Bétard, 2015). Jusqu'au pont de Cabaceira et au débouché sur la plaine alluviale qui s'élargit à partir du coude du Rio Salamanca vers l'est (Lambedor), leurs étroits chenaux rocheux sont encombrés de blocs de grès Exu remaniés des terrasses de laves torrentielles ou de coulées de débris qui les encadrent (Fig. 1.11 A). Ces cours d'eau intermittents proviennent tous des cirques ou entonnoirs qui indentent les parois de la reculée (Meio, Farias, Macaúba, Caldas) et qui possèdent de nombreuses sources. En revanche, à l'est, le Riacho do Ouro est déconnecté de la

corniche et provient des pentes vallonnées, des replats et des langues de débris (Riacho do Meio, Santa Rita, Lagoinha) qui relie celle-ci aux glacis et bas plateaux disséqués où s'étend la ville de Barbalha. Long de 6 km et large de 1 à 1,5 km, son bassin-versant est de petite taille (environ 6,5 km²), ce qui n'empêche pas ses deux drains principaux, sinueux et encombrés de blocs de grès, d'être périodiquement balayés par des crues éclair. Comme à Crato, la survenue fréquente de tels épisodes a justifié leur canalisation dans la traversée du centre-ville de Barbalha, sur 1,6 km de longueur, depuis 1976 (Fig. 1.15).



Figure 1.15. A. Le chenal bétonné du Riacho do Ouro dans le centre-ville de Barbalha. B. Confluence avec le chenal partiellement busé (à l'amont) du Riacho Seco. Photos : A.O. Magalhães, 2011.

1.2.3. Des milieux contrastés

Exposé aux alizés, le rebord NE de la Chapada do Araripe reçoit des précipitations élevées, de 1000 mm à 1200 mm par an ou plus en altitude. Il porte, ainsi que son revers, une forêt sempervirente ou semi-décidue (Magalhães, 2006), en partie incluse depuis 1946 dans la Forêt Nationale de l'Araripe (FLONA). Des formations végétales moins denses de type “*cerradão*,” “*cerrado*” and *caatinga*, souvent dégradées par l'activité agro-pastorale, occupent les parties centrale et occidentale du plateau ainsi que les dépressions voisines. Cette région est incluse dans le Géoparc Araripe, reconnu par l'UNESCO en 2006 pour son exceptionnelle richesse paléontologique.

1.2.3.1. Sols et formations superficielles

Les sols sont développés directement sur le substrat ou sur les dépôts liés aux phénomènes morphodynamiques récents ou actuels. Ils présentent une grande variété liée à celle du relief et de la lithologie. Cette diversité, dont l'étude relève d'une approche morphopédologique (Bétard, 2007), conditionne à son tour une inégale sensibilité aux phénomènes d'érosion (ruissellement, mouvements de masse) auxquels peuvent correspondre des aléas naturels.

Selon F. Bétard (2007), le modelé tabulaire de la *Chapada* gréseuse, revêtu de sols épais,

s'oppose assez nettement à celui des versants escarpés couverts de colluvions grossières et des lanières de pédiments ou de glacis disséqués qui s'inscrivent en contrebas sur le socle ou la couverture sédimentaire (Fig. 1.16). Sous tous les climats qui ont affecté la *Chapada*, allant de l'humide au semi-aride, l'altération prolongée a abouti à la production d'altérites et de sols profonds (plus d'une dizaine de mètres), à l'écart des axes de dissection.

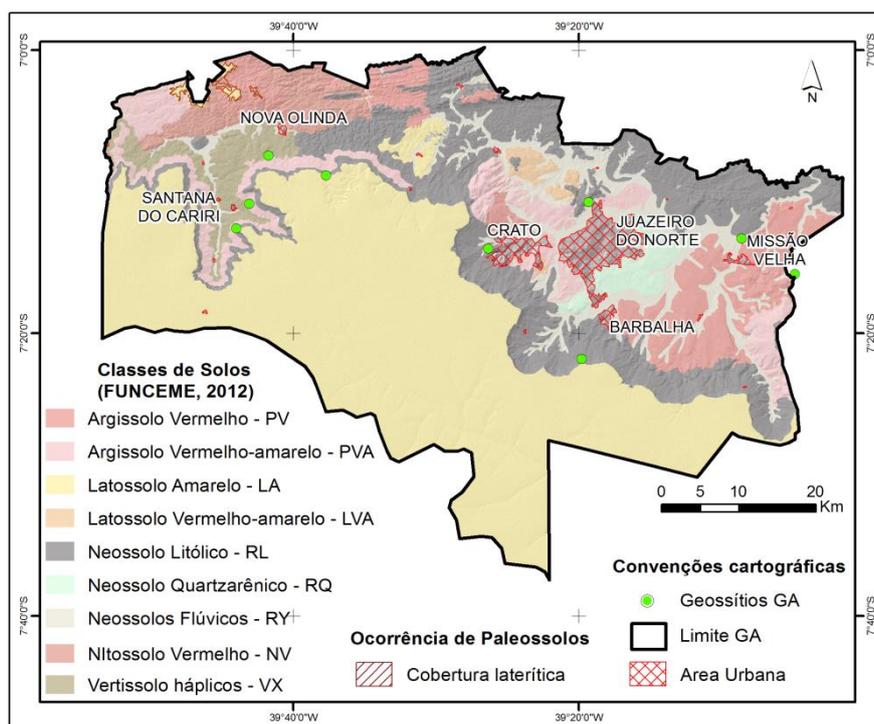


Figure 1.16. Carte des sols dans les limites du Géoparc Araripe. Explications dans le texte. (Source : Carvalho Neta *et al.*, 2018).

Les sols rouges à jaunes développés sur ces grès sont *ortho-ferrallitiques* (Ferralsol ou *Latossolo vermelho-amarelo* selon la classification brésilienne ; EMBRAPA, 1999), à pseudo-sables, épais de plusieurs mètres (Guichard, 1970 ; Projeto Radambrasil, 1981). Malgré une teneur parfois assez élevée en argile, leur texture pseudo-sableuse implique un comportement hydrodynamique typique de sols sableux extrêmement perméables. La kaolinite est le minéral argileux dominant de ces sols et altérites (Guichard, 1970). Selon cet auteur, il est probable qu'ils se soient formés sous des climats plus humides que l'Actuel, et maintenus dans les conditions bioclimatiques présentes, car la perméabilité du matériau et la forme du modelé favorise l'altération et s'oppose à l'érosion. La présence d'horizons profonds plus ou moins argileux de ces sols le long des fissures recoupées par le recul de l'escarpement peut faciliter les phénomènes de déstabilisation et les glissements observés dans la corniche (Peulvast *et al.*, 2011).

Sur les versants bordiers et les parties du piémont où le climat est sub-humide, ce qui est le cas des secteurs de Crato et Barbalha, les sols rencontrés sont généralement des sols rouges lessivés du

type Lixisol (*Argissolo* de la classification brésilienne), ou encore des sols peu évolués d'érosion du type Leptosol (*Neossolo Litólico*) dans les secteurs les plus pentus. Il s'agit de sols minéraux, non hydromorphes, peu développés, pierreux, avec un horizon A directement superposé à la roche en place (R) ou à l'horizon C (roche altérée), peu épais et riche en minéraux primaires. On les rencontre généralement associés à des affleurements rocheux.

La lithodépendance s'exprime plus encore pour les Vertisols (*Vertisolo Ebânico*) développés sur les surfaces d'alluvions dans les vallées les plus larges (parties aval des vallées des Rios da Batateira, Granjeiro, Salamanca). Ce sont des sols argileux à très argileux, avec un contenu élevé en argiles 2:1 favorables aux phénomènes d'expansion et de contraction, et à l'ouverture de fissures polygonales en période sèche. Pendant la saison des pluies, ces sols deviennent très plastiques et imperméables, ce qui les rend assez sensibles à l'érosion.

D'une manière générale, selon Ribeiro (2004), les sols et formations superficielles rencontrés dans le secteur étudié correspondent à une altération poussée, sauf sur les versants pentus, d'épaisseur moyenne à faible en dehors de la *Chapada* proprement dite, où prédomine la fraction sableuse (sols sableux à argilo-sableux), de porosité moyenne à haute, avec une faible teneur en matière organique. Ces caractéristiques leur confèrent une érodabilité moyenne à élevée par rapport aux processus dominants (ruissellement surtout), dépendant de leur localisation dans le relief (forme et pente du terrain).

1.2.3.2. Couverture végétale

La végétation joue un rôle important dans les phénomènes érosifs comme dans la genèse et la préservation des sols. Le nord-est de la Chapada do Araripe, l'escarpement et son piémont, dans la région de Crato et Barbalha, présentent des associations végétales particulières par rapport au reste du *sertão*, compte tenu de l'humidité particulière liée au relief et à l'exposition aux alizés. Selon l'Atlas du Ceará (IPLANCE, 1989), ces biomes sont les suivants : Forêt subcaducifoliée tropicale xéromorphe, Forêt sub-sempervirente pluvio-nébuleuse, Forêt tropicale pluviale sub-caducifoliée, Forêt caducifoliée (Fig. 1.17).

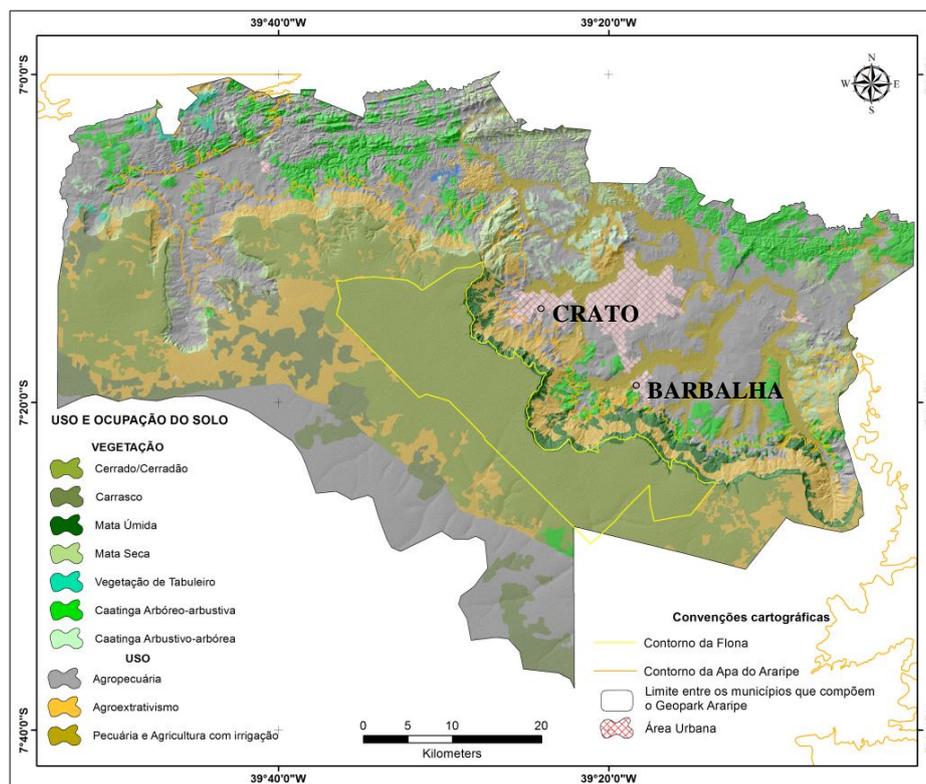


Figure 1.17. Carte de la végétation et de l'usage des sols dans les limites du Géoparc Araripe. Traductions dans le texte. (Source : Carvalho Neta *et al.*, 2018).

L'escarpement présente une végétation forestière dense et de port assez élevé représentant des vestiges de la Mata Atlântica (Fig. 1.18 A). Cela s'explique par l'altitude (supérieure ou égale à 700 m) et l'exposition aux alizés humides à l'origine de fortes pluies orographiques. Le grand nombre de sources jaillissant au pied de l'escarpement contribue aussi à la permanence de cette végétation forestière, de même que la rosée qui se dépose lors des jours de brouillard fréquents aux niveaux les plus élevés. C'est ce qui, selon Figueiredo (1989), explique la présence de la Forêt sub-sempervirente pluvio-nébuleuse, également appelée Forêt ombrophile (*Mata Úmida*), caractérisée par la présence d'arbres aux troncs droits, couverts de lichens et d'épiphytes, et par un étagement des strates de végétation. L'extension actuelle de ce type de forêt est résiduelle, du fait des pratiques de déboisement et des brûlis qui l'ont affectée jusqu'à son classement en APA (Aire de Protection Environnementale) en 1997 (Bétard *et al.*, 2017).

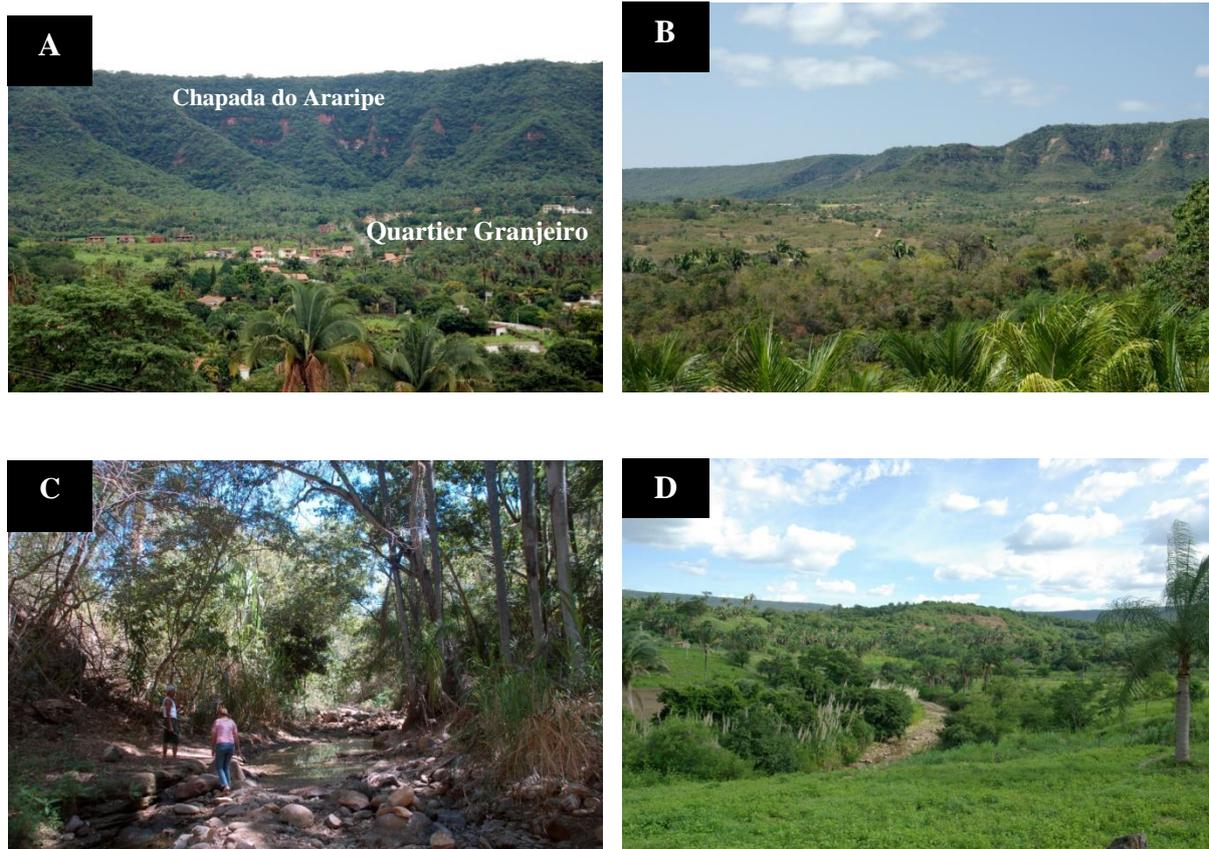


Figure 1.18. Formations végétales au pied de la Chapada do Araripe. **A.** Forêt ombrophile dans l’escarpement à Granjeiro - Crato (Photo : A.O. Magalhães, 2007). **B.** Forêt tropicale pluviale sub-caducifoliée et Forêt caducifoliée épineuse, dégradées, dans la partie amont du bassin-versant du Rio Granjeiro. **C.** Ripisylve (*Mata Ciliar*), Sítio Fundão, Crato. **D.** Végétation de plaine alluviale : Rio Salamanca à Cabaceiras, Barbalha. Photos: J.P. Peulvast, 2012.

Plus bas, les basses pentes et les glacis sont couverts par des forêts sèches (*Matas secas*), de type Forêt tropicale pluviale sub-caducifoliée, mais avec la présence d’individus tolérants de la Forêt ombrophile et aussi de la *Caatinga* arborée. Cette dernière formation (aussi appelée Forêt caducifoliée épineuse) occupe la majeure partie du piémont de la chapada (Fig. 1.18 B). C’est un faciès xérophile plus ou moins ouvert, avec des arbres assez hauts (jusqu’à 20 m) aux troncs droits, et un sous-bois d’arbrisseaux, arbustes et plantes annuelles. Le long des principaux cours d’eau existait initialement une végétation arborée plus dense, grâce à l’eau de la nappe phréatique et/ou des infiltrations latérales. Comprenant de nombreuses espèces de la Forêt pluviale sub-caducifoliée, elle constitue la ripisylve ou forêt ripicole (*Mata Ciliar* ; Fig. 1.18 C).

Au voisinage des sources, dans les dépressions et dans les parties aval des vallées (plaines alluviales des Rios da Batateira et Salamanca), poussent de nombreux palmiers (Fig. 18 D) : carnaúba (*Copernicia cerifera*), catolé (*Syagrus comosa*), babaçu (*Orbignya speciosa*), macaúba (*Acrornomia intrumescens*) et buriti (*Mauritia vinifera*), dont certains ont été introduits et forment des peuplements

denses au pied de la corniche de la *chapada (babaçu)*. Sur les basses pentes de l'escarpement irriguées grâce aux *levadas* (canaux) provenant de nombreux captages de sources, des bananeraies remplacent localement ces peuplements. Dans les bas-fonds, cette couverture, comme celle de la ripisylve, a été largement remplacée par des cultures permanentes ou temporaires (canne à sucre, graminées, haricots, maïs).

C'est donc aussi bien dans les parties amont des bassins-versants que dans les plaines situées à l'aval que l'on rencontre des sols faiblement protégés de l'érosion (érosion pluviale, ruissellement), saisonnièrement ou en permanence. La couverture forestière, plus présente dans l'APA Araripe qui correspond à l'escarpement et à ses basses pentes, et dans de rares zones de protection situées en contrebas (Sítio Fundão, sur le cours moyen du Rio da Batateira), peut jouer un rôle plus protecteur, qui devient toutefois moins efficace sur les pentes très fortes (corniche gréseuse) et vis-à-vis des mouvements de masse profonds (Peulvast *et al.*, 2011).

1.3. Une exception hydroclimatique dans le sertão semi-aride

1.3.1. Particularités climatiques du Nordeste brésilien

Connus pour les épisodes de sécheresse prolongés qui touchent certaines régions (« Polygone de la sécheresse », ~1 000 000 km²), les climats prépondérants du Nordeste brésilien sont de type Littoral humide, Tropical et Tropical semi-aride (CEPED-UFSC, 2013). La pluviosité moyenne annuelle est variable, pouvant atteindre des valeurs de 2000 mm (du littoral de la Bahia au Rio Grande do Norte), entre 1 000 et 1 200 mm (parties des États de Bahia, Ceará, Maranhão et Piauí), mais dans tout le *sertão* nordestin, elle est inférieure à 600 mm – à l'exception d'étroits « *brejos de altitude* » (Cavalcante, 2005 ; Bétard, 2007) comme ceux correspondant aux massifs du Ceará touchés de plein fouet par les alizés (y compris l'est de la Chapada do Araripe).

Assez exceptionnelle en région intertropicale, cette sécheresse n'est pas entièrement expliquée, mais peut être en partie liée à la présence du haut plateau de la Borborema à l'arrière de la côte orientale, du Rio Grande do Norte à l'Alagoas. Avec ses altitudes atteignant 1200 m, ce massif montagneux exerce un effet d'abri par rapport aux alizés (Gunnell, 1998) qui oppose les régions littorales humides aux plaines semi-arides de l'intérieur. Partout, les températures moyennes annuelles sont élevées, entre 20 et 28° C.

Les régimes de précipitations régionaux résultent d'interactions complexes entre le relief, la position géographique et la circulation atmosphérique (Nimer, 1979). Les mécanismes des précipitations sont surtout conditionnés par le balancement de la ZCIT (qui laisse se former une puissante cellule anticyclonique sur l'intérieur en hiver mais qui apporte aussi les pluies sur le nord de la région en mars-avril), par l'intervention de fronts froids venus du sud (juillet-août) dans le sud de la région, par la formation de vortex cycloniques d'altitude venant de l'ouest (septembre-avril), par celle

de lignes de grains ou de systèmes convectifs d'échelle moyenne et, dans les régions littorales, par les systèmes de brises de mer et de terre. Les variations de leur activité dépendent en partie d'oscillations d'échelle globale (ENSO : El Niño-Southern Oscillation), des températures de surface de l'Atlantique Sud et Nord, et du balancement des alizés. Du point de vue des événements extrêmes, cette région est affectée à intervalles irréguliers par des périodes de sécheresse (*secas*) pouvant durer 3 à 4 ans (par exemple, dans la région étudiée, 1981-1983 ou, dans une moindre mesure, 2015-2017), et aussi de pluies torrentielles (voir chapitre 2). Les événements El Niño tendent à coïncider avec les années de sécheresse accentuée comme celle de 1983, mais il arrive qu'ils puissent correspondre au contraire à des années à saison des pluies plus marquée (Bétard, 2007). Cette grande variabilité, liée à des facteurs planétaires, explique que la région puisse être touchée par des crues et des inondations brusques ou par des glissements de terrain, entre autres, atteignant les populations installées dans les zones exposées, urbaines ou rurales.

1.3.2. Paramètres climatiques et régimes de précipitations dans la région d'étude

1.3.2.1. Précipitations

Dans l'ensemble, le sud du Ceará, ou Cariri *cearense*, présente des valeurs pluviométriques supérieures à celles du reste de l'intérieur de l'État, en particulier sur les reliefs élevés qui le caractérisent (Fig. 1.19). Mais la pluviosité y est tout aussi contrastée et irrégulière.

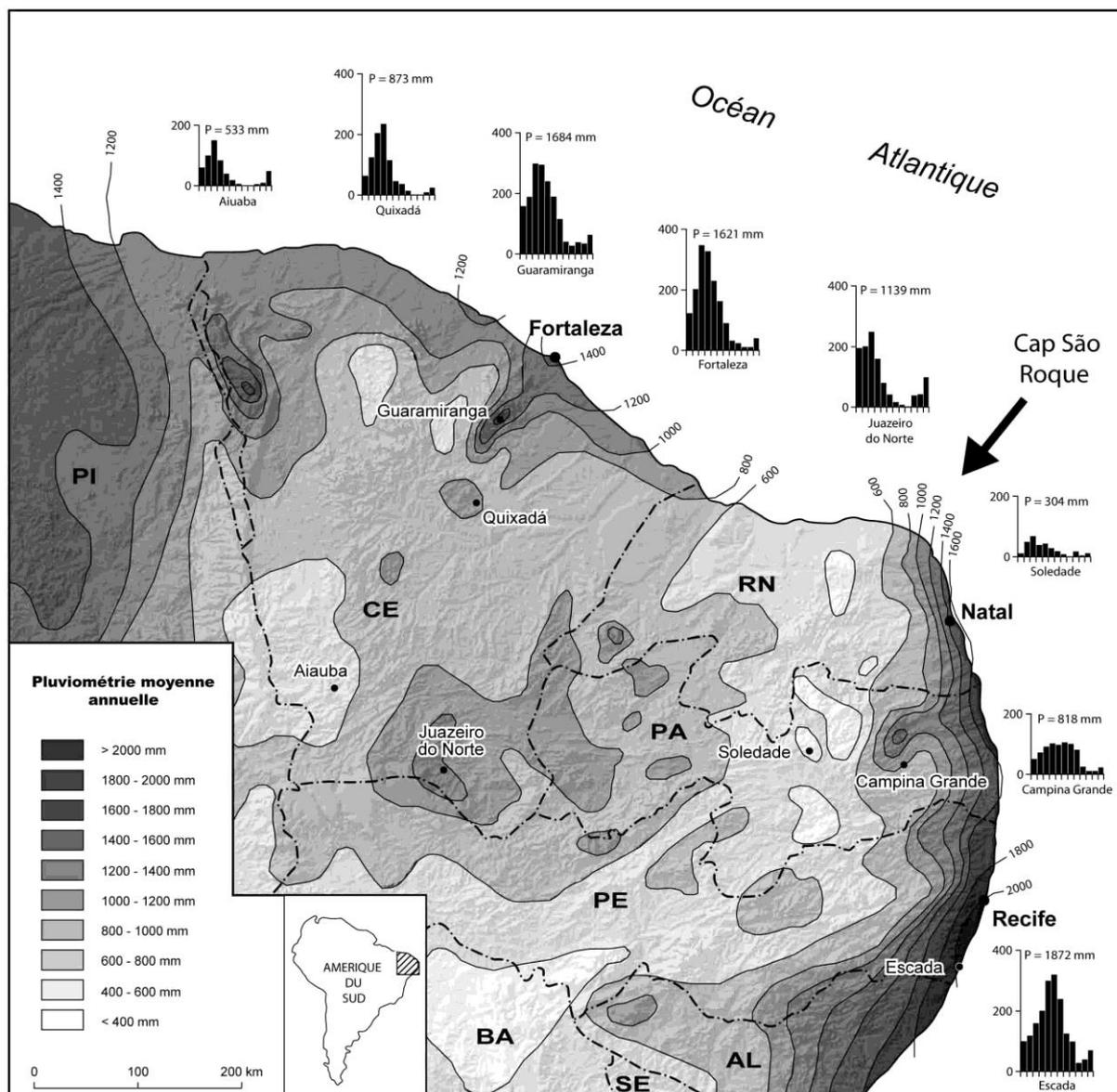


Figure 1.19. Carte des précipitations dans l'État du Ceará. (Reproduit de Bétard, 2007).

D'après les séries des stations pluviométriques de Crato, Barbalha, Juazeiro do Norte et Missão Velha, dont certaines remontent à 1974, la moyenne des précipitations moyennes annuelles est de 1033 mm, tandis que pour l'ensemble de la région du Cariri, la moyenne est de 920 mm. Ces moyennes ne reflètent pas la forte variabilité interannuelle des précipitations. Ainsi, pour la station de Crato (période 1974-2016 ; Fig. 1.20), l'année la plus arrosée a été 1985, avec un total de précipitations de 1770 mm (FUNCEME, in Silva, 2017). À l'inverse, 1993 fut l'année la plus sèche, avec 568,1 mm, soit une différence de 1401,9 mm entre les deux extrêmes. Pour la période considérée, l'année 1993 fait partie des années de sécheresse (*seca*), tout comme les années 1979, 1983, 1987, 1993, 1997, 2012, enregistrées dans le domaine semi-aride nordestin.

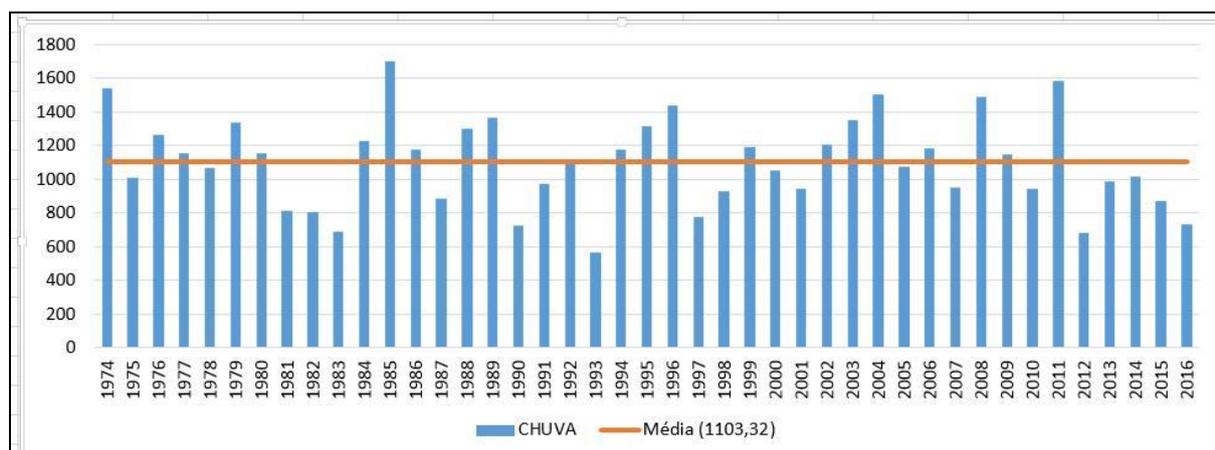


Figure 1.20. Totaux annuels et moyenne annuelle des pluies à Crato sur la période 1974-2016. Elaboré à partir des données de la FUNCEME (Silva, 2017).

Sur la même période, les années de pluies supérieures à la moyenne ont été 1974, 1976, 1977, 1979, 1980, 1984, 1985, 1986, 1988, 1989, 1994, 1995, 1996, 1999, 2002, 2003, 2004, 2006, 2008, 2009 et 2012. Ce sont les années 1985, 2011, 1974, 2004 et 2008, par ordre décroissant, qui ont été les plus arrosées.

À Barbalha, sur la période 1973-2014, la moyenne annuelle des précipitations a été de 1061,9 mm. Les années 1985 (1766,2 mm), 1989 (1567,3 mm) et 2008 (1562,4 mm) ont été les plus arrosées. Selon Matos *et al.* (2015), Barbalha présente une série de 20 années de pluies inférieures à la moyenne historique, 16 au-dessus de cette valeur et 2 juste dans la moyenne (Fig. 1.21).

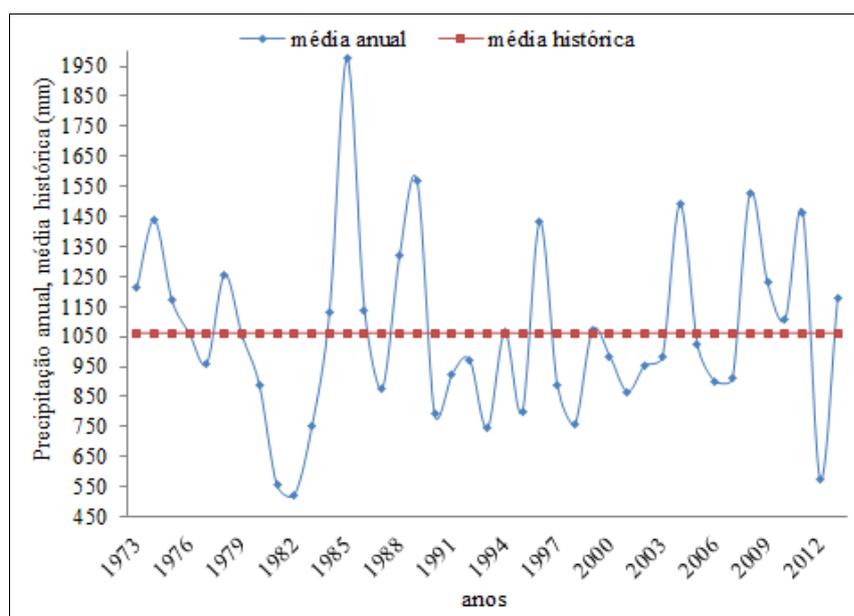


Figure 1.21. Totaux annuels et moyenne annuelle des précipitations à Barbalha sur la période 1973-2014. (Source: Matos *et al.*, 2015).

En ce qui concerne la répartition des pluies sur l'année, on remarque une concentration sur la fin de l'année civile (décembre : la « pré-saison des pluies » de la FUNCEME) et sur les premiers mois de l'année suivante (saison des pluies, janvier-avril ou mai, 80% du total annuel). Les pluies sont sous le contrôle des actions combinées de différents facteurs macro- ou mésoclimatiques tels que le balancement de la ZCIT (zone de convergence intertropicale), l'action de VCAN (vortex cycloniques de haute altitude), celle de la masse d'air équatoriale continentale (MEC) et celle de fronts froids (Nimer, 1989).

La station de Crato (421 m d'altitude), localisée près de la Chapada do Araripe, a enregistré une moyenne pluviométrique annuelle de 1103 mm sur 42 ans (1974-2016). Les pluies s'y concentrent surtout sur les mois de janvier à mai (FUNCEME, 2015, Silva, 2017), après une « pré-saison des pluies » modérément pluvieuse (92,1 mm en décembre) (Fig. 1.22). Le mois de mars est le plus arrosé (254,4 mm), suivi, par ordre décroissant, des mois de février (210,5 mm), de janvier (199,6 mm), avril (174,0 mm) et mai (61,2 mm). Le mois d'août est le plus sec (2,6 mm).

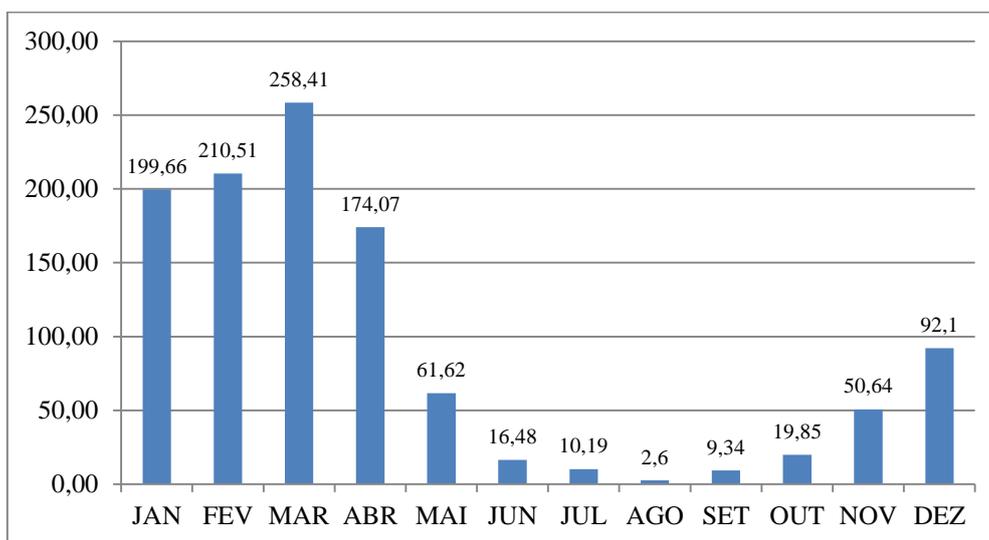


Figure 1.22. Distribution des moyennes pluviométriques mensuelles à Crato sur le période 1974-2016. Élaboré par l'auteur à partir des données de la FUNCEME (Silva, 2017).

À Barbalha (station de Barbalha, 409,03 m d'altitude), Matos *et al.* (2015) ont analysé la variabilité pluviométrique sur 41 ans (1973-2014), en comptabilisant sur un même graphique les valeurs mensuelles moyennes, maximales et minimales à partir des données de l'INEMET (*Instituto Nacional de Meteorologia*). La répartition des pluies sur l'année est assez similaire à celle de Crato, avec de faibles différences dans les moyennes mensuelles (Fig. 1.23). La moyenne la plus élevée est celle de mars (234,4 mm) et la plus basse celle du mois d'août (3,9 mm). Après mars, viennent par ordre décroissant février (203,5 mm), avril (185 mm) et janvier (181,3 mm). Les maxima de moyennes mensuelles se localisent sur les mois de mars et d'avril.

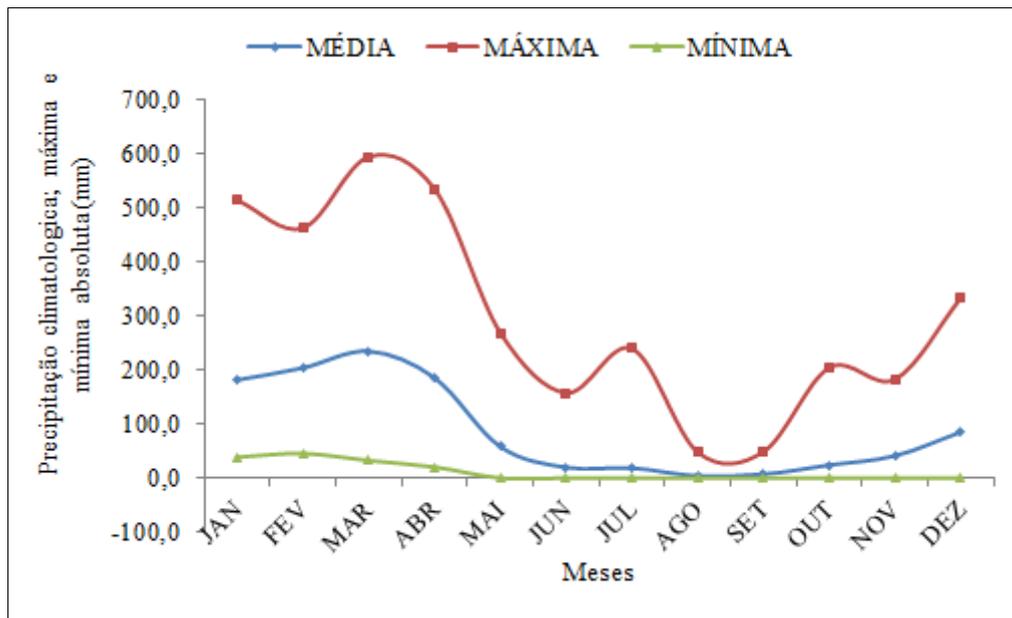


Figure 1.23. Précipitations mensuelles moyennes, maximales et minimales à Barbalha, sur la période 1973-2014. Élaboré par Matos *et al.* (2015).

1.3.2.2. Régime thermique et bilan hydrique

À Crato, sur la période 1974-2011, les températures moyennes mensuelles ont oscillé entre 23,8 °C (juillet) et 27,4 °C (novembre) ; la moyenne annuelle a été de 25,7 °C. À Barbalha, sur la période 1974-2015, les températures moyennes mensuelles ont été sensiblement les mêmes : 23,8 °C en juillet, 26,8 °C en novembre, pour une moyenne annuelle de 25,2 °C (Brito, 2016). Dans les deux cas, dont la similitude s'explique par la proximité, le climat est chaud, avec un rafraîchissement à peine marqué lors de l'hiver astronomique qui succède à la fin de la saison des pluies, et un maximum thermique juste avant l'été astronomique qui va coïncider avec la saison des pluies ou hivernage (Fig. 1.24).

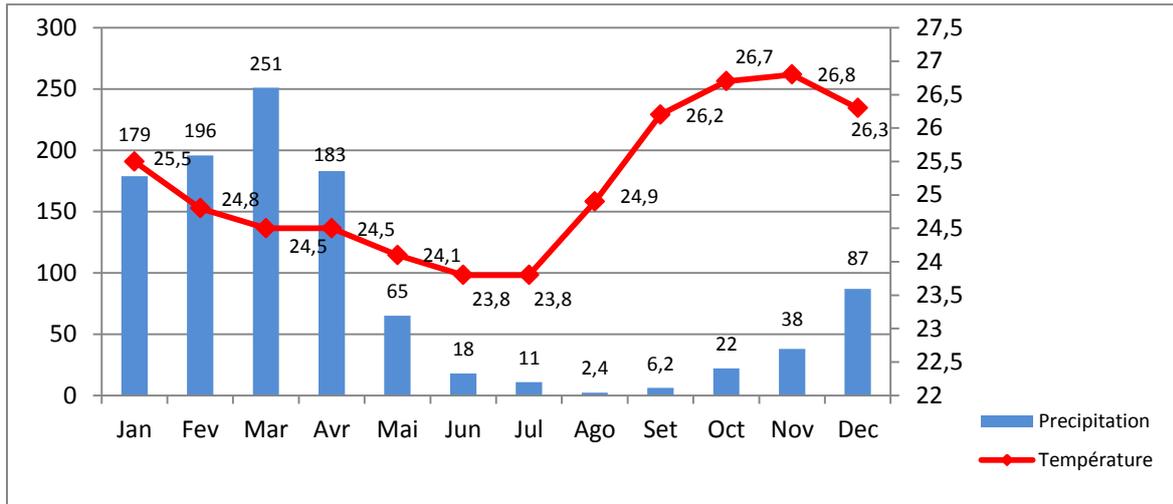


Figure 1.24. Diagramme ombrothermique de la station de Barbalha, 1974-2015. In Brito, 2016 (données FUNCEME).

Le tableau 1.1. présente le bilan hydrique pour la commune de Crato (1974-2011).

Tempo MESES	T (°C)	P (mm)	ETP Thornthwite	P-ETP (mm)	NEG - AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	26,90	209,88	147,52	62,4	- 47,1	62,4	62,4	147	0,0	0,0
Fev	25,90	215,28	119,0	95,6	0,0	100,0	37,6	119,7	0,0	58,0
Mar	25,30	253,32	120,54	132,8	0,0	100,0	0,0	120,5	0,0	132,8
Abr	24,90	192,13	108,48	83,6	0,0	100,0	0,0	108,5	0,0	83,6
Mai	24,70	63,90	107,27	- 43,4	- 43,4	64,8	- 35,2	99,1	8,2	0,0
Jun	24,10	14,42	94,19	- 79,8	- 123,1	29,2	- 35,6	50,0	44,2	0,0
Jul	23,80	10,13	92,98	- 82,8	- 206,0	12,7	- 16,4	26,6	66,4	0,0
Ago	25,10	2,70	112,82	- 110,1	- 316,1	4,2	- 8,5	11,2	101,6	0,0
Set	26,40	10,53	132,14	- 121,6	- 437,7	1,3	- 3,0	13,5	118,6	0,0
Out	27,20	21,91	154,06	- 132,2	- 569,9	0,3	- 0,9	22,8	131,2	0,0
Nov	27,40	47,27	155,39	- 108,1	- 678,0	0,1	- 0,2	47,5	107,9	0,0
Dez	27,10	103,06	156,16	- 53,1	- 731,1	0,1	0,0	103,1	53,1	0,0
TOTAIS	-	1144,5	1501,3	- 356,7	-	-	0,0	870,1	631,2	277,4
MÉDIAS	25,7	95	125	-	-	-	+ 100	73	53	23

Tableau 1.1. Bilan hydrique de la station de Crato, élaboré à partir des données de la FUNCEME (1974-2011) par Brito et Silva (2012). (T : Température; P : Précipitations ; ETP : Évapo-transpiration potentielle ; NEG-AC : perte en eau cumulée ; ARM : Réserve hydrique ; ALT: Variation de la réserve ; ETR: Évapo-transpiration réelle; DEF: Déficit hydrique ; EXC: Excédent hydrique).

Les mois les plus arrosés (janvier, février, mars) sont ceux où l'on observe un excédent hydrique ; la saturation des sols, seulement limitée par leur capacité maximale de rétention d'eau, est atteinte de février à avril. À l'inverse, 8 mois de l'année sont caractérisés par un déficit hydrique, de mai à décembre. Le déficit est le plus marqué en septembre (118,6 mm) et octobre (131,2 mm).

La situation est assez similaire à Barbalha, où l'on observe un déficit hydrique sur 8 mois (de mai à décembre), les maxima de déficit hydrique étant atteints en septembre (121,9 mm) et octobre (120,3 mm). Là aussi, les sols sont saturés de février à avril, une période qui sera donc favorable aux ruissellements lors des plus fortes pluies (Tableau 1.2).

Tempo MESES	T (°C)	P (mm)	ETP Thorntwaite	P-ETP (mm)	NEG - AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	25,50	180,00	119,84	60,2	- 50,7	60,2	60,2	119,8	0	0
Fev	24,80	197,00	102,02	95,0	0,0	100,0	39,8	102,0	0,0	55,2
Mar	24,50	251,00	108,50	142,5	0,0	100,0	0,0	108,5	0,0	142,5
Abr	24,50	183,00	105,00	78,0	0,0	100,0	0,0	105,0	0,0	78,0
Mai	24,10	61,00	102,76	- 41,8	- 41,8	65,9	- 34,1	95,1	7,6	0,0
Jun	23,80	17,00	95,41	- 78,4	- 120,2	30,1	- 35,8	52,8	42,6	0,0
Jul	23,80	10,00	98,59	- 88,6	- 208,8	12,4	- 17,7	27,7	70,9	0,0
Ago	24,90	2,40	114,46	- 112,1	- 320,8	4,0	- 8,4	10,8	103,7	0,0
Set	26,20	6,30	131,06	- 124,8	- 445,6	1,2	- 2,9	9,2	121,9	0,0
Out	26,70	23,00	144,15	- 121,2	- 566,7	0,3	- 0,8	23,8	120,3	0,0
Nov	26,80	38,00	141,24	- 103,2	- 670,0	0,1	- 0,2	38,2	103,0	0,0
Dez	26,30	89,00	137,14	- 48,1	- 718,1	0,1	0,0	89,0	48,1	0,0
TOTAIS		1057,7	1400,2	- 342,5	-	-	0,0	782,0	618,2	257,7
MÉDIAS	25,2	88	117	-	-	-	± 100	65	52	23

Tableau 1.2. Bilan hydrique de la station de Barbalha, élaboré à partir des données de la FUNCEME (1974-2011) par Brito et Silva (2012). (**T** : Température; **P** : Précipitations; **ETP** : Évapo-transpiration potentielle ; **NEG-AC**: perte en eau cumulée ; **ARM** : Réserve hydrique ; **ALT**: Variation de la réserve ; **ETR** : Évapo-transpiration réelle; **DEF** : Déficit hydrique ; **EXC** : Excédent hydrique).

D'après ces données, le climat de Crato et de Barbalha (Fig. 1.25) correspond au type C1S1 de Thorntwaite et Mather (1955) (sec à sub-humide, avec excès hydrique modéré en été) ou à la classe climatique BSW'h' de Köppen, c'est-à-dire un climat semi-aride, avec une courte saison des pluies en été-automne. Il est probable que le sommet de la *chapada*, avec ses températures plus basses, appartienne plutôt à la classe AW. Par comparaison avec les régions voisines (Bétard, 2007), la région d'étude apparaît comme une enclave relativement humide au sein des climats semi-arides du Nordeste.

La présence d'une pré-saison des pluies (décembre) est le principal facteur de différenciation par rapport aux autres régions intérieures du Ceará.

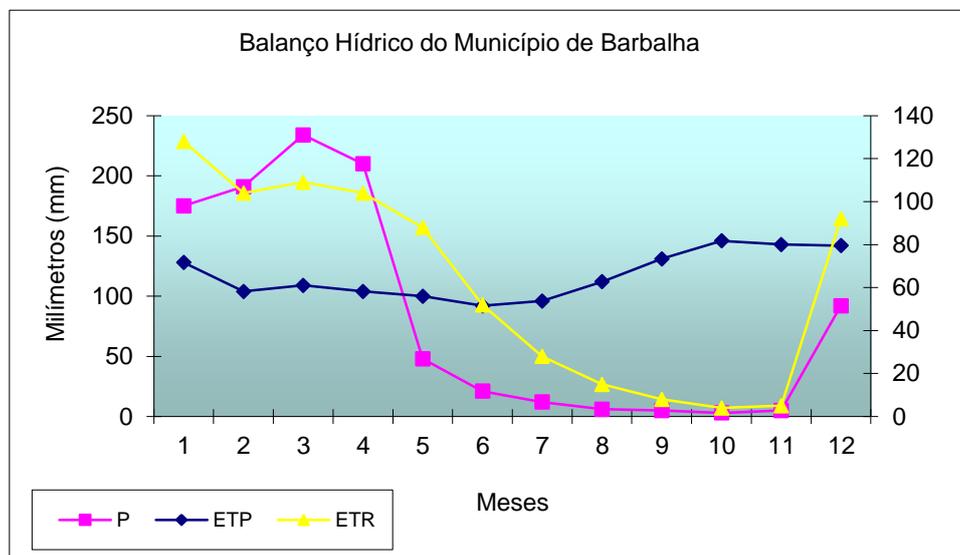


Figure 1.25. Bilan hydrique de la station de Barbalha, selon la méthode de Thornthwaite et Mather (1955). Graphique élaboré par A.O. Magalhães (2006). (Source des données : Varejão Silva, 1990).

1.3.3. L'hydrologie et ses excès : des torrents montagnards intermittents

La majeure partie du domaine semi-aride du Nordeste brésilien est caractérisée par une faible ressource hydrique, et les régimes hydrologiques sont calqués sur la saison des pluies, qui ne dure que 3 ou 4 mois. Les cours d'eau sont pour la plupart intermittents, mais une certaine pérennisation a été localement créée par la construction de barrages-réservoirs (« açudes »), alors que dans des régions de sources comme la Chapada do Araripe, les prélèvements publics et privés sur la ressource en eau ont au contraire transformé des cours d'eau pérennes en véritables oueds au régime spasmodique (crues-éclair : Magalhães, 2013 ; voir chapitre 2).

Les premières observations hydrologiques dans la région d'étude ont été effectuées en 1963-1966, sur les stations représentées dans le tableau 1.3 (SUDENE-ASMIC, 1967 ; APA Chapada do Araripe, 1999), c'est-à-dire en une période où l'urbanisation restait encore limitée, ainsi que l'artificialisation des cours d'eau, de leurs lits et de leurs régimes. Ce sont donc les seules qui représentent le fonctionnement « naturel » de ces rivières. Le cadre géographique dépasse celui des communes étudiées mais reste significatif pour notre propos.

Bassin-versant représentatif	Station Hydrologique	Superficie (km ²)	Indice de Compacité	Altitude Moyenne (m)
Batateiras	Batateiras	29,5	1,29	520
	Granjeiro	18,0	1,39	530
	Ponte Carité	198,0	1,23	420
Rio Seco	Missão Velha	266,0	1,49	450
Rio Carás	Sítio Lapinha	1.520,0	1,21	-
Rio dos Porcos	Podimirim	3.525,0	1,64	-

Tableau 1.3. Bassins-versants représentatifs et stations de jaugeage dans le Cariri (1963-1966). (Source : SUDENE-ASMIC, 1967).

Le fonctionnement de ces stations pendant 4 ans a permis d'obtenir des résultats importants. Les cours d'eau venus de l'escarpement de la *chapada* présentent un caractère torrentiel, ce qui engendre quelques difficultés techniques pour les mesures. Elles sont dues à l'instabilité des lits sableux (qui perturbe l'enregistrement automatique des niveaux d'eau) et à l'effet orographique sur les précipitations, qui engendre des maxima de précipitations à mi-pente, là où il est difficile d'installer des pluviomètres.

Cette irrégularité spatiale, même à l'échelle d'un petit bassin-versant, est difficile à évaluer, alors même qu'elle conditionne les modalités complexes de la formation des crues. C'est pourquoi l'étude a porté sur des bassins-versants de superficies variées, de 20 à 3 500 km². Avec l'évolution des éléments du régime hydrologique en fonction de l'accroissement de la superficie du bassin-versant, il est possible d'apprécier la variabilité des régimes dans le cadre d'une région apparemment homogène.

Selon cette étude (SUDENE-ASMIC, 1967 ; APA Chapada do Araripe, 1999), l'analyse des crues de fréquences annuelles et décennales indique les valeurs suivantes (tableaux 1.4 et 1.5) :

Station	Superficie km ²	Pics de crue maximum		Kr %	Vr (x10 ³) m ³	Lame écoulee mm	Temps de base heures
		m ³ /s	l/s.km ²				
Crato	29,5	55	1.820	15	230	7,8	3
Ponte Carité	198	25	125	15	1.500	7,5	40
Missão Velha	266	30	110	5	700	2,6	15
Sítio Lapinha	1.520	85	50	15	-	-	72 a 100
Podimirim	3.525	70	20	5	-	-	120 a 150

Tableau 1.4. Caractéristiques des crues dans les bassins-versants du bassin sédimentaire Araripe. Crues annuelles. Kr : Coefficient d'écoulement hors débit de base ; Vr : Volume d'écoulement de surface. (Source : SUDENE-ASMIC, 1967).

Station	Superficie (km ²)	Pic de crue maximum		Kr %	Vr (x10 ³) m ³	Lame écoulée mm	Temps de base heures
		m ³ /s	l/s.km ²				
Granjeiro	18,0	130	7.200,0	-	-	-	-
Crato	29,5	90	3.000,0	20	490	16,6	3 ¹ / ₂ a 4 ¹ / ₂
Ponte Carité	198,0	45	225,0	20	4.500	22,5	90 a 100
Missão Velha	266,0	55	205,0	8	1.500	5,6	20
Sítio Lapinha	1.520,0	150	100,0	20	-	-	100 a 120
Podimirim,	3.525,0	115	32,5	8	-	-	150 a 170

Tableau 1.5. Caractéristiques des crues dans les bassins-versants du bassin sédimentaire Araripe. Crues décennales. **Kr** : Coefficient d'écoulement hors débit de base ; **Vr** : Volume d'écoulement de surface. (Source : SUDENE-ASMIC, 1967).

D'un autre côté, à partir de la connaissance des écoulements annuels obtenue sur les 4 années d'observations, un modèle pluie-débit a été construit, incluant un "indice de précipitation" IP représentant les précipitations totales mensuelles qui dépassent un seuil déterminé. Dans le Cariri, le seuil retenu est de 125 mm. C'est sur cette base qu'ont été obtenus les résultats présentés dans le tableau 1.6 (APA Chapada do Araripe, 1999).

Station	Superficie Km ²	Lame écoulee mm	Ke%	Module	
				m ³ /s	l/s.km ²
Crato	29,5	298,0	18,4	0,279	9,45
Ponte Carité	198,0	213,0	15,4	1,340	6,70
Missão Velha	266,0	31,3	2,2	0,264	1,00
Sítio Lapinha	1.520,0	144,0	9,3	6,950	4,60
Podimirim	3.525,0	24,5	2,1	2,750	0,77

Tableau 1.6. Lames d'eau écoulées annuellement et modules dans les bassins-versants du bassin sédimentaire Araripe. **Ke** : coefficient d'écoulement incluant le débit de base. (Source : SUDENE-ASMIC, 1967).

Une des questions qui se posent dans l'évaluation des régimes hydrologiques et en particulier dans l'analyse des crues est la soustraction des écoulements qui représentent la contribution des aquifères en dehors des ruissellements se produisant lors de la saison des pluies (débit de base). Sur le Rio da Batateira et ses trois principaux affluents (Granjeiro, Lobo, São José), cette soustraction a été effectuée : à Ponte Carité, le débit de base est inférieur à 0,8 m³/s, ce qui correspond au drainage de 2 Mm³ environ. La part de ce type d'alimentation dans le Rio da Batateira à Crato est de 18 %, ce qui

illustre le grand rôle des sources du pied de la Chapada dans le fonctionnement hydrologique, au moins avant ceux des captages, les plus récents, qui ont considérablement réduit ces débits de base jusqu'à des valeurs non mesurables (lits à sec pendant la saison sèche, même à faible distance des sources).

Cependant, l'étude détaillée de crues récentes menée dans le chapitre suivant mettra en évidence le rôle bien plus important des écoulements superficiels dus aux précipitations les plus violentes de la saison des pluies, écoulements dont les caractéristiques sont fortement contrôlées par la morphologie de ces bassins-versants semi-montagnards (qui ne change guère à l'échelle de temps considérée) et surtout par les caractéristiques de l'occupation des sols et l'urbanisation galopante qui les affecte.

À l'échelle de notre secteur d'étude, les données sur le régime hydrologique du Rio Grangeiro sont parcellaires, en l'absence de mesures systématiques de débit jusqu'à l'installation, en 2016, d'une station de jaugeage sur la section « canalisée » traversant la ville de Crato. Il ne s'y écoule pratiquement pas d'eau pendant une partie importante de l'année, malgré le nombre (4) et l'importance des sources situées au pied de la Chapada. En effet, ces sources issues de l'aquifère gréseux ont été captées au moyen d'un système complexe et anarchique de tuyaux d'adduction d'eau le plus souvent privés et de canaux de terre (*levadas*) destinés à l'irrigation et aux loisirs (piscines) (Fig. 1.26 A). De ce fait, le ruisseau est privé de la plus grande partie d'un débit de base sur lequel aucune donnée n'est d'ailleurs disponible (Ribeiro, 2004).

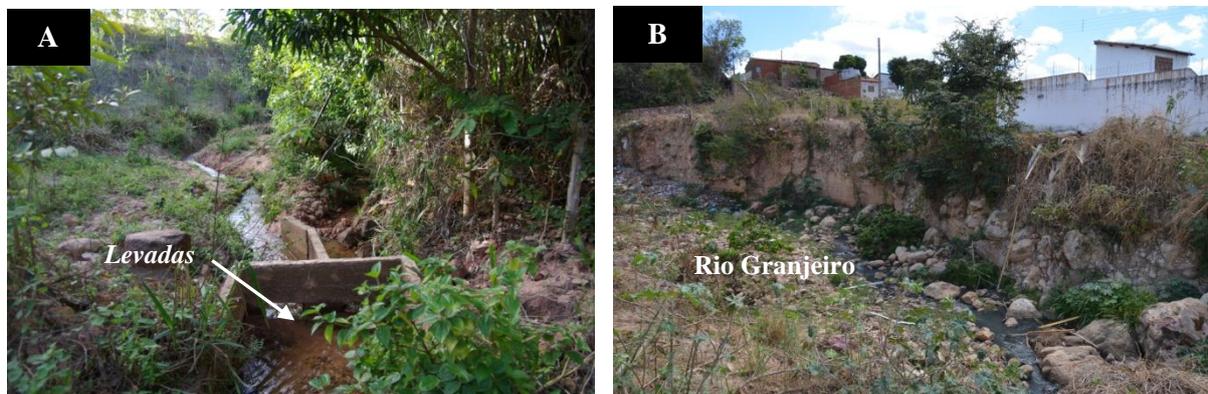


Figure 1. 26. Parties amont du Rio Grangeiro, Crato. **A.** Source (*nascente*) de Grangeiro, avec captage traditionnel (*levada*) et répartiteur d'eau d'irrigation. Photo : A.O. Magalhães, 2014. **B.** Lit du Rio Grangeiro en amont du pont de Lameiro. Photo : J.P. Peulvast, 2014.

Les parties moyennes et aval du cours écoulent donc surtout les eaux usées des égouts et les eaux pluviales (Fig. 1.26 B) ; en cas de fortes pluies, la concentration rapide de ces dernières et leur acheminement en ville par un canal étroit et pentu expliquent la brutalité du comportement hydrologique de ce drain. Les affluents (Riacho das Piabas, en rive gauche, près du pont de Lameiro et

Riacho da Vala, en rive droite) présentent les mêmes caractéristiques. L'étude détaillée de ce bassin-versant sera elle aussi présentée dans le chapitre suivant, avec l'analyse de crues récentes.

1.4. Occupation humaine et urbanisation de la dépression du Cariri Cearense et du front de la Chapada do Araripe

Dans le Cariri comme ailleurs, les changements rapides de l'occupation des sols dans les dernières décennies, essentiellement liées à l'urbanisation, font partie des facteurs les plus préoccupants dans l'évolution récente de la question des risques « naturels », en tout cas de ceux liés à l'écoulement des eaux et, pour une part, aux mouvements de terrain. C'est ce que présente ce paragraphe.

1.4.1. La ville de Crato : une expansion récente sur des sites variés

Parmi les trois villes principales de la région du Cariri (Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha), la ville de Crato (120 000 habitants) est la plus proche de l'escarpement qui délimite le plateau. Fondée au XVIII^e siècle sur les rives du Rio Grangeiro, l'un des cours d'eau descendus de l'escarpement, elle s'étend de façon plus ou moins désordonnée vers l'amont, principalement le long de ce torrent et sur les interfluves découpés par ses affluents et ses voisins dans un large glacis de piémont.

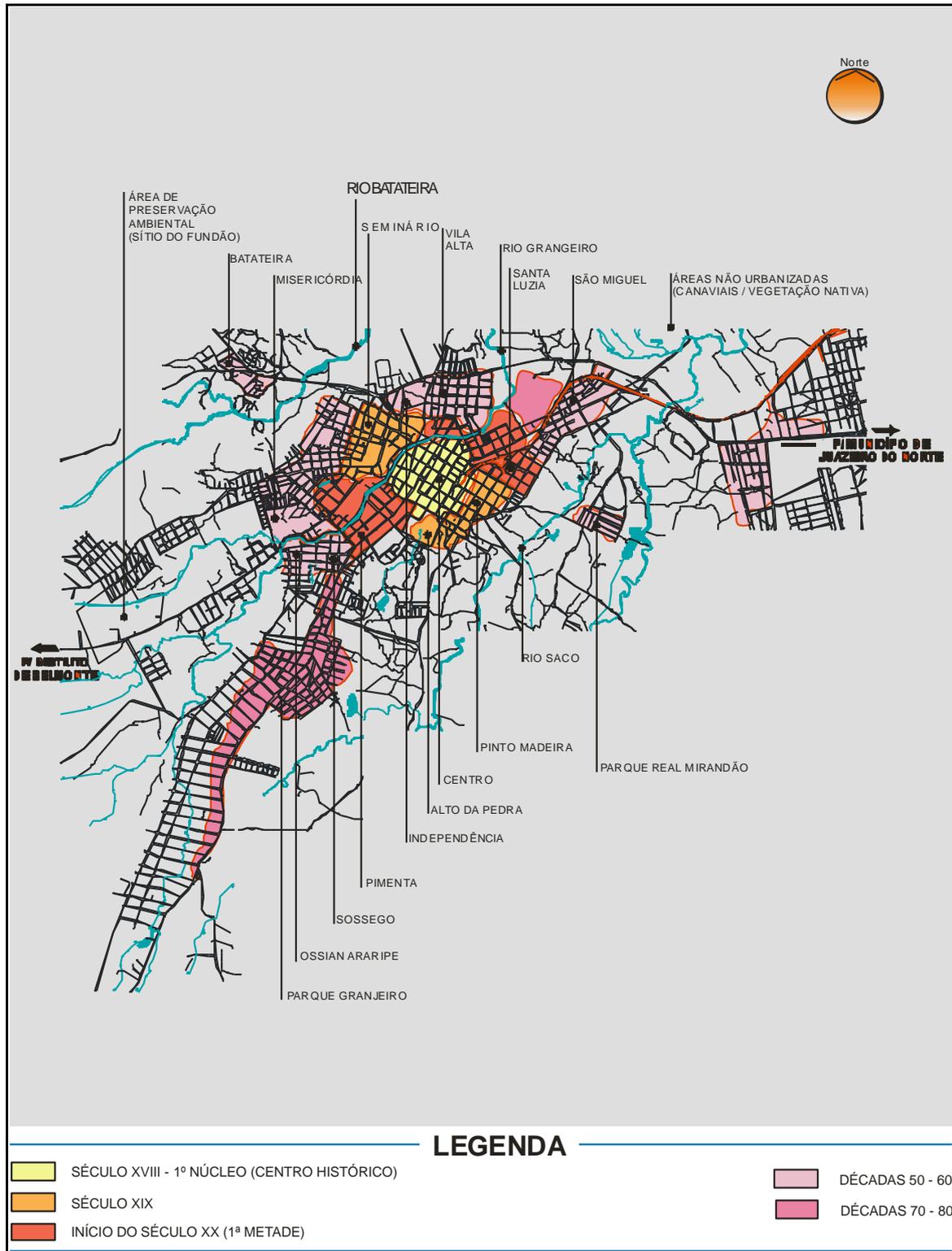


Figure 1.27. Evolution urbaine de Crato, jusque dans les années 1980. (Source: D’après ESTADO DO CEARÁ, 2000, modifié).

L’histoire de la ville remonte à la fin du XVII^e siècle, avec les explorations du sud du Ceará menées par les colons bahianais, éleveurs sans terre et parfois esclaves, à la poursuite des Indiens et à la recherche de nouvelles terres à exploiter, principalement pour l’élevage bovin (Ribeiro, 2004). Dès

cette époque s'est installée une mission religieuse de l'ordre des Capucins, appelée Mission de Miranda, sur les rives du Rio Granjeiro. Autour s'est constituée une agglomération appelée Aldeia dos Brejos, entre deux crêtes d'interfluves (Alto da Penha, Alto do Seminário, lesquels correspondent maintenant aux quartiers Barro Vermelho et Seminário) (Fig. 1.27).

Au début du XVIII^e siècle, la région, déjà appelée Cariri, a été divisée en grands lots (« *sesmarias* ») pour l'élevage bovin. Une de ces exploitations fut revendue à un grand propriétaire de la région dont les héritiers donnèrent les terres, celles de l'actuelle ville de Crato, aux Indiens de la Mission de Miranda en 1743. Elles furent prises en main pour le compte de la mission par un religieux, le frère Carlos Maria de Ferrara, qui entreprit dès 1745 la construction de l'église Notre Dame de la Penha – l'actuelle cathédrale), devant l'*aldeamento*. Tout autour, les cultures (riz, maïs, haricots, manioc, canne à sucre) ont bien vite dépassé en importance l'élevage bovin, grâce aux 250 sources du secteur (Governo do Estado do Ceará, 2000). Les premiers *engenhos* de canne à sucre ont été installés vers 1750, surtout pour la production de *rapadura* (pâte de canne à sucre solidifiée) et/ou de *cachaça* (eau de vie) (Andrade, 1986). C'est en 1764 que Crato, devenue principal centre de commerce et de production de *rapadura* et de farine de manioc du Cariri, est passé au rang de Vila (Vila Real de Crato). Par suite des appétits pour le développement de l'agriculture et de la densification de la population, les Indiens ont fini par être expulsés en 1779.

Crato accède au rang de cité (*cidade*) en 1853 et domine alors l'économie régionale (jusqu'à 90 *engenhos*). Avec l'arrivée de commerçants venus d'Icó, la ville change de vocation, les anciennes maisons cédant la place à des établissements commerciaux (PDM do Crato, Governo do Estado do Ceará, 2000), tandis que se développent divers services urbains. L'activité commerciale et la zone d'influence s'étendent fin XIX^e-début XX^e siècles, ce qui accélère l'expansion urbaine.

Du point de vue géographique, le centre historique de Crato a été construit dans l'étroite plaine de confluence entre le Rio Granjeiro et le Riacho da Vala (Fig. 1.27 ; Fig. 1.28). Le plan est conçu au départ selon un schéma quadrangulaire, à l'intérieur de la vallée du Rio Grangeiro. Ce n'est qu'avec l'inauguration du séminaire São José en 1874 que l'agglomération commence à gagner les interfluves (Alto do Seminário, en rive gauche). Au XIX^e siècle, l'expansion urbaine s'est donc produite le long du Rio Granjeiro avec la création des quartiers Seminário, sur l'interfluve Granjeiro - Batateira, et Alto da Penha et Pinto Madeira, sur l'interfluve Granjeiro - Riacho Saco Lobo. Dans la première moitié du XX^e siècle, sont construits les quartiers Pimenta, sur les terrasses fluviales qui s'élargissent progressivement vers l'aval, et Santa Luzia, en marge droite de la plaine de confluence Granjeiro-Saco Lobo (PDM Crato, Plano Diretor Municipal, 2009).

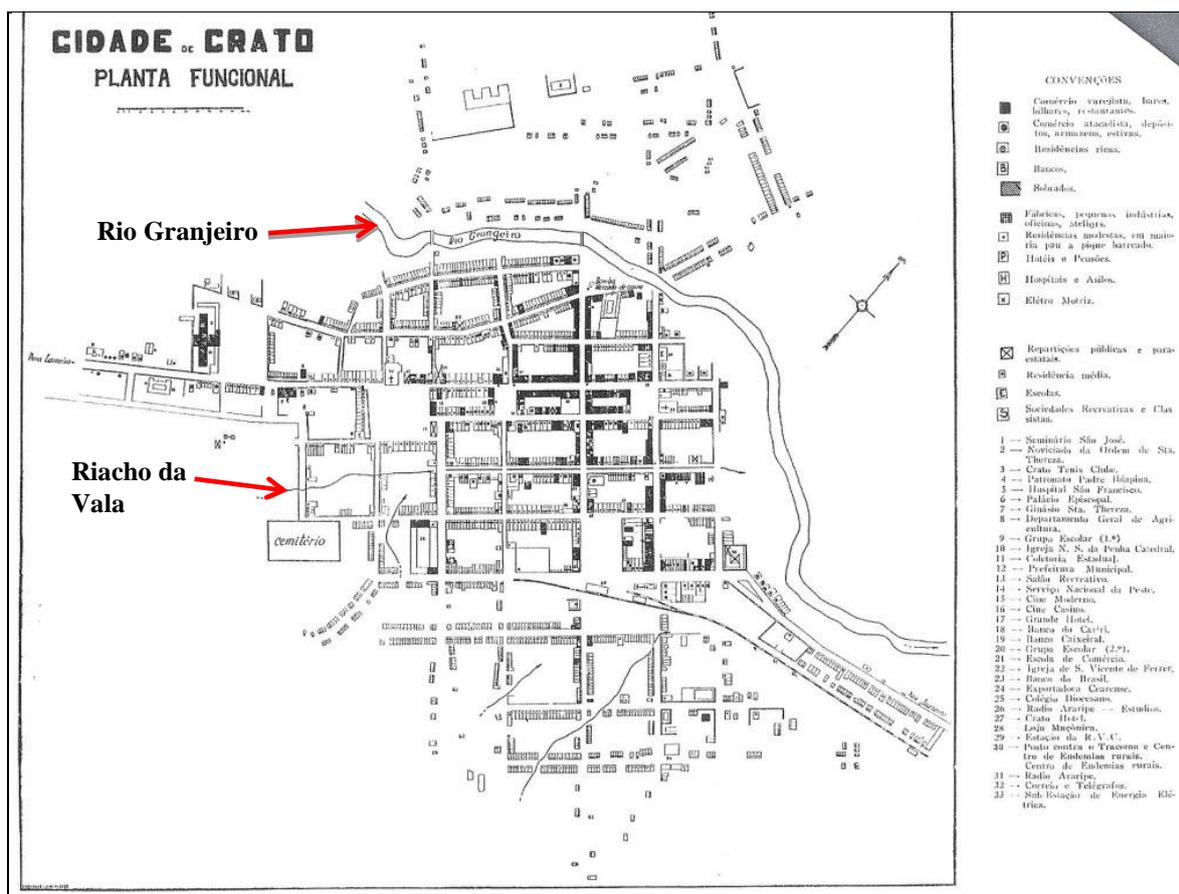


Figure 1.28. Plan du centre ville de Crato, date non précisée (probablement vers les années 1950). Le Rio Granjeiro ne paraît pas aménagé ; le Riacho da Vala est déjà partiellement couvert en aval du cimetière. Document fourni par un employé du FUNDETEC/URCA.

Dans les décennies 1950-1960, l'urbanisation gagne des secteurs plus éloignés du centre, avec la construction des quartiers Batateira, Misericórdia, Independência et Vila Alta sur les hautes terrasses de la rive gauche et du Rio da Batateira (Fig. 1.27). Dans le même temps, la marge droite du Granjeiro et l'extrémité de l'interfluve Granjeiro-Saco Lobo sont occupées (quartiers Ossian Araripe et Sossego), ainsi que l'interfluve Saco Lobo - Constantino (quartiers São Miguel et Parque Real Mirandão). La spéculation immobilière et la construction s'intensifient dans les décennies 1970-1980, vers l'amont. Elle gagne les marges de l'Aire de Protection Environnementale (Area de Proteção Ambiental, APA Chapada do Araripe) qui englobe la partie NE de la Chapada, l'escarpement et les sources (Clube Granjeiro...). Les fonds alluviaux, principalement à l'aval de la ville, restent consacrés à la culture de canne à sucre, pour des finalités industrielles (production d'alcool, depuis les années 1970). Cette activité, de même que la division croissante des propriétés par suite des partages pour héritages, ont chassé de leurs terres de nombreux habitants (« moradores ») qui, devenus « trabalhadores », n'ont d'autre ressource que de s'installer dans des quartiers informels à la

périphérie, sur les hauteurs et dans les secteurs à risques, dépourvus de services et d'équipements collectifs.

Le quartier Parque Granjeiro, constitué de lotissements, s'étale principalement sur le versant de rive droite entre le quartier Pimenta et le pied de l'escarpement (Fig. 1.27), mais le réseau de rues et les constructions occupent également le fond de la vallée, avec un quadrillage de rues perpendiculaires, parallèles ou obliques par rapport au cours d'eau.

Plus récemment (décennies 1990-2010), les constructions se sont densifiées dans le bassin-versant, avec la multiplication des lotissements, des domaines résidentiels fermés (*condomínios fechados*), l'installation d'industries (1997 : usine de chaussures GRENDENE sur l'interfluve du quartier Misericórdia, en marge gauche du Rio Granjeiro), etc. Ces nouveaux ensembles sont implantés sur les glacis et les versants, généralement hors des zones inondables, mais ils contribuent à aggraver les risques dans le centre, par suite de l'imperméabilisation croissante des sols et du rôle de la voirie qui achemine plus rapidement les eaux vers les talwegs, dès que les axes sont parallèles à la pente ou suivent des talwegs (quartiers Pimenta, Sossego, Seminário) (Fig. 1.29 ; voir aussi chapitres suivants).



Figure 1.29. Crato et sa périphérie rurale en 2017. Image Google Earth, 09-2017.

Avec l'accroissement de la spéculation immobilière, d'anciens secteurs ruraux se sont urbanisés et la place des espaces naturels a reculé au profit d'implantations plus ou moins organisées. Il existe encore, principalement dans les vallons de la partie SW du bassin-versant (Lameiro-

Belmonte) de larges secteurs ruraux, occupés par une végétation secondaire, entre de petites exploitations agricoles (bananeraies...). Mais c'est seulement dans les aires appartenant à la FLONA-Araripe, dans le haut de l'escarpement et sur la Chapada, que l'on rencontre encore une végétation dense proche de l'état de forêt primaire (Fig. 1.16 A ; Fig. 1.30).

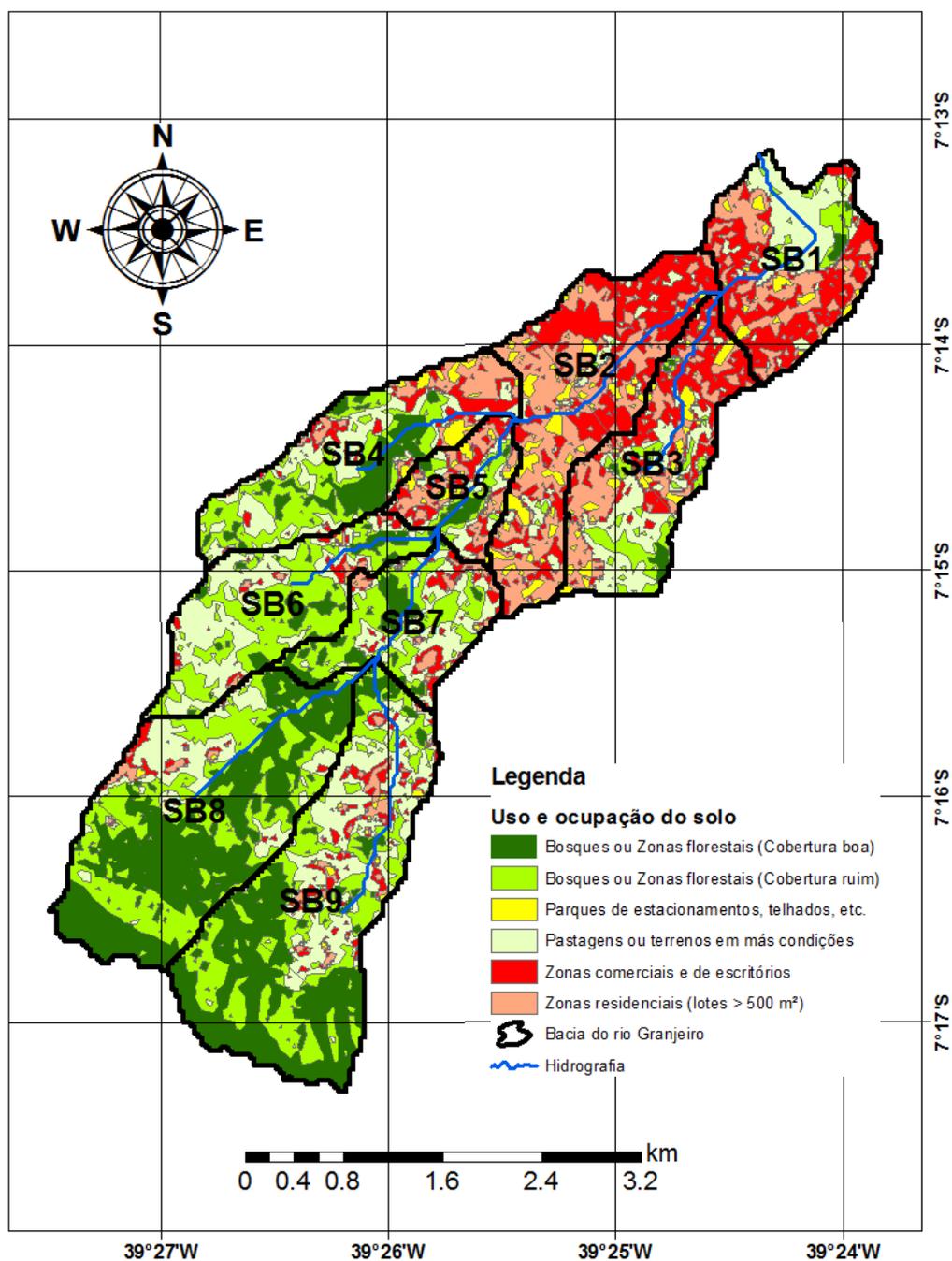


Figure 1.30. Usage et occupation des sols dans le bassin-versant du Rio Granjeiro. (Source: D'après Moreira, 2013). Vert foncé : bois et forêts ; vert clair : bois et forêts (couverture dégradée) ; jaune : parkings, hangars, etc. ; gris clair : pâturages et zones dégradées ; rouge : zones commerciales et bureaux ; rose-orangé : zones résidentielles (terrains >500 m²).

Le facteur principal de l'expansion urbaine au bas de l'escarpement fut l'installation de clubs récréatifs (Clube Recreativo Granjeiro, Sociedade do Clube Serrano Atlético Cratense, AABEC – Associação Atlética Banco do Estado do Ceará, Itaytera Clube, Passárgada, etc.), un peu en contrebas des sources. Par la suite, une partie de la base de l'escarpement, avantaagée par une relative fraîcheur par rapport au centre ville, fut lotie pour la construction de maisons de villégiature ou de propriétés de luxe et, plus récemment, pour l'implantation de domaines résidentiels fermés (*condomínios fechados*). Ce qui fit de ces espaces les quartiers nobles de la ville, les valorisant comme des espaces urbains (Ribeiro, 2004), principalement dans les parties amont des vallées des rios Granjeiro, das Piabas et Água Fria-Batateira (Luanda ; Fig. 1.31). C'est aussi dans ces secteurs, dans les zones loties en voie d'occupation, que l'on observe la majorité des processus érosifs accélérés, en particulier pendant les phases de défrichage et de construction (Ribeiro, 2004). L'expansion urbaine s'est donc faite sans planification ni véritable organisation spatiale, en particulier sans lien avec les potentiels risques liés à la topographie et à l'hydrographie.



Figure 1.31. Lotissements, clubs et *condomínios fechados* au pied de la Chapada do Araripe, à Crato. **A.** Granjeiro, vu depuis le *mirante*. Photo : J.P. Peulvast, 2014. **B.** Clube Serrano, Belmonte, 2008. Photo : J.P. Peulvast.

1.4.2. Barbalha, une expansion moins contrainte que celle de Crato

À 15 km au SE de Crato, la ville de Barbalha a été construite sur des terrasses et des interfluves plus éloignés de l'escarpement, en bordure sud de la plaine alluviale du Rio Salamanca, mais certains quartiers occupent des fonds de vallée (vallée du Riacho do Ouro). Plusieurs hameaux isolés (« *distritos* ») se situent plus près de la *chapada* ou même à sa base (Arajara, Farias, Macaúba, Caldas). Selon les données de l'IPECE (2016), la commune couvre une superficie de 569,5 km², avec une population estimée à 59 343 habitants.

Les terres proches des marges du Rio Salamanca étaient habitées par les Indiens Kariri jusqu'à l'arrivée des colonisateurs au XVII^e siècle. La volonté des militaires et des religieux de les contrôler et

de les catéchiser s’est traduite par leur regroupement en “*aldeamentos*” ou missions, tandis que l’existence de terres considérées comme inexplorées et libres attirait de nombreuses familles portugaises, principalement pour des activités d’élevage bovin (Source : <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/barbalha/historico>). Fondé dans ce contexte autour d’une chapelle, le village de Santo Antônio de Barbalha – nommé Barbalha en 1838 –, est devenu indépendant de Crato en 1846 (Fig. 1.32). Il s’est agrandi grâce au développement de la culture de la canne à sucre, en particulier sur les terres fertiles de la vallée du Rio Salamanca, et de la production de *rapadura*, devenant même une des villes les plus riches de la région. Il existait alors plus de 70 *engenhos*, 13 distilleries et 150 “*casas de farinha*” (production de farine de manioc), principalement dans les fonds de vallées. De cette prospérité témoignent les habitations de styles variés du centre ville, mais simultanément, les populations pauvres se sont entassées dans des quartiers sans assainissement. Ayant pu accéder au rang de ville (*cidade*) en 1876, Barbalha a dû accueillir dès l’année suivante les paysans pauvres chassés de leurs terres par un grand épisode de sécheresse. La ville a néanmoins continué à se développer grâce à un actif commerce des étoffes et aux industries liées à l’agriculture.



Figure 1.32. La chapelle Saint Antoine à Barbalha. Photo Padre Paulo, non datée. Construite en 1778 sur les terres du capitaine Francisco Magalhães Barreto, considéré comme le fondateur de Barbalha. (Source : <http://jardimcrianca.blogspot.com/2013/08/paroquia-santo-antonio-175-anos.html>).

Le noyau urbain, bâti sur l’extrémité de l’interfluve qui sépare la plaine du Rio Salamanca de la vallée du Riacho do Ouro, était concentré autour de l’église Saint Antoine et d’une place centrale. La topographie ne lui permettait de se développer que de façon limitée, vers le SE, où furent construits la gare et divers édifices publics (mairie, prison). Ce n’est qu’à partir de 1955 que commença

véritablement l'expansion urbaine, avec la construction du lotissement Santo Antônio, au sud (Fig. 1.33). L'arrivée du chemin de fer en 1950 puis de l'électricité en 1961, depuis l'usine hydroélectrique de Paulo Afonso (Pernambuco), permit l'implantation d'industries nouvelles (cimenterie, céramique), ce qui entraîna la construction de nouveaux quartiers et “*conjuntos habitacionais*” (Malvinas, Vila Santa Teresinha e Vila São José (Piancó, 1998), principalement autour du Riacho do Ouro et plus à l'est. Plus tard, en 1970, de nouveaux lotissements ont été bâtis vers l'est, sur des secteur accidentés pourtant considérés comme des zones de risque (Alto da Alegria). Le développement urbain a continué à attirer de plus en plus les populations rurales dans les années 1980, entraînant en retour la croissance de la ville à proximité du centre (quartiers Bela Vista, Nossa Senhora de Fátima puis Cirolândia, entre le Riacho do Ouro et le Riacho Seco).

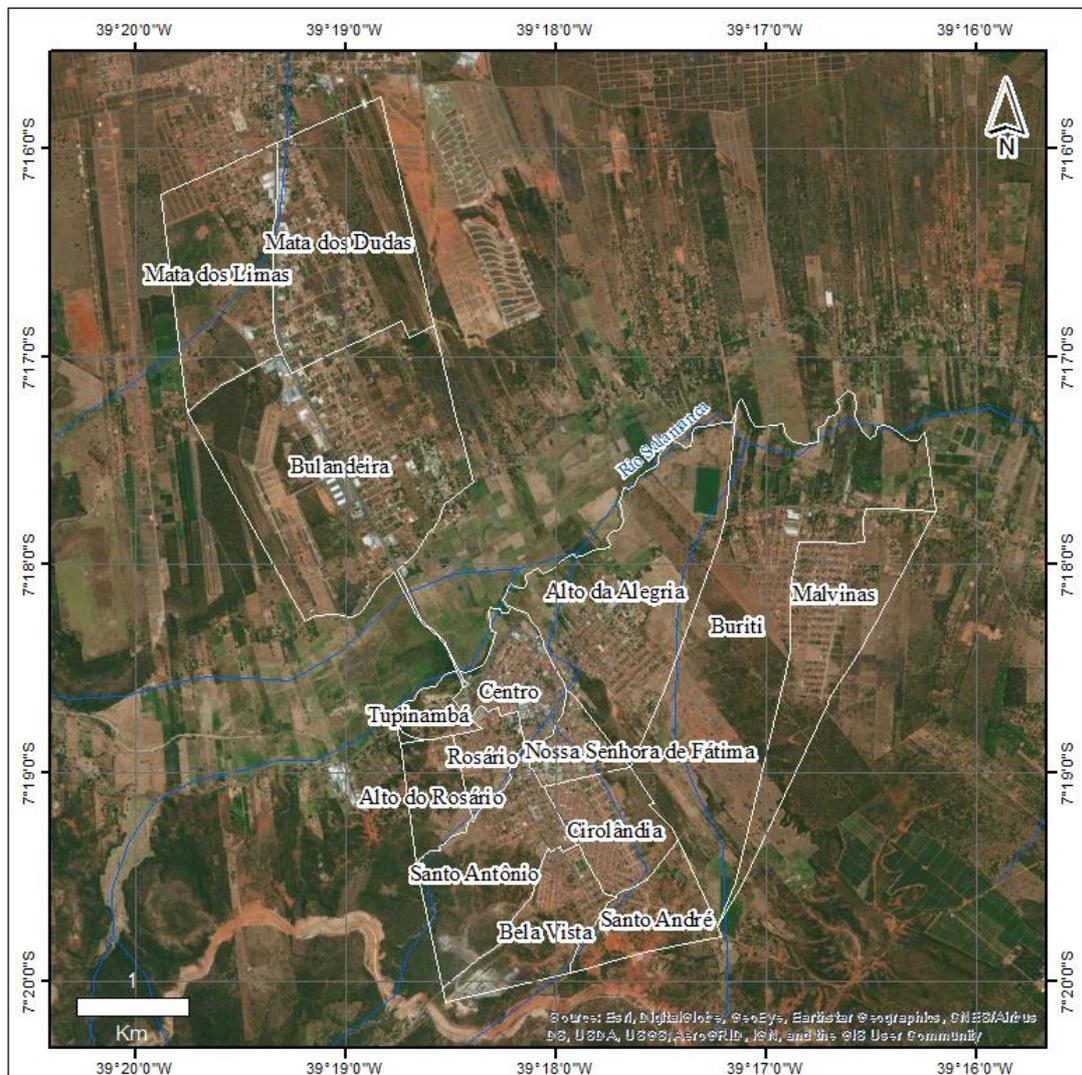


Figure 1.33. Les quartiers de Barbalha. Image Google Earth, 2017. (Élaboration : Carvalho Neta, M.L., 2018).

Des équipements importants, en particulier plusieurs établissements hospitaliers et une faculté de médecine de l'Université Fédérale du Ceará (créée en 2001), illustrent une vocation médicale et une grande réputation remontant aux années 1970. La plupart des équipements ont été construits dans les quartiers centraux. Cependant, les infrastructures peinent à suivre, que ce soit en ville (voirie, collecte et traitement déficients des déchets – y compris hospitaliers ! –, assainissement inexistant pour plus de la moitié des logements, égouts à ciel ouvert, insuffisante protection contre les inondations) ou autour, dans les quartiers éloignés et les implantations isolées de la commune (*distritos, sítios...*), où se multiplient les atteintes à l'environnement (déforestation, brûlis...). En outre, une forte disparité sociale oppose quelques quartiers du centre ville composés de grandes maisons anciennes aux façades ouvragées et pourvues de jardins, aux quartiers plus périphériques occupés par des populations modestes ou pauvres et en partie installés sur des secteurs à risques (versants instables, zones inondables comme celles des rives du Riacho do Ouro canalisé).

1.5. Conclusion du chapitre 1

Deux récents articles sur la riche géodiversité de la région étudiée et en particulier dans le Géoparc Araripe (Bétard *et al.*, 2017, 2018) dressent un constat alarmant sur l'état de l'environnement et la question des risques naturels, qui vient donner à ce chapitre un éclairage plus pertinent pour le sujet traité. De nombreux problèmes environnementaux découlent de l'absence de contrôle et de respect des normes environnementales. La réalité des déboisements dans l'escarpement et son piémont, et la destruction de la forêt ripicole (*mata ciliar*) le long des cours d'eau, concourent non seulement à des pertes significatives de biodiversité, mais seraient aussi responsables de phénomènes localisés de ravinements et de mouvements de terrain affectant les infrastructures urbaines et rurales de la région (Magalhães et Peulvast, 2013). L'absence de planification urbaine et environnementale à l'échelle métropolitaine a également conduit à des formes d'occupation illégale de l'espace et à une exploitation anarchique des ressources hydriques (captage illégal de sources pour l'irrigation ou la consommation individuelle), dans une région où l'urbanisation galopante conduit à une augmentation rapide du taux d'imperméabilisation des sols aux dépens d'espaces ruraux et naturels. Parmi les trois villes principales de la région du Cariri (Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha), la ville de Crato est celle dont l'expansion urbaine en direction de l'escarpement menace le plus directement le biopatrimoine remarquable associé aux derniers vestiges de *mata atlântica* présents dans la région. S'y ajoute aujourd'hui l'impact de la construction du canal de transposition des eaux du São Francisco vers le bassin du Rio Salgado, qui a déjà traversé la commune de Barbalha et atteint actuellement celle de Crato (Fig. 1.31, bas de l'image).

Enfin, la pollution des sites et les problèmes de contamination des sols et des eaux constituent sans doute l'un des dommages environnementaux les plus manifestes et les plus préjudiciables en termes d'image pour le Géoparc. Les rejets d'eaux usées et de résidus solides (domestiques,

industriels) dans les cours d'eau causent non seulement une grave pollution à l'origine du mauvais état écologique des rivières, mais peuvent aussi avoir des conséquences très graves pour la santé humaine. De nombreux efforts restent à faire, qui passent notamment par des actions de sensibilisation et d'éducation à l'environnement auprès des différentes catégories de la population et des acteurs locaux.

L'une des clés d'un développement territorial durable dans le Cariri du Ceará passe probablement par le renforcement et l'élargissement des actions éducatives, visant à aider le grand public et la population locale, encore inégalement sensibilisée (voir les résultats de l'enquête récemment réalisée sur ce thème à Santana do Cariri : Castro *et al.*, 2015; voir aussi Silva *et al.*, 2017) à prendre conscience de l'importance de préserver le patrimoine naturel et culturel de la région, mais aussi de connaître le fonctionnement du milieu et les aléas associés. À ce sujet, parmi les actions à entreprendre figure la sensibilisation à la question des aléas et risques naturels, dans la mesure où plusieurs types de phénomènes menacent directement les zones urbanisées et où des catastrophes liées aux crues soudaines affectent régulièrement les villes du piémont, comme cela a été montré sur la première décennie du XXI^e siècle (Magalhães et Peulvast, 2013).

Sur ce dernier point, l'enjeu est particulièrement important car la faible conscience du risque, chez les habitants comme parmi les acteurs locaux (Magalhães, 2014), rend le territoire fortement vulnérable face au risque de catastrophe naturelle, alors que la protection des biens et des personnes devrait constituer une priorité de l'action territoriale. Bien qu'aucune catastrophe meurtrière ou de grande ampleur n'ait été recensée au cours de la période récente ou même historique, plusieurs crues dévastatrices ont affecté les quartiers bas des villes de Crato et Barbalha, presque tous les ans depuis 2002 (Magalhães et Peulvast, 2013). À l'amont, les quartiers proches de la *Chapada* sont exposés aux risques liés aux grands mouvements de masse (glissements de terrain, coulées de débris), plus rares mais potentiellement plus dangereux encore, pouvant affecter l'escarpement et son piémont de plus en plus urbanisé (Peulvast *et al.*, 2011). Il reviendra aux chapitres suivants (2 et 3) de présenter ces phénomènes et d'analyser leur rôle dans la réalité des aléas et risques qui pèsent sur la région.

Chapitre 2 : Crues et inondations dans la région du Cariri Cearense. Étude de cas et séries historiques.

2.1. Introduction du chapitre 2

Plusieurs graves crues ont affecté le Nordeste brésilien depuis les années 2000 (ex : Pernambuco, Alagoas, janvier 2010). Celle du Rio Granjeiro, qui a provoqué d'importants dommages dans le centre-ville, le 28 janvier 2011, est un exemple de ces événements brutaux qui menacent de plus en plus les biens, les infrastructures et les personnes. Malgré la répétition récente de telles catastrophes, ici et dans d'autres régions du Brésil (par exemple dans l'État de Rio de Janeiro, janvier 2010 et 2011), il n'existe guère de « culture » (Glastron, 2003) ou même d'appréhension locale des risques, ni aucune réelle expression de cette problématique dans l'aménagement et la planification urbaine (Magalhães *et al.*, 2010). Dans la littérature scientifique, il n'existait jusque récemment que quelques travaux sur des crues et des mouvements de terrain de petite taille affectant les systèmes de vallées et d'interfluves qui forment le site urbain (Ribeiro et Guerra, 2003 ; Soares, 2006 ; Carvalho et Ribeiro, 2007).

La connaissance des aléas a commencé à s'étendre avec l'identification de grands mouvements de masse ayant affecté l'escarpement (glissements) et les fonds de vallées (coulées de débris), probablement avec des temps de récurrence assez longs pour que ces événements soient jusqu'alors restés ignorés (Peulvast *et al.*, 2011). En revanche, les crues et, en particulier, les crues-éclair, sont beaucoup plus fréquentes. Elles restent pourtant mal étudiées et gérées, en dépit des nombreuses annonces faites après chaque inondation.

Un des objectifs de ce chapitre est donc de contribuer à combler cette lacune, tout d'abord à partir d'une étude de cas portant sur la crue éclair et l'inondation du 28 janvier 2011 à Crato. Cette étude reprend en grande partie un article déjà publié (Magalhães et Peulvast, 2013). Après une présentation des méthodes utilisées, elle décrit cette crue, ses causes, son déroulement et ses conséquences, puis analyse les facteurs naturels et anthropiques en cause, reprenant en partie une démarche systémique suivie, entre autres, dans une étude menée par Menad *et al.*, (2012) sur l'inondation de 2001 à Bab-el-Oued (Alger, Algérie). Accompagnée d'une mise en perspective historique sur les dernières décennies, à Crato et dans la commune voisine de Barbalha, elle aboutit à une réflexion sur le caractère de moins en moins exceptionnel de tels événements dans le contexte d'une urbanisation mal contrôlée qui modifie la formation et les modalités des écoulements, tout en aggravant les menaces sur les biens et les personnes.

2.2. Crues éclair et inondations : l'épisode du 28 janvier 2011 à Crato

2.2.1. Contexte et aspects méthodologiques

Non vécu directement, l'événement a été décrit à partir de recherches bibliographiques, principalement dans la presse écrite (*Jornal do Cariri, Diário do Nordeste, O Povo*). Il a aussi été analysé à partir de documents audiovisuels (télévision, vidéos amateur, reportages photographiques, blogs), complétés par la collecte de données d'ordre météorologique et hydrologique issues de stations locales. Des documents sur la gestion de la catastrophe ont été obtenus de différents organismes d'État (Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME, Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Ceará – COGERH, Instituto Nacional de Meteorologia - INEMET, Coordenadoria Estadual de Defesa Civil – CEDEC, Corps de Pompiers militaires, etc.) ainsi que de la mairie (Prefeitura Municipal do Crato : Secretaria Municipal do Meio Ambiente). Le « *Plano Diretor do Município do Crato* » (*Governo do Estado do Ceará, 2000*) a aussi été consulté ainsi que divers documents cartographiques et données officielles.

L'étude repose aussi sur des travaux de terrain personnels menés dans la région depuis 2004, avant et après la crue. L'analyse de cartes (en particulier aux échelles 1/50 000 et 1/10 000) a été complétée par celle d'images 3D de Google Earth et de photographies au sol de dates variées, avant, pendant et après l'événement. Les données obtenues à partir de l'analyse des photos, vidéos et reportages ont été utilisées pour cartographier l'inondation du centre-ville, afin d'identifier les secteurs touchés et de les rapporter à la topographie ainsi qu'aux éléments permettant de caractériser la vulnérabilité (atteinte aux structures, mise hors de fonction...) des différents quartiers et installations. Enfin, la consultation des nouvelles et comptes rendus à travers les médias, celle des rapports techniques rédigés après la crue, ainsi que les contacts pris avec la population et les acteurs concernés (politiques, techniciens, représentants d'associations) à différents niveaux (Fédération, État, commune), ont permis de compléter les données et de prendre un recul critique par rapport aux informations immédiates.

2.2.2. L'événement du 28 janvier 2011 : aspects météorologiques

Généralement, les précipitations les plus importantes dans le Ceará commencent chaque année en décembre et peuvent durer jusqu'en juin, selon les conditions océaniques et atmosphériques régionales. Les pluies qui tombent en décembre et janvier sont appelées *chuvas de pré-estação* (pluies d'avant-saison), et se produisent principalement dans la région du Cariri. Ces pluies et celles de la saison des pluies sont influencées par les conditions locales, régionales et globales. Parmi celles-ci, les phénomènes El Niño et La Niña, la température de l'Atlantique tropical, les alizés de NE et SE, entre autres, sont considérés comme facteurs déterminants, contribuant ou non à la formation de nuages et

de précipitations sur l'État (INPE, 2011 : voir chapitre 1). Nous décrivons ici l'événement pluvieux du 28 janvier 2011 survenu à Crato et l'inondation correspondante.

Les précipitations qui ont atteint la commune de Crato le 28 janvier 2011, provoquant le chaos, la panique et des destructions dans la ville, ont amené le maire de l'époque, Samuel Araripe, à décréter immédiatement l'état d'urgence. Selon le bulletin de la Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2011), un total de 162 mm de pluie tomba dès le petit matin, pratiquement sans interruption pendant 6 heures (*Relatório dos Bombeiros/Defesa Civil* ; rapport des Pompiers et de la Défense Civile). Alors que beaucoup de personnes dormaient, la pluie a provoqué une grosse crue torrentielle du Rio Granjeiro, la destruction partielle du canal qui traverse la ville et l'inondation d'une partie du centre.

Le graphique des précipitations journalières de janvier à mai 2011 sur la station de Crato, située en zone urbaine à 427 m d'altitude, montre une concentration des pics sur quelques jours de chaque mois (Fig. 2.1 A), avec des totaux mensuels de 392,8 mm en janvier, 331,4 mm en février, 192,4 mm en mars, 133,4 mm en avril et 88 mm en mai. Le pic le plus important correspond au 28 janvier 2011 (162 mm) ; ce même jour, 137 mm ont été mesurés à la station de Lameiro, plus proche de la Chapada (Fig. 2.1 B). Il avait déjà beaucoup plu les jours précédents (74,7 mm les 25 et 26 janvier), ce qui implique que le niveau des nappes avait pu s'élever, avec des saturés ou proches de la saturation. Ceci a pu diminuer l'infiltration et augmenter les coefficients de ruissellement.

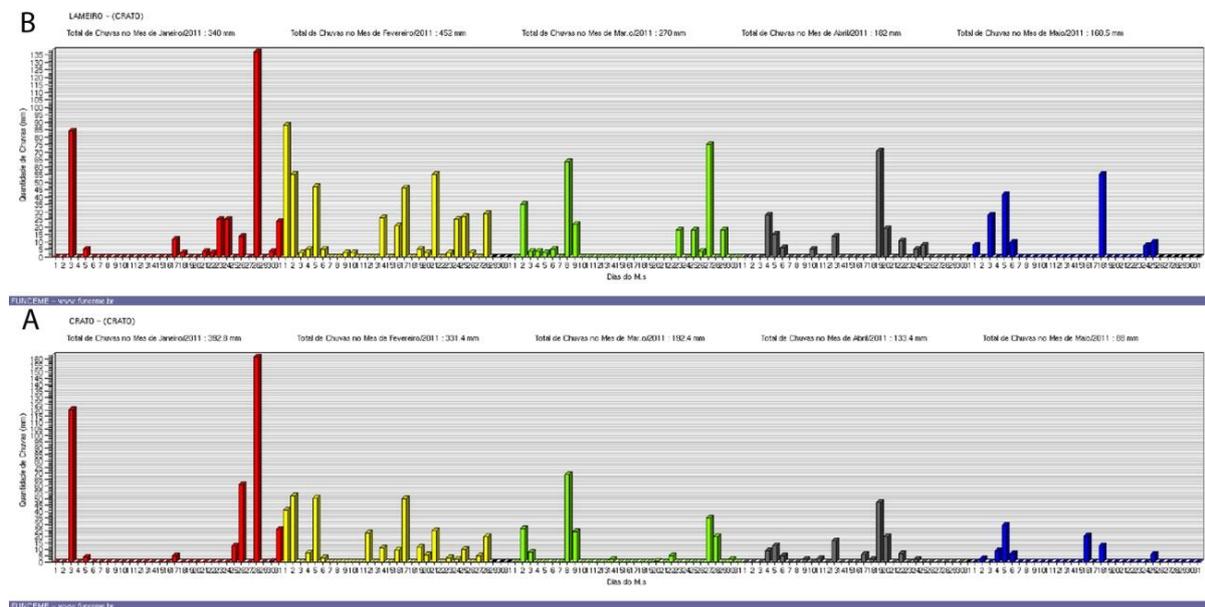


Figure 2.1 - Précipitations journalières de janvier à mai 2011. A : station de Crato ; B : station de Lameiro. (Source : FUNCEME, 2011).

La consultation des bulletins météorologiques des jours précédents montre que cet événement pluvieux n'avait pas été prévu et ne pouvait donc pas avoir été anticipé. Tout au plus, les analyses

faites mi-janvier à l'échelle du pays (Melo, 2011) indiquent que, compte-tenu de la persistance du phénomène La Niña en cette période de l'année, la situation était favorable à la chute de pluies sur le secteur nord du Nordeste brésilien. Pourtant, des températures supérieures à la normale sur l'Atlantique tropical nord auraient pu au contraire empêcher la formation de précipitations, surtout dans le secteur nord où prédomine normalement l'action de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) en cette période de l'année. Le bulletin de prévisions du 27 janvier (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, INPE) indique une situation de marais barométrique sur tout le pays. Un phénomène d'instabilité locale auto-entretenu semble avoir provoqué l'événement pluvieux du 28 janvier 2011.

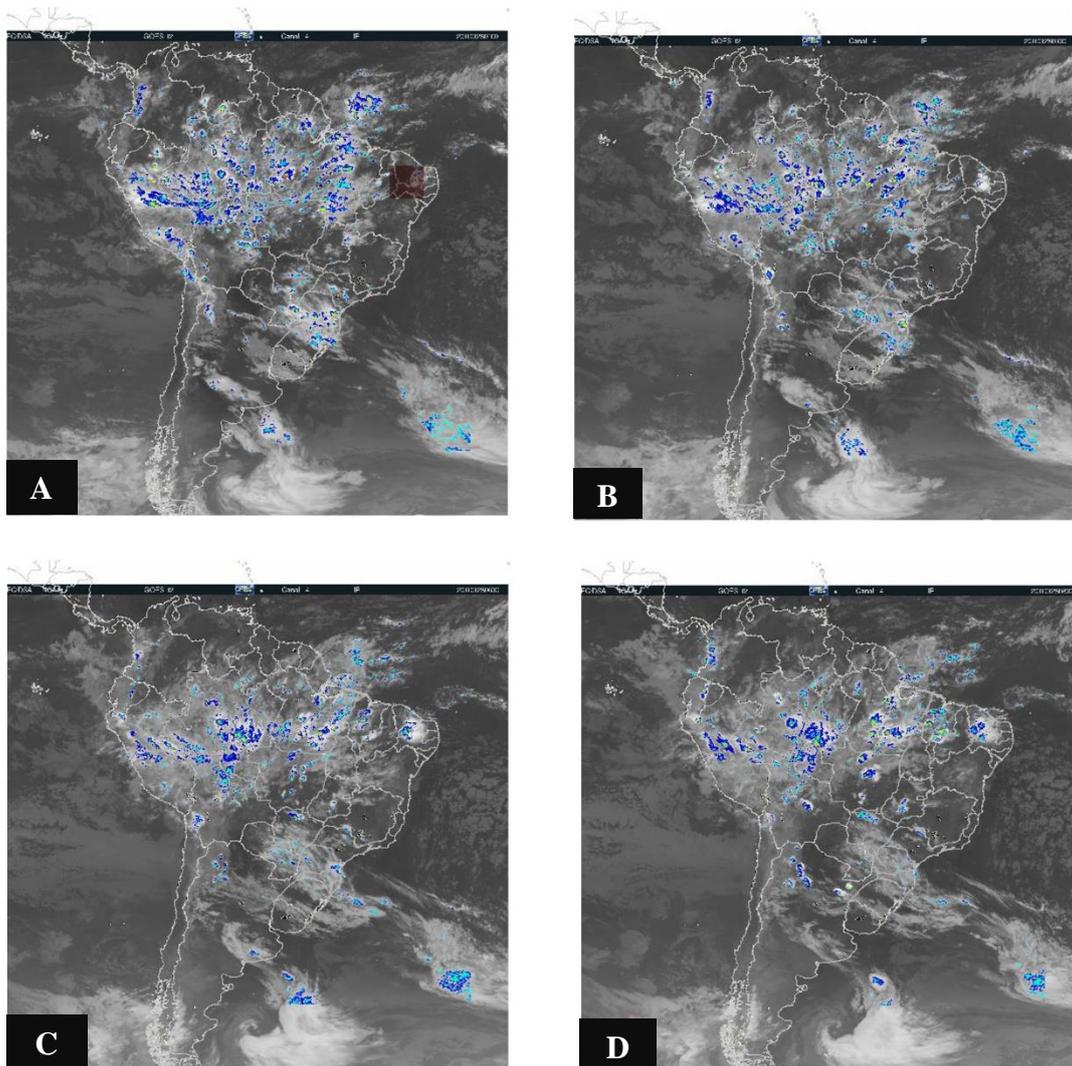


Figure 2.2. Séquence de développement des systèmes nuageux et orageux dans la nuit du 27 au 28 janvier 2011. A : à 1 h. B : à 3 h. C : à 6 h. D : à 8 h. Source : Images satellitaires GOES 12 (canal 4, INPE, 2011). Le carré rouge sur l'image A indique le secteur concerné par l'étude. La ZCIT est matérialisée par les systèmes nuageux qui s'étendent devant la côte nord du Nordeste et sur le sud de l'Amazonie.

L'occurrence de ce phénomène est confirmée par l'examen heure par heure des images satellitaires GOES 12 (canal 4, INPE), où l'on voit la naissance rapide d'un système nuageux et orageux localisé sur le SE du Ceará le 28 janvier à 1 heure du matin. La croissance de ce système est ensuite rapide, jusqu'à un diamètre de plus de 200 km à 7 heures du matin, accompagnée d'une lente dérive vers l'W ou l'WNW, donc vers le Cariri et la bordure E de la Chapada (Fig. 2.2). Ces conditions, accompagnées de forts vents locaux dans le système convectif, ont pu amplifier le phénomène par un effet orographique sur le versant au vent de la Chapada.

2.2.3. La séquence pluviométrique antérieure à la crue

L'analyse des données de la FUNCEME, obtenues à partir des deux stations météorologiques de Crato et de Lameiro, permet de prendre en compte le total des précipitations qui ont précédé le déclenchement de la crue en préparant éventuellement certaines de ses conditions (par exemple, la saturation des sols).

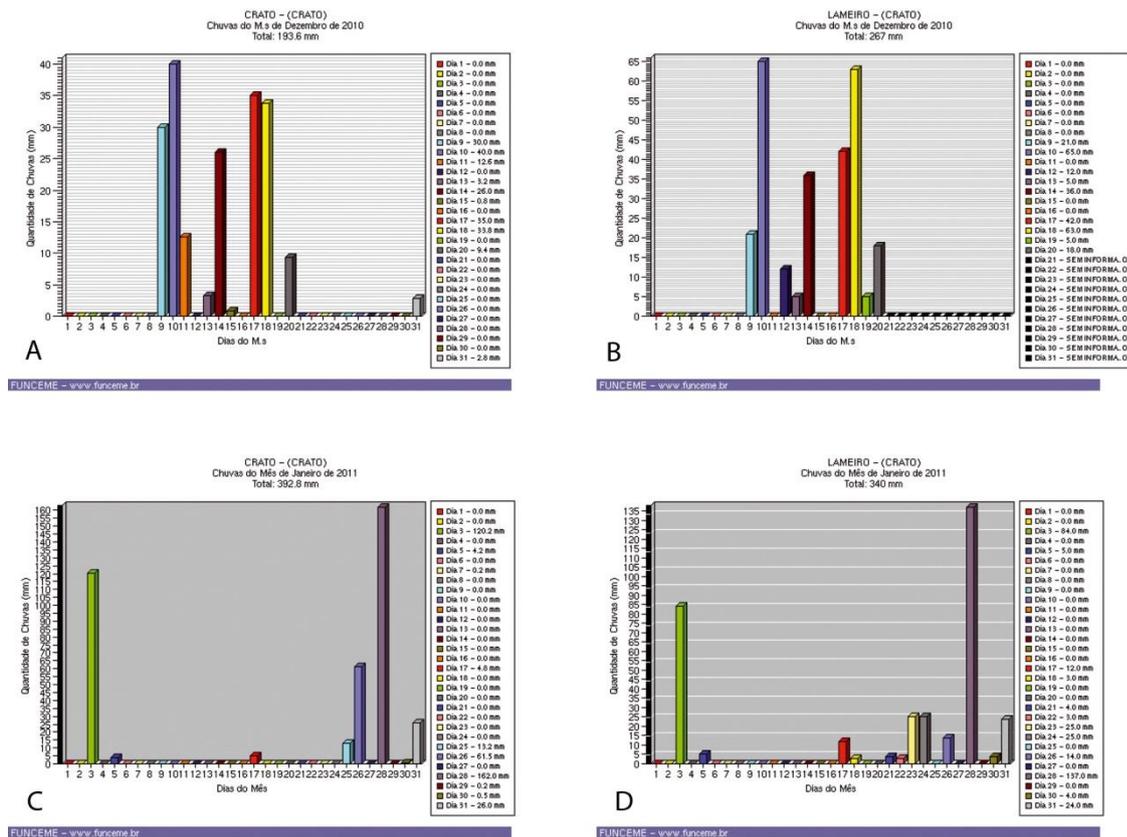


Figure 2.3. Précipitations journalières de décembre 2010 et janvier 2011. A, C : station de Crato ; B, D : station de Lameiro. (Source : FUNCEME, 2010 et 2011).

À Lameiro (Fig. 2.3), 267 mm sont tombés en décembre 2010, en 9 jours : 9 décembre (21 mm), 10 décembre (65 mm), 12 décembre (12 mm), 13 décembre (5 mm), 14 décembre (36 mm), 17 décembre (42 mm), 18 décembre (63 mm), 19 décembre (5 mm) et 20 décembre (18 mm). De son côté, la station de Crato a reçu 193,6 mm en décembre 2010 (Fig. 2.3 A).

Les jours les plus arrosés ont été les 9 décembre (30 mm), 10 décembre (40 mm), 11 décembre (12,6 mm), 13 décembre (3,2 mm), 14 décembre (26 mm), 15 décembre (0,8 mm), 17 décembre (35 mm), 18 décembre (33,8 mm), 20 décembre (9,4 mm), 31 décembre (2,8 mm).

Les totaux de janvier 2011 sont plus importants encore. À Crato-centre, le total atteint 392,8 mm (Fig. 2.3 C) et, avant le 28, les jours les plus pluvieux sont le 3 janvier (120,2 mm – sans crue signalée), le 5 janvier (4,2 mm), le 17 janvier (4,8 mm), le 25 janvier (13,2 mm) et le 26 janvier (61,5 mm). Il tombe encore 26 mm le 31 janvier, deux jours après la crue.

La crue a donc été précédée par d'importantes pluies tombées deux et trois jours plus tôt, un délai qui peut être plus court que le temps de ressuyage des sols. Cependant, comme lors de chaque grosse pluie, les ruissellements les plus actifs sont surtout intervenus le long des ravines (*voçorocas*) et des éléments de voirie tracés le long des plus grandes pentes ou de certains talwegs, ce qui peut minorer le rôle éventuel de la séquence pluvieuse antérieure. *A contrario*, l'absence de crue signalée après la grosse pluie du 3 janvier (120 mm, mais seulement 85 mm à Lameiro ; Fig. 2.3 D) peut s'expliquer par l'absence de pluie importante dans les deux semaines précédentes (depuis le 21 décembre).

2.2.4. Analyse de l'inondation et des aires inondées

La pluie du 28 janvier 2011 a provoqué le débordement du canal en béton qui enserré le Rio Granjeiro à sa traversée de la ville (Fig. 2.4 A). L'inondation des rues et des maisons riveraines ainsi que de nombreux bâtiments privés et publics (église, banques, commerces, station-service, écoles et collèges) s'est accompagnée de dégâts matériels importants. De nombreuses familles se sont retrouvées sans abri, mais aucune victime ne fut à déplorer, sans doute grâce à l'horaire très matinal de l'événement qui explique que les rues n'étaient alors pas fréquentées (entre 1 heure et 7 heures du matin). Plusieurs tronçons de la partie amont du canal, déjà dégradés lors de crues antérieures, ont été détruits ; les débris ont contribué à obstruer le cours et à augmenter le débordement (Fig. 2.4 B).



Figure 2.4. L'inondation du 28 janvier 2011 à Crato. **A.** Boutiques du quartier Centre. Le mur peint en bleu, à gauche, porte la trace du niveau maximum atteint par l'eau (1,5 m). **B.** Destruction du canal à l'aval de l'église Nossa Senhora da Fátima (quartier Pimenta). Photos : H. Maia et W. Vieira.

Sur le plan hydrologique, il n'existait à l'époque aucune mesure de débit permettant de quantifier le phénomène. On dispose seulement de données sur des crues anciennes (SUDENE-ASMIC, 1967) selon lesquelles le débit maximum à temps de retour décennal estimé pour le Rio Grangeiro à l'aval du centre-ville (par comparaison avec le Rio da Batateira, où des mesures étaient disponibles) serait de $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Une pluie de 75 mm maximum pourrait engendrer une crue de fréquence annuelle, dont le débit n'est pas donné. Il est probable que les chiffres atteints lors de l'événement considéré soient supérieurs aux chiffres indiqués mais l'absence de station hydrologique à l'époque de la crue empêche toute estimation sérieuse. De même, les hydrogrammes de crue n'ont été établis que pour le Rio da Batateira, mais ils ont été extrapolés au bassin-versant du Rio Grangeiro, où ils seraient symétriques de part et d'autre du pic du fait de la rapidité des temps de réponse de l'écoulement en zone urbaine.

Par exemple, le 9 avril 1963, la réponse s'est faite en 8 heures, la montée en 6 heures 30, l'écoulement pendant 17 heures, avec un coefficient d'écoulement faible (3,7 %), mais de l'ordre de 30 % pour la partie aval du bassin-versant, fortement urbanisée (SUDENE-ASMIC, 1967).

En ce qui concerne les effets de la crue, les secteurs les plus affectés sont les quartiers Lameiro, Pimenta, Seminário et Centre, les plus proches du canal (Fig. 2.5). Les rues du centre sont les plus régulièrement atteintes par les inondations car ce secteur est le moins élevé par rapport au talweg. Entièrement construit et imperméabilisé (bâtiments, asphalte), il correspond à l'ancienne plaine d'inondation, encadrée par les basses terrasses composées de vieux dépôts torrentiels et de coulées de débris. C'est aussi le secteur où les rues sont les plus étroites, augmentant la vitesse d'écoulement de l'eau. Les enjeux y sont les plus importants, compte tenu de la concentration de bâtiments publics – y compris la mairie – et d'établissements privés ou publics de commerce, d'artisanat et d'enseignement, outre les habitations.

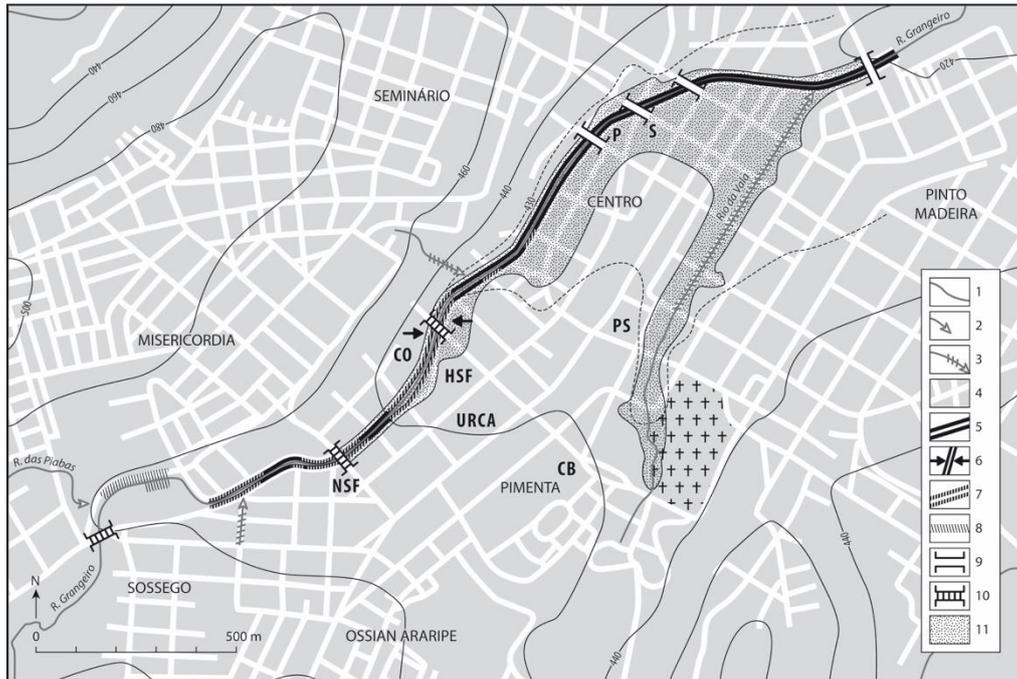


Figure 2.5. Carte du centre-ville de Crato et des zones affectées par la crue du 28 janvier 2011 (Magalhães et Peulvast, 2013). *Légende : 1. Cours d'eau ; 2. Confluence aménagée ; 3. Section de cours d'eau busée ; 4. Aires construites, avec voirie en blanc ; 5. Canal ; 6. Rétrécissement du canal ; 7. Segment de canal endommagé ou détruit par la crue ; 8. Érosion en berge naturelle ; 9. Pont ; 10. Pont dégradé ou détruit. 11. Zone inondée. P : Prefeitura Municipal (mairie). CB : Corpo de Bombeiros (pompiers). H : Hôpital São Francisco de Assis. CO : Colegio Objetivo. V : Voçoroca do Seminário. NSF : Eglise Nossa Senhora de Fátima. PS : Praça da Sé. S : Shopping Residence.*

La carte au 1/10 000 de 1976 (*Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE, 1976*) montre la topographie et l'état du site avant l'extension du centre-ville aux rives du Rio Grangeiro et avant la construction du canal entre le bas du quartier Seminário et le quartier Sossego (mentionné Parque Socego sur la carte) (Fig. 2.6).

profond de 3 m en moyenne (ce qui entraînait donc une section mouillée variable : voir Fig. 2.7 A et 2.7 B), est enjambé par 5 ponts de béton et 4 passerelles métalliques à peine surélevés. Ces ouvrages ont été submergés, constituant donc de courts segments de canalisation couverts et insuffisamment calibrés. Certains d'entre eux coïncidaient en outre avec des rétrécissements calés sur des ruptures de pente naturelles (emboîtement accru dans la basse terrasse à l'amont de Seminário, peut-être à l'emplacement du terminus de l'ancienne coulée de débris formant la terrasse ; Fig. 2.7 B).



Figure 2.7. Le « canal » du Rio Granjeiro : géométrie et défauts d'entretien. Photos : JP. Peulvast/A.O. Magalhães.

A : à l'aval de la mairie, juillet 2010.

B : à l'aval du collège Objetivo, vu vers l'amont en juillet 2012, après destruction et reconstruction partielles (gabions) ; noter la section rétrécie au niveau du pont et la préservation partielle de la section trapézoïdale d'origine. En arrière plan : la Chapada do Araripe.

C : Partie amont du canal, août 2010. Paroi de rive gauche partiellement détruite par une crue précédente, laissant voir le matériel grossier « clast supported » de coulée de débris dans lequel le chenal d'origine est emboîté. Remarquer la minceur des plaques constituant la paroi inclinée.

D : Le canal en centre-ville, près de la mairie, vers l'amont, juillet 2010. Le pont et la passerelle réduisent la section, augmentant le risque de débordement et de constitution d'embâcles. Paroi mince et dégradée (plaque de béton faiblement armée, descellée et basculée, prête à être emportée par la crue suivante).

Les tronçons les plus dégradés se concentrent à l'amont du débouché du ravin (*voçoroca*) du Seminário, c'est-à-dire dans la partie la plus récemment construite (années 2000). Des pans entiers de parois, longs de plusieurs dizaines de mètres, ont disparu en rive gauche comme en rive droite, mettant à nu le matériel grossier et hétérométrique de la terrasse ou le remblai sableux sur lequel est assis l'ouvrage, là où le recoupement des courbes naturelles l'éloignait des berges (Fig. 2.8 A). Le sapement et le recul au détriment de la voirie adjacente sont maximum au débouché d'un petit affluent busé venant du quartier Pimenta, au sud, et à l'amont du rétrécissement correspondant au pont de la rue Rui Barbosa. En rive gauche, le sapement s'est dangereusement approché du mur extérieur du bâtiment principal du collège Objetivo (Fig. 2.8 B).



Figure 2.8. Le canal du Rio Granjeiro après la crue du 28 janvier 2011. Photos : J.P. Peulvast/ A.O. Magalhães/ H. Maia et W. Vieira.

A : Segment entièrement détruit face au collège Objetivo, vers l'amont (avril 2011). Remarquer le matériel grossier de la terrasse de coulée de débris où s'emboîte le chenal et contre lequel les parois du canal avaient été directement posées. Photo J.P. Peulvast.

B : Le même segment, en fin de crue (28/01/2011). Moins avancée, la destruction sera parachevée par de petites crues ultérieures et par les travaux de nettoyage des parties fragilisées. Photo H. Maia et W. Vieira, janvier 2011.

C : Le canal en fin de crue (28/01/2011) près du centre-ville. Débris végétaux rejetés en berge. Photo H. Maia et W. Vieira, janvier 2011.

D : Engravement du canal détruit en amont de l'église Nossa Senhora de Fátima (29/01/2011). Photo A.O. Magalhães.

Les débris des ouvrages qui ont été partiellement ou totalement détruits (passerelles surtout) ont pu obstruer le chenal, au moins temporairement, de même que quelques troncs de palmiers, finalement rejetés sur les berges (Fig. 2.8 C). Plusieurs embâcles de blocs de grès et de béton ont été observés, immédiatement à l'aval des tronçons où l'eau a détruit les parois et affouillé le matériel grossier de la terrasse remis au jour (Fig. 2.8 D). Par chance, aucun véhicule n'a été emporté dans le chenal et n'a ainsi contribué à l'obstruer davantage.

2.2.5. Facteurs et impacts de la crue-éclair

2.2.5.1. Facteurs naturels prédisposants et déclenchants : morphologie du bassin-versant, conditions de formation des crues

Les dimensions et la forme du bassin-versant, grossièrement rectangulaire avec un étranglement à l'aval, sont favorables à un écoulement rapide des eaux issues des précipitations et à de courts temps de formation des crues (Fig. 1.12). La déclivité d'ensemble, entre les sources (720 m d'altitude) et la confluence avec le Rio da Batateira (401 m) est de 3,04 % mais elle est beaucoup plus forte à l'amont de la plaine alluviale, y compris à la traversée de la ville (300 m de dénivelée sur 6 500 m, soit 4,6 %). Ne tenant pas compte des hautes parois boisées des entonnoirs surplombant les sources (240 m de dénivelée supplémentaire), ces chiffres traduisent tout-de-même l'existence d'un véritable système torrentiel montagnard, au fonctionnement spasmodique. Dans la ville même, le tronçon canalisé présente une pente moyenne de 1,9 %, caractéristique d'une rivière torrentielle, pente intermédiaire entre celles d'une rivière de plaine et d'un torrent. Ces valeurs sont légèrement inférieures à celles des voisins immédiats (Rio da Batateira, Riacho Saco).

À l'état naturel, ceci pourrait conférer au bassin-versant un temps de concentration des eaux un peu moins court (44 minutes selon Silva, 2011a), plus favorable à l'infiltration sinon à l'évaporation donc à un amortissement des crues (Lima Neto *et al.*, 2008). La réalité actuelle est bien différente.

Malgré un nombre élevé de drains élémentaires et d'ordres supérieurs (56 selon Ribeiro, 2004), la densité de drainage (1,02 km/km² selon Lima Neto *et al.*, 2008) est assez faible, ce qui pourrait s'expliquer par la porosité du substrat et des sols. Selon le système de hiérarchisation de Horton (1945) modifié par Strahler (1957), le Rio Granjeiro devient un drain de 4^{ème} ordre à l'aval de Lameiro, là où il traverse Crato. Dans la partie amont du bassin-versant (10,6 km²), les drains élémentaires issus des sources du pied de la *chapada* ou nés dans des vallons déconnectés de l'escarpement (Riacho das Piabas) forment un réseau plus touffu. Les rapports de confluence (ou de bifurcation) sont plus élevés ($R_b = 3,72$, pour les drains de 1^{er} et de 2^{ème} ordres et $R_b = 3,67$ pour ceux de 2^{ème} et 3^{ème} ordres) que ceux de la partie aval du bassin-versant, plus resserrée et moins disséquée ($R_b = 3$ entre ceux de 3^{ème} et 4^{ème} ordres). Le coefficient de compacité de cette partie du bassin-versant (rapport entre son périmètre et la circonférence d'un cercle de même superficie) est de 1,1 ce qui, là

encore, est propice à la formation rapide de crues (Silva, 2011a). Il en est de même pour le coefficient de forme (rapport entre largeur moyenne du bassin-versant et longueur axiale), très élevé (2,53).

Les cours d'eau sont normalement alimentés par plusieurs sources issues de l'aquifère supérieur (grès Exu), au contact des grès argileux sous-jacents de la formation Arajara (Granjeiro). Issue de circulations de type karstique au sein de la Chapada, l'eau peut aussi jaillir au sein de volumineuses masses glissées préservées au pied de l'escarpement (Belmonte). Il en ressort aussi dans le plancher du vallon du Riacho das Piabas, à l'aval du coude de capture qui prive le Rio Grangeiro des eaux des grosses sources qui alimentent maintenant le Rio da Batateira (Fig. 1.11). Ces sources participent très peu au fonctionnement actuel des cours d'eau, étant pratiquement toutes captées. Hors saison des pluies, tous les drains sont pratiquement à sec ou seulement parcourus par de maigres filets d'eau. En ville, seules s'écoulent des eaux usées et nauséabondes qui se déversent librement dans le chenal. Ainsi, aucune mesure des débits de base n'est disponible ou ne l'était, jusqu'à l'installation d'une station de jaugeage en ville en 2013 (et dont les données ne sont pas encore significatives).

Ce sont donc principalement les eaux provenant directement des précipitations et celles des nappes temporaires, constituées dans les sols du bassin-versant, qui participent à la constitution des épisodes d'écoulement, souvent brefs et brutaux, caractéristiques du fonctionnement du système. Selon Ribeiro (2004), les eaux superficielles parcourent en moyenne 236 m dans les versants pour atteindre un drain. Compte tenu des pentes des versants et des talwegs (pourtant inférieures à celles des bassins-versants voisins selon Lima Neto *et al.*, 2008), le ruissellement de surface (écoulement hortonien), lié à un dépassement de la capacité d'infiltration des sols, entraîne une réponse très rapide des cours d'eau (« écoulement rapide de crue », Bravard et Petit, 1997). Il dépend beaucoup de l'état et du degré de couverture des sols (végétation, constructions et revêtements divers... : Moreira, 2013). Un écoulement de surface saturée s'y ajoute si l'épisode pluvieux se prolonge et/ou s'il succède à d'autres épisodes. Dans ce dernier cas, même des précipitations modestes peuvent déclencher un écoulement rapide de crue. Il est donc important de connaître aussi bien les caractéristiques du substrat et des sols que celles des précipitations impliquées dans chaque événement.

L'escarpement d'où vient le Rio Granjeiro est façonné dans les couches supérieures de la série mésozoïque qui occupe la partie orientale du bassin Araripe (Peulvast *et al.*, 2011 ; Peulvast et Bétard, 2015 ; voir chapitre 1). En dehors de la dalle de grès sommitale et des calcaires, qui forment les deux aquifères susceptibles d'alimenter les sources et de soutenir un débit de base (CPRM, 2005), cette série est globalement peu perméable, voire très imperméable (niveaux argileux) et donc potentiellement favorable à la constitution de ruissellements superficiels.

En réalité, du fait de la présence de fortes couvertures colluviales et alluviales (masses glissées, couvertures de glacis, terrasses), le substrat affleure peu dans le bassin-versant. Ce sont surtout ces formations superficielles qui conditionnent la capacité d'infiltration de l'eau. Les dépôts caillouteux ou sableux qui tapissent le fond des chenaux et forment les terrasses sont très perméables, mais ce sont précisément les terrasses, constituées de dépôts très grossiers de coulées de débris dans la

ville de Crato (Fig. 2.7 C), qui sont urbanisées et partiellement imperméabilisées. Ailleurs, l'altération, conduisant à la formation de sols argileux et de remplissages argileux le long des fissures des roches, est très importante dans l'environnement initialement forestier de la région. Des altérites et des sols riches en kaolinite (ferralsols), atteignant jusqu'à 10 m d'épaisseur, revêtent les grès altérés (Bétard, 2007). Des manteaux d'altération plus minces (lixisols, leptosols) sont visibles dans les versants et sur les croupes d'interfluvies du piémont. Ces sols poreux existent aussi à la base de l'escarpement et dans ses entonnoirs de sapement. Ils sont prédominants dans les systèmes de glacis disséqués. Tous sont sensibles au ravinement et aux glissements de terrain de petite taille (Ribeiro, 2004), phénomènes producteurs de boue qui contribuent au débit solide entraîné lors des crues, à la viscosité des écoulements et à leur capacité d'emporter des éléments grossiers.

Ces indications confirment celles de Sousa *et al.* (2006), selon lesquelles les facteurs naturels prédisposent déjà le Rio Granjeiro et ses affluents à des comportements dangereux. Le contraste brutal entre les fortes pentes longitudinales des talwegs à l'amont, favorables à des vitesses d'écoulement élevées, et les pentes plus faibles dans ce qui constituait, avant urbanisation, une plaine d'inondation plus large, y favorise une tendance au ralentissement et à l'étalement latéral. La situation du centre-ville à l'articulation des deux secteurs peut donc par elle-même constituer un facteur de risque.

2.2.5.2. Facteurs aggravants

C'est précisément à cet endroit que le cours d'eau se trouve confiné dans un canal de béton à profil trapézoïdal (Fig. 2.7 A). D'un modèle géométrique classique au Brésil (ex : São Paulo, Rio Tiete) comme aux États-Unis (ex : Los Angeles), ce « canal » (appellation locale) ou chenal bétonné construit à partir de 1957 (premier tronçon : Seminário-mairie) s'est révélé trop étroit et propice aux débordements. En outre, il reçoit des eaux transposées depuis les sources du Rio da Batateira (Sousa *et al.*, 2006). De l'aveu même des ingénieurs chargés de son recalibrage en 2000, il est conçu pour contenir un débit de $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ alors que les mesures effectuées à Crato dans les années 1960 indiquaient pour le Rio Granjeiro des pics de crue décennaux atteignant $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tableau 1.5).

La population et les autorités sont confrontées aux effets d'un empiètement incontrôlé sur un lit fluvial qui devrait pourtant, selon la législation brésilienne, constituer une aire de préservation permanente (Résolution du *Conselho Nacional do Meio Ambiente* - CONAMA, n° 303, article 3, 2002). Par analogie avec la morphologie de rivières voisines aux caractéristiques proches (Rio Salamanca ; Fig. 2.9 A), et comme le confirment quelques photos relativement anciennes (Fig. 2.9 B), il se présentait comme une étroite bande de tressage large de quelques dizaines de mètres au plus, entre des berges creusées dans une basse terrasse riche en gros blocs de grès.



Figure 2.9. Lits fluviaux « naturels » sur le piémont NE de la Chapada do Araripe. **A** : Le Rio Salamanca à Cabaceira (Barbalha). Photo JP. Peulvast, février 2010. **B** : Le Rio Granjeiro à Crato (quartier Pimenta) avant artificialisation. Photo A.O. Magalhães, 2003.

Sur deux kilomètres, l'écoulement, transformé en puissant torrent le temps d'une très grosse pluie, ne dispose d'aucune zone d'expansion. Il est au contraire entravé par des réductions de section (rétrécissements, ponts trop bas : Fig. 2.6 B) qui l'amènent à déborder, surtout en cas de formation d'embâcles (débris végétaux ou artificiels, véhicules) (Fig. 2.10 A). La montée des eaux est telle que les buses adventices sont engorgées et l'eau fait éclater les conduites, soulève les plaques de regard et ressort dans d'autres rues du centre-ville (Riacho da Vala).



Figure 2.10. Écoulements de fin de crue et embâcles dans le Rio Granjeiro. Photos : H. Maia et W. Vieira, 2011. **A** : Passerelle détruite et partiellement emportée, centre-ville (28/01/2011). Photo H. Maia et W. Vieira. **B** : Écoulement turbulent et embâcle de blocs de béton, aval de l'église Nossa Senhora de Fátima (28/01/2011). Photos H. Maia et W. Vieira.

Les rapports techniques rédigés après la crue (Oliveira, 2011 ; Silva, 2011a, 2011b) soulignent les nombreux défauts du chenal bétonné. Parmi eux, de nombreux branchements de canalisations d'eaux pluviales et usées ou même d'affluents busés (Riacho da Vala, voçoroca de Seminário-Vulcão) arrivant selon un angle de l'ordre de 90° et construits avec des matériaux de qualité inadéquate (briques communes), sans augmentation de section à l'aval. Le rapport signale aussi l'encombrement

du chenal, avant la crue, par des sables et des matériaux naturels (blocs de grès) ou artificiels (gravats, morceaux de parois...), susceptibles d'accroître les perturbations et la turbulence de l'écoulement, de faire barrage ou même de se comporter en véritables béliers quand la force de l'eau les entraîne contre les parois (Fig. 2.6 D). Une partie de ces apports est attribuée à une augmentation de l'érosion à l'amont, liée à des actions de déboisement et à des constructions irrégulières dans l'Aire de Protection Environnementale (APA Chapada do Araripe) qui englobe le pied de l'escarpement. Sont accusés aussi les ouvrages en déblai avec des pentes supérieures à 45°, restés sans protection végétale.

Plus grave, la configuration même du chenal, avec sa section insuffisante, son profil transversal et son rapport profondeur/largeur variables (Fig. 2.6 B), accompagnés de ruptures de pente reflétant sa construction en plusieurs étapes, ses courbes ou ses coudes brusques et ses rétrécissements surtout adaptés aux impératifs de l'établissement des voies adjacentes (une avenue de chaque côté, des ponts de différentes longueurs et hauteurs par rapport au fond), est mise en cause : « *il ne semble pas exister d'études hydrologiques de détail qui auraient pu permettre cette configuration* » (traduit de Oliveira, 2011). Cet avis est confirmé par Silva (2011b), selon lequel le chenal, avec sa pente de 2,64 à 2,87 %, a été construit de façon à permettre un écoulement supercritique très turbulent et à haute énergie (Fig. 2. 10 B), alors que l'écoulement sous-critique qui est la norme pour les chenaux fluviaux artificialisés requiert une pente de 0,010 à 0,015 %. Il n'existe en outre aucune structure hydraulique de dissipation de l'énergie. La vitesse d'écoulement lors de la crue du 28 janvier 2011 y a été évaluée à 11 m/s, alors qu'elle ne devrait en aucun cas dépasser 6 m/s dans un chenal en béton (Silva, 2011b) et que le document technique préalable au recalibrage de 2000 fait état de vitesse prévue de 1,24 m/s !

L'état déjà alarmant du canal avant la crue, régulièrement dénoncé par les journaux locaux depuis 2008, a contribué à aggraver les destructions (Fig. 2.6 C, Fig. 2.6 D). Les habitants interrogés redoutaient depuis longtemps les effets de l'absence d'entretien d'un ouvrage aux parois minces et de piètre qualité, surtout dans sa moitié amont (plaques de béton minces, faiblement armées et mal jointées), de la disparition dès 2010 de pans entiers de ces parois, mettant au jour les dépôts hétérométriques et peu cohérents de coulées de débris sur lesquels s'assoit directement l'ouvrage, des marques de soutirage de sable visibles sous les trottoirs voisins, ou encore de la multiplication anarchique des branchements d'égouts et d'eaux pluviales, souvent brisés.

Parmi les rapports techniques, seul celui de Silva (2011b) prend en compte l'état du lit à l'amont du chenal. Ici, à l'exception d'un court tronçon de chenal naturel entaillé sur 1 à 2 m de profondeur dans les grès tendres du substrat sous le pont de Lameiro (lequel voit une de ses piles dangereusement déstabilisée par suite de l'érosion active), le ruisseau serpente entre des blocs métriques et sape la terrasse dans les rives concaves de méandres (Fig. 2.11 A, Fig. 2.11 B). Ces dépôts anciens de coulées de débris ou de laves torrentielles, décrits plus bas (2.3), sont particulièrement spectaculaires à l'amont immédiat du chenal ; ils constituent une réserve de matériaux susceptibles de venir l'obstruer en cas de mobilisation par les crues les plus violentes (Fig. 2.11 C). Le rôle des blocs de grès omniprésents dans le site urbain (Peulvast *et al.*, 2011) est généralement négligé

car la pratique courante et incontrôlée consistant à les fragmenter en pavés pour l'empierrement dès qu'ils sont mis au jour fait rapidement disparaître les plus encombrants d'entre eux. Cette pratique modifie aussi la composition de la charge sédimentaire pour les crues suivantes, dont la capacité de transport et le rôle érosif sont amplifiés.



Figure 2.11. Le Rio Granjeiro à l'amont du canal. Photos : JP. Peulvast/A.O. Magalhães, 2011. **A** : Aval du pont de Lameiro. Coupes dans l'épaisse terrasse de coulée de débris qui se poursuit jusqu'au centre-ville et dans son substrat de grès tendres (Formation Rio da Batateira). Le plus gros bloc dépasse 5 m de longueur. **B** : Sapement d'une des piles du pont de Lameiro, août 2011. **C** : Entrée amont du canal (août 2011). Matériaux prêts à être mobilisés par les crues suivantes.

Quant aux caractéristiques du bassin-versant (réalité des déboisements, taux de couverture et d'imperméabilisation des sols, rôle de la voirie), elles restent jusqu'alors mal étudiées et devront faire l'objet, comme le mentionne le rapport de Sousa *et al.* (2006), d'investigations plus détaillées, en particulier par l'analyse d'images diachroniques (voir 5.4). Parmi les facteurs anthropiques,

l'importance des déboisements dans l'escarpement et surtout sur son piémont, ainsi que la destruction de la forêt ripicole (*mata ciliar*) le long des cours d'eau, seraient responsables de ravinements et de mouvements de terrain ainsi que de l'ensablement des fonds de vallées à l'aval. Par ailleurs, le rejet des eaux usées et de résidus solides dans les chenaux non seulement cause une grave pollution mais aussi perturbe le fonctionnement hydrologique.

2.3. Séries historiques et temps de récurrence des crues-éclair : Crato et Barbalha

Reste un facteur important dans la connaissance et le traitement (mesures de protection, calibrage des ouvrages...) des crues éclair : une bonne appréciation des temps de récurrence. Ce que permet, pour les deux dernières décennies, l'analyse des données pluviométriques et celle des diverses sources décrivant les épisodes de crues et d'inondation (articles de journaux, etc.).

Dans les deux cas, ce sont les épisodes pluvieux de valeur supérieure à 100 mm en 24 h qui sont retenus car, de façon empirique, c'est à partir de ce seuil que sont enregistrés la plupart des impacts, inondations et dommages. Ces données ont été collectées à partir des années 1980 car c'est à cette époque que l'urbanisation s'est accélérée et que la collecte de données, ainsi que les études d'événements associés à ces pluies sont devenues plus régulières et importantes, en particulier après les années 1990. Elles révèlent une très forte variabilité interannuelle de la pluviométrie (Silva, 2017).

2.3.1. La commune et la station de Crato

Les années ayant connu les plus forts totaux pluviométriques au cours de la période considérée (1980-2017) ont été, par ordre décroissant : 1985 (1970 mm), 2008 (1708 mm), 2011 (1588,4 mm), 2004 (1577 mm) et 2014 (1539 mm) (Fig. 2.12). La moyenne annuelle est de 1184,7 mm.

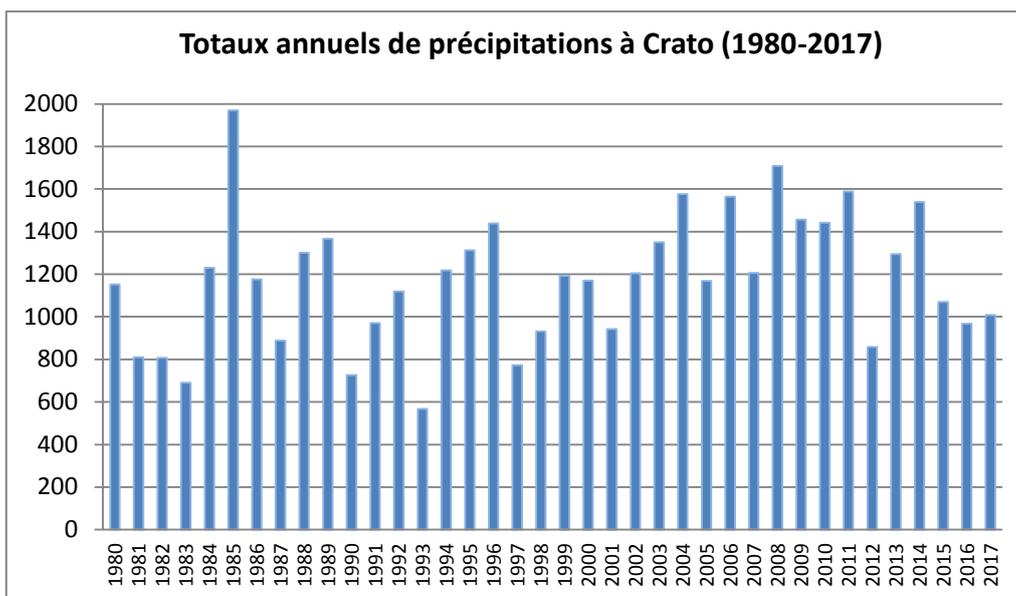


Figure 2.12. Histogramme des totaux annuels de précipitations à la station de Crato, dans la période 1980-2017, après les données de la FUNCEME 2018. (Elaboration: A.O. Magalhães, 2018).

Sur la période analysée, les précipitations se concentrent principalement sur les mois de janvier, février, mars et avril (saison des pluies). Les pluies enregistrées en novembre et décembre relèvent de la “pré-saison des pluies”. Dans le Cariri, les pluies commencent généralement en décembre. Le mois de mars est généralement le plus arrosé, en relation avec une activité maximale de la ZCIT.

Les années où ont été enregistrées les précipitations de plus de 100 mm en 24 h sont les suivantes : 1980, 1982, 1985, 1987, 1988, 1992, 1998, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2011, 2015 et 2016. Trois des plus forts événements recensés se situent parmi les années les plus arrosées (par ordre décroissant : 1985 : 1970 mm ; 2008 : 1708 mm ; 2011 : 1228,7 mm ; 2004 : 1577 mm). Le mois de janvier 2011 se distingue par la survenue de deux forts événements pluvieux : 120,6 mm le 3 janvier, et 162 mm le 28 janvier, dont le deuxième a causé la crue décrite plus haut. L’année 2004 se distingue aussi, avec une pluie de 156 mm en 24 h au mois de février (tableau 2.1).

Années	Total annuel de précipitations (mm)	Précipitations en 24 heures (mm)	Jour d'occurrence de l'événement
1980	1152,0	140	05 janvier
1981	811,0	0	0
1982	808,0	127 106	27 janvier 28 novembre
1983	691,0	0	0
1984	1230,0	0	0
1985	1970,0	100	21 mars
1986	1175,9	0	0
1987	888,0	110	29 mars
1988	1301,2	110	19 février
1989	1367,0	0	0
1990	726,0	0	0
1991	971,0	0	0
1992	1119,5	125	26 janvier
1993	568,1	0	0
1994	1218,6	0	0
1995	1313,2	0	0
1996	1438,1	0	0
1997	773,2	0	0
1998	931,4	108,6	30 décembre
1999	1192,7	0	0
2000	1170,3	0	0
2001	942,1	0	0
2002	1204,8	0	0
2003	1350,8	120	19 janvier
2004	1577,0	156	16 février
2005	1169,0	101	24 mars
2006	1565,0	0	0
2007	1206,0	110,2	22 avril
2008	1708,0	0	0
2009	1456,0	113,2	06 avril
2010	1441,0	0	0
2011	1588,4	120,2 162	03 janvier 28 janvier
2012	859,0	0	0
2013	1294,8	0	0
2014	1539,0	0	0
2015	1069,0	140	23 avril
2016	968,0	108	22 janvier
2017	1008,0	0	0

Tableau 2.1. Événements pluviométriques supérieurs à 100 mm, station de Crato (1980-2017). Adapté de Brito (2016) et actualisé par l'auteur à partir de données de la FUNCEME (2018).

En ce qui concerne **l'année 1985**, la plus arrosée de la période étudiée, les pluies se sont surtout concentrées sur les mois de janvier à mai (1640 mm sur 1970), dont 499 mm en avril (sans pluie supérieure à 100 mm) et 455 mm en mars (avec une pluie supérieure à 100 mm). D'après Monteiro (2011), le quadrimestre (février-mai) de cette année aurait coïncidé avec une période de faible intensité de la Niña ayant favorisé la survenue de pluies abondantes. Malheureusement, il est

resté impossible d'obtenir plus de données sur les sites de la FUNCEME et de la Défense Civile de l'État du Ceará (laquelle fut créée dans les années 1990).

L'année 2004 est mieux documentée et plus significative, dans la mesure où des dégâts ont été répertoriés dans la ville de Crato. La station a reçu 1400,1 mm de pluie de janvier à mai, dont 509 mm en janvier et 474 mm en février, mois au cours duquel est survenue une pluie de 156 mm en 24 h, le 16 février (Fig. 2.13).

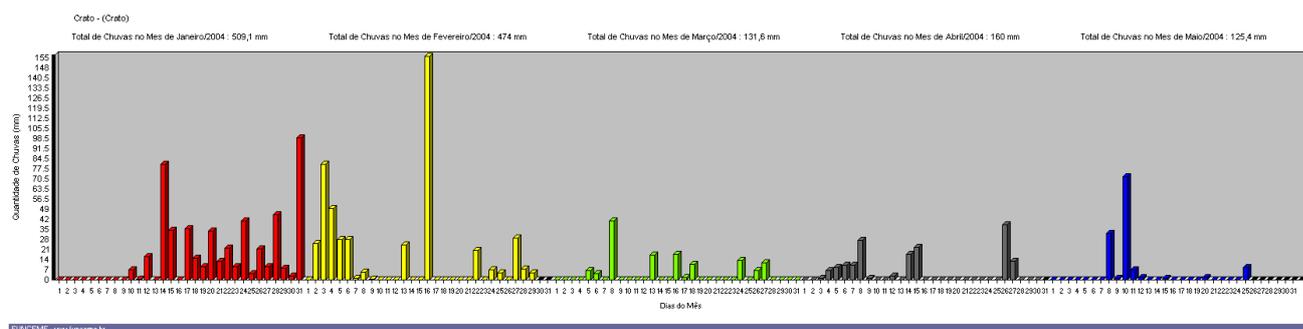


Figure 2.13. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2004. (Source: FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Les pluies intenses qui ont affecté toute la région Nordeste cette année-là ont été provoquées par le déplacement de fronts froids vers le nord, par l'activité de la ZCIT et par la présence de vortex cycloniques d'altitude sur l'océan Atlantique. En certains endroits, les maxima de précipitations ont dépassé les moyennes mensuelles de plus de 300 mm (<http://infoclima.cptec.inpe.br/> accès le 06.08.2018).

D'après "l'Atlas Brasileiro dos Desastres Naturais" (1991 à 2012) - volume Ceará (2013), au cours de l'année 2004, l'État du Ceará a enregistré son plus grand nombre de désastres provoqués par des inondations, soit un total de 86 événements sur le bimestre janvier-février. À Crato même, le journal "Diário do Nordeste" a publié des reportages sur ces événements les 01.02.2004, 12.02.2004, 17.02.2004 et 13.03.2004, surtout à propos des pluies du mois de février, qui ont provoqué l'inondation du centre-ville autour du Rio Granjeiro et du Riacho da Vala.

Le reportage du 1^{er} février, qui relate la pluie du 31 janvier (99 mm), s'intitule "Chuva deixa rastros de destruição" (la pluie laisse des traces de destruction). L'eau a envahi maisons et commerces, ainsi que les bureaux du Département des Constructions, Routes et Transports (DERT), près du cimetière de la ville, ou encore la maison d'arrêt (dont les 71 détenus ont dû être évacués vers Juazeiro do Norte). Réfrigérateurs, voitures, baraques et kiosques sont partis dans le courant. Un commerçant raconte que: "não foi a maior chuva do ano, mas foi a mais grossa. Explicando que essa começou as 22:00 hs da noite anterior, e em menos de uma hora de precipitação o canal já estava transbordando" ("cela n'a pas été la pluie la plus abondante de l'année, mais la plus violente ; il

explique qu'elle a commencé vers 22 h et que au bout de moins d'une heure, le canal débordait déjà"). Plusieurs rues sont devenues inaccessibles, sous 50 cm d'eau et de boue.

L'eau est passée par-dessus plusieurs ponts du Rio Granjeiro chenalisé, inondant une grande partie des rues Pedro II, Coronel Antônio Luiz (où se trouve la URCA), Almirante Alexandrino, Júlio Saraiva (où se trouve la mairie) ainsi que la quasi-totalité de l'avenue José Alves de Figueiredo, le long du "canal" (Fig. 1.20). Quatre des principaux ponts ont été dégradés, dont le pont proche du "Centro de Estudos Supletivos" où furent arrachés 30 m de revêtement en béton armé du chenal.

Selon les informations du Secrétariat Municipal d'Action Sociale, 30 familles se sont retrouvées sans abri ; le quartier Batateira a été le plus touché, avec 15 maisons détruites. Les personnes ont été hébergées dans des crèches, des locaux associatifs et des maisons particulières. Le maire Walter Peixoto, qui avait déjà décrété l'état d'urgence pour cause de fortes pluies la semaine précédente, a décrété l'état de calamité publique.



Figure 2.14. Destruction partielle de maisons dans le quartier Batateira (Crato) lors des pluies de février 2004. (Source: Vincelmo, A., *Jornal Diário do Nordeste*, 01.02.2004).

Selon un reportage du 12.02.2004, les techniciens du DNOCS (Département National des Ouvrages contre les Sécheresses), formés en "*Comité Gestor das Ações Federais de Emergência no Ceará*" (Comité de gestion des actions fédérales d'urgence au Ceará), visitaient tous les sites atteints par les crues dans la ville de Crato. Ce comité a été institué à l'initiative du Ministère de l'Intégration Nationale avec, pour objectif, de relever toutes les informations et les besoins de chaque communauté, de coordonner les actions d'urgence et d'élaborer les rapports sur l'état matériel des domiciles et des infrastructures urbaines. Parmi les organismes publics réunis au siège du DNOCS figuraient la Défense Civile et les Ministères de l'Agriculture, de la Santé et de l'Aéronautique.

Après l'identification des personnes touchées et un recensement des besoins en aliments et médicaments, des visites de techniciens furent organisées pour atteindre les objectifs mentionnés plus haut. Mais quelques jours après, le 16.02, 156 mm d'eau se sont abattus sur la ville, provoquant une

nouvelle inondation du centre ville qui atteint, cette fois-là, des écoles ainsi que les locaux de l'Institut National de Sécurité Sociale (INSS). (Fig. 2.15).



Figure 2.15. Inondation de Crato, le 16 février 2004. **A.** Rue Tristão Gonçalves (Riacho da Vala sorti de sa buse). **B.** Bureau de l'INSS. (Source : Vincelmo, A., Jornal Diário do Nordeste, 17.02.2004).

Un reportage du 13.03.2004 intitulé “*Cestas básicas são insuficientes*” (“les paniers d'aide alimentaire sont insuffisants”) indique que les aides alimentaires envoyées par le Gouvernement Fédéral ne sont parvenues qu'à 10 % de la population concernée. Au total, ce sont plus de mille personnes qui ont été atteintes.

L'année 2008 a aussi été une année de fortes précipitations (1.708 mm), mais aucune valeur quotidienne n'a dépassé 100 mm. La période pluvieuse (janvier-mai) a vu tomber 1268,1 mm (Fig. 2.16), dont 531 mm en mars.

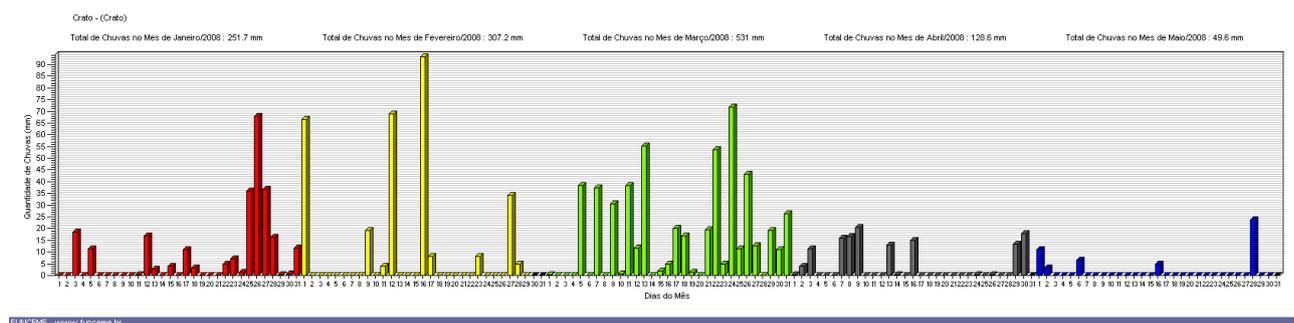


Figure 2.16. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2008. (Source: FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/monitoramento/meteorologico/grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Cette année 2008 a connu une diminution de l'activité frontale sur le Brésil, résultant de la persistance d'une anomalie anticyclonique sur l'océan Atlantique et l'est du pays, en particulier dans la deuxième quinzaine de décembre. Malgré la conjonction de trois épisodes d'activité de la Zone de

Convergence sud-Atlantique (ZCAS), il a plu moins que la moyenne dans une grande partie des régions Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste et dans le sud de la Région Norte. Dans le nord du Nordeste, la rareté des pluies a correspondu aussi avec l'augmentation de la fréquence de vortex cycloniques d'altitude par rapport au mois précédent (<http://infoclima.cptec.inpe.br/>, accès le 07.08.2018).

Plusieurs reportages sur les pluies ont été publiés par le Diário do Nordeste, les 12.02.2008, 13.02.2008, 25.03.2008, 26.03.2008 et 10.04.2008. Ils insistent sur les dommages causés par l'eau dans le canal du Rio Granjeiro, par exemple sur la structure du pont qui donne accès au champ de tir de l'Avenue José Alves de Figueiredo et de celui qui est proche de l'hôtel de ville. De même, les parois mêmes du canal sont à nouveau dégradées après chaque réparation. Selon les riverains interrogés, chaque pluie supérieure à 50 mm suffirait pour de telles dégradations.

Les pluies de mars 2008 (531 mm au total) ont fait les manchettes des journaux dans tout l'État du Ceará. La plus importante d'entre elles (71,8 mm le 24 mars) a provoqué l'inondation du centre ville (principalement la rua da Vala), sans nouveaux dégâts sur le canal.

Plus tard dans l'année, après la fin de la saison sèche, l'édition du Diário do Nordeste du 17 décembre 2008 comporte un reportage sur les pluies survenues à Crato, titré : *“Canal do Rio Granjeiro: primeiras chuvas assustam a população* (“Canal du Rio Granjeiro : les premières pluies effraient la population”). Le reportage insiste sur la préoccupation de la population par rapport aux pluies, principalement autour du Rio Granjeiro. Aucun dégât important n'est survenu cette fois, bien que les parties basses de la ville aient été inondées et que les débris accumulés le long du canal aient été entraînés et répandus en aval.

Dans le même reportage, le gérant de la *“Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos da Bacia do Salgado”* (Compagnie de gestion des ressources hydriques du bassin du Rio Salgado, COGERH) propose la construction de barrages au pied de la Chapada do Araripe pour éviter les inondations de la zone urbaine de la commune. Le maire, Samuel Araripe, affirme approuver cette idée, ajoutant que le *“Projeto de Requalificação Urbana do Crato”* (Projet de requalification urbaine de Crato, PRU) inclut la construction de petits réservoirs (“açudes”) de ce type, permettant de contrôler les débits des eaux de ruissellement. Cependant, la mairie est à la recherche de ressources pour les construire.

Cette succession d'articles de journaux montre bien comment des séquences pluvieuses rapprochées et les crues correspondantes préoccupent les habitants de Crato, surtout les riverains du Rio Grangeiro, conscients de l'insuffisance des moyens mis dans la maintenance des ouvrages censés les protéger. La catastrophe de **janvier 2011**, traitée plus haut (2.2.1), devait leur donner raison. En dépit des interventions entreprises à la suite de cette catastrophe, ce ne devait pas être la dernière.

L'année 2014 figure aussi parmi les années pluvieuses, avec un total de 1539 mm. 897,1 mm sont tombés de janvier à mai (Fig. 2.17). Mars a été le mois le plus arrosé (313,2 mm). Mais aucune précipitation de plus de 100 mm en 24 h n'a été enregistrée (72 mm le 9 février, 75 mm le 4 avril), ni aucune inondation importante : un heureux hasard, alors même que les travaux de reconstruction du

canal du Rio Granjeiro étaient alors en voie d'achèvement. En revanche, les dernières pluies intenses d'avril, après une longue séquence pluvieuse, ont entraîné de multiples préjudices (4 blessés, 10 sans abri) et dégâts en dehors du centre (quartiers Gisélia Pinheiro, Alto da Penha, Pinto Madeira, Ossian Araripe, Muriti, Parque Granjeiro, Seminário, Coqueiro, Novo Horizonte) : écoulements boueux, destruction d'habitations précaires installées dans les pentes exposées, obstruction de réseaux d'égouts, etc. (source : Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID).

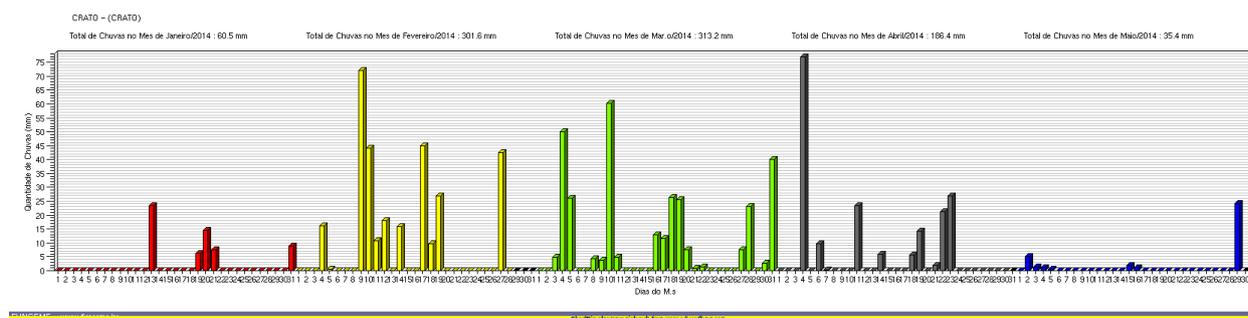


Figure 2.17. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2014. (Source: FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Bien que l'année 2015 ait été moins arrosée (1069 mm) que celle de 2014, la saison des pluies a été relativement humide, avec 811 mm de janvier à mai (Fig. 2.18), dont 321,7 mm en mars et 181,6 mm en avril. Le 22 avril, une pluie de 140 mm a causé de nouveaux dégâts dans la ville de Crato : *“Chuva forte causa transtornos no Crato e em outras cidades do Cariri”* (“De fortes pluies causent des dommages à Crato et dans d'autres villes du Cariri”; Diário do Nordeste, cahier régional, 23.04.2015). Il s'agit en l'occurrence d'un débordement du canal du Rio Granjeiro, affectant la circulation, le fonctionnement des écoles et provoquant l'inondation de plusieurs immeubles ainsi que la perte de mobilier, de matériel électroménager, etc. (Fig. 2.19).

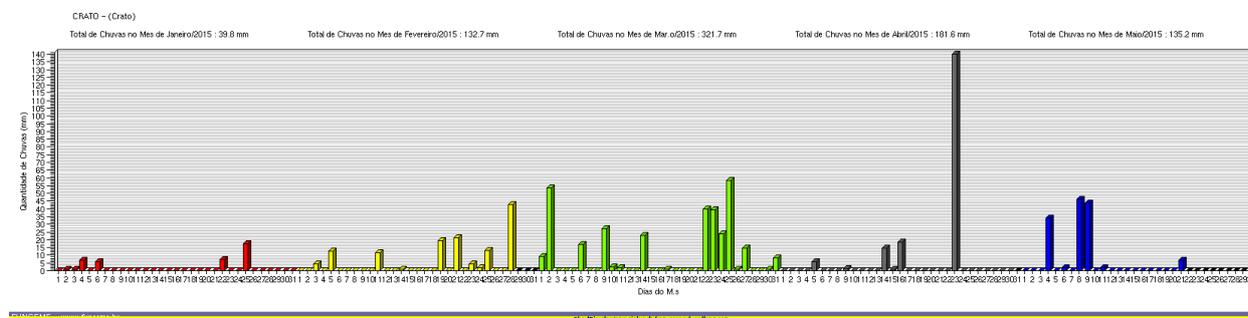


Figure 2.18. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2015. (Source: FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>



Figure 2.19. Réparation de dégâts causés par le débordement du canal du Rio Grangeiro en avril 2015. (Source : Journal Diário do Nordeste, 23.04.2015). <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/online/chuva-forte-causa-transtornos-no-crato-e-em-outras-cidades-do-cariri-1.1274889>

Les pluies de l'année 2016 n'ont atteint que le total de 968 mm, dont 664 mm pendant la saison des pluies (janvier-mai : Fig. 2.20) et 323 mm en janvier. C'est le 22 janvier qu'une séquence pluvieuse a atteint 108 mm, entraînant une nouvelle inondation dans les vallées des Rios Grangeiro et Batateira, et son lot de personnes évacuées et de maisons détruites (4 dans le quartier Batateira), ce qui a justifié l'intervention de la Défense Civile (journal O Povo, 22.01.2016).

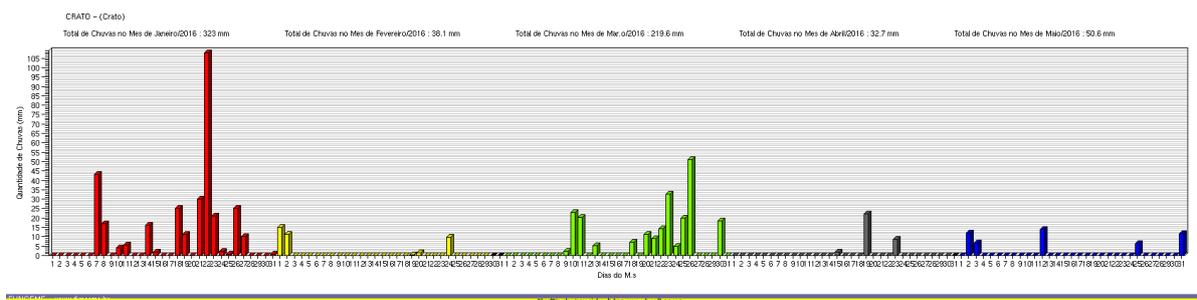


Figure 2.20. Histogramme des précipitations journalières à Crato de janvier à mai 2016. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

On notera que les inondations de ces deux dernières années se sont produites à Crato malgré la reconstruction du canal du Rio Grangeiro, engagée après la crue catastrophique de janvier 2011 et achevée en 2014 (voir 5.4.2).

2.3.2. La commune et la station de Barbalha

Sur la période 1980-2017, les années de plus forts totaux pluviométriques ont été, par ordre décroissant : 1985 (2.147,5 mm), 1989 (1567,3 mm), 1996 (1528,6 mm), 2011 (1431,2 mm), 2004 (1423,1 mm), 2008 (1384,5 mm), 1988 (1321,2 mm), 2013 (1238,1 mm) et 2014 (1173,2 mm). Comme à Crato, les années 1985 et 2011 apparaissent comme étant parmi les plus arrosées de la série analysée (Fig. 2.21).

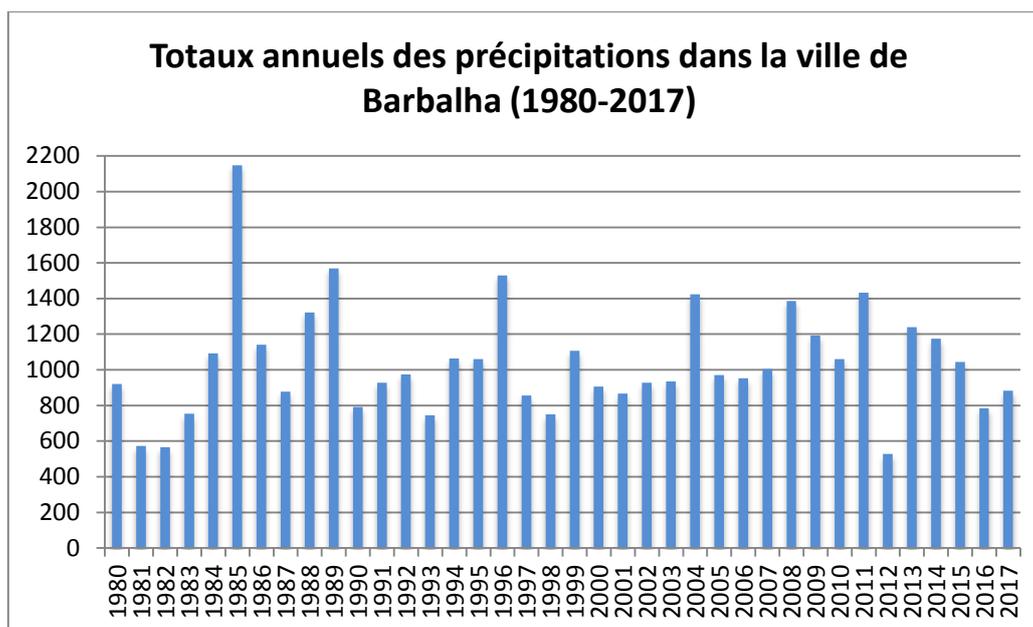


Figure 2.21. Histogramme des totaux annuels de précipitations à la station de Barbalha dans la période 1980-2017. Après des données de la FUNCEME 2018. (Elaboration : A.O., Magalhães, 2018).

En général, les précipitations se sont principalement concentrées sur les mois de décembre – janvier (“pré-saison” des pluies) et février à mai (saison des pluies). Les mois les plus arrosés sont février et mars, suivis de janvier, avril et décembre, ce qui diffère quelque peu de la répartition des pluies les plus intenses, supérieures à 100 mm en 24 h (tableau 2.2).

Les années où se sont produites des précipitations supérieures à 100 mm en 24 h ont été 1983 (125,6 mm), 1985 (109 et 118,2 mm en janvier et décembre respectivement), 1990 (125,1 mm), 1992 (103 mm), 1997 (131 mm), 2004 (112 et 117 mm en janvier), 2005 (112,2 mm), 2006 (100,5 mm), 2007 (141,5 et 104 mm en février et avril respectivement), 2008 (108 mm), 2010 (101 mm), 2011 (110 mm), 2014 (106 mm) et 2015 (159 mm). En fonction de l’intensité des pluies, de l’occurrence d’inondations dommageables et de la disponibilité d’informations et de données, les événements décrits ici sont ceux de 1985, 2004, 2007, 2008, 2009, 2011 et 2015.

Années	Total anual de précipitations (mm)	Précipitations en 24 h (mm)	Date de l'événement
1980	919,8	0	0
1981	571,3	0	0
1982	564,2	0	0
1983	752,8	125,6	04 février
1984	1091,9	0	0
1985	2147,5	109 118,2	14 février 23 décembre
1986	1139,2	0	0
1987	875,8	0	0
1988	1321,2	0	0
1989	1567,3	0	0
1990	791,3	125,1	02 mai
1991	926	0	0
1992	973	103	17 mars
1993	743,9	0	0
1994	1063,3	0	0
1995	1059,4	0	0
1996	1528,6	0	0
1997	855,8	131	26 mars
1998	748,7	0	0
1999	1105	0	0
2000	905,2	0	0
2001	866,5	0	0
2002	927,3	0	0
2003	934,1	0	0
2004	1423,1	112 117	14 janvier 17 janvier
2005	969,7	112,2	12 mars
2006	951,9	100,5	18 mars
2007	1003,8	141,5 104	03 février 22 avril
2008	1384,5	108	12 février
2009	1191	0	0
2010	1059,9	101	09 janvier
2011	1431,2	110	27 mars
2012	528	0	0
2013	1238,1	0	0
2014	1173,2	106	27 mars
2015	1043,7	159	23 avril
2016	783,5	0	0
2017	882,3	0	0

Tableau 2.2. Événements pluviométriques supérieurs à 100 mm, station de Barbalha (1980-2017). Adapté de Brito (2016) et actualisé par l'auteure à partir des données de la FUNCEME (2018).

Comme à Crato, l'année la plus humide a été l'**année 1985** (total annuel de 2.147,5 mm, dont 1716 mm de janvier à mai). Le mois d'avril a connu le plus fort total (435,6 mm), suivi de février (395,4 mm), janvier (364,3 mm), mars (341,2 mm) et mai (180,2 mm). Mais c'est en décembre (saison des pluies 1985-1986) et en février que se sont produites les pluies les plus violentes (70 mm et 109

mm les 13 et 14 février, et 118,2 mm le 2 décembre). Cependant, comme à Crato, il n'existe aucune documentation sur d'éventuelles inondations causées par ces pluies.

L'année 2004 a aussi été très pluvieuse, avec 1423,1 mm dont 551,5 mm en janvier et 454,8 mm en février. C'est en janvier que se sont produits deux épisodes pluvieux supérieurs à 100 mm en 24 h : 112 mm le 14 et 117 mm le 17 (Fig. 2.22).

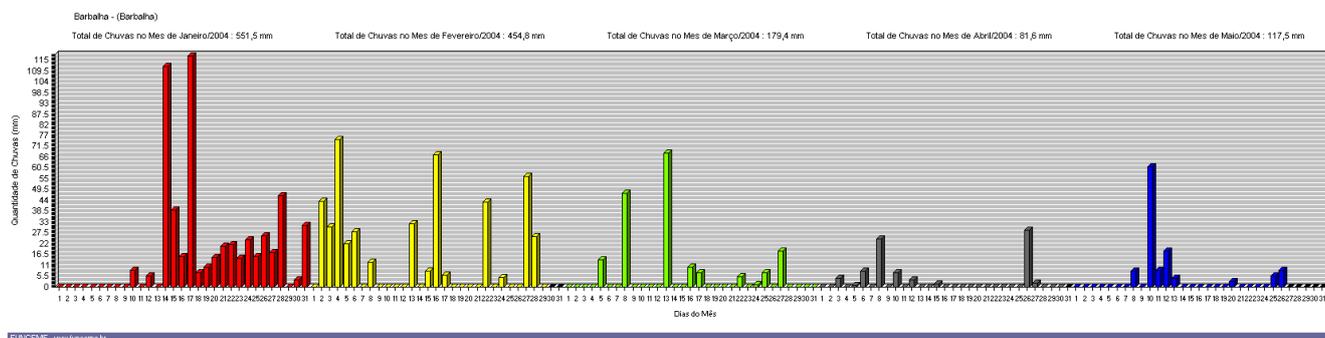


Figure 2.22. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2004. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

D'après l'Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (1991 - 2012), volume Ceará (2013), l'excès de pluies de janvier 2004 a été causé, entre autres facteurs, par l'intensification de l'oscillation intrasaisonnière de la ZCIT sur l'Amérique du Sud, ayant provoqué une activation exceptionnelle des systèmes frontaux semi-stationnaires des régions du sud-est du Brésil et du sud du Nordeste. 86 événements qualifiés de "désastres" se sont produits en janvier et février dans l'État du Ceará, du fait de la localisation de la ZCIT au sud de sa position habituelle. Plusieurs stations ont vu leur total pluviométrique mensuel de février dépasser la moyenne de plus de 300 mm. Barbalha a fait partie de la liste de "Reconhecimentos de Situação de Emergência (SE: reconnaissance de Situation d'Urgence) et d' "Estado de Calamidade Pública" (ECP: État de Calamité Publique) de l'État du Ceará, dressée par le "Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil" et le "Ministério da Integração Nacional". Malgré la violence de ces précipitations, peu de conséquences sont relatées dans les journaux, alors que, selon les témoignages de la population locale recueillis par Brito (2016), des inondations se sont produites dans plusieurs quartiers de Barbalha, principalement autour des *riachos do Ouro* et *Seco*. Plusieurs sites de la zone rurale de la commune auraient aussi été inondés, autour de petits affluents du Rio Salamanca.

L'année 2007 a été beaucoup moins arrosée : 1003,8 mm, dont 755,5 mm de janvier à mai et 387,2 mm en février et 155,6 mm en avril (Fig. 2.23). Mais deux épisodes de plus de 100 mm en 24 h se sont produits en février (141,5 mm le 2 février) et en avril (104 mm le 22 avril).

Le mois de janvier a été caractérisé par des situations atmosphériques estivales atypiques ayant entraîné l'activation de systèmes frontaux semi-stationnaires et de la ZCAS (Zone de Convergence de l'Atlantique Sud) pendant tout le mois. Il en a résulté des pluies intenses et de nombreuses catastrophes naturelles (inondations, mouvements de terrain) dans les régions Sud-Est et Centre-Ouest. À Barbalha, l'épisode pluvieux du 2 février a provoqué l'inondation des quartiers Cirolândia, Nossa Senhora de Fátima et Rosário (localisation : voir Fig. 1.31). Des travaux de drainage ont été entrepris dans le quartier Cirolândia à la suite de cet événement, mais n'ont pas été achevés (Brito, 2016).

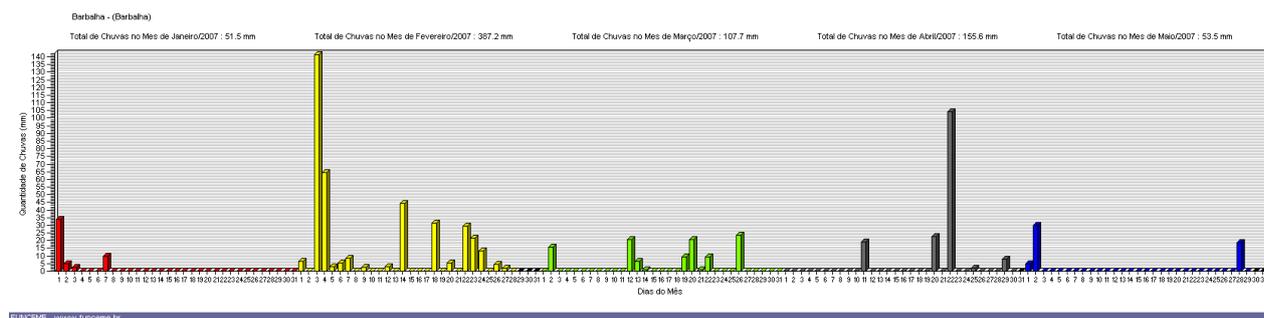


Figure 2.23. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2007. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Les précipitations ont atteint un total de 1384,5 mm au cours de l'année 2008, dont 1224,5 mm de janvier à mai (Fig. 2.24), 560,8 mm en mars et 293,5 mm en février. Auparavant, 196,5 mm étaient tombés en décembre 2007.

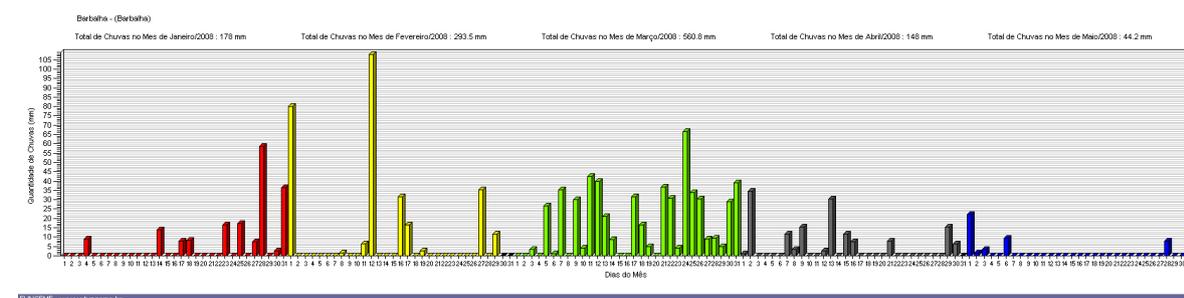


Figure 2.24. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2008. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Ces pluies se sont produites après une période de diminution de l'activité frontale sur le Brésil ayant permis la persistance d'une anomalie anticyclonique sur l'océan Atlantique et l'est du Brésil, notamment dans la 2^{ème} quinzaine de décembre. Malgré trois épisodes d'activité de la ZCAS, il avait plu moins que la moyenne sur une grande partie des régions Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste et dans

le sud de la région Norte, ainsi que dans le nord du Nordeste. Décembre et janvier ont été plus arrosés et, le 12 février, ce sont 108 mm d'eau qui sont tombés sur Barbalha.

Les données de la Défense Civile du Ceará font état de plus de 3000 personnes touchées par les inondations dans la commune de Barbalha cette année-là (Brito, 2016). De multiples dégâts ont été signalés : rues inondées, chaussées et structures de maisons dégradées, habitations en torchis détruites, destruction du pont reliant la ville de Barbalha au district d'Arajara. Le journal *Diário do Nordeste* (26.03.2008) titre son cahier régional ainsi : “*Cheia do Rio Salgado provoca destruições*” (une crue du Rio Salgado provoque des destructions), mais le maire de Barbalha affirme dans l'article que “*a situação é preocupante mas está longe de virar calamidade*” (la situation est préoccupante mais est loin de tourner à la calamité).

L'année 2009 a été moins humide, avec 1191 mm, dont 934,2 mm de janvier à mai et 328,7 mm en avril, mois le plus arrosé, suivi de mai (265,5 mm) et mars (157 mm) (Fig. 2.25). C'est en mai (le 5) qu'est survenue une pluie de 74 mm en trois heures, provoquant des dégâts dans la ville de Barbalha, ce résultat ayant sans doute été facilité par la saturation des sols dû à un mois d'avril particulièrement pluvieux.

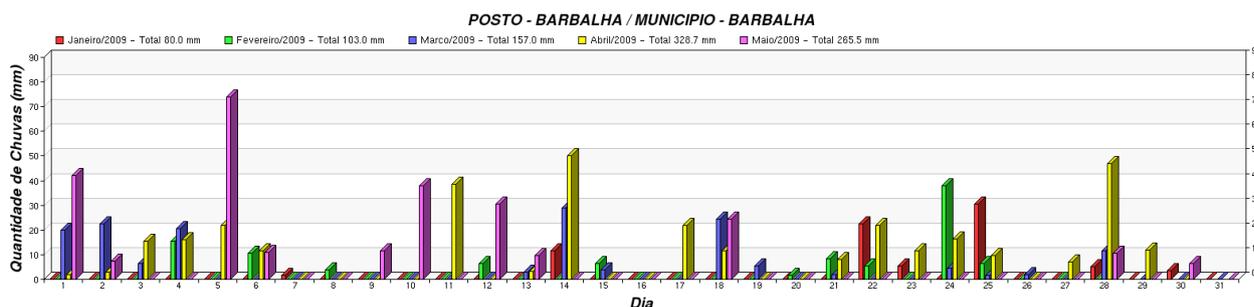


Figure 2.25. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2009. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Ces pluies ont résulté de la conjonction de l'activité de la ZCIT dans la région, de la formation de lignes d'instabilité sur la zone littorale et de la propagation de cellules de basse pression dans la moyenne et haute troposphère. 140 communes ont été touchées par des inondations dans l'État du Ceará, selon la Défense Civile. Barbalha fait partie de celles qui ont décrété une situation d'urgence, mais aucun autre détail sur d'éventuels dommages n'a pu être trouvé.

Il en est de même pour l'année 2011, qui a pourtant été aussi pluvieuse qu'à Crato, avec 1431,2 mm. Il est tombé 1043,7 mm au cours de la saison des pluies (janvier-mai), dont 340,8 mm en janvier, 248,9 mm en février et 247,5 mm en mars. En janvier, les pluies se sont essentiellement concentrées dans les derniers jours du mois et en février, avec deux épisodes de plus de 90 mm en 24 h, mais sans aucune conséquence catastrophique, à la différence de Crato (Fig. 2.26). Les 100 mm

n'ont été dépassés que le 27 mars (110 mm), apparemment sans que le canal du Riacho de Ouro ne déborde (aucun signalement dans la presse locale).

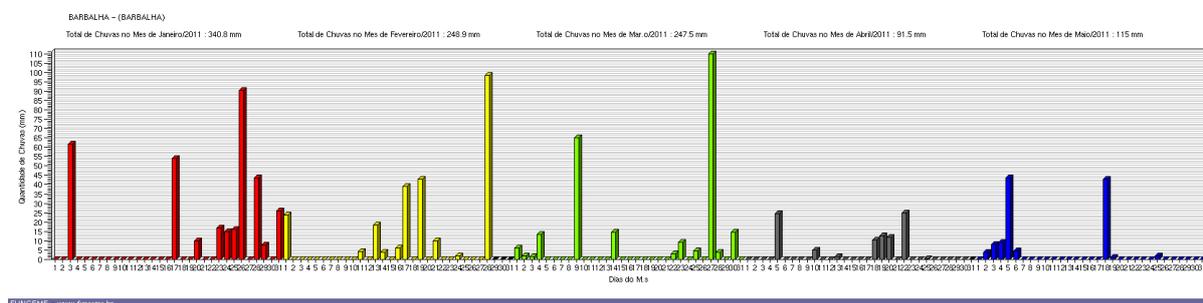


Figure 2.26. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2011. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Après deux années assez humides (2013, 2014) mais sans épisode pluvieux violent, ce sont seulement 918,2 mm qui sont tombés à Barbalha au cours de l'année 2015. Sur ce total, 818,5 mm correspondent à la saison des pluies (janvier-mai), dont 253,5 mm en mars, 227,5 mm en mai et 201 mm en avril (Fig. 2.27). C'est au cours de ce mois que s'est produit l'épisode le plus violent : 159 mm entre les 22 et 23 avril, dans un contexte de forte convection associée à la ZCIT, alors bloquée sur l'État du Ceará.

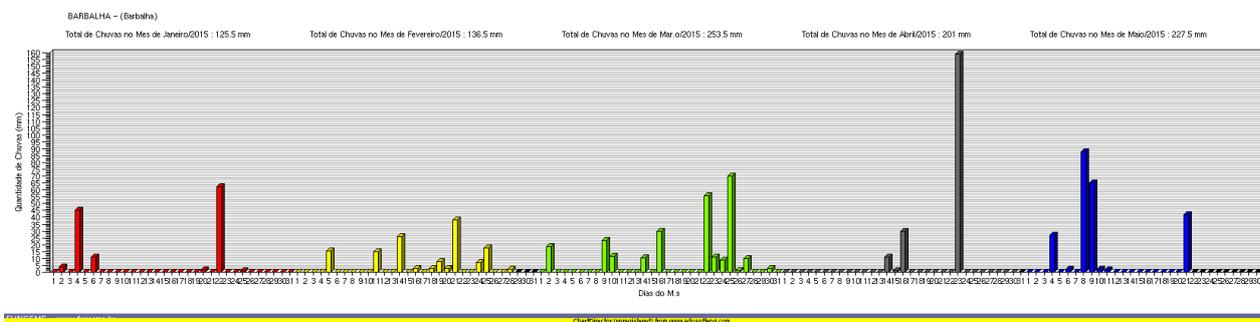


Figure 2.27. Histogramme des précipitations journalières à Barbalha de janvier à mai 2015. (Source : FUNCEME, 2018). <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/548-grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos>

Selon les informations des médias locaux, ce sont les secteurs proches des rives du Riacho Seco qui ont été les plus atteints (quartiers Bela Vista, Santo André et Cirolândia ; voir chapitre 5). Plusieurs familles ont été évacuées à cause du débordement du canal. En centre-ville, les eaux ont envahi les couloirs de l'hôpital São Vicente. Des dégâts ont également été signalés sur le canal du Riacho do Ouro. À la suite de cet événement, certains élus locaux ont tenté d'exiger des mesures

auprès des autorités, dont un *vereador* (conseiller municipal) qui a rassemblé une documentation écrite et photographique (non communiquée) sur les inondations et autres dégâts survenus dans la commune au cours des années précédentes. Sans succès jusque là...

2.3.3. Évolution de la fréquence des crues : pas de tendance claire faute de recul

La proximité géographique et les similitudes de situation des communes de Crato et Barbalha expliquent le relatif parallélisme de la distribution dans le temps des épisodes pluvieux intenses et des crues qui les ont touchées, bien que l'événement le plus grave qui ait affecté Crato, le 28 janvier 2011 ne semble pas avoir eu d'équivalent à Barbalha. Cette observation peut correspondre aux différences locales de durée et d'intensité des pluies – un fait avéré pour la crue étudiée –, à une différence de réponse des bassins-versants à ces pluies, mais aussi à des disparités dans la disponibilité et la qualité des informations.

Il apparaît en tout cas que sur la période étudiée (1980-2017, soit 37 ans), 17 événements d'intensité supérieure à 100 mm en 24 h se soient produits, soit un peu moins de un tous les deux ans en moyenne, mais que seuls 7 cas d'inondations ont été répertoriés à Crato, dont 6 sur la période 2004-2016 (un tous les 2 ans en moyenne également). Le fait que sur la période précédente (1985-2003) une seule inondation apparaisse dans les enregistrements (1985) correspond surtout à ce que les sources consultées (journaux régionaux et locaux) ne les considèrent pas comme dignes d'être rapportées et ne les mentionnent donc pas. C'est pourtant au cours de cette période que le chenal bétonné, commencé en 1965, a été rallongé et redimensionné (dès les années 2000 pour ses parties les plus anciennes), ce qui a été une réponse à des crues et inondations répétées dont il convenait de protéger le centre-ville (voir aussi chapitre 5). Le fait que jusqu'alors le Rio Granjeiro disposait, à l'amont immédiat du centre-ville (quartier Pimenta), d'un lit naturel et d'une bande de tressage plus large (Fig. 2.9 b) où son énergie pouvait se dissiper, peut aussi avoir rendu les inondations moins menaçantes, sans effet de débordement brutal d'un chenal bétonné parcouru par un courant plus rapide.

Les chiffres, similaires pour les épisodes pluvieux intenses, sont encore moins significatifs à Barbalha, où seulement quatre inondations sont décrites sur la période 2004-2015. Des demandes d'informations complémentaires ont été effectuées auprès de la mairie et de certains élus mais à ce jour, elles n'ont pas encore abouti.

2.4. Conclusion du chapitre 2

Les villes de Crato et de Barbalha souffrent fondamentalement de continuer à se développer sans respecter les cours d'eau qui les traversent. À Crato en particulier, le petit torrent montagnard qu'est le Rio Granjeiro est la plus grande partie de l'année tellement privé de son eau par les captages, qu'il en est oublié et que l'on a cru pouvoir le réduire à un ruisseau facilement contenu entre deux

parois de béton. Il circule désormais dans un véritable toboggan aux lignes simplifiées mais rendues de plus en plus irrégulières au fil des réparations et recalibrages successifs. Ces derniers n'ont pour effet que d'accélérer l'écoulement et de l'acheminer au plus vite hors de la cité, jusque dans la plaine de confluence où on pourra l'oublier entre les champs de canne à sucre, là où il n'incommoder personne... Le Rio Granjeiro, ruisseau, mais aussi égout à ciel ouvert, devenant en saison sèche un filet noirâtre qui, serpentant de trou en fissure sur le fond cimenté, incommoder riverains et passants. Et pourtant, pratiquement tous les deux ans depuis ce corsetage inconsidéré, de violentes crues viennent rappeler que l'eau retrouve toujours son chemin et qu'elle peut toujours reprendre ses droits sur son ancienne plaine d'inondation, et même au-delà.

La question qui se pose est donc de savoir comment rendre au Rio Granjeiro son statut de rivière et composer avec des excès qui menacent de s'aggraver compte tenu de l'occupation croissante de son bassin-versant. La crue du 28 janvier 2011 est venue rappeler, après bien d'autres, que cette question est grave, qu'elle demande des solutions urgentes, mais aussi que celles-ci ne peuvent pas être élaborées dans l'improvisation et la dispersion. L'analyse des conditions de déclenchement et des conséquences de cette crue et de celles qui l'ont précédée ou suivie est un pas dans cette direction. Elle devrait par la suite s'insérer dans une approche scientifique plus large et interdisciplinaire dont les résultats devraient s'articuler avec ceux des approches appliquées (ingénierie, urbanisme...) afin de fournir aux décideurs les éléments nécessaires à l'élaboration d'une planification urbaine comportant une véritable gestion des risques d'inondation et, plus généralement, des risques « naturels ». Parallèlement, la diffusion de ces résultats auprès de la population devrait améliorer la perception de cette situation, sans laquelle cette gestion peut rester incomprise, mal acceptée et inefficace.

Chapitre 3 : Crato et Barbalha face aux aléas érosion et mouvements de terrain

3.1. Introduction du chapitre 3

La rapide croissance des villes de Crato et de Barbalha vers l'escarpement de la *chapada* pose de nombreux problèmes environnementaux préoccupants par les impacts (déforestation, exploitation désordonnée des ressources hydriques, occupation incontrôlée de l'espace, imperméabilisation des sols, pollution) comme par les risques naturels encourus. Il n'existe pourtant aucune véritable culture locale du risque, ni aucune expression coordonnée de cette thématique dans la planification urbaine. Outre les crues traitées dans le chapitre précédent, on ne trouve dans la littérature scientifique que quelques travaux sur les mouvements de terrain de petite taille qui affectent les systèmes de glacis disséqués formant les site de Crato (Ribeiro et Guerra, 2003 ; Soares, 2006; Carvalho et Ribeiro, 2007) et de Barbalha (Silva *et al.*, 2018). Dans le haut escarpement gréseux qui les domine, on ne connaît que des chutes de blocs, tandis qu'aucun grand mouvement de masse n'apparaît dans les documents historiques qui ont pu être consultés. La connaissance des aléas a commencé à s'étendre avec l'identification de grands mouvements de masse ayant affecté l'escarpement (glissements) et les fonds de vallées (coulées de débris), probablement avec des temps de récurrence assez longs pour que ces événements soient jusqu'alors restés ignorés (Peulvast *et al.*, 2011). Elle permet de compléter la connaissance des risques auxquels sont exposés les habitants et les infrastructures des communes concernées.

3.2. Ravinelements et petits mouvements de terrain

Jusque récemment, les travaux sur les aléas naturels autres que ceux liés aux crues mentionnaient surtout les petits mouvements de masse et les ravinelements identifiés dans le piémont disséqué où sont construites les villes de Crato et Barbalha, à quelques kilomètres de l'escarpement (ex : Ribeiro et Guerra, 2003 ; Soares, 2006 ; Carvalho et Ribeiro, 2007 ; Silva, 2017). Les processus impliqués sont essentiellement des processus de surface, contrôlés par les propriétés des formations superficielles, par la nature et l'état des couvertures végétales et par les actions anthropiques. Il en est de même pour les quelques phénomènes observés dans l'escarpement lui-même, essentiellement à l'issue d'épisodes pluvieux intenses. On citera par exemple de petits glissements boueux dans les altérites argileuses développées le long des fractures du grès Exu, observés le long des routes d'accès à la Chapada, toutes entaillées dans des rentrants concaves de la corniche sommitale (Belmonte, Farias), ou encore des chutes de blocs ou de petits éboulements intervenus dans des parois abruptes dépourvues de couvert forestier, ou temporairement dénudées par l'événement lui-même (Granjeiro,

Luanda, Arajara Park) (Fig. 3.1). Les secteurs concernés sont inhabités mais quelques-uns de ces événements affectent des routes régulièrement empruntées et peuvent représenter des dangers potentiels.

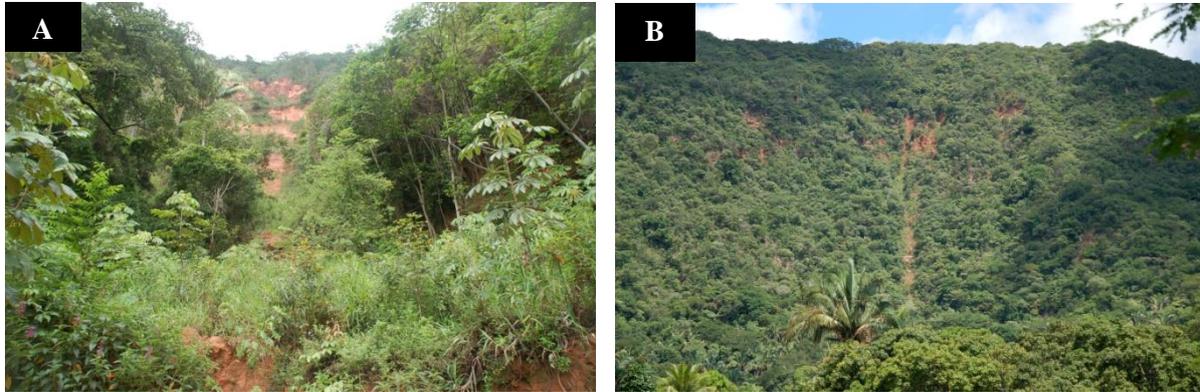


Figure 3.1. Mouvements de masse de petite taille dans l'escarpement de la Chapada do Araripe, 2007. **A.** Cicatrice de glissement fraîche à Farias (Arajara Parque, Barbalha). **B.** Cicatrices d'arrachement et de chutes de blocs à Luanda, Crato). Photos : J.P. Peulvast.

Associés à des processus d'érosion actifs, ces événements laissent des marques spécifiques dont un inventaire a été dressé dans le bassin-versant du Rio Granjeiro, à travers une cartographie des classes d'érodabilité des formations superficielles et de susceptibilité à l'érosion (Ribeiro, 2004). Sur la carte d'érodabilité sont également reportées les cicatrices de ravinement et/ou de mouvements de terrain observées au début des années 2000 (Fig. 3.2).

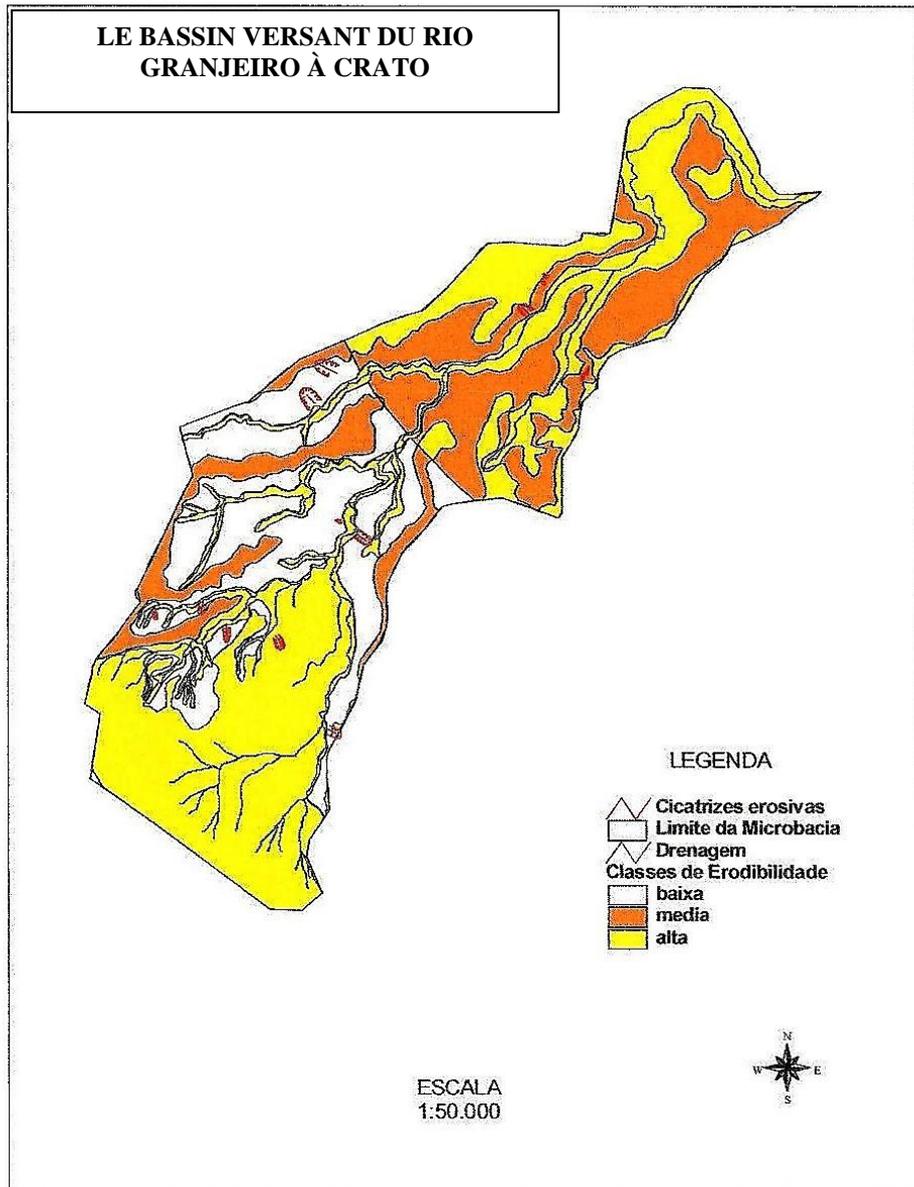


Figure 3.2. Carte d'érodabilité des formations superficielles et cicatrices d'érosion dans le bassin-versant du Rio Granjeiro. La figure représente les cicatrices érosives, les limites du bassin-versant, les axes de drainage, les classes d'érodabilité (basse, moyenne, haute). (Source : Ribeiro, 2004).

Dans ce travail, S. Ribeiro (2004) a identifié 5 classes de susceptibilité à l'érosion superficielle à l'intérieur du bassin-versant. (Fig. 3.3). Ces classes résultent de l'interaction entre des paramètres interdépendants (unités de versants, formes des pentes, déclivité, érodabilité des matériaux superficiels) qui contrôlent directement ou indirectement les dynamiques et l'évolution géomorphologiques.

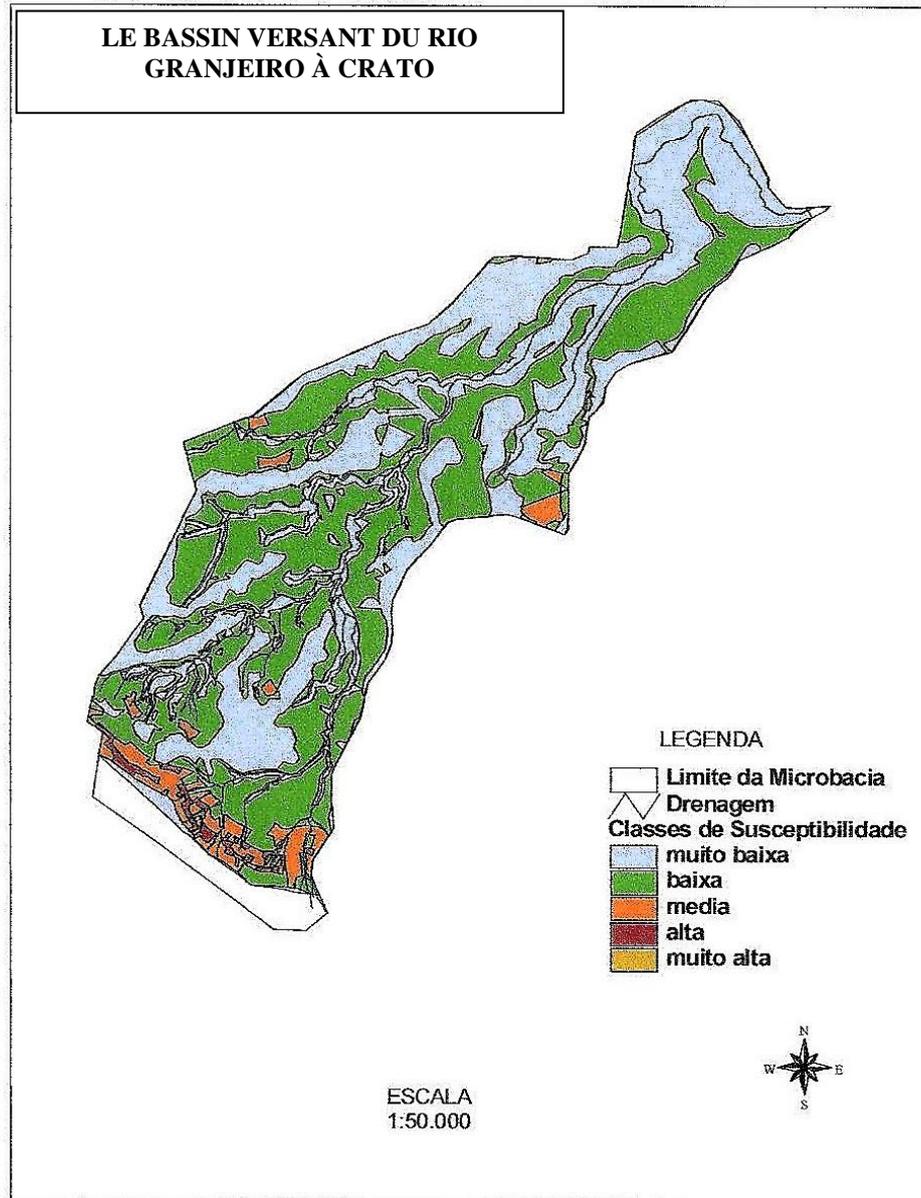


Figure 3.3. Carte de susceptibilité aux processus d'érosion superficielle dans le bassin-versant du Rio Granjeiro. La figure représente les limites du bassin-versant, les axes de drainage, les classes de susceptibilité (très basse, basse, moyenne, haute, très haute). (Source : Ribeiro, 2004).

Les classes de susceptibilité aux processus naturels de l'érosion dans le bassin-versant du Rio Granjeiro selon Ribeiro (2004) :

Classe 1 – très basse susceptibilité

Cette classe couvre 949,76 hectares, soit 45,31 % de la superficie du bassin-versant. Elle correspond aux interfluves plans et aux plaines alluviales, dont les terrains sont souvent meubles, mais où les pentes (convexes, rectilignes ou concaves) et les déclivités sont faibles. Elle englobe une grande partie du site de Crato, principalement le centre, qui est aussi le noyau initial de la ville. Aucune cicatrice d'érosion n'y est recensée.

Classe 2 – basse susceptibilité

Cette classe couvre 944,87 hectares, soit 45,08 % de la superficie du bassin-versant. Elle correspond à de grandes parties des basses pentes des interfluves, avec des inclinaisons variées, faibles à très fortes. Les formations superficielles sont moyennement érodables, en particulier sur les grès tendres de la Formation Batateira, où l'infiltration est aussi aisée dans les horizons altérés que dans le substrat. Au pied de l'escarpement, l'érodabilité des matériaux reste faible dans les parties basales, et plus forte sur les parties plus élevées, surtout en rive droite du Rio Grangeiro, en particulier sur les colluvions issues des grès Exu, déposées sur les grès argileux Arajara et la Formation Santana (calcaires, argiles...). Dans ce cas, des contrastes de porosité et de perméabilité peuvent faciliter des phénomènes de déstabilisation (glissements en planche, etc.), en particulier dans les éboulis gréseux plus ou moins désagrégés et argilisés (Fig. 3.4 A).

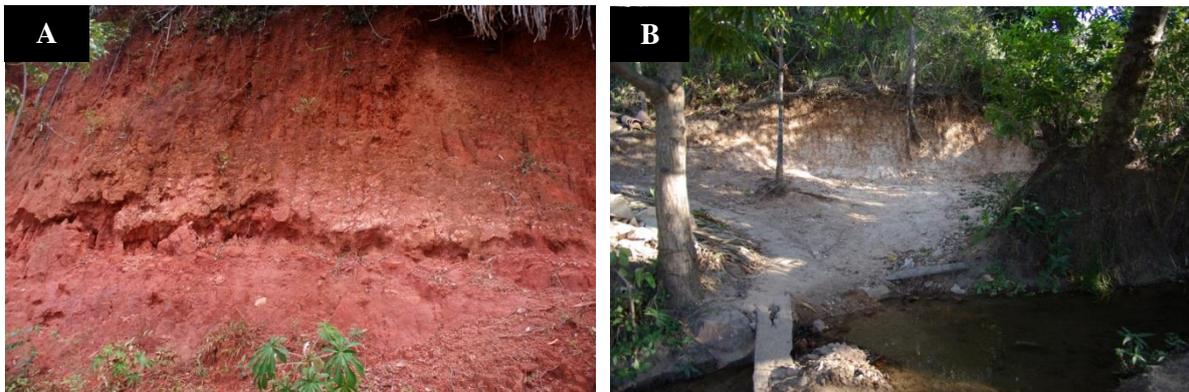


Figure 3.4. Morphologie de la base de l'escarpement gréseux de la chapada do Araripe. **A.** Arajara (Barbalha) : éboulis gréseux argilisé. **B.** Coqueiro (Crato) : affleurement de grès Arajara, apparaissant exceptionnellement à la faveur de glissements ayant emporté la couverture colluviale (témoignage d'un riverain, 08-2008). Photos : J.P. Peulvast, 2008.

Selon nos propres observations, de tels phénomènes pourraient expliquer la dénudation locale des basses pentes de l'escarpement façonnées dans les grès Arajara (Coqueiro), et ainsi participer à l'alimentation de grandes coulées de débris (langues de débris du Rio Saco, du Rio Granjeiro et de Luanda : Fig. 2.30 B).

Les interfluves sur lesquels la ville de Crato a débordé, autour des *riachos* Granjeiro, da Vala et das Piabas, sont largement représentés dans cette classe de basse susceptibilité. Il en est de même pour les zones périurbaines comme les lotissements développés sur les basses pentes de l'escarpement et sur les crêtes en rive droite du Rio Granjeiro (Avenue Pedro Felício Cavalcanti). C'est là que se rencontrent la plus grande partie des petites cicatrices d'érosion observées par S. Ribeiro (2004), dans des secteurs défrichés et partiellement viabilisés (routes de terre rectilignes, obliques ou parallèles à la plus grande pente) mais dépourvus de tout aménagement de protection des sols contre les écoulements d'eau (ruissellement pluvial, écoulements d'eaux usées).

C'est à l'intérieur de ce secteur que se trouve la plus importante cicatrice érosive décrite dans le travail cité : la « *voçoroca* » (ravin) du quartier Seminário, entaillée dans le rebord d'une haute lanière de glaciais (40 m) face au centre ville (Fig. 3.5 A). Ce quartier est un quartier résidentiel incluant des zones de *favela* dépourvues de tout système ordonné d'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées, en particulier autour de la tête du ravin. Alors long de plusieurs dizaines de mètres, le ravin atteignait 20 m de profondeur, 15 m de large et sa tête, en forme de fourneau érosif aux parois verticales, reculait à la vitesse moyenne d'1 m par an selon les riverains. Cet agrandissement rapide a provoqué la destruction ou la déstabilisation de nombreuses maisons.



Figure 3.5. Ravinements et *voçorocas* à Crato. **A.** La « *voçoroca* » du quartier Seminario (Travessa Bomfim) en février 2007. Elle continuait alors à s'approfondir et à reculer, en dépit de sa localisation dans un secteur de basse susceptibilité (mais en rebord de terrasse), à cause du déversement des eaux pluviales et usées d'un égout situé à l'amont. Au premier plan, vestiges d'une maison détruite. **B.** Ravinements dans les grès tendres de la Fm Batateira au-dessus du Parc des Expositions, 2009. Photos: J.P. Peulvast.

Classe 3 – Susceptibilité moyenne

Cette classe couvre 93,17 hectares, soit 4,45 % de la superficie du bassin-versant. Elle est principalement représentée le long de l'escarpement de la Chapada, avec des pentes moyennes ou fortes et des formations superficielles peu épaisses et très érodables. On la rencontre aussi en quelques secteurs de plus basse altitude, surtout en rive droite du riacho da Vala (Alto da Penha), où les formations superficielles surmontant les grès Batateira sont particulièrement meubles, avec des pentes concaves et des abrupts en partie artificiels (tranchées routières et anciennes carrières, autour et au-dessus du parc des Expositions) favorables au ravinement (Fig. 3.5 B).

Il s'agit de secteurs peu densément occupés, sauf dans le quartier Alto da Penha, dépourvu de système de collecte des eaux usées et pluviales, et où des masures de torchis et de bois coexistent avec des habitations en dur. Plusieurs ravins se développent dans les pentes situées en contrebas. L'occupation est encore moindre dans les pentes inférieures de l'escarpement, incluses dans des aires protégées (FLONA, APA) et où l'on observe d'importantes marques de mouvements de terrain (cf. infra).

Classe 4. Haute susceptibilité

Cette classe couvre 19,6 hectares, soit 0,91 % de la superficie du bassin-versant. Elle correspond uniquement à l'escarpement de la Chapada, fortement incliné et pourvu de parois rocheuses (Fig. 3.6 A). Les formations superficielles (colluvions peu épaisses, altérites argileuses) y sont très érodables.

Classe 5. Très haute susceptibilité

Cette classe couvre 0,89 hectare, soit 0,04 % de la superficie du bassin-versant. Elle correspond à un point isolé de l'escarpement, une paroi subverticale taillée dans les grès Exu très fracturés. En réalité, il existe plusieurs pointements de ce type, souvent ruiniformes et propices à des éboulements plus ou moins importants (Fig 3.6 A), dans ce bassin-versant comme dans celui du Rio da Batateira et dans ceux du rentrant de Barbalha. Certains d'entre eux dominent directement des lieux habités, en particulier des clubs de loisirs (Clube Serrano, à Crato ; Arajara Park, à Barbalha : Fig. 3.6 B).

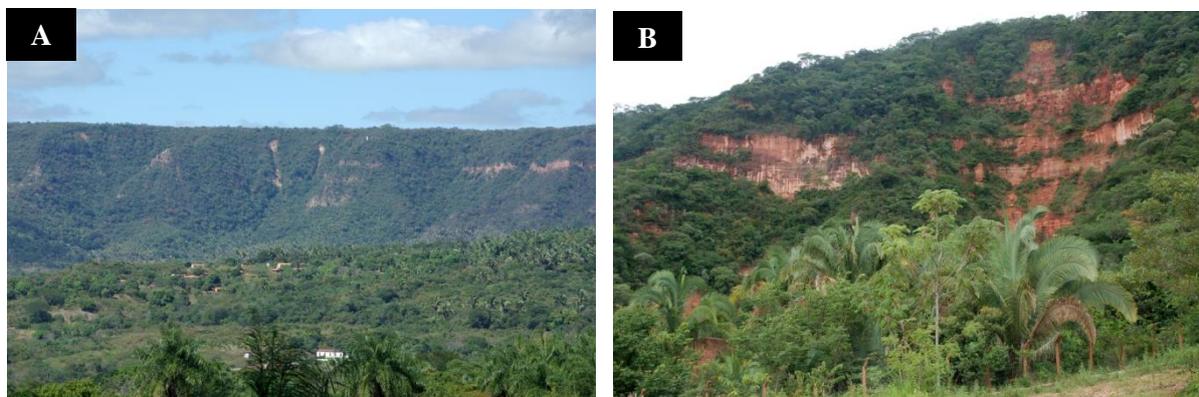


Figure 3.6. Parois actives dans l'escarpement gréseux de la Chapada do Araripe. A. Traces récentes de chutes de blocs et/ou de petits glissements au-dessus de Luanda, vues depuis Guaribas (Crato, 08-2008). B. Paroi dénudée au-dessus de la source de Farias, Arajara Parque, Barbalha (02-2007). Photos : A.O. Magalhães.

En résumé, l'analyse des cartes publiées par S. Ribeiro (2004) montre que les parties du bassin-versant dotées d'une haute susceptibilité à l'érosion ne représentent que des superficies assez faibles, malgré la présence de plusieurs (une douzaine) cicatrices d'érosion au début des années 2000. L'auteur en conclut que l'usage des sols est un des facteurs principaux de la vulnérabilité des formations superficielles et des sols à l'érosion. En majorité, les cicatrices érosives observées se concentrent dans des terrains en principe peu susceptibles des secteurs péri-urbains en phase d'urbanisation désordonnée, dépourvus de formations végétales denses, de voirie organisée et de systèmes d'évacuation des eaux, c'est-à-dire non protégés de la pluie, du ruissellement et des phénomènes de déstabilisation. On notera cependant que la carte omet la plus grande partie des cicatrices visibles dans l'escarpement et que la plus importante forme de ravinement a été observée en ville (*voçoroca* de Seminário, Fig. 3.2).

Cette particularité s'explique en grande partie par le fait que, jusque dans les années 2010, ce ravin était alimenté en grande partie par une canalisation recueillant les eaux usées des habitations

voisines (Fig. 3.7). Menaçant pour les habitations riveraines comme pour la voirie et le chenal du Rio Grangeiro situé en contrebas, il est le seul qui ait finalement reçu un traitement spécifique. Il recoupe les grès tendres de la Formation Batateira, très altérés et surmontés par 2 à 3 m d'un dépôt non stratifié et riche en blocs représentant la couverture du glacis ou une haute terrasse du Rio Grangeiro. La lithologie est donc propice à un creusement et à un élargissement rapides, accompagnés de déstabilisations du rebord associées au délogement de blocs. Dans la mesure où le fond de ce ravin était, avant les travaux d'aménagement de 2013-2014, directement relié au chenal du Rio Grangeiro par une courte buse de béton passant sous l'avenue et les immeubles construits au débouché de l'entaille, la *voçoroca* représentait non seulement un danger pour les habitations construites sur la terrasse, mais aussi pour celles situées au pied. Ses caractères, ainsi que ceux du quartier riverain, ont été totalement modifiés par l'aménagement de 2014 (voir chapitre 5).

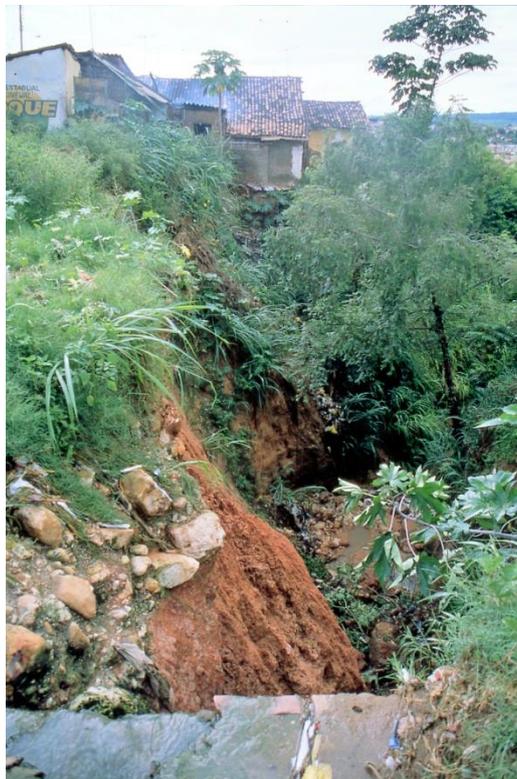


Figure 3.7. La tête de la *voçoroca* du quartier Seminário en mars 1999. Au premier plan, rebord de la canalisation apportant les eaux pluviales et usées du quartier. À gauche, le matériel hétérométrique de la haute terrasse (ou couverture de glacis) reposant sur les grès tendres de la Fm Batateira. Photo : J.P. Peulvast.

Outre les cas signalés à Crato, les ravinements affectent aussi certains quartiers de Barbalha, en particulier celui de Rosário construit sur le haut interfluve de grès tendres et altérés qui sépare les vallées du Riacho do Ouro et du Rio Salamanca (Fig. 3.8). Ici c'est le recul rapide (signalé par Josier Ferreira da Silva, professeur à la URCA et habitant de Barbalha) de têtes de ravins creusés dans une

ancienne paroi de carrière qui menace directement les habitations construites sur le rebord de l'interfluve.



Figure 3.8. *Voçorocas* du quartier Tupinambá à Barbalha, dans d'anciennes carrières de grès argileux de la Fm Batateira. **A.** Image Google Earth, 2018. **B.** État de la *voçoroca* en février 2010. Photo : J.P. Peulvast.

3.3. Grands mouvements de masse dans les communes de Crato et Barbalha : des aléas à prendre en compte ?

3.3.1. Identification de formes liées à de grands mouvements de masse

En partie à cause de sa réputation, celle d'une région semi-aride propice à de longues périodes de sécheresse sévère, le *sertão* est encore peu connu comme une région où de grands mouvements de masse pourraient être importants dans l'évolution des escarpements et le recensement d'aléas naturels. Cependant, c'est au cours de la recherche menée dans le cadre de cette thèse que des topographies dues à de grands mouvements de masse ont été reconnues dans le rebord et le piémont de la partie orientale de la Chapada do Araripe, Ceará (Peulvast *et al.*, 2011). Rapidement présenté dans le chapitre 1 en tant qu'élément important quoique méconnu de la morphologie locale, ce type de morphologie est analysé ici comme résultant de processus morphodynamiques susceptibles de représenter des aléas à prendre en compte dans la prévention et la gestion des risques naturels. Cette analyse, nécessaire à l'évaluation ultérieure d'éventuels aléas naturels, reprend pour l'essentiel l'article cité, mais tient compte d'observations effectuées depuis sa parution.

Si les grands mouvements de masse sont restés pratiquement inconnus jusque là, c'est surtout à cause de diverses difficultés qui compliquent l'identification des formes et des dépôts associés. La première d'entre elles réside dans la couverture forestière dense du plateau et de l'escarpement. Bien que cette couverture soit plus clairsemée et largement dégradée en contrebas, en particulier du fait des activités agricoles et de l'urbanisation, facilitant ainsi la photo-interprétation, les accès nécessaires au travail de terrain restent difficiles du fait même de ces modes d'occupation des sols (friches

inextricables, privatisation de nombreux sites, clôtures, constructions...). En ce qui concerne les processus eux-mêmes, l'absence d'archives historiques remontant au-delà du XVIII^e siècle contribue aussi à rendre cette étude difficile, dans un contexte de temps de récurrence probablement longs.

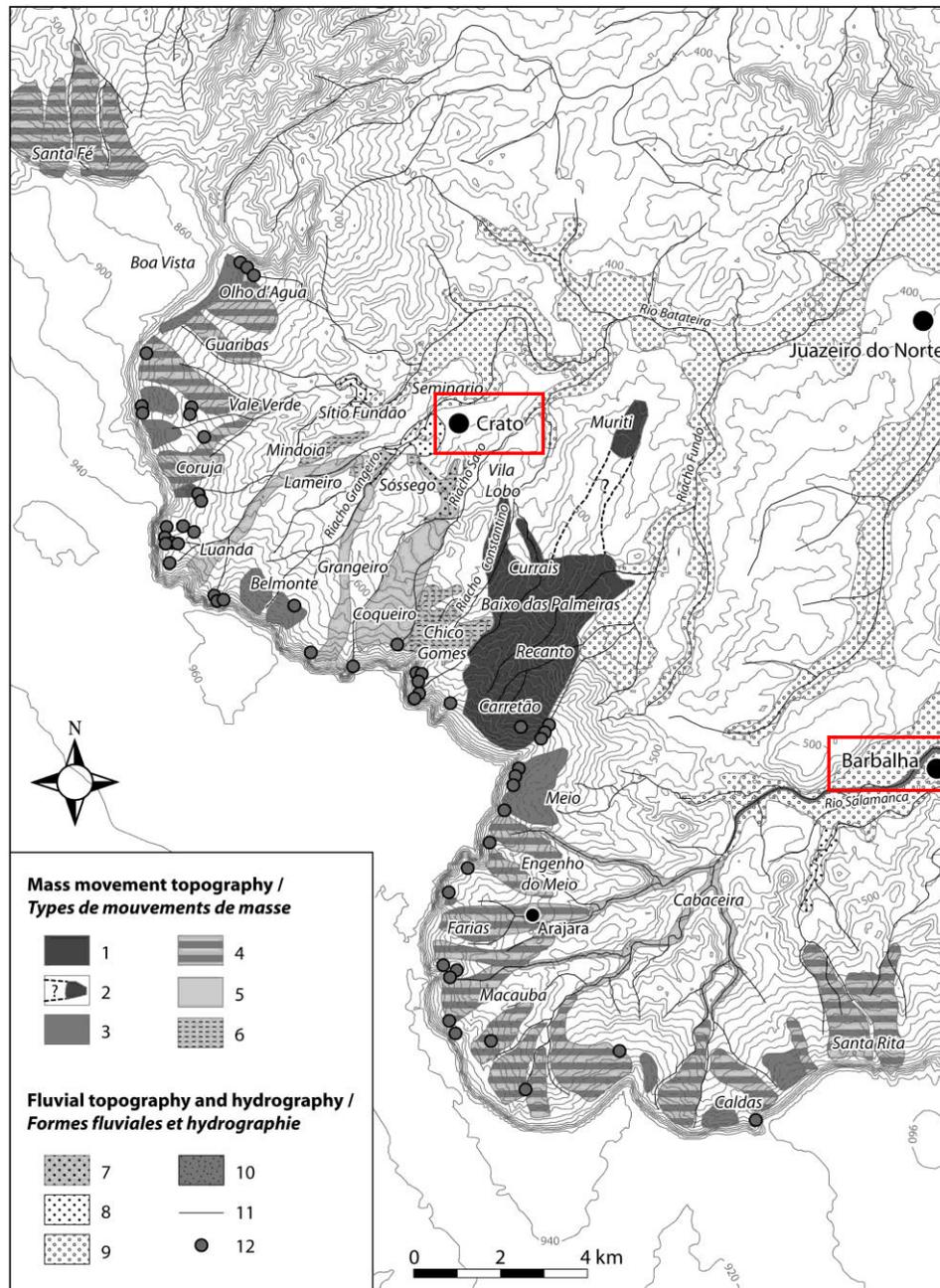


Figure 3.9. Topographie, formes et dépôts liés aux grands processus morphodynamiques dans la région de Crato-Barbalha. Carte dressée à partir du MNT SRTM et des observations des auteurs (Peulvast *et al.*, 2011). **1** : dépôt d'avalanche de débris (*Sturzström*) ; **2** : lobe d'avalanche de débris (en partie supposé) ; **3** : glissement rotationnel (*slump*) ; **4** : glissement rotationnel-lobe de débris ; **5** : coulée de débris ; **6** : dépôts de coulée de débris dégradés ; **7** : plaine d'épandage en avant d'un lobe de débris ; **8** : terrasse fluviale ; **9** : plaine fluviale ; **10** : chenaux en tresses ; **11** : cours d'eau ; **12** : source.

L'identification et la cartographie des grands mouvements de masse s'est faite grâce à un travail de terrain et à l'analyse de photos aériennes à 1:15 000 et d'images satellite à haute résolution (Landsat TM and ETM+). L'usage de l'imagerie Google Earth sous forme de visualisations 3D a été déterminant. S'appuyant sur une cartographie de terrain à partir d'une carte topographique à 1:50 000 (FUNDETEC, 1998 ; Fig. 1.11) complétée par le traitement d'un MNT de moyenne résolution spatiale (90 m : SRTM), une cartographie géomorphologique a été élaborée par F. Bétard grâce à l'intégration des données terrain et images sous SIG (ARC GIS®) (Fig. 3.9).

Les critères d'identification ont été la présence de caractères topographiques significatifs à moyenne ou grande échelle (cicatrices de glissement, langues de débris à profil convexe, vallées partiellement remblayées, éventuellement avec des écoulements jumeaux de part et d'autre de langues épaisses, contre les versants) et des indices plus indirects (végétation, localisation des sources, etc.), combinés avec des données sur la rugosité de surface et les caractéristiques sédimentologiques des dépôts observées sur le terrain. Des profils géologiques et une cartographie élaborée sous SIG ont aidé à obtenir des évaluations semi-quantitatives des volumes de dépôts à partir des mesures de longueur, de largeur et d'épaisseur moyennes, ces dernières basées sur l'étude de toutes les coupes visibles le long de chaque forme de dépôt (tableau 3.1). Combinées avec l'usage des données disponibles sur le climat et l'hydrologie (chapitre 1), et avec celui d'indications morpho-stratigraphiques sur la succession des dépôts et des formes, ces données ont permis d'obtenir des indications préliminaires sur la signification et la chronologie relative des événements qui les ont engendrés. La typologie des mouvements de masse suit celle de Dikau *et al.* (1996).

Situation (voir Fig. 3.9)	Type de mouvement de masse	Vitesse typique	Dénivelé total	Caractéristiques de la cicatrice de glissement			Caractéristiques des dépôts			
				Hauteur de paroi	largeur	Volume manquant	Longueur totale	Largeur moyenne	Épaisseur observée	Volume estimé
Crato-Olho d'Água	Composite : slump-langue de débris	Lente	>200 m	50-80 m	600 m		1500 m	500 m		
Crato-Coruja	Composite : slump-coulée de débris	Lente	240 m slump	100 m	1000 m		1200 m (slump) 2700 m (avec coulée)	1000 m (slump) 200 m (coulée)		
Crato-Luanda-Lameiro	Coulée de débris	Rapide	280 m				>5500 m	200-300 m	3-5 m	>3 M m ³
Crato-Granjeiro	Coulée de débris	Rapide	280 m				>5500 m	200-300 m	3-5 m	>3 M m ³
Crato-Coqueiro-Riacho Saco	Coulées de débris poly-génétiques	Rapide	280 m				3000 m	600-800 m	>20 m (toe)	>5 M m ³
Crato-Carretão	Composite : slump-Sturzstrom	Rapide à très rapide	500 m	160m	1700 m	>63 M m ³	5500 to 6000 m	2000 m	Jusqu'à 60 m	>100 M m ³
Barbalha-Meio N	Slump	Lente	300 m	140 m	1200 m		~1000 m	~1500 m		
Barbalha-Meio S	Composite-slump-coulée de débris	Lente	360 m	100-200 m	1200 m		1400 m	2000 m	20 m ? jusqu'à 100 m à l'amont	>50 M m ³
Barbalha-Farias	Composite : slump-langue de débris	Lente	400 m	180 m	1000 m		>3000 m	600-800 m		
Barbalha-Macaúba-Rio Salamanca	Composite : slumps-langues de débris coulées de débris	Lente (slump) à rapide (coulée)	490 m	140 m	2000 m		7000 m	150-200 m (coulées aval)		
Barbalha-Macaúba S-Rio Salamanca	Composite: slumps-coulées de débris	Lente (slump) à rapide (coulées)	480 m	120-140 m	4000 m		7000 m	200 m (lower debris flow)	3-5 m	>3 M m ³
Barbalha-Caldas-Riacho da Onça-Rio Salamanca	Composite: slumps-coulées de débris	Lente (slump) à rapide (coulées)	480 m	120-140 m	2500 m		6000 m	200 m		
Missão Velha-Jamacaru	Slump-langue de débris		420 m	80 m	1200 m		1400 m	1000-1200 m	>5 m	>7 M m ³

Tableau 3.1. Typologie des grands mouvements de masse identifiés dans le secteur Crato-Barbalha (Source : Peulvast *et al.*, 2011).

3.3.2. Types de formes et processus correspondants

3.3.2.1. Glissements de terrain et formes complexes

On trouve des formes de glissement simples ou complexes le long des segments concaves de l'escarpement, généralement caractérisés par une corniche supérieure réduite (~100-150 m), au-dessus d'une concavité basale (fig. 3.10). Individualisées ou coalescentes, elles sont localisées en dehors des principales têtes de vallées, à moins qu'elles ne remplissent ou oblitérent certaines d'entre elles. Les plus grandes présentent leurs propres systèmes de sources et de dissection, à quelque distance de l'escarpement (Carretão; fig. 3.9).

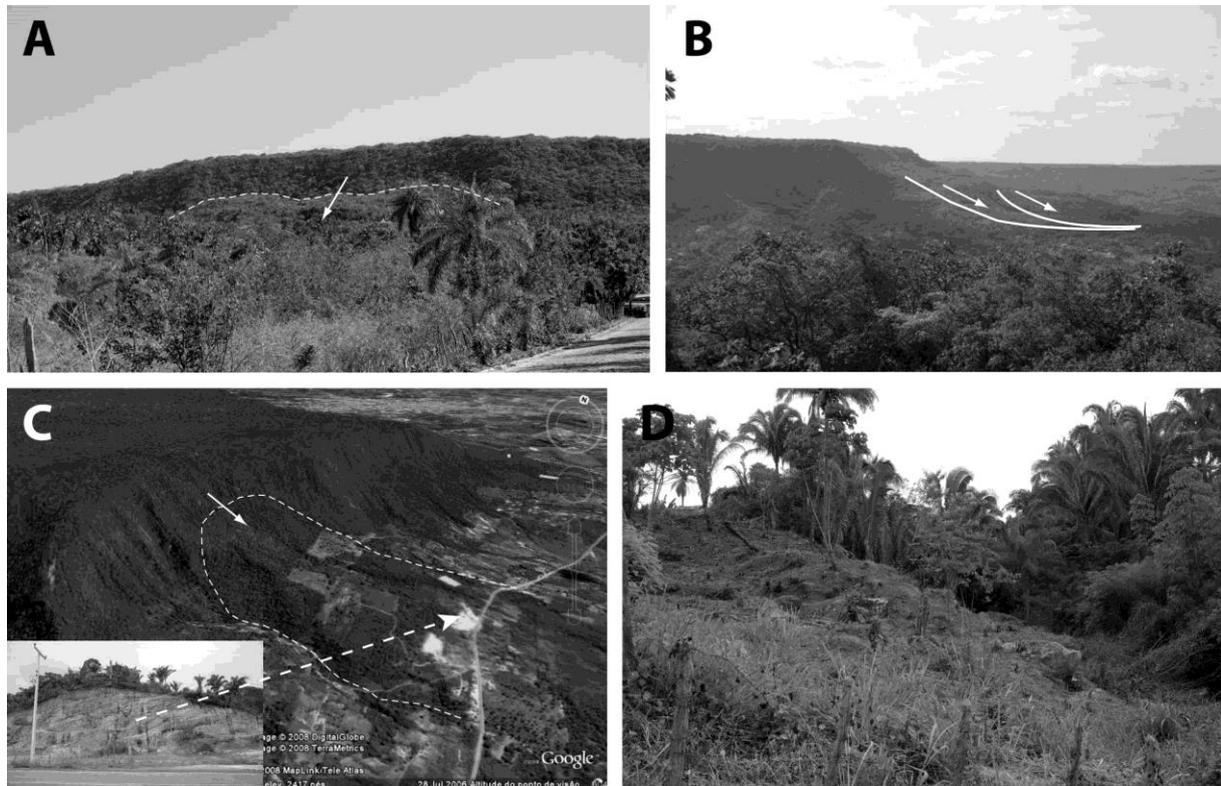


Figure 3.10. Glissements rotationnels (*slumps*) dans l'escarpement gréseux de la Chapada do Araripe, 2009. **A.** Glissement rotationnel simple (*slump*) à Macauba (Barbalha). **B.** Glissement rotationnel de Coruja, vu vers le NW depuis Belmonte. **C.** Glissement de Meio (Barbalha, image Google Earth). La photo en médaillon montre une coupe dans un énorme bloc de grès Exu basculé vers le SW. **D.** Extrémité d'une langue de débris haute de 10 à 15 m, au sud d'Arajara (Barbalha). Photos : J.P. Peulvast.

Dans les glissements les mieux caractérisés, des dépôts proéminents forment des lobes chaotiques empiétant sur les racines de glaciais. Les glissements rotationnels (*slumps*) sont les plus simples d'entre eux (Fig. 3.10 A). Ils sont prolongés par des tabliers de débris aplatis ou par de longues coulées de débris. On peut voir de grands blocs basculés dans certains d'entre eux. À Coruja, 4 km à l'ouest de

Crato, un épais lobe de débris montre de fortes pentes frontales hérissées de blocs de grès, sur 1000 m de largeur. Au moins deux masses ou écailles imbriquées ont glissé le long d'une paroi concave mise à nu sur 100 m de hauteur, prolongée ou dédoublée en surfaces de cisaillement concaves clairement visibles en marge sud du dépôt, ceci sur une longueur totale de 1200 m (Fig. 3.10 B ; tableau 3.1).

À Meio, 9 km à l'ouest de Barbalha, deux cicatrices de glissement adjacentes échancrent un segment NS de l'escarpement sur une largeur totale de 2,5 km. Tandis que la plus septentrionale ne domine qu'un court lobe aplati, la plus méridionale est partiellement occupée par un épais lobe de débris dans sa moitié nord. L'épaisseur de ce dépôt atteint 60 à 100 m au-dessus du plancher disséqué visible dans la moitié sud (Engenho do Meio). Une petite carrière localisée sur le côté ouest de la route Crato-Arajara à 680 m d'altitude montre que la partie la plus épaisse de ce lobe montueux, à 800 m de la corniche gréseuse, correspond à un énorme panneau basculé de grès Exu incliné à 30°SO, c'est-à-dire en partie vers l'escarpement, 80 m plus bas que l'altitude locale du contact entre les grès Exu et Arajara (Fig. 3.10 C). Tandis que la hauteur de la paroi rocheuse correspondante est d'environ 100 m, elle atteint 200 m au sud, ce qui suggère que les deux parties de la cicatrice de glissement se sont formées indépendamment ou qu'une part, peut-être moins cohérente, de la masse de débris a été soustraite à la partie sud d'un lobe unique, le long d'un cours d'eau alimenté par une source située au pied de l'escarpement. À 2 km plus au sud, au-delà d'un profond entonnoir dont le fond est occupé par le parc de loisirs Arajara, le glissement de Farias présente un épais lobe de dimensions similaires (tableau 3.1). Jonché de blocs énormes, il remplit partiellement la vallée qui prolonge une courte reculée et se termine par un haut front pentu au-dessus du village d'Arajara (Fig. 3.9). Un lobe de débris plus petit provenant de la même cicatrice se distingue sur son flanc sud, se terminant aussi par un front abrupt (Fig. 3.10 D).

Le long de la plupart des autres segments concaves de l'escarpement, de larges (1 à 2 km) systèmes coalescents de blocs basculés à contre-pente ou de lobes de débris ont été observés. Cela suggère que des panneaux larges et épais de la table gréseuse ont été déstabilisés en bloc dans le rebord du plateau le long de surfaces de rupture courbes et qu'ils se sont disloqués pendant la translation. De tels lobes épais ont été identifiés dans le secteur Boa Vista-Olho d'Água (ONO de Crato) et surtout dans le rentrant de Barbalha, en particulier entre Farias et Caldas-Santa Rita, où ils descendent jusqu'à des altitudes similaires ou plus basses (500 m) autour des affluents du Rio Salamanca, formant les têtes de langues allongées de dépôts riches en blocs. Ils forment un tablier presque continu de colluvions de la taille des sables à celle des blocs qui couvre partiellement les glacis et les replats structuraux développés dans la Formation Santana. Au SE de Barbalha, un panneau de longueur kilométrique s'est morcelé en plusieurs banquettes concaves étagées. Celui-ci combine probablement déplacement vertical et glissement en translation le long de failles listriques pouvant être raccordées à un cisaillement plat en profondeur et reflétant le recul d'ordre hectométrique ou pluri-hectométrique subi par le rebord du plateau lors des plus grands de ces glissements de terrain (Fig. 3.11 A).

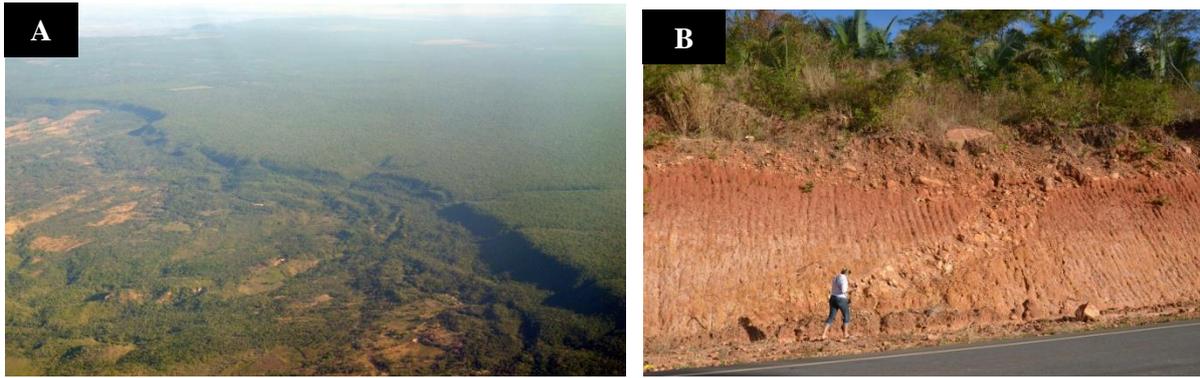


Figure 3.11. Glissements en translation dans l’escarpement NE de la Chapada do Araripe au S et au SE de Barbalha, 2016. **A.** Sitio Flores (SE de Barbalha) : découpage du rebord de la Chapada en blocs étagés, déplacés le long de failles listriques probablement raccordées à un cisaillement plat en profondeur. **B.** Lagoinha (SW de Barbalha, bord SE de la route de Caldas) : faille listrique dans les grès de la Fm Batateiras, le long de laquelle la translation vers le NE (vers la gauche) du bloc abaissé a ouvert un vide comblé par les matériaux de la terrasse alluviale surincombante. Photos : J.P. Peulvast.

Dans tous les cas, les profils géologiques (fig. 3.12) indiquent que les mouvements se sont produits dans les niveaux mécaniquement faibles de la série sédimentaire (argiles, marnes et gypse des Membres Romualdo et Ipubi). Peut-être initiés par un cisaillement et une translation horizontale le long de ces niveaux, comme le suggère un glissement en translation observé dans la Formation Batateira au sud de Barbalha (Fig. 3.11 B), ils se sont combinés avec des glissements rotationnels suivant des surfaces de rupture concaves développées dans les grès surincombants. C’est aussi ce que montre l’observation fréquente de grands blocs de grès basculés à contre-pente (fig. 6B).

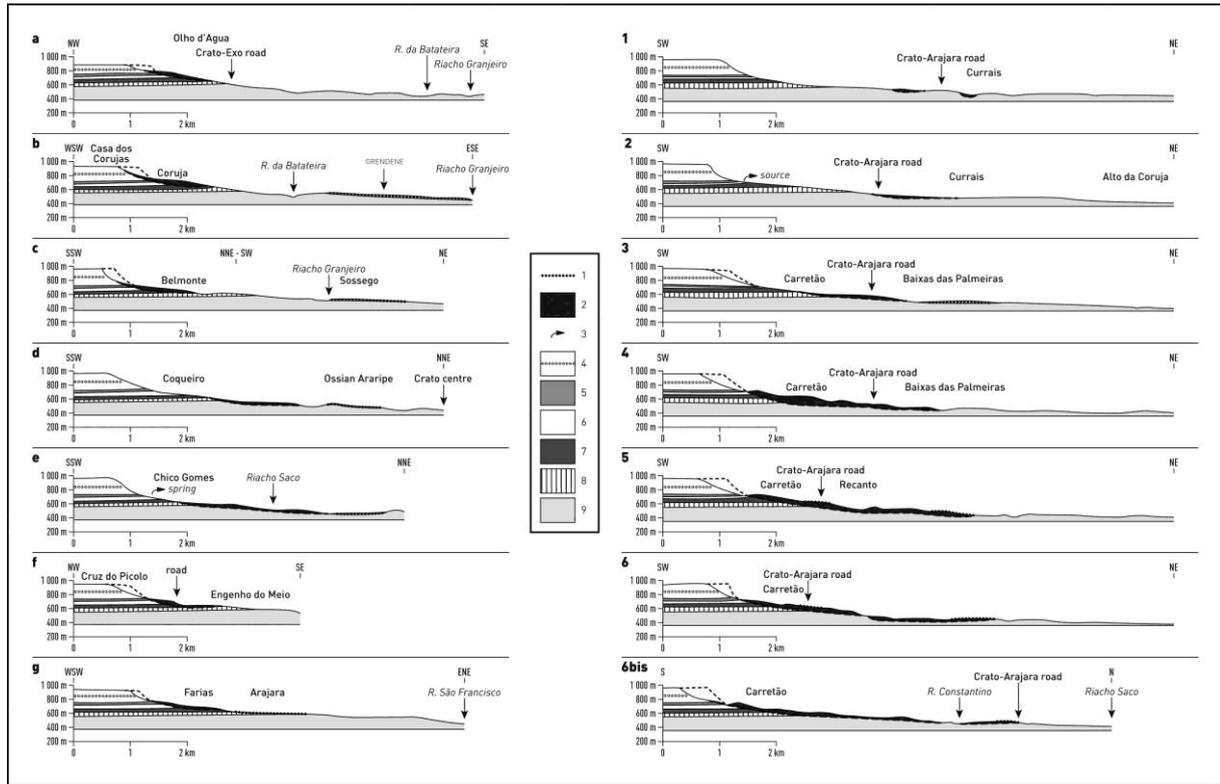


Figure 3.12. Profils géologiques dans quelques grands glissements rotationnels de la region de Crato - Barbalha et dans le dépôt de *Sturzstrom* de Carretão (localisation : voir noms dans la fig. 3.9). D’après Peulvast *et al.*, 2011. **1, 2** : dépôts de glissements de terrain ; **3** : source ; **4** : grès (Fm Exu) ; **5** : grès argileux (Fm Arajara) ; **6** : argiles feuilletées, marnes (Mb Romualdo) ; **7**: gypse (Fm Ipubi) ; **8**: calcaire (Mb Crato) ; **9** : grès tendre (Fm Rio da Bateira).

3.3.2.2. Identification de modelés et dépôts de *Sturzstrom*

Au sud de Crato, la partie amont du grand glissement identifié au lieu-dit Carretão est aussi de type rotationnel, en contrebas d’une ample cicatrice concave longue de 1,5 km, haute de 180 m et dont la pente décroît de 30° à 25-20° vers le bas (Fig. 1.9 ; Fig. 3.9). La cicatrice domine une topographie chaotique où des collines de 60 à 80 m de hauteur, disséquées par 4 vallons profonds et étroits, déconnectés de la paroi, s’étendent sur 2 km de largeur, jusqu’à 540 m d’altitude (Fig. 3.9). Dans plusieurs coupes en marge de la route Crato-Arajara, des blocs de grès Exu altérés affleurent sur des épaisseurs de 2 à 4 m, mais des versants raides de 50 m de hauteur apparaissent également constitués de ce matériel à blocs qui compose probablement ces reliefs chaotiques composés de grands blocs basculés plus ou moins démantelés. On y observe par exemple un énorme panneau horizontal de grès sur une longueur de plus de 40 m le long de cette route, à 580 m d’altitude (Recanto).

Plus bas (Baixio das Palmeiras, Currais), un large tablier de débris s’est mis en place sur une topographie différenciée et a partiellement rempli les vallons affluents des Riachos Constantino et Fundo, où d’épaisses langues de blocaille sont descendues jusqu’à des fronts pentus comme celui

dominant le quartier Vila Lobo, à 6 km de la cicatrice (Fig. 3.9). Plus à l'est, le lobe, bien identifiable par l'abondance des blocs visibles sur ses marges à la faveur de défrichements récents (Currais, flanc ouest du Riacho Fundo ; Fig. 3.13 A) s'est étalé jusqu'à 460 m d'altitude sur un large interfluve (Baixio das Palmeiras ; Fig. 3.13 B), remontant même localement un versant d'une quarantaine de mètres face à la cicatrice (sud de Currais). On y observe des blocs saillants de 4 à 8 m de longueur, ainsi que de multiples talus routiers montrant des blocs plus petits dans une abondante matrice sablo-argileuse.

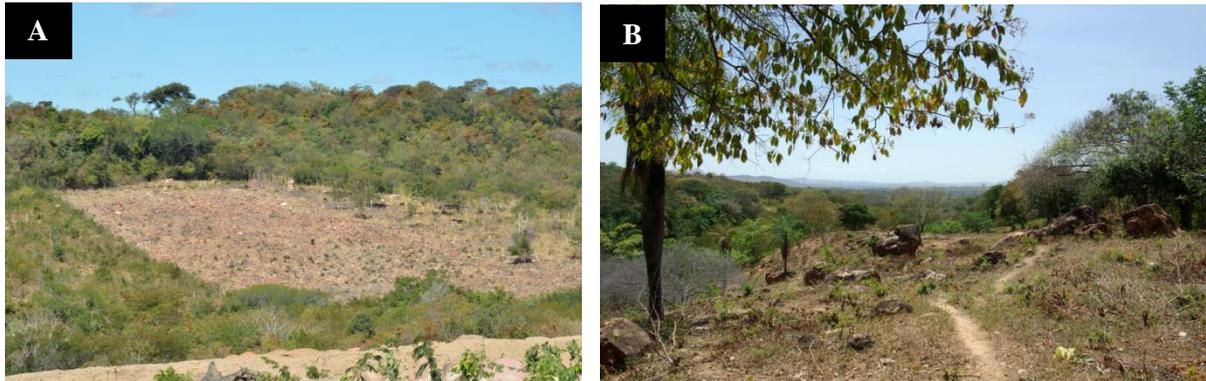


Figure 3.13. Le tablier de débris aval du glissement de Carretão (Crato). **A.** Currais, août 2014 ; flanc de vallon affluent du Riacho Constantino, jonché de blocs de grès Exu. **B.** Baixio das Palmeiras, septembre 2009 ; flanc de vallon affluent du Riacho Fundo. Les plus gros blocs atteignent 4 à 6 m de longueur. Localisation : voir Fig. 3.9. Photos : J.P. Peulvast.

L'extrémité aval du tablier et des langues qui le prolongent n'est pas clairement identifiée dans la topographie. Cependant, vers l'extrémité nord du long interfluve qui sépare les Riachos Constantino et Fundo (Muriti), à 440 m d'altitude et à 8 km de la cicatrice, des travaux d'aplanissement préalables à la construction d'édifices commerciaux sur le côté nord de la route Crato-Juazeiro do Norte ont mis au jour en 2011 une couverture de blocs et cailloux hétérométriques, sub-émoussés à anguleux, à matrice sableuse, épaisse de 1 à 3 m, au sein de laquelle étaient présents de gros blocs de grès Exu atteignant jusqu'à 4 à 6 m de longueur (Fig. 3.14).



Figure 3.14. La nappe de cailloutis et les blocs de Muriti (Crato), coupe NS. Les éléments, y compris les blocs métriques, proviennent tous du grès Exu, 2009. Photo : J.P. Peulvast.

Compte tenu de la position en bout de glacis, 40 à 50 m plus haut que le fond de la vallée du Rio da Batateira, l'origine de ces matériaux – maintenant peu visibles (talutage des coupes, concassage des blocs, construction de bâtiments commerciaux) – pourrait être l'escarpement situé au sud, où se trouve la cicatrice de glissement de Carretão. Bien que la continuité des dépôts n'ait pu être observée entre Currais et Muriti, sous les quartiers Barro Branco et Alto da Coruja du fait de la couverture végétale ou de l'urbanisation (accompagnée d'une destruction rapide des indices tels que la présence de gros blocs), la formation observée à Muriti pourrait représenter une des extrémités du tablier de débris divisé en plusieurs lobes (Vila Lobo, Currais, Muriti, Baixio das Palmeiras ; Fig. 3.9). L'hypothèse alternative, non vérifiée, serait qu'il représente un vestige de haute terrasse en marge sud de la vallée du Rio da Batateira. Là encore, aucune continuité ni aucune corrélation n'a pu être clairement établie avec d'autres vestiges de terrasse d'altitude relative similaire comme les petits témoins repérés à Muriti autour de la confluence du Riacho Constantino.

Selon ces observations, la topographie chaotique de l'amont correspondant à de grands blocs de grès basculés et celle du tablier de débris épandu à l'aval sur un relief différencié de glacis disséqués, ainsi que l'occurrence probable de mouvements ascendants à contre-pente impliquant de hautes vitesses d'écoulement (Fort et Peulvast, 1995), suggèrent que l'ensemble peut correspondre à un dépôt d'avalanche de débris, ou *Sturzstrom* (Heim, 1932, *in* Angeli *et al.*, 1996). Même sans l'hypothétique langue de Muriti, sa superficie estimée serait de 10 km² au minimum, et l'épaisseur peut varier de quelques dizaines de mètres dans la zone amont de glissement à une dizaine de mètres dans les langues émissaires (Vila Lobo, Currais) ou peut-être à 1-3 m vers l'extrémité (Muriti). Le volume correspondant serait énorme, au minimum de l'ordre de 100 Mm³. Compte tenu de l'accroissement de

volume subi par le matériel mobilisé, cette valeur peut être comparée à celle obtenue pour le volume manquant dans la zone de départ, estimé à titre d'hypothèse pour un versant initialement rectiligne entre les deux éperons latéraux de la cicatrice (63 Mm^3). À titre de comparaison, plusieurs panneaux glissés de contexte structural et de dimensions comparables, démantelés ou simplement basculés, ont bien été repérés autour de la Chapada do Araripe, en particulier autour des promontoires digités de son extrémité ouest (Peulvast et Bétard, 2015, Fig. 3.15). À la différence de celui de Carretão, ils n'ont pas disposé de l'aire d'étalement aussi large que celle dont ce dernier a disposé en se produisant à la tête d'un vaste glacis disséqué, ni d'une lithologie aussi favorable (absence de couche de gypse, moindre épaisseur des formations plastiques sous-jacentes au grès Exu).

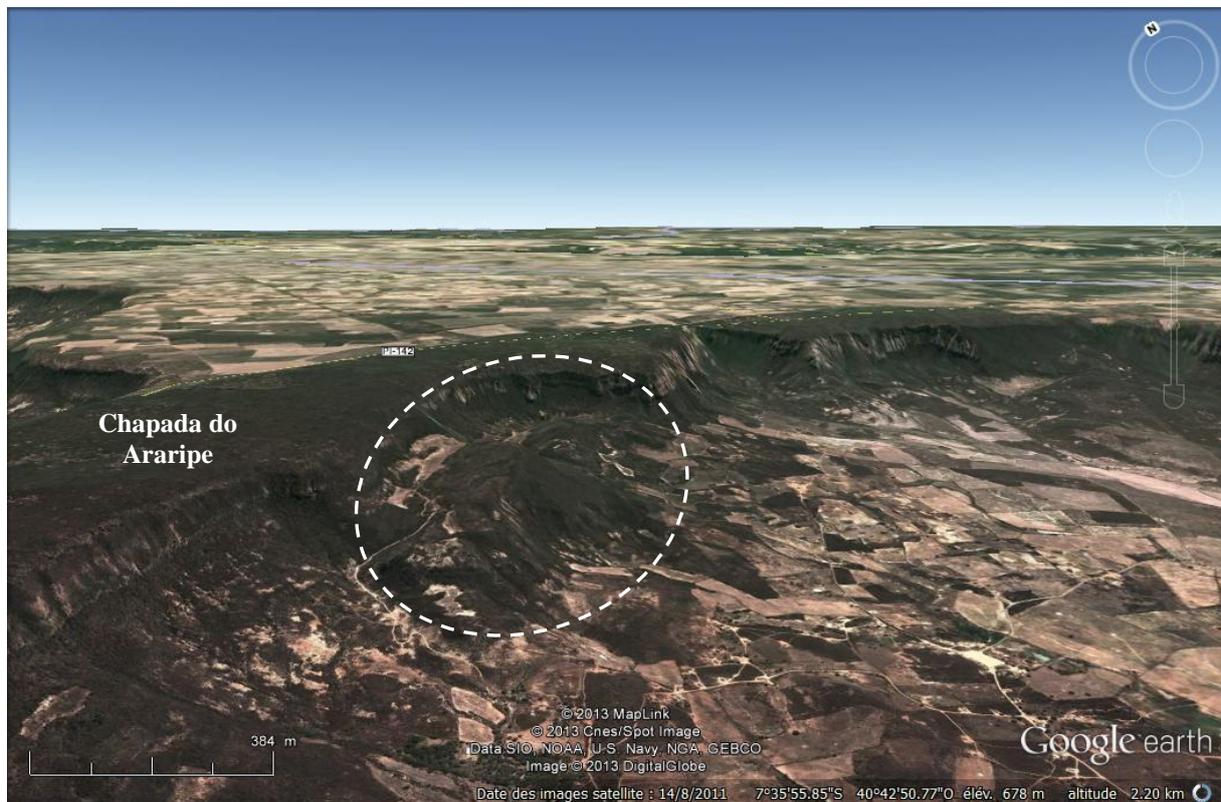


Figure 3.15. Grands blocs basculés de grès Exu sur le flanc nord d'une reculée ouverte dans l'extrémité ouest de la Chapada do Araripe à l'ouest d'Araripina. Image Google Earth, 2014.

3.3.2.3. Mouvements de masse liés aux topographies de dissection : coulées de débris et/ou laves torrentielles

En contrebas des entonnoirs d'érosion ou en aval des glissements et langues de débris provenant des segments concaves, certains fonds de vallées (Luanda-Lameiro, Granjeiro, Riacho Saco, Rio Salamanca) sont partiellement occupés par des langues allongées de matériaux riches en blocs qui convergent respectivement vers Crato et Cabaceira (Barbalha) (Fig. 3.9). Les parois de grès qui les dominent ne présentent que des traces de chutes de blocs ou de petits arrachements (cf. *supra*). À leur

pied, des accumulations discontinues de débris altérés (blocs de grès plus ou moins émoussés et friables dans une abondante matrice sablo-argileuse rougeâtre) forment des éboulis à travers lesquels ressortent des eaux de source. Aucune connexion claire n'a été trouvée entre ces éboulis fortement végétalisés et les langues de débris, plutôt situées dans le prolongement du pied des éperons, entre les alcôves. La présence locale d'affleurements des grès blancs de la Formation Arajara au pied de l'escarpement (Coqueiro, Granjeiro) suggère qu'aucune reconstitution des dépôts colluviaux ne semble s'être faite depuis l'entraînement des débris mobilisés par les dernières coulées.

La reconnaissance des langues de débris et de leur mise en place par des phénomènes uniques ou multiples de type coulée de débris ou lave torrentielle s'est faite à partir des formes planes ou légèrement bombées de basses terrasses ou de fonds de vallées jonchés de blocs métriques ou plurimétriques de grès et de conglomérats Exu, et dans des coupes visibles le long des cours d'eau incisés dans les langues elles-mêmes ou au contact avec les flancs de vallées. Ce n'est que localement qu'ont été trouvées des formes superficielles caractéristiques tels que des rides concentriques suggérant une mise en place par pulsations successives (Santa Rita, Fig. 3.16 A), ou des chenaux emboîtés formés lors de phases ultérieures de réactivation des écoulements (partie amont de la langue de Granjeiro, Fig. 3.16 B). Comme les parties terminales de deux de ces langues de débris confluant à Crato se terminent en ville, elles sont en partie oblitérées par l'urbanisation et la canalisation des écoulements (Rio Granjeiro) et la position de leur terminus n'est pas clairement identifiée ; les longueurs estimées sont donc indiquées *a minima*.

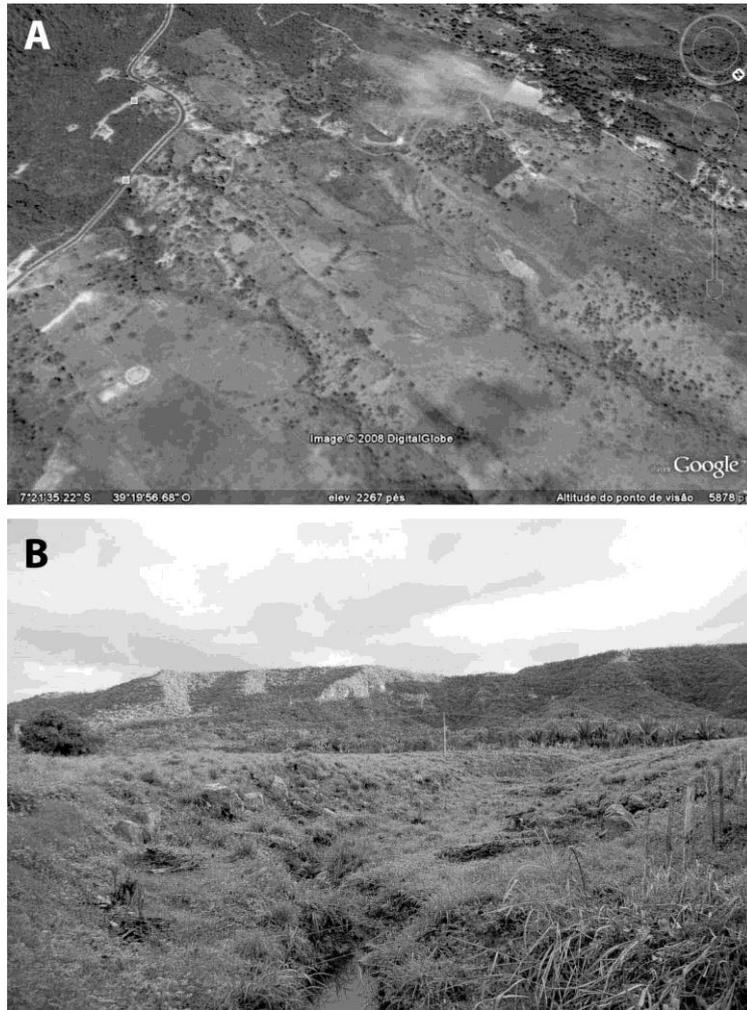


Figure 3.16. Morphologie superficielle et dépôts de coulées de débris dans la région de Crato-Barbalha. **A.** Coulée de débris de Santa Rita, Barbalha. Google Earth, 2008. **B.** Partie amont (disséquée) de la coulée de débris de Granjeiro, Crato, 2007. Photo : J.P. Peulvast.

Les longueurs mesurées de ces langues de débris varient de 2,5 à 6,5 km, pour des dénivelées de 250 à 350 m (tableau. 1). Celles du bassin du Rio Salamanca ont été suivies sur des longueurs atteignant jusqu'à 6 km. Les largeurs sont généralement de 150 à 250 m, mais un grand lobe de débris atteint 800 à 1000 m de largeur entre les cours jumeaux du Riacho Saco, à Crato (Fig. 3.17). Dans ce cas, une langue de débris à l'aspect plus frais s'emboîte en rive droite du lobe principal, ce qui suggère une mise en place par deux ou plusieurs événements répétés (Fig. 3.17 A). De même, la langue de débris formant la basse terrasse du Rio Salamanca appartient à un système emboîté ou étagé comportant au moins une terrasse de dépôts similaires dominant le chenal de 6 à 8 m (Fig. 3.17 B).

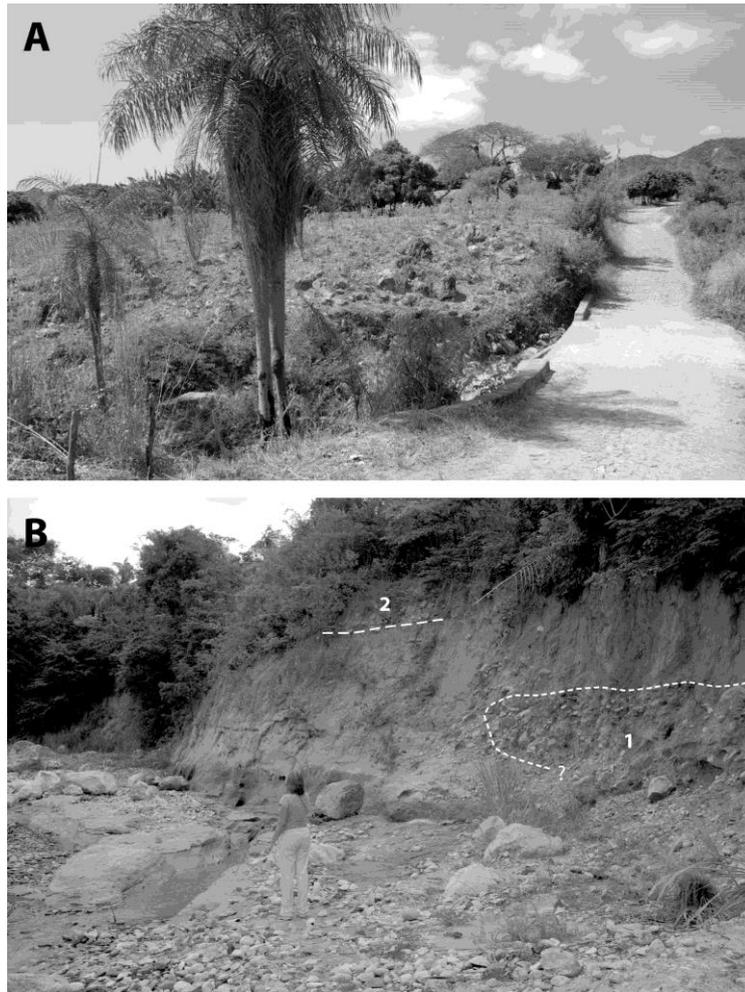


Figure 3.17. Coulées de débris multiphasées, 2010. **A** : Coulée de Coqueiro, côté droit du complexe de coulées de débris du Rio Saco (Crato). La route est perpendiculaire à la coulée de débris. **B** : Coulée inférieure (1) du Rio Salamanca, emboîtée dans la terrasse de débris supérieure (2) en amont de Cabaceiras (Barbalha). Photos : J.P. Peulvast.

Dans leurs secteurs moyens et inférieurs, les cours d'eau ont localement incisé et sapé les dépôts jusqu'au contact avec le substrat ou même plus bas, creusant de véritables micro-canyons de plus d'un mètre de profondeur (Riacho Saco, Rio Salamanca ; Fig. 1.10 A). Les coupes dans les terrasses montrent généralement une couche unique atteignant 3 à 4 m d'épaisseur, tantôt constituée de blocs disposés en *openwork*, tantôt riches en matrice sableuse, sur les affleurements les moins dégradés (Fig. 3.18). Jointes à l'absence quasi-générale de stratification et d'imbrication (sauf à la base de certaines coupes, qui exhibent des dépôts de blocs imbriqués de type torrentiel), à la forme anguleuse ou sub-anguleuse des débris et à la distribution très hétérométrique de ces derniers (du caillou au bloc de plus de 6 m de longueur apparente), ces caractéristiques suggèrent une mise en place par des événements monogéniques de type coulée de débris ou lave torrentielle (Corominas *et al.*, 1996), localement

précédés ou suivis par des écoulements torrentiels (charriage), comme en témoignent des lentilles de matériel à galets imbriqués à la base ou au sommet de certains dépôts.



Figure 3.18. Sédiments des coulées de débris : coupe naturelle dans la coulée inférieure du Rio Salamanca, en amont de Cabaceiras. Photo : J.P. Peulvast, 2010.

C'est ce que confirme le fonctionnement hydrologique observé dans les chenaux emboîtés dans ces dépôts. Les blocs qui encombrant le fond de ces chenaux proviennent surtout du sapement des terrasses lors des brefs épisodes d'écoulement torrentiel qui caractérisent les cours d'eau actuels. La faible mobilisation longitudinale des plus gros d'entre eux (calibre métrique ou plurimétrique), observée par comparaison de photos à l'issue des crues éclair évoquées en début de chapitre, semble confirmer que les épisodes d'écoulement torrentiel, d'ailleurs peu fréquents, ne suffisent pas à expliquer la mise en place de la plus grande partie du matériel des langues de débris, pour lequel la mise en place brutale proposée plus haut paraît plus probable. Hors événements exceptionnels, les écoulements fluviaux entraînent surtout les fines, que l'on retrouve sous forme d'épandages sableux dans les plaines alluviales et les basses terrasses à l'aval du terminus des coulées.

En fonction des épaisseurs observées, des volumes de l'ordre de $2,5 \text{ Mm}^3$ peuvent être proposés pour les plus importants de ces dépôts (Granjeiro, Luanda-Lameiro, Salamanca) (Peulvast *et al.*, 2011 ; tableau 3.1).

3.3.2.4. Interprétation : types de dynamiques impliquées

Les facteurs impliqués dans la mise en place de grandes coulées ne sont pas clairement identifiés puisqu'aucun événement de ce type n'a pu être reconnu à l'aide des sources disponibles, au cours des

temps historiques – c’est-à-dire depuis le XVIII^e siècle. Les zones-source sont les secteurs de l’escarpement à entonnoirs et éperons, mais aussi de grands glissements de terrain (Coruja, têtes du Rio Salamanca). Le matériel reprend d’anciens éboulis ou tabliers colluviaux constitués de débris de grès altérés et formés par chutes de blocs et petits glissements de terrain dans l’escarpement (voir 3.2.2). Il a pu être déstabilisé à l’occasion de fortes pluies ou d’autres conditions de saturation en eau après de longues périodes d’accumulation, sur des épaisseurs telles que la couverture forestière, si elle était présente, ne pouvait pas le retenir.

Les autres mouvements de masse identifiés correspondent à des processus profonds contrôlés par des facteurs structuraux et hydrogéologiques. Par exemple, le glissement de Carretão pourrait correspondre au glissement d’un panneau de plus de 200 m d’épaisseur ; il en est de même pour celui de Coruja (Fig. 3.10 B). Dans les deux cas, comme dans celui des autres glissements étudiés ici, les facteurs superficiels tels que le rôle de la végétation ne semblent pas être impliqués dans ces phénomènes, qu’ils soient catastrophiques (Carretão) ou beaucoup plus lents (Coruja et la plupart des autres glissements rotationnels). Cependant, plusieurs de ces glissements sont prolongés par des coulées de débris, où des contrôles plus superficiels tels que le guidage par les incisions antérieures peuvent avoir agi.

Les dépôts liés aux grands mouvements de masse bien identifiés ne forment qu’une part des sédiments colluviaux et alluviaux qui tapissent de grandes parties de la dépression du Cariri et du site de Crato (plus que de celui de Barbalha). La présence de dépôts similaires à ceux des coulées de débris les plus basses sur les lanières de glaciais et dans de hautes terrasses montre que de tels processus se sont répétés à diverses reprises au cours de l’évidement de la dépression, du creusement des vallées et du recul de l’escarpement (Peulvast et Bétard, 2015).

3.3.3. Indications chronologiques

En dehors d’un témoignage fiable portant sur une activation du glissement de terrain de Coruja survenue en 1958 lors d’une saison des pluies particulièrement intense, avec l’enfouissement d’une source (Nascente João de Borba : Freitas, comm. orale, 2017), il n’existe aucun enregistrement historique connu de grands mouvements de masse dans la région étudiée. Seuls des éléments de chronologie relative peuvent être avancés. Il n’existe pas non plus, jusqu’à présent, de datations absolues de dépôts de glissements de terrain. Cependant, quelques langues et lobes de débris présentent des modelés de surface très accidentés compatibles avec une mise en place récente (quelques décennies ou siècles ?) : les coulées de Granjeiro (partie amont) et de Santa Rita (Fig. 3.17 A, B), les plus basses coulées du Rio Salamanca, celles de Luanda-Lameiro et de la marge est du lobe du Rio Saco (Fig. 3.19 A), ou encore le lobe de débris du glissement de Coruja (Fig. 3.19 B).

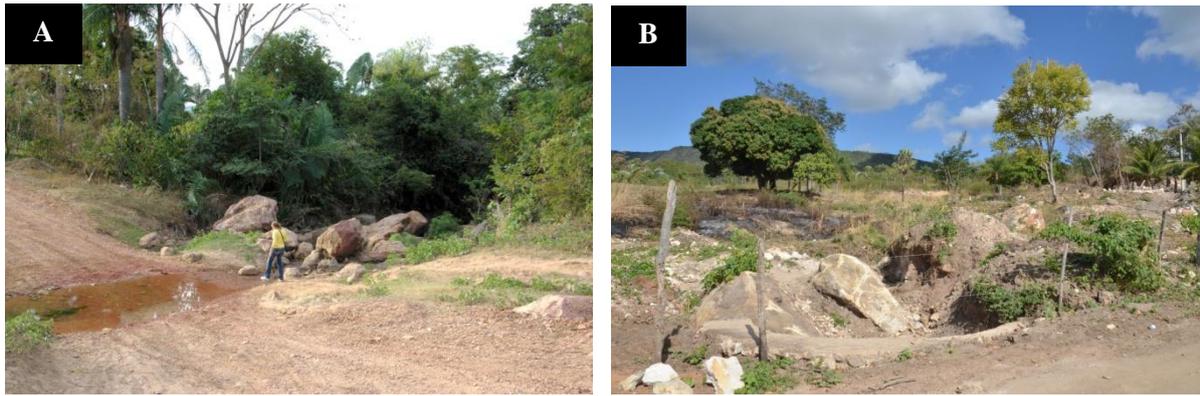


Figure 3.19. Modelés superficiels chaotiques pouvant indiquer des mouvements de terrain récents. **A.** la coulée de Grangeiro, (Crato, quartier Baixo Granjeiro) en août 2008. La route est perpendiculaire à l’axe de la coulée de débris. **B.** Front du glissement de terrain de Coruja à Bebida Nova (Crato), août 2014. Photos: J.P. Peulvast.

Au contraire, la dissection conduisant à la préservation partielle de langues de débris sous forme de terrasses (Crato-Sossego, Fig. 3.20 A) ou même de couvertures de glacis (Mindóia, Fig. 1.9 B) suggère des âges plus anciens, bien que l’incision puisse être très rapide après un épisode d’obstruction, dans les dépôts meubles comme dans le substrat (grès tendres de la Formation Batateira). Il en est de même pour les glissements de terrain, où l’on observe des différences de préservation des modelés, dans les cicatrices de départ (tantôt concaves et lisses, comme à Farias ou Carretão (Fig. 3.13 A), tantôt ravinées comme à Belmonte : Fig. 3.20 B) comme sur les lobes de débris, chaotiques ou lissés.

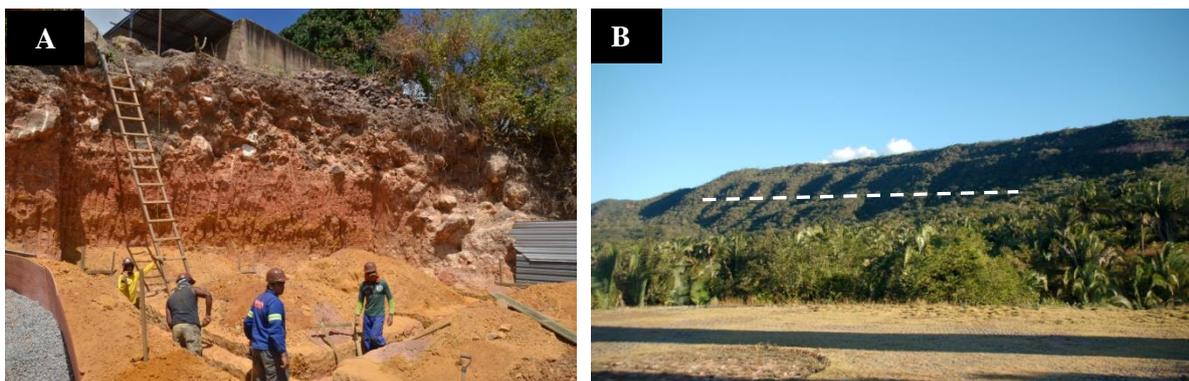


Figure 3.20. Indices d’ancienneté de dépôts et formes de mouvements de masse. **A.** Quartier Sossego, Crato : moyenne terrasse à blocs anguleux de grès Exu en rive droite du Rio Granjeiro. Noter la reprise colluviale partielle du matériel dans le rebord de la terrasse (à droite). **B.** Ravinements dans la cicatrice de glissement de Belmonte, Crato. Photos: J.P. Peulvast, 2014.

Du point de vue géomorphologique, ces diverses dynamiques sont impliquées dans le processus de retrait de l'escarpement de la Chapada au-dessus de la dépression du Cariri, ou au moins à ses dernières phases, enregistrées par les couvertures détritiques et les terrasses étagées ou emboîtées qui ont été identifiées à différents niveaux du piémont (Peulvast et Bétard, 2015). À ce titre, elles participent à l'évolution habituelle de ce segment de l'escarpement. Elles se poursuivent sans doute, sur un rythme lent, même dans le contexte actuel d'un relatif blocage de l'érosion verticale lié à l'existence d'un seuil gréseux très résistant dans le lit du Rio Salgado, à Missão Velha, servant de niveau de base local stable à ses affluents. Seuls des sédiments fins parviennent dans la plaine alluviale des Rios Batateiras-Salgado, à quelques kilomètres de la base de l'escarpement, correspondant au lessivage et à l'évacuation de la matrice des dépôts de coulées et de glissements précédant l'évacuation finale. Il est probable que ces sédiments ne représentent qu'une petite partie des produits de l'érosion qui a engendré les grands rentrants érosifs de Crato et Barbalha.

L'évaluation des aléas éventuellement associés aux processus correspondants nécessitera des études plus détaillées des systèmes étagés et des possibles différences d'altération des dépôts. L'état de nos connaissances ne permet pas encore de savoir si ces processus sont périodiquement actifs dans la région étudiée, ou inactifs. Il sera donc nécessaire de définir les âges des formes observées et les temps de récurrence des phénomènes impliqués si l'on veut les inclure dans notre étude des risques naturels. Dans tous les cas, des datations absolues, par exemple basées sur la méthode des isotopes cosmogéniques, seront nécessaires ; très coûteuses et nécessitant des collaborations élargies, elles n'ont pas pu être mises en œuvre dans le cadre de ce travail.

3.3.4. Facteurs des mouvements de masse, implications pour la question des aléas et des risques

3.3.4.1. Facteurs statiques et préparatoires : lithologie, hydrogéologie et conditions d'altération

Les formes décrites ici sont des glissements épais affectant une structure tabulaire et une superposition de terrains aux propriétés mécaniques et hydrogéologiques contrastées. Les épaisses couches de gypse, de marne et d'argile présentes à la base de l'escarpement forment des niveaux tendres et ductiles, propices à ces glissements. La saturation permanente ou saisonnière provoquée par l'infiltration d'eau dans cette série est un des facteurs contrôlant ces phénomènes.

Par ailleurs, l'altération et la mise en place d'argile le long des discontinuités du grès sont très actives. Des sols profonds (>10 m) et riches en kaolinite (ferralsols) se trouvent sur les grès altérés. Des couvertures rouges plus minces sont visibles dans l'escarpement, avec des sols (lixisols) plus en équilibre avec le climat actuel. Ces sols poreux sont aussi présents sur les éboulis et dans les cirques d'érosion. Quand ils sont saturés d'eau, ils peuvent être impliqués dans le départ de coulées de débris. Des sols sablo-argileux, généralement minces (<1 m) et très poreux prédominent aussi dans les interfluves et dans les versants des lanières de glaciais, où ont été décrits les ravins (« *voçorocas* ») et les petits glissements mentionnés plus haut (Ribeiro, 2004).

3.3.4.2. Facteurs déclenchants : climat et tectonique

Afin d'expliquer le passage d'un état "marginalelement stable" à un état "activement instable" (Glade et Crozier, 2004) dans l'escarpement ou les éboulis localement accumulés dans sa partie inférieure, on peut envisager un facteur de déclenchement potentiel également favorable au ruissellement et aux crues : le rôle des averses violentes de la saison des pluies qui causent la saturation des sols et des aquicludes, surtout si elles s'inscrivent dans une séquence pluvieuse prolongée (Magalhães *et al.*, 2010).

Malgré le manque de datation des dépôts décrits ici, on peut aussi suggérer l'influence des changements climatiques du Quaternaire, avec l'occurrence de périodes plus humides (Behling *et al.*, 2000 ; Wang *et al.*, 2004) ayant pu favoriser une plus grande fréquence des grands mouvements de masse. L'intervention d'événements sismiques est également suggérée sur la base de l'observation d'indices d'activité néotectonique, comme la faille normale qui recoupe le tablier de débris de Muriti avec un rejet vertical d'une cinquantaine de centimètres (Peulvast *et al.*, 2011 ; Peulvast et Bétard, 2015).

3.3.4.3. Vers une évaluation intégrée des aléas associés aux mouvements de terrain dans la région de Crato-Barbalha

Bien que les modelés liés aux grands mouvements de masse ne reflètent que les derniers stades de l'inversion de relief et du recul d'escarpement qui caractérisent l'évolution du rebord de la Chapada do Araripe et de la dépression du Cariri, l'étude des dépôts les plus anciens montre que ces processus s'inscrivent dans une continuité telle qu'il n'existe aucune raison qu'ils soient désormais inactifs (Peulvast et Bétard, 2015). Cependant, l'évaluation des aléas et risques morpho-dynamiques est restée limitée jusqu'ici à celle de phénomènes d'échelle réduite.

Dans la mesure où aucun événement de grande portée ne semble s'être produit sur la courte durée (3 siècles) des temps historiques locaux, ce type de phénomène n'a jamais été considéré comme représentant un risque potentiel ni comme une contrainte pour l'installation des activités humaines, d'autant moins que jusqu'à une époque récente (fin XX^e siècle), l'agriculture restait la forme dominante d'occupation des sols sur les basses pentes de l'escarpement et que l'urbanisation se cantonnait essentiellement à des secteurs plus éloignés (4 à 6 km) où rien de significatif (même la présence d'abondants blocs de grès provenant manifestement de la chapada) n'avait été identifié.

Notre étude reste encore trop fragmentaire pour assurer qu'un tel risque doit être pris en considération dans les conditions actuelles, surtout en l'absence d'indications précises sur la chronologie et les temps de récurrence. Pourtant, notre cartographie préliminaire des formes et des dépôts liés aux grands mouvements de terrain (Fig. 3.9), jointe à l'observation de la morphologie de l'escarpement, donne des indications précieuses sur la distribution des événements passés et des aléas possibles.

De grandes parties de la ville de Crato, sauf à l'aval du centre, sont construites sur les couvertures de glacis, les hautes terrasses et les langues de débris des principales vallées (Rio Grangeiro, Riacho das Piabas). La distance de la plupart des lieux habités par rapport à l'escarpement est généralement inférieure à 6 km, ce qui les place à portée des plus grosses coulées de débris et/ou laves torrentielles, et d'un *Sturzstrom* tel que celui de Carretão. Des lotissements sont construits sur des fonds de vallée déjà remplis par des coulées et à proximité de l'escarpement (Grangeiro). Certes, la plupart des grands glissements ont probablement été des phénomènes lents, dont la répétition aujourd'hui n'engendrerait sans doute pas de risques vitaux majeurs, mais il s'agira dans une phase ultérieure de ce travail de déterminer si des masses mobilisables ou des glissements dormants déjà occupés par divers types d'implantations (habitats, clubs de loisirs, fermes, école d'agriculture : Granjeiro, Belmonte, Guaribas, Olho d'Água, Farias...) peuvent être sujets à réactivation et si de nouveaux glissements ou coulées de débris peuvent se produire dans les conditions actuelles, en particulier lors d'événements extrêmes (très fortes pluies, séisme). Nous avons en effet démontré combien le contexte structural et hydrogéologique est hautement favorable à ces mouvements de masse. Leur importance est d'autant plus grande que ces phénomènes de fréquence probablement très faible mais de haute magnitude s'inscrivent, on l'a vu, dans les grandes tendances de l'évolution morphologique régionale sur le long terme et qu'ils influent sur les phénomènes de beaucoup plus haute fréquence comme les crues, les laves torrentielles ou les coulées de débris par la fourniture de matériaux aisément mobilisables.

3.4. Conclusion du chapitre 3 et de la première partie

S'agissant de la question des risques naturels, le contexte de forte vulnérabilité socio-environnementale de la région d'étude, face aux aléas naturels comme aux impacts anthropiques, nécessite une connaissance approfondie du milieu et de son fonctionnement dans la région d'étude. La présentation du milieu a été effectuée dans le chapitre 1, tandis que son fonctionnement hydroclimatique et géodynamique apparaît en partie dans les chapitres 2 et 3 à travers une analyse de phénomènes extrêmes et de traces plus ou moins fraîches de mouvements de terrain d'échelles variées.

Parmi les aléas et les risques d'ordre morphodynamique décrits dans ces chapitres, il n'apparaît pas encore clairement si ceux qui sont liés à de grands mouvements de masse doivent être pris en compte dans la planification urbaine. Bien que préliminaire et encore dépourvue de datations absolues, notre étude de ces phénomènes donne cependant des indications sur la nature et la distribution des événements passés ainsi que sur les aléas associés qui peuvent inciter les décideurs à les prendre en compte dans toute politique d'aménagement local.

Inscrire ces observations dans une amélioration de la gestion du milieu et de la planification urbaine passe, entre autres, par la réalisation d'un diagnostic géographique et socio-environnemental avec une évaluation plus détaillée des impacts environnementaux et des conditions socio-économiques

de la population. La constitution future d'une base de données spatialisée pourra aider à déterminer non seulement les facteurs naturels mais aussi les facteurs socio-environnementaux qui contribuent à la dégradation et à la vulnérabilité accrue de la région. La seconde partie de la thèse s'inscrit partiellement dans cette réflexion.

Deuxième partie : De la perception des risques à la gestion des catastrophes naturelles au Brésil : exemple de la région du Cariri (État du Ceará)

Introduction de la deuxième partie

La deuxième partie de la thèse s'ouvre sur une étude de la perception et la gestion des risques dans les deux villes étudiées, principalement au moyen d'une enquête menée auprès des populations riveraines des cours d'eau identifiés comme dangereux (chapitre 4). Ce chapitre comporte également une analyse des besoins en matière de traitement des phénomènes dangereux et de la façon dont ils ont été gérés jusqu'ici, du point de vue juridique comme du point de vue technique. Le chapitre 5 est tout d'abord consacré à l'identification et à la cartographie des risques naturels dans les deux communes, avec un essai de zonage des aléas, des enjeux et des risques. Quant au traitement des catastrophes naturelles, il est abordé du point de vue juridique à deux échelles, celle de l'État Fédéral et celle des collectivités régionales et locales (États, communes). Les autres thématiques (gestion de crise, réponses techniques, prévention des risques) font l'objet d'un exposé critique à l'échelle locale, conçu à partir d'observations originales ainsi que de l'examen des textes réglementaires et des rapports techniques sur les mesures de prévention consécutives aux événements analysés (chapitre 5).

Chapitre 4 : Perception du risque dans la région du Cariri : enseignements d'une enquête de terrain

4.1. Introduction du chapitre 4

Bien que les phénomènes hydrodynamiques et géodynamiques brutaux ne soient sans doute pas assez pris en compte dans le développement urbain, les crues et inondations, voire les mouvements de terrain, ont toujours été présents dans la conscience collective des habitants du Cariri. En témoignent quelques récits transmis par voie orale chez les Indiens *Kariri*, les premiers habitants de la région maintenant disparus en tant que groupe ethnique, à part une quarantaine de familles identifiées en zone rurale. Remontant à des temps antérieurs à la colonisation portugaise, tout en reflétant aussi l'évolution ultérieure des mentalités des survivants, ils ont été récemment recueillis dans la région de Crato par Eldinho Pereira, historien à l'Institut de la Mémoire du Peuple Cearense (IMOPEC), et divulgués localement par la Fondation Casa Grande, à Nova Olinda.



Figure 4.1. Rio da Batateira et *Pedra da Batateira*. A. Radier ou « Passagem Molhada », Crato, avec blocs de la Fm Exu dans le lit du ruisseau, provenant de la Chapada do Araripe, 2006. B. Légende de la *Pedra da Batateira*, présentée au musée de la *Fundação Casa Grande* à Nova Olinda, Ceará, 2008. Photos : A.O. Magalhães.

Parmi ces légendes, celle de la « *Pedra da Batateira* » (Fig. 4.1) fait clairement allusion à l'environnement dangereux de ce secteur pourtant attirant par l'abondance des eaux et des autres ressources. Il y est en effet question de la principale source (« *nascente* ») du Rio da Batateira où, le jour où la « mère des eaux » (*mãe d'água*) se lèverait de son lit, elle ferait rouler les trois rochers qui forment la « *Pedra da Batateira* », libérant la queue du « serpent d'eau » supposé dormir sous le sol. Les eaux en furie inonderaient toute la région et « transformeraient le sertão en mer ». Par ces récits, les « *pajés* » des tribus prophétisaient la disparition des Blancs et la restitution de leurs terres aux

Indiens réduits en esclavage. Par delà la revendication d'un paradis spolié, ce récit est clairement inspiré par les crues et, peut-être, par les laves torrentielles qui ravagent régulièrement le lit et les marges des torrents issus de la Chapada, y compris, dans certaines versions postérieures à la christianisation, le site initial de Crato.

Les chroniques historiques ne semblent malheureusement pas avoir conservé des traces de tels événements catastrophiques, probablement répétés. Il a donc fallu centrer notre travail sur les épisodes récents (chapitre 2) et, pour leur perception, s'appuyer sur des témoignages contemporains (ce chapitre).

Plusieurs crues ont affecté gravement le Nordeste brésilien ces dernières années (ex : Pernambuco, Alagoas, janvier 2010). Celle du Rio Grangeiro, qui a provoqué d'importants dommages dans le centre-ville de Crato (Ceará), le 28 janvier 2011 (chapitre 2), est un exemple de ces événements brutaux qui touchent les biens, les infrastructures et les personnes (Magalhães et Peulvast, 2013). Pourtant, la question des risques naturels n'apparaît guère dans le Plan Directeur Municipal de Crato (2000), alors qu'une partie des bas quartiers de la cité est inondable, là où les deux cours d'eau qui la traversent sont contenus dans d'étroits chenaux ou buses de béton construits dans les années 1990-2000. L'ampleur des dégâts, en ville comme le long du « canal », associée à l'impact médiatique, psychologique, politique et financier, a entraîné un effort inédit d'enregistrement et de documentation, justifiant le choix de cette crue comme objet d'étude (Magalhães et Peulvast, 2013).

Largement médiatisé, cet événement pourrait avoir favorisé une prise de conscience des risques encourus, auprès de la population comme des acteurs locaux. En partie repris d'un article récent (Magalhães, 2014), le présent chapitre a pour but d'évaluer cette prise de conscience, à travers la perception des phénomènes dangereux, et d'apprécier sa traduction dans les orientations récentes ou prévues de la gestion des aléas et des risques en relation avec l'aménagement urbain. Ce travail s'appuie sur la réalisation, deux ans après la crue mais en pleine phase de réfection des ouvrages hydrauliques, d'une enquête auprès d'un échantillon de la population urbaine de Crato. À titre de comparaison, il comporte aussi le traitement des réponses obtenues aux mêmes questions sur la ville voisine de Barbalha. L'analyse de ses résultats éclaire une partie du contexte dans lequel la question des risques naturels est actuellement traitée ou devrait l'être aux différents niveaux administratifs et politiques.

4.2. Les conséquences humaines de la crue-éclair du Rio Grangeiro le 28 janvier 2011 à Crato

Selon la notification préliminaire d'état de catastrophe publiée par la *Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Estado do Ceará-CEDEC* (2011), un total de 15 809 personnes a été affecté par l'événement décrit dans le chapitre 2.

Le bilan humain s'élève à 498 personnes provisoirement évacuées, 305 personnes sans abri et 6 hospitalisées. Quant aux dommages matériels, 166 habitations, 10 édifices publics, 1 local associatif

et 256 locaux commerciaux et artisanaux ont été endommagés, parmi lesquels 75 habitations ont été totalement détruites ; 6 véhicules ont également été détruits.

Parmi les dommages causés aux infrastructures civiles, il ressort que 500 m de l’Avenue José Alves de Figueiredo, qui longe le canal du Rio Granjeiro, ont été détruits, ainsi que les trottoirs, les systèmes d’adduction d’eau et d’énergie attenants. À ces dégâts s’ajoutent la dégradation ou la destruction partielle de 2 ponts de béton reliant les deux rives du chenal, ainsi que de 2 passerelles métalliques, de plusieurs transformateurs, et les pompes à essence d’une station-service à l’aval de la mairie (Fig. 4.2). Le montant des dommages est évalué par la mairie à 3 153 000 R\$ (~1,4 M€: résidences, commerces, marchandises) et 55 529 000 R\$ (~22 M€ : infrastructures).



Figure 4.2. Dommages causés à Crato par la crue du 28 janvier 2011. **A, B** : Traces laissées par la violence de l’écoulement près du canal ; **C, D** : Importance des dépôts boueux et de la hauteur atteinte par l’eau dans les rues voisines. Photos : H. Maia et W. Veira.

Le jour suivant la crue, la mairie, la Défense Civile et le Corps de Pompiers ont transféré les familles touchées vers des abris d’urgence, des centres de soins, une résidence universitaire et des écoles. Différentes associations ont participé à une campagne de collecte de dons de nourriture, de vêtements, de couvertures, de médicaments, etc. Le Service d’Assistance sociale est intervenu avec des psychologues, des psychopédagogues et des infirmiers auprès des familles sans abri, fournissant

un accompagnement psychologique, ainsi que des vaccins aux personnes qui avaient été directement en contact avec les eaux polluées.

Il a également été procédé au recensement des familles sans abri, dans le but de mettre à leur disposition une aide financière appelée *aluguel social*, d'une valeur de R\$ 120,00 (~50 €), pour que ces personnes puissent louer un logement dans un quartier plus sûr de la ville jusqu'à la baisse des eaux. Cependant, ce montant s'est révélé insuffisant, selon diverses personnes concernées, dans la mesure où les propriétaires ont profité de la situation pour augmenter les loyers...

Beaucoup de maisons, boutiques ou locaux artisanaux endommagés par la crue du 28 janvier 2011 restent menacés par de futurs événements de même magnitude. Les cas les plus graves sont ceux du Shopping Cariri, galerie commerçante proche du canal et régulièrement inondée, et surtout du Collège Objetivo, dont un grand bâtiment d'enseignement construit en marge de l'avenue de rive gauche est directement menacé par la destruction de la voirie et le recul de la berge (Fig. 2.8B). Malgré cela, ces locaux restent occupés depuis l'inondation, car les habitants ne peuvent ou ne désirent pas, pour différents motifs (familiaux, professionnels, etc.), s'installer dans des secteurs plus sûrs mais aussi plus éloignés de la ville. Il s'avère également difficile ou impossible de transférer certaines activités ou certains équipements (collège...) représentant de lourds investissements et requérant la proximité du centre.

4.3. Une enquête sur la perception des risques consécutive à la crue-éclair du 28 janvier 2011

4.3.1. Réalisation de l'enquête et caractéristiques des personnes interrogées

C'est en juin 2013, plus de deux ans après l'événement étudié mais en pleine période de travaux de restauration des ouvrages abîmés, que le questionnaire (voir annexe 1) a été soumis, avec l'aide d'étudiants du cours de géographie de la URCA, principalement le long du chenal du Rio Granjeiro mais aussi à l'écart de celui-ci et dans des quartiers plus proches de la Chapada et des sources, concernés par d'autres risques (glissements de terrain, chutes de blocs, ravinement, etc.). Les abords du Rio Granjeiro ont été subdivisés en trois secteurs plus ou moins inondés (pont de Lameiro-église Nossa Senhora de Fátima ; église Nossa Senhora de Fátima-mairie ; mairie-extrémité aval du chenal) (Fig. 2.4).

Le questionnaire a également été soumis à un échantillon de la population de Barbalha, périodiquement concernée par l'inondation des quartiers entourant la portion canalisée du Riacho do Ouro (Fig. 1.25 ; Fig. 4.3). Il a donc été proposé principalement le long du « canal » et des rues atteintes par ces inondations. Les secteurs analysés ont été subdivisés entre : amont du canal (rues Divino Salvador et Zuca Sampaio, Rue Coronel João Coelho/Avenida Paulo Maurício) ; partie médiane jusqu'au bout du canal (Avenida Ministro Costa Cavalcante jusqu'à Avenida Beira Brejo) et Ensemble Nossa Senhora de Fátima (entre Avenida Presidente Médici et rue dos Cariris).

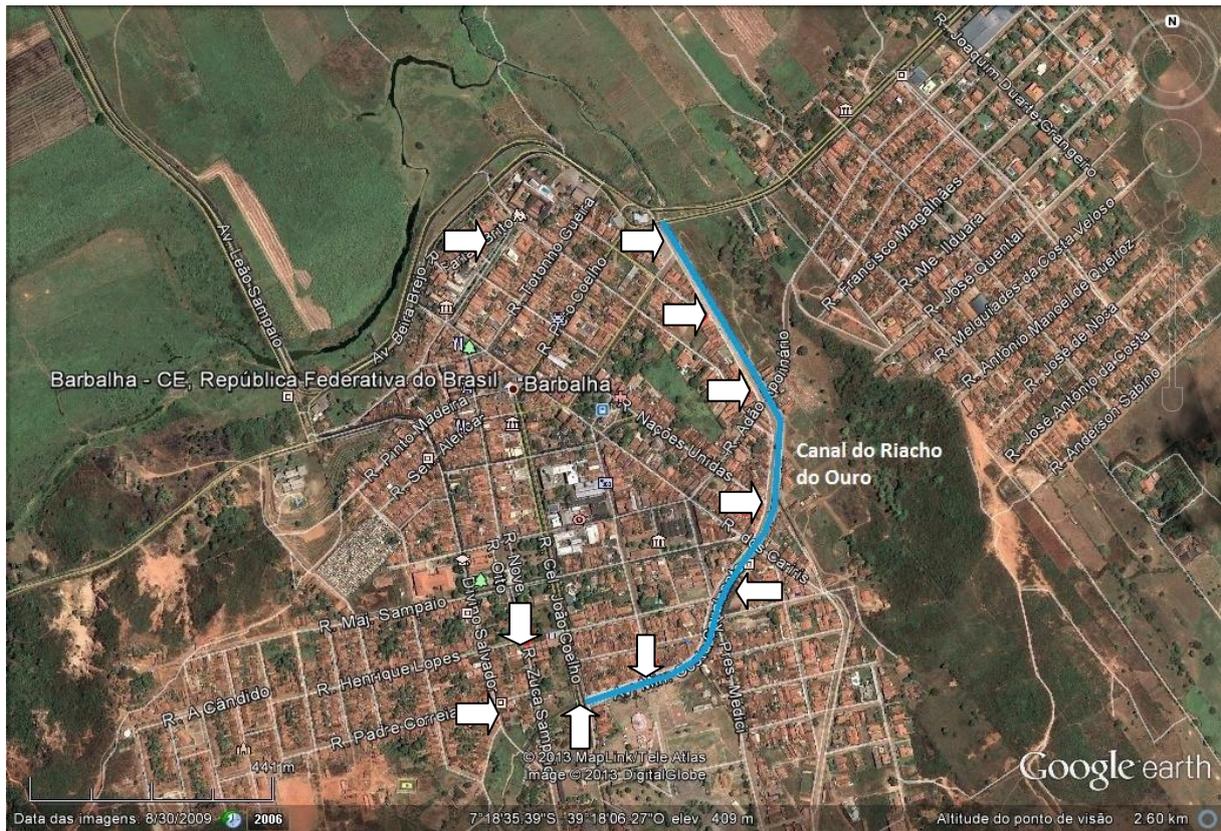


Fig. 4.3. Barbalha. Image Google Earth, 2009. Flèches blanches : secteurs de collecte de réponses au questionnaire. Élaboration : Magalhães, A.O., 2018.

Réunies en un formulaire de 6 pages (Annexe 1), les questions ont porté sur la connaissance des catastrophes naturelles dans la région et plus particulièrement des crues et inondations, dont celle survenue à Crato le 28 janvier 2011. Des questions plus ciblées ont concerné les situations personnelles par rapport à l'inondation, les préjudices subis, leur coût, l'assurance éventuelle des biens, les mesures et aides financières dont ont bénéficié les personnes sinistrées. Il s'est agi aussi de savoir ce que les habitants connaissaient des problèmes survenus après la crue, des quartiers les plus atteints, de la réalisation d'ouvrages de prévention des catastrophes, lesquels et par qui, des secours et de leur organisation, de ce qu'est un secteur à risques, de l'existence d'informations à ce sujet, et de quelle provenance. Il leur a été également demandé s'ils avaient eu connaissance de documents municipaux traitant des risques, s'ils étaient informés sur le Plan Directeur Municipal, document réglementaire qui définit les orientations de l'urbanisme dans la commune, comment ils voyaient le développement urbain par rapport au milieu naturel, et ce qu'ils pensaient des mesures à prendre pour améliorer la situation. Les autres questions ont porté sur les données personnelles : sexe, âge, lieu de naissance, temps de résidence dans la ville, présence de personnes plus vulnérables dans le domicile, profession, niveau de revenu familial.

Une brève présentation du profil de ces personnes a alimenté la réflexion sur d'éventuelles corrélations avec leur perception du milieu naturel et de la question des aléas et des risques dans la ville. Sur les 95 personnes interrogées à **Crato**, 37 (38,9 %) sont des hommes et 58 (61,1 %) des femmes, une proportion qui peut s'expliquer en partie par les horaires des entretiens menés avec les habitants présents chez eux (horaires de travail).

Parmi les personnes interrogées, la tranche d'âge prédominante est celle de 45 à 55 ans (25,3 %) (Fig. 4.4). Celles de 65 ans et plus ne représentent que 5,3 %, surtout pour des raisons de disponibilité au moment de l'enquête. En ce qui concerne le lieu de naissance, 56,8 % des personnes sont originaires de Crato et, à ce titre, peuvent être les mieux à même de connaître la région et ses milieux naturels, sinon de garder la mémoire des événements catastrophiques survenus dans la ville. Les autres sont essentiellement originaires du reste du Ceará (32,6 %) et des États voisins (Pernambuco : 6,3 % ; Paraíba : 1,0 % ; Maranhão : 1,0 %).

Du point de vue socio-économique et professionnel, les réponses ont été regroupées dans les catégories suivantes : industrie et entrepreneurs (4,1 %) ; commerce (22,1 %) ; services et administration publique (39,9 %) ; agriculture (3,1 %) ; retraités (11,5 %) ; sans emploi (1,0 %) ; maîtresses de maison (3,1 %) ; étudiants (11,5 %). 3,1 % des personnes sollicitées n'ont pas répondu à la question.

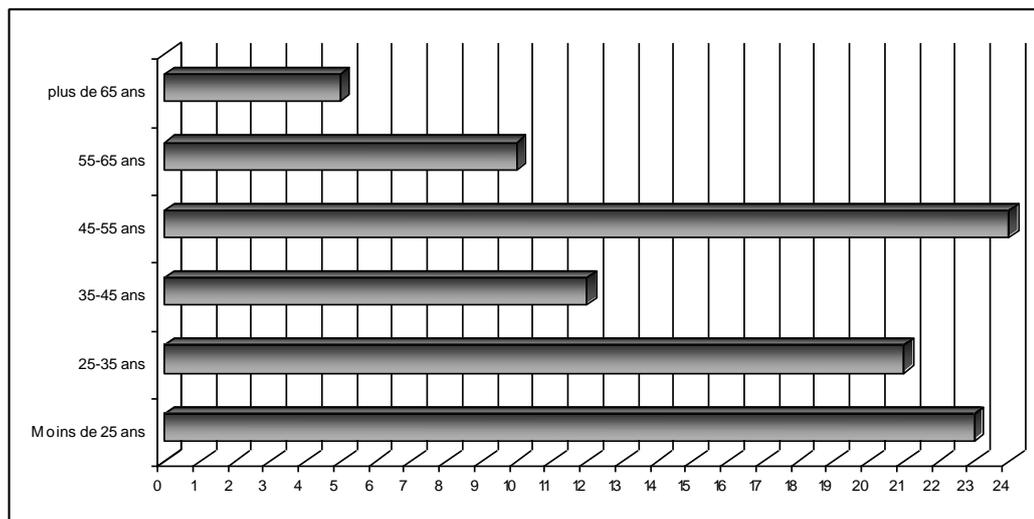


Figure 4.4. Histogramme des tranches d'âge des personnes interrogées à Crato (n = 95). (Élaboration : Magalhães, A.O., 2011).

À **Barbalha**, sur les 75 personnes interrogées, 18 (24 %) sont des hommes et 57 (76 %) sont des femmes. Sur ce total, 74 ont fourni des réponses exploitables. Parmi elles, la tranche d'âge 25-35 ans est la plus représentée (21,6%), tandis que les moins représentées ont été celles des moins de 25 ans (12,1 %) et des plus de 65 ans (12,1 %). En ce qui concerne l'origine des personnes interrogées,

67,5 % sont originaires de Barbalha, 21,6 % d'autres communes du Ceará, les autres provenant du reste du pays (Alagoas, Pernambuco, São Paulo). Enfin, du point de vue professionnel et socio-économique, l'échantillon se répartit de la manière suivante : artisans et entrepreneurs (1,3 %), commerçants (12,5 %); employés dans les services (31,9 %), agriculteurs (5,5 %), retraités (8,3 %), chômeurs (1,3 %), maîtresses et employées de maison (30,5 %), étudiants (6,9 %). 4,1 % n'ont pas répondu à la question.

4.3.2. Expérience vécue des événements catastrophiques survenus dans la ville

La majorité des personnes interrogées à **Crato** (63 %) déclare avoir été atteinte par une ou des catastrophes naturelles dans la ville ou la région. Parmi les phénomènes proposés dans le questionnaire, elles citent majoritairement (59 % du total, soit 77% de celles qui ont été atteintes) les crues et inondations. Les glissements de terrain auraient atteint 8,4 % du total (13 % des sinistrés), l'érosion des sols (ravinement) 4,2 % et les chutes de blocs 2,1 % (respectivement 6,5 et 3,3 % des sinistrés). Certaines de ces personnes déclarent avoir été touchées par plus d'un de ces événements depuis 2004 (Fig. 4.5).

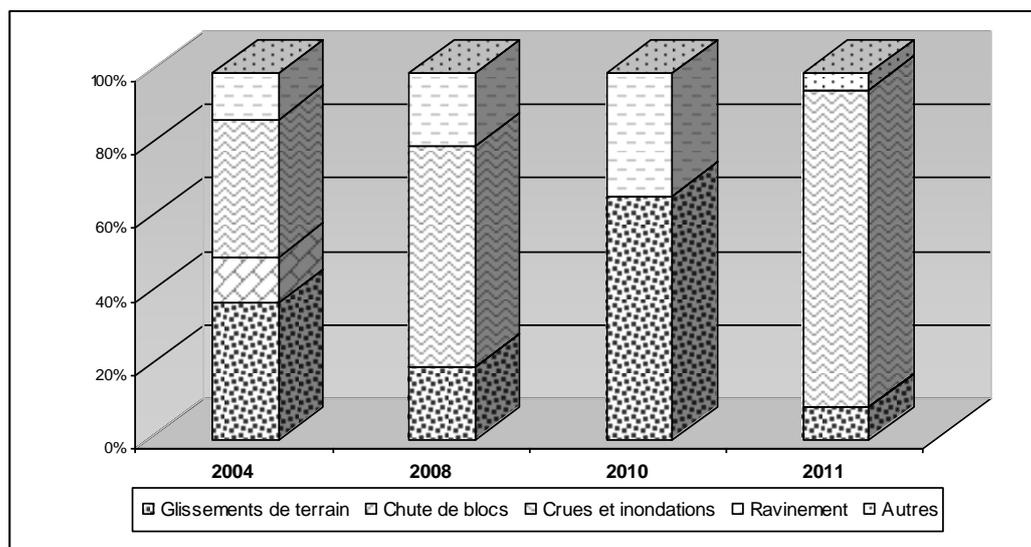


Figure 4.5. Histogramme de fréquence des réponses sur les types d'événements naturels subis depuis 2004. (Élaboration : Magalhães, A.O., 2011).

À **Barbalha** aussi, la majorité (65,7 %) des personnes interrogées a déclaré avoir été touchée par des catastrophes naturelles dans la ville ou la région. Parmi les phénomènes catastrophiques mentionnés, ce sont surtout les crues et inondations (100 %). Sur les 75 personnes interrogées, 62,2 % ont déjà été touchées par des inondations en ville, en particulier en 2003, 2004 et 2010. Il apparaît que

l'événement du 28 janvier 2011 si dévastateur à Crato n'a pas eu la même importance ici et que la crue la plus citée a été celle liée aux pluies de 2010.

Interrogées sur les préjudices dus aux crues du Rio Grangeiro à **Crato**, les personnes interrogées évoquent principalement des dommages causés aux immeubles (59 %), sous forme de fissures, chutes de murs, peintures abîmées, trottoirs dégradés, etc., et des pertes de meubles, appareils électroménagers, ordinateurs, vêtements, livres, objets personnels (30 %). La plupart, pour l'essentiel non assurés, évaluent les préjudices subis à hauteur de 1000 à 3000 R\$ (~400-1200 €). Bien qu'une grande partie de ces personnes – principalement celles qui habitent près du chenal – souhaitent souscrire une assurance pour garantir leurs biens, la plupart déclarent ne pas en avoir les moyens financiers.

À **Barbalha**, les préjudices liés aux crues et inondations du Rio do Ouro apparaissent surtout correspondre à la perte de mobilier, d'appareils électroménagers, ordinateurs, vêtements, livres, objets personnels (78,1 % des réponses), suivie de dégâts causés aux constructions (fissures, chutes de murs, dégradation des peintures, destruction des trottoirs – à la charge des riverains au Brésil : 65,6 %). Quant aux préjudices, ils ont été estimés entre 1000 et 3000 R\$ (64,7%) mais ont pu atteindre 9.000 R\$ (~2500€) ou plus (29,4 % des réponses). Comme à Crato, la grande majorité (83,8 %) des personnes interrogées a déclaré ne pas être assurée mais pense qu'il serait important de l'être (62,1 %).

Sur les 58 personnes de **Crato** ayant déclaré avoir déjà été atteintes par des inondations, seulement 3 ont confirmé avoir reçu une aide financière publique ou caritative de deux à trois mois, parmi lesquelles 2 ont trouvé cette aide suffisante. Dans les faits, la Mairie indique avoir hébergé les familles sinistrées dans des abris d'urgence (écoles, résidence universitaire, locaux associatifs, etc.) et les avoir enregistrées pour leur attribuer une allocation de logement (« *aluguel social* ») de 150 R\$ (~40 €) mensuels pendant 6 mois renouvelables.

À **Barbalha**, sur les 47 personnes interrogées (62,6 % de l'échantillon) qui ont déclaré avoir été touchées par les crues et inondations, 2 seulement (3,3 %) ont dit avoir reçu une aide financière de l'État du Ceará ou d'une école catholique située dans l'ensemble Nossa Senhora de Fátima durant 2 mois. Un seul de ces bénéficiaires a jugé l'aide suffisante.

4.3.3. Connaissance des dommages dus à la crue du 28 janvier 2011

Selon une grande majorité (94 %) des personnes interrogées, certains quartiers ont été plus atteints que d'autres, en particulier ceux qui jouxtent le Rio Grangeiro. D'après 88 % des réponses obtenues, les lieux les plus atteints furent la zone commerciale (galerie commerçante, boutiques, dépôts, etc.). Viennent ensuite les zones résidentielles (maisons, appartements, etc. : 69 %), la voirie urbaine (62 %), les ponts (47 %), les édifices publics et privés (mairie, banques, etc. : 41 %), les écoles (40 %), les routes (21 %), les aires de loisirs (places, etc. : 16 %), les terrains inoccupés (7,5 %), tandis

qu'aucune réponse n'a mentionné d'installation industrielle. Il est vrai que les principales industries de la ville (usine de chaussures GRENDENE, briqueteries) sont localisées sur les interfluves.

À **Barbalha**, 50% des personnes interrogées ont répondu que certains quartiers ont été atteints par les inondations du Riacho do Ouro. Les plus cités sont l'ensemble Nossa Senhora de Fátima, Cirolândia, l'entrée de la ville (PROURB), le centre-ville, les quartiers Alto da Alegria, Bulandeira, Sítio Mata et Bela Vista (Fig. 1.31). Quant aux types de lieux les plus atteints, les zones résidentielles sont les plus citées (100 %), suivies par les ponts (32,8 %), les routes (31,4 %), les zones commerciales (centre commercial, boutiques, entrepôts, etc. : 21,4 %), les voies urbaines (14,3 %), des terrains inoccupés (5,7 %), des écoles (4,3 %), des édifices publics et privés (mairie, banques, etc. : 4,3 %), la zone industrielle (2,8 %) et les aires de loisirs (places... : 1,4 %). Ces données indiquent la vulnérabilité des populations qui occupent de manière plus ou moins légale les abords des cours d'eau pourtant connus comme inondables, ainsi que la fragilité et le manque d'entretien des infrastructures et équipements urbains vite dégradés comme les ponts ou la voirie.

À **Crato**, le nombre d'habitants sinistrés est estimé à 200 ou plus dans 37 % des réponses, entre 100 et 200 dans 27 %, 50 à 100 dans 14 %, 5 à 50 dans 10 %, aucun dans 2%. À **Barbalha**, aux mêmes questions, il a été répondu que le nombre de personnes atteintes par les dernières inondations se monterait entre 100 et 200 (40,3 %), entre 50 et 100 (24,5 %), 200 ou plus (15,7 %), entre 5 et 50 (14 %), ou à 0 (5,2 %). Cette dispersion, jointe à l'absence de réponse dans 9 % des cas à Crato, révèle une certaine méconnaissance des conséquences humaines des crues à l'échelle des deux villes.

Parmi les mesures prises après la crue de janvier 2011 à **Crato**, sont cités l'évacuation de la population des secteurs à risque (48 %), les aides financières (« *aluguel social* », etc. : 41 %), la distribution d'aliments, de vêtements, de médicaments (37 %), une assistance médicale (10 %), le relogement dans des lieux plus sûrs (8 %). L'absence d'aide est évoquée dans 8 % des réponses.

En ce qui concerne **Barbalha**, parmi les mesures prises après les crues et inondations sont citées par ordre décroissant l'évacuation de la population des secteurs à risque (34,6 %), une assistance médicale et hospitalière (26,9 %), les aides financières (« *aluguel social* », etc. : 19,2 %), le relogement dans des lieux plus sûrs (15,3 %), la distribution d'aliments, de vêtements, de médicaments (11,5 %). Certaines personnes interrogées ont ajouté des réponses qui ne figuraient pas dans le questionnaire : la population est restée sur place, du fait de la faible intensité des phénomènes (3,8 %), et « les responsables n'ont rien fait » (7,6 %).

Parmi les principaux problèmes se posant après l'inondation du 28 janvier 2011 à **Crato** sont évoqués les dommages matériels (78 %), les pertes de biens personnels (70 %), le nettoyage des rues (56 %), le nettoyage des lieux d'habitation (47 %), les problèmes de santé (47 %), le manque d'aide financière (38 %), le manque d'information (24 %), les jours chômés et sans école (22 %), l'évacuation et le relogement des sinistrés en lieu sûr (14 %) et l'isolement par rapport à la famille et aux amis (10 %).

L'ordre des réponses à cette question diffère un peu à **Barbalha**, où le problème des inondations paraît être plus ressenti au niveau des habitations individuelles concernées qu'à l'échelle de la ville. Parmi les principaux problèmes, ont été énumérés par ordre décroissant : les pertes de biens personnels (60,9 %), les dommages matériels (53,1 %), le manque d'aide financière (45,3 %), les problèmes de santé (42,1 %), le nettoyage des lieux d'habitation (39 %), le manque d'information (31,2 %), le nettoyage des rues (29,6 %), l'isolement par rapport à la famille et aux amis (10,9 %), l'évacuation et le relogement des sinistrés en lieu sûr (6,2 %), les jours chômés et sans école (6,2 %).

4.3.4. La perception des risques par la population

Selon la grande majorité des réponses (95 %), la population de **Crato** n'est pas bien protégée des catastrophes naturelles. À 61%, les personnes interrogées estiment d'ailleurs être menacées par d'autres risques naturels que les inondations, dont les glissements de terrain, les sécheresses, la foudre, les ravinements, les chutes de blocs, l'érosion en général, auxquels s'ajoutent les risques d'incendie de forêt. À 78%, elles estiment savoir ce qu'est une zone à risques et mentionnent comme telle des lieux habités et dangereux du fait de la proximité de cours d'eau (zones inondables), d'escarpements, de secteurs déboisés, d'aires soumises à de fortes pluies et propices à des glissements de terrain ou à l'érosion des sols.

De même, à **Barbalha**, 97,1 % des personnes interrogées estiment qu'elles ne sont pas bien protégées des catastrophes naturelles. Cependant, à 61,9 %, elles estiment que la ville n'est pas menacée par d'autres risques que les inondations, tandis que 38 % répondent positivement, citant comme risques possibles les glissements de terrain, les tempêtes, l'érosion des sols et la sécheresse. À 73,9%, elles estiment savoir ce qu'est une zone de risques, citant comme lieux les plus dangereux le canal à ciel ouvert qui traverse la ville, les constructions sur les remblais et dépôts meubles, les quartiers construits sur les versants, les aires à risques d'inondation et de glissement de terrain. Les principales différences par rapport aux réponses obtenues à Crato reflètent en particulier le plus grand éloignement de l'escarpement de la *chapada* et des risques correspondants (chutes de blocs, glissements de terrain, etc.).

Sur l'appréhension des dangers, 70 % des personnes interrogées à **Crato** pensent qu'il est dangereux d'habiter près du Rio Granjeiro, du « canal » ou de la Chapada do Araripe, tandis que 14 % estiment que ce n'est que moyennement dangereux, et 11 % pas du tout. Les dangers les plus cités sont ceux liés aux crues, aux glissements de terrain, aux chutes de blocs, aux attaques d'animaux sauvages venus de la Chapada, au mauvais entretien du canal ou au ravinement lors des pluies intenses.

Par ailleurs, à 70 %, les habitants interrogés affirment qu'il n'existe pas d'association dans leur quartier, et seulement 23 % disent savoir que le thème des risques naturels a été discuté lors de réunions publiques ou associatives.

À **Barbalha**, 56 % des personnes interrogées disent trouver dangereux d'habiter près du Riacho do Ouro, du canal ou de la Chapada do Araripe (où se situent plusieurs écarts de la commune), tandis que 17,3 % estiment que c'est moyennement dangereux, et 22,6 % pas du tout. Parmi les risques les plus cités, on note ceux liés aux crues et inondations, aux glissements de terrain, à la construction et au manque d'entretien du canal, etc. En ce qui concerne la vie associative qui pourrait participer à l'information et à la prise de conscience de la question, 72,8 % des réponses indiquent l'absence d'association de quartier, tandis que 22,8 % en mentionnent l'existence. Enfin, seulement 12,5 % des personnes interrogées affirment avoir assisté à des réunions et discussions sur ce thème.

Sur les causes des inondations, on trouve à **Crato** une majorité de réponses multiples mentionnant le mauvais état du chenal du Rio Grangeiro et les autres causes des dommages subis. Parmi elles, la situation du centre-ville dans un secteur plat et peu surélevé par rapport à la partie la moins profonde du chenal ; la destruction de la végétation des rives et le déboisement sur l'escarpement de la Chapada ; l'accumulation de débris dans le chenal ; l'absence de contrôles et d'actions d'information par les autorités sur la propreté en ville et l'occupation des zones à risques ; le manque de projets et de politiques environnementaux dans la ville ; l'absence de prévention des inondations et de planification urbaine ; le manque d'associations de quartiers traitant de ces problèmes. L'intensité des pluies est aussi évoquée mais les réponses montrent que les causes des inondations sont avant tout perçues comme anthropiques.

Pour la population de **Barbalha**, les principales causes des crues et inondations sont principalement la construction et le manque d'entretien du canal, l'urbanisation des zones de risques, la pente du cours d'eau et du canal en direction du centre ville (un étonnant renversement de point de vue !), le manque de propreté et d'assainissement ainsi que l'accumulation de déchets dans le canal et sur ses marges (Fig. 4.6), le manque d'information de la population, des constructions dans le lit majeur du cours d'eau, l'absence de planification urbaine, l'insuffisance des actions de la Mairie et du Secrétariat aux Infrastructures, en particulier pour une amélioration du canal.

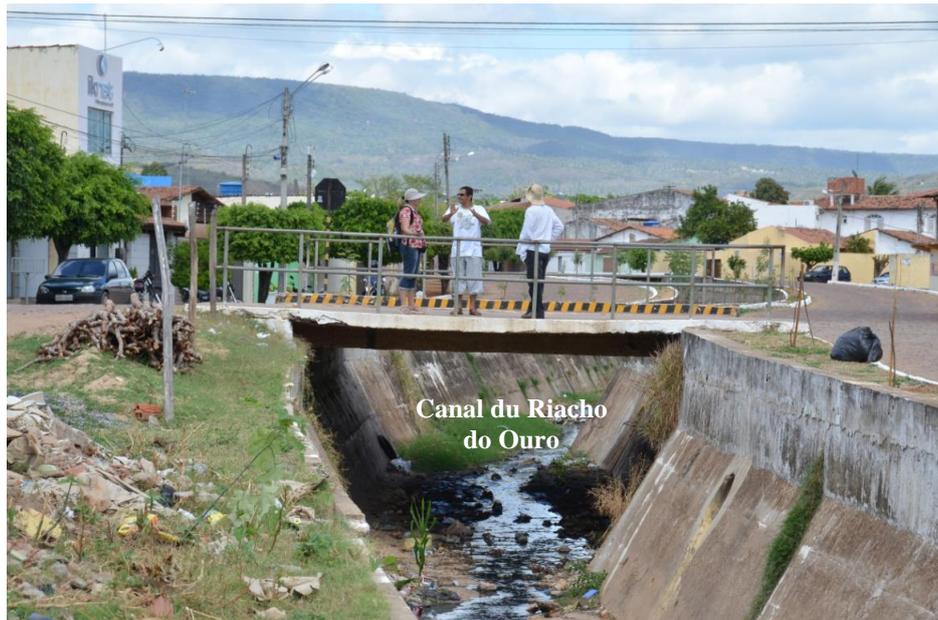


Figure 4.6. Le chenal bétonné du Riacho do Ouro, Barbalha. Photo : J.P. Peulvast, 2011.

En réponse à une question ouverte, les types de solutions les plus cités à **Crato** sont : en premier lieu, la construction d'ouvrages de contention des eaux à l'amont de la zone urbaine ; l'amélioration de la structure du « canal » ou sa reconstruction, après étude détaillée des lieux ; l'assainissement urbain et le nettoyage régulier du chenal afin d'éviter les embâcles lors des crues ; le détournement des cours d'eau ou encore la construction d'autres canaux (sans autres précisions). Ensuite, viennent la reforestation et la restauration de la ripisylve ; la réglementation des usages de l'eau ; l'éducation et l'information de la population afin d'éviter les dépôts d'ordures dans le chenal ; l'élargissement et l'approfondissement (voire la couverture) de ce chenal ; l'élaboration de projets et de politiques sérieuses à tous les niveaux ; la suppression des avenues de part et d'autre du chenal, afin de permettre son élargissement ; un contrôle strict de l'occupation des aires à risques, assorti de sanctions ; une planification urbaine définissant les aires constructibles ou non ; une information plus ample sur ce thème ; une bonne administration municipale ; la protection des sols ; l'amélioration du drainage en ville ; la création d'associations environnementales dans chaque quartier.

À **Barbalha**, parmi les types de solutions les plus cités sont mentionnés : le nettoyage du canal ; la couverture du canal ; l'élaboration de projets pour l'écoulement des eaux ; la réalisation d'ouvrages de protection accompagnée d'une information à l'intention des riverains ; la revégétalisation des marges du canal ; la construction de barrages de rétention ; l'éducation à la propreté urbaine (ex : ne pas jeter d'ordures dans le canal...) ; l'assainissement urbain ; le rehaussement des parois du canal ; élaboration d'un projet de canal de dérivation hors de la ville ; l'évacuation des aires à risques avec relogement dans des zones plus sûres.

4.3.5. Comment les habitants interrogés voient-ils la gestion des risques naturels ?

À 66 %, le groupe interrogé à **Crato** dit ne pas avoir reçu d'informations sur les risques naturels dans la ville. Pour ceux qui ont répondu affirmativement (32 %), l'information provient de bulletins et dépliants (13 %), des journaux (63 %), de la télévision (80 %), de la radio (63 %), des médias informatiques (SMS, internet, Facebook, Tweeter, etc. : 17 %) ; de réunions publiques organisées par la mairie, des scientifiques, des représentants d'organismes environnementaux, des associations de quartier, des syndicats, etc. (10 %). Pour 20 %, l'information a circulé sur les lieux de travail, et pour 30 % dans l'entourage personnel (famille, amis, voisins).

La situation est pire à **Barbalha**, où les personnes interrogées affirment à 82,3 % ne pas avoir reçu d'informations sur les risques naturels dans la ville. Parmi celles qui ont répondu positivement (17,6 %), les informations ont été acheminées par la télévision et la radio (8,8 % de l'échantillon total), des bulletins et dépliants, par des réunions organisées par des techniciens de la mairie, des spécialistes ou des représentants d'organismes environnementaux, par des associations de quartier, par des syndicats, ou encore par la famille, des amis, des voisins, etc. (1,4 %). Aucune réponse ne mentionne une information par les journaux, les médias informatiques (SMS, internet, Facebook, Tweeter, etc.), ou sur les lieux de travail. Ces réponses indiquent l'absence de tout système d'alerte et de prévention des risques naturels dans la ville.

À 85 %, les habitants interrogés à **Crato** ignorent s'il existe une législation concernant la protection des biens et des personnes dans les zones à risques. Ce pourcentage varie peu quels que soient l'âge, le domicile (près ou loin du Rio Granjeiro) ou la durée de résidence dans la ville. Il atteint 96 % chez les moins de 25 ans, presque autant chez les 25-35 ans et 100 % chez les 55-65 ans.

Seules les personnes de 45 à 55 ans paraissent un peu mieux informées (21 %) alors que 75 % de celles de 35 à 45 ans ne savent pas. La personne la plus âgée (84 ans) fut la seule à déclarer connaître l'existence de telles lois.

De même, à **Barbalha**, 78,6 % des habitants interrogés ignorent tout de l'existence de lois traitant de la protection des personnes et des biens dans les zones à risques. Ce pourcentage varie en fonction de l'âge, du domicile (près ou loin du Rio do Ouro) et de la durée de résidence dans la ville. Il atteint 100 % chez les moins de 25 ans, 85,7 % chez les 25-35 ans, les 35-45 ans et les 45-55 ans, 91,6 % chez les 55-65 ans et 66,6 % chez les plus de 65 ans, cette dernière tranche d'âge paraissant la mieux informée. Le fait le plus préoccupant est l'ignorance du sujet chez les jeunes de 25 ans et moins, qui paraît refléter un déficit d'éducation et d'information dans ce domaine, et aussi une absence d'intérêt pour la question à tous les niveaux (école, université, citoyenneté, vie associative et politique...).

En réalité, il apparaît que les problèmes liés aux crues et inondations ne figurent qu'épisodiquement et momentanément dans les médias, dans les actions ou promesses politiques ou dans les manifestations publiques, à l'occasion de tel ou tel événement catastrophique. Par la suite, le

sujet est remplacé par d'autres thèmes et tombe rapidement dans l'oubli, jusqu'à de nouvelles pluies catastrophiques. Cette discontinuité, assez généralisée, affaiblit et désarticule les mouvements de pression citoyenne sur les responsables de la politique urbaine.

À la question sur la connaissance de documents municipaux faisant référence aux risques naturels, 97 % de réponses négatives ont été obtenues à **Crato**. Seulement deux personnes ont évoqué un arrêté concernant la protection de la nature, sans autres précisions. Le Plan Directeur de la ville n'a été cité que par 3 personnes, dont deux capables d'en définir les objectifs en matière d'occupation des sols et d'organisation de l'espace urbain.

À **Barbalha**, sur les 73 personnes interrogées qui ont répondu à la même question, 100 % ont affirmé n'avoir aucune connaissance de tels documents. Seulement 7 (9,4 %) ont déclaré connaître l'existence d'un Plan Directeur de la commune, toutefois sans pouvoir donner une définition précise de son contenu. Il apparaît donc que, faute d'information, la population et ses représentants associatifs ne sont pas en mesure de discuter les actions ou l'inaction des autorités de la ville en matière de gestion des risques naturels.

Les réponses concernant les acteurs publics ou privés qui sont intervenus après l'inondation de janvier 2011 à **Crato** ont été la mairie (secrétariat à l'environnement, planification urbaine), à 65 % ; la population (volontaires), à 60 %, les pompiers (50 %), le gouvernement de l'État (34 %), la Défense civile (21 %), des responsables de tous ordres (commerce, construction civile, politique, église, écoles, universités, etc.) : 16 % ; les ONG (au sens d'associations dépassant l'échelle du quartier) : 5 %.

À **Barbalha**, les acteurs cités ont été : la mairie (secrétariat à l'environnement, planification urbaine), à 52,1 % ; la population (volontaires, etc.), à 43,4 % ; le gouvernement de l'État (23,9 %), le corps de pompiers et la Défense Civile (8,6 %), les représentants de la société civile (commerce, construction, politiciens, églises, écoles, universités, etc.) et de quelques entreprises spécialisées (Compagnie des Eaux et des Egouts, *Companhia de água e esgoto* – CAGECE), à 6,5 %, et enfin des ONG (2,1 %).

Concernant la gestion des risques dans la ville de **Crato**, 58 % des personnes interrogées disent n'avoir aucune connaissance de travaux réalisés pour éviter les catastrophes naturelles. Pour ceux qui se disent informés (42 %), ces actions devraient être réalisées par le gouvernement de l'État (75 %), la mairie (55 %), les services de l'Environnement (7 %), des associations de quartiers (7 %) ou des entreprises privées (5 %).

À la même question, à **Barbalha**, ce sont 64,3 % des personnes interrogées qui affirment n'avoir aucune connaissance de travaux réalisés pour éviter les catastrophes naturelles. Parmi celles qui ont répondu positivement (35,6 %), 73 % estiment que c'est le gouvernement de l'État qui devrait se charger de ces opérations, la mairie (38,4 %), ou des entreprises telles que la CAGECE. Ni les organismes environnementaux ni les associations de quartiers n'ont été cités, ce qui suggère qu'ils ne sont pas perçus comme représentatifs de la population ni comme influents dans la gestion de la ville, dans le contrôle de la gestion de l'environnement ou de l'occupation des sols et des espaces naturels.

Parmi les types de travaux cités en priorité par la population interrogée à **Crato**, apparaissent la reconstruction du « canal » (100 %) et la réparation des ponts (58 %), suivis par l'enlèvement des débris et des blocs du lit de la rivière (33%). Mais sont aussi évoqués des travaux de prévention et de protection individuels sur les biens privés (reconstruction ou surélévation des murs, réparation des trottoirs – lesquels sont de la responsabilité des riverains - etc.) : 13 %.

À **Barbalha**, parmi les types de travaux cités en priorité apparaissent : la reconstruction du « canal » (57,6 %), la réparation des ponts, passerelles et buses (23 %), l'enlèvement des gravats, des déchets, des blocs et des cailloux qui encombrant le fond et les berges (11,5 %). On cite beaucoup moins les travaux individuels de prévention et de protection sur les biens privés (reconstruction ou surélévation des murs, réparation des trottoirs...) : 3,8 %.

4.4. De la perception des risques naturels à la nécessité de leur gestion

Malgré une proportion assez faible de réponses négatives (« ne sait pas ») ou inexploitables, le questionnaire met bien en évidence le fait que la population des quartiers enquêtés se sent concernée par la question des risques naturels et en particulier des crues et inondations. Même si elle n'a pas clairement identifié tous ces risques (en particulier ceux, d'ordre morphodynamique, liés à la morphologie de l'escarpement de la Chapada, pourtant proche : Peulvast *et al.*, 2011), elle est attentive à la gestion des phénomènes les plus fréquents, les inondations surtout, telle qu'elle a été observée jusqu'à présent et telle qu'elle paraît souhaitable.

4.4.1. Un cadre juridique ignoré

Il existe un cadre juridique et administratif spécifique concernant les risques naturels, le plus souvent d'institution récente, qui sera présenté en détail dans le chapitre 5. La structure fédérale du pays explique une relative complexité peu favorable à une bonne connaissance de la part du public. Il n'est donc guère étonnant que les réponses aux questions posées dans l'enquête fassent ressortir une profonde méconnaissance de l'existence de ces lois ou règlements. Malgré la mise en place rapide de mesures d'assistance d'urgence (relogement, indemnités de logement, etc.), les modalités d'indemnisation ne sont guère mieux connues, en particulier leurs sources. Pourtant, le jour suivant la crue du 28 janvier 2011, la mairie, la Défense Civile et le Corps de Pompiers ont transféré les familles touchées vers des abris d'urgence, des centres de soins, une résidence universitaire et des écoles. Différentes associations ont participé à une campagne de collecte de dons de nourriture, de vêtements, de couvertures, de médicaments, etc. Le Service d'Assistance sociale est intervenu avec des psychologues et des infirmiers auprès des familles sans abri, fournissant un accompagnement psychologique ainsi que des vaccins aux personnes qui avaient été en contact avec les eaux polluées.

Les familles sans abri ont été recensées, dans le but de leur attribuer une aide financière pour louer provisoirement un logement dans une zone plus sûre de la ville.

Le manque d'information explique cette méconnaissance mais le constat, à tous les niveaux, de pratiques consistant à ne pas respecter les dispositifs existants en est aussi responsable.

4.4.2. Les mesures techniques : avis et réalités

Sur la gestion actuelle et passée des risques, la plupart du temps réduite à une gestion de crise (Léone *et al.*, 2011) et à la réfection improvisée de certains ouvrages, les faits donnent raison aux jugements souvent sévères (Magalhães et Peulvast 2013). Il existe pourtant une forte attente, en particulier au lendemain de chaque phénomène catastrophique ou dommageable, en matière d'aménagements susceptibles de réduire l'impact de ces phénomènes à défaut d'en réduire l'intensité ou la fréquence sur le plus long terme. Ainsi, le 8 mars 2012, après une nouvelle crue, s'est tenue une manifestation des riverains du « Canal » du Rio Grangeiro (rebaptisé par un journaliste « *Canal do Medo* » : Canal de la Peur) demandant aux autorités des mesures immédiates pour remédier aux graves problèmes de cet ouvrage.

Une majorité de réponses aux questions portant sur les solutions techniques ont donc mentionné le Rio Grangeiro et plus particulièrement son tronçon canalisé, perçu comme un voisin d'autant plus dangereux que sa présence a pu donner à la population l'illusion qu'elle était bien protégée. De plus, depuis le début des années 2000, chaque crue a été suivie de promesses des autorités (commune, État) de régler « définitivement » le problème du « canal » et de ses débordements. Une partie des propos recueillis est ainsi résumée par un habitant : « *on devrait détruire le canal du Rio Grangeiro et tous les édifices construits autour pour que la rivière existe à nouveau et retrouve son chemin* » (traduction). Une solution radicale, théoriquement efficace, mais pratiquement inenvisageable compte tenu du contexte urbain et socio-politique.

Les rapports techniques établis après la crue du 28 janvier 2011 ne vont pas jusque-là mais les défauts de conception sont reconnus, de même que l'absence d'entretien ou la hâte avec laquelle sont engagés des travaux de réfection, sans aucune étude préalable (Oliveira 2011, Silva 2011a et 2011b). On reste frappé par cette improvisation qui semble surtout répondre au souci de rassurer immédiatement la population riveraine. Ainsi, dans les mois qui ont suivi la crue du 28 janvier 2011, les fonds débloqués par l'État (4 millions R\$, soit ~ 1,6 million €) ont servi à des remblaiements partiels de certains des segments de parois détruits au moyen de gabions reposant directement sur le fond alluvial mis à nu, accompagnés de variations supplémentaires de profil transversal et de section. Inévitablement, ces réparations de fortune ont été mises à mal par la crue du 5 mars 2012 et ont même pu en aggraver les effets sur les berges déjà affouillées et privées de protection. Les travaux engagés en 2013 dans un ouvrage de section variable relèvent de la même logique (Fig. 4.7) et n'annoncent aucune atténuation du danger.



Figure 4.7. Le « canal » du Rio Grangeiro en reconstruction au niveau du Collège Objetivo (quartier Centro, **A**), vu vers l’amont (juin 2011) et à l’amont de l’église Nossa Senhora da Fátima (quartier Pimenta, **B**), novembre 2011. Remarquer la pose de gabions directement sur le fond du chenal, sans fondations (A). Photos : J.P. Peulvast.

4.4.3. Des phénomènes de moins en moins exceptionnels ?

La période pour laquelle des données relativement précises sont disponibles est courte : une quinzaine d’années (depuis 2002). Elle correspond aussi à celle de l’achèvement du canal du Rio Grangeiro dans son extension et sa forme actuelle. Elle voit aussi la multiplication des problèmes liés à sa construction, à sa mauvaise qualité, à l’absence d’entretien et, surtout, à l’imprudente occupation de ses abords immédiats par toutes sortes d’habitations et d’implantations collectives dont certaines accueillent un public nombreux (collège Objetivo).

La compilation des données obtenues de la FUNCEME (précipitations), des autorités locales et des journaux fait apparaître la répétition quasi-annuelle de crues-éclair et d’inondations, au rythme moyen d’un événement par an, toujours pendant la saison des pluies (janvier-avril : tableau 4.1). Dans cette série, la crue du 28 janvier 2011 n’apparaît donc pas comme un événement inhabituel, si ce n’est par l’ampleur des dégâts et du nombre de personnes concernées. Dans l’état actuel des connaissances, on ne sait pas si cette fréquence représente un changement par rapport à la situation antérieure, qui est celle d’une urbanisation moindre et d’un cours d’eau canalisé sur une longueur plus faible, limitée à la zone du centre-ville.

Années	Source information	Date	Pluie Station Crato (mm)	Pluie Station Lameiro (mm)	Crue, inondation	Autres pertes et dommages
2002	DN	03/01	61		Rio Granjeiro, marges du canal Dégradation du canal	95 maisons détruites (Batateira)
	DN	25/01				
	JC	15/03	92,8			
2003	DN	19/01	120	36	Débordement et dégradation du canal Inondation Riacho da Vala, Rua Tristão Gonçalves	Destruction de maisons (Seminário)
	DN	17/03	88	66		
2004	DN	31/01	99	74	Débordement canal et Riacho da Vala, quartier mairie, 1 km2 inondé Débordement canal et Riacho da Vala	2700 sans abri
		16/02	156	136		
2005	DN	24/03	100	94	Débordement du canal, 1 voiture emportée	1 mort, 96 sans abri, 26 maisons détruites
2006	DN	21/04	105	122	Débordement et dégradation du canal, inondation : prison, 100 maisons, Praça da Sé	-
2007	DN	11/04	80	110	Dégradation du canal, sans débordement	-
2008	DN	11/02	95	92	Dégradation du canal (partie neuve) et du pont du Champ de tir Inondation du bas de la Praça da Sé, dégradation du canal	-
		24/03	71	90		
2009	DN	06/04	115	63	Inondation Riacho da Vala	-
2010	OP	31/01	115		Inondation dans Crato	-

2011	DN OP	28/01	162	137	Débordement et destruction partielle du canal, Inondation du centre ville	Destruction de ponts et passerelles Dégradation de la voirie, inondation de 166 maisons et 256 magasins, destruction de 75 maisons ; 305 sans abri
2012	DN	05/03	92,8	85	Dégradation ou destruction partielle du canal (segments réparés)	-

Tableau 4.1. Événements pluvieux et crues du Rio Granjeiro, 2002-2012. Le tableau diffère partiellement du tableau 2.1. en ce sens qu'il est centré sur les épisodes de crue et de débordement du canal du Rio Granjeiro, quels que soient les seuils de déclenchement. Il prend en compte les données des deux stations pluviométriques de la ville. Source : Compilation à partir de la consultation de la presse (**DN** : *Diário do Nordeste* ; **OP** : *O Povo*; **JC** : *Jornal do Cariri*) et des bulletins pluviométriques de la FUNCEME. Élaboration : A.O.Magalhães, 2018.

L'analyse des graphiques pluviométriques journaliers des stations de Crato (centre-ville) et Lameiro (un peu à l'amont du centre-ville) fait apparaître des seuils de déclenchement de l'ordre de 70 à 90 mm tombés à Lameiro (généralement en 2 à 3 heures), quelles que soient les séquences pluviométriques antérieures ; les inondations les plus graves surviennent pour des pluies supérieures à 100 mm dans les deux stations (elles restent moins marquées si la station de Lameiro reçoit moins). Avec ses 162 mm et 137 mm respectivement, la pluie du 28 janvier 2011 est la plus forte de toute la période considérée, ce qui justifie son traitement particulier (chapitre 2). Elle aura coïncidé avec une aggravation de l'état du canal qui est sans doute indirectement l'autre grand responsable de l'inondation, dans la mesure où la présence du canal a pu donner l'illusion aux populations qu'elles étaient bien protégées.

4.4.4. Des aléas aux risques : des phénomènes nouveaux liés à la croissance urbaine mal accompagnée

L'enquête par questionnaire a fait ressortir le rôle considérable que la population concernée attribue aux facteurs anthropiques dans le déclenchement des crues-éclair du Rio Grangeiro. Outre des aménagements hydrauliques mal appropriés, mal conçus et/ou mal construits, et mal entretenus, l'urbanisation elle-même est perçue comme comportant ses propres facteurs de risque, à la fois par un accroissement des vulnérabilités et des enjeux, et par une modification des aléas : construction dans des zones naturellement inondables ou devenues inondables par suite des aménagements, modification des conditions d'infiltration et de ruissellement dans des parties du bassin-versant susceptibles d'engendrer des écoulements accrus. Comme le remarquent de nombreux articles de presse et même les rapports officiels déjà cités, il est d'ores et déjà certain que l'accélération de l'urbanisation, l'occupation désordonnée des sols, ainsi que la négligence des administrations publiques, ont

contribué à créer une situation toujours plus critique, pouvant entraîner dans le futur des catastrophes aux conséquences de plus en plus lourdes.



Figure 4.8. Réparations du canal du Rio Granjeiro après la crue du 28 janvier 2011. **A** : À l'aval de l'église Nossa Senhora de Fátima ; **B** : Devant le collège Objetivo. Pose de gabions à même le lit du cours d'eau dans les tronçons détruits par la crue de janvier 2011. Maintien de la section trapézoïdale ailleurs, ainsi que des ponts trop bas, induisant des variations de forme transversale et de calibre propices à une accentuation des turbulences et de la puissance érosive de l'écoulement de crue. Photos : A.O. Magalhães, 2011.

Parmi les facteurs les plus évidents, outre la géométrie inappropriée du canal, son état lamentable dans les années et les mois précédant la crue a été pointé par tous les observateurs et la population concernée, illustrant les retards des pouvoirs publics dans l'accompagnement et la planification de l'urbanisation. Depuis le début des années 2000, chaque crue a été suivie de promesses des autorités (commune, État) de régler « définitivement » le problème du « canal » (le cours d'eau en tant qu'élément naturel du milieu est oublié ou même nié) et de ses débordements. Les défauts de conception sont reconnus, l'absence d'entretien l'est moins. On reste surtout frappé par l'improvisation qui préside aux travaux censés régler le problème et qui semblent surtout répondre au souci de rassurer la population riveraine (Fig. 4.7 ; Fig. 4.8 A et B). On l'a vu, ces réparations de fortune, faites sans aucune étude préalable, ont été mises à mal par la crue du 5 mars 2012 et ont même pu en aggraver les effets sur les berges déjà affouillées et privées de protection.

Cependant, face à ces faits visibles par tous, les facteurs plus généraux tels que l'absence de gestion du bassin-versant à l'amont, l'absence de contrôle du respect des aires de protection environnementale et l'absence de réglementation des implantations dans les zones de risque (lesquelles ne sont d'ailleurs ni définies ni cartographiées dans aucun document), sont encore plus préoccupants. La prise en compte d'une approche scientifique et multidisciplinaire de ces problèmes n'en est que plus urgente.

4.4.5. Le besoin ressenti d'une prévention des risques et d'une planification urbaine

Le problème reste posé car beaucoup de données restent parcellaires. Sur le plan météorologique, seules deux stations fournissent des données régulières et fiables, depuis 1974 pour Crato et 1994 pour Lameiro (FUNCEME, 2013) ; celle de l'aéroport de Juazeiro do Norte, la seule à fournir des données horaires, est située à 15 km. Il n'existe pas de système local d'alerte et un radar météo n'a été installé au Ceará qu'en mars 2011. On remarque surtout l'absence de données hydrologiques dans le bassin-versant et sur le drain principal. De la même manière, les réparations d'urgence ont été faites sans aucune des études préalables qu'il est pourtant envisagé ou promis d'entreprendre au lendemain de chaque inondation. Les rapports consultés (Sousa *et al.*, 2006, Oliveira 2011, Silva 2011a, b) soulignent l'absence de gestion coordonnée du bassin-versant mais aucune solution cohérente n'est proposée, le « Plano de Requalificação Urbana » (PRU) de Crato établi en 2005 et révisé en 2009 ne mentionnant guère la question des risques. Ainsi, l'urbanisation a continué et s'est même accélérée pendant toute la décennie 2000, dans les vallées comme sur les interfluves. Il n'existe actuellement pas de données sur le taux de couverture et d'imperméabilisation des sols, données d'ailleurs mouvantes et difficiles à acquérir dans un contexte d'urbanisation rapide et de spéculation foncière. Les lotissements en construction ou récemment construits ne comportent pas de poches de rétention des eaux, ce qui montre là aussi l'absence de gestion des phénomènes de ruissellement. Seuls sont envisagés des ouvrages plus importants, sur les axes où les écoulements se sont déjà concentrés. C'est dans les années 2000 qu'est apparue l'idée de construire ou de rétablir six retenues dans les parties amont du bassin versant.

Le PRU de Crato en donne même la localisation approximative, sur le Rio Grangeiro et trois de ses affluents, dont le Riacho das Piabas et le Riacho da Vala, entre 1 et 2 km en amont du centre-ville (Fig. 4.9). L'idée a fait ses preuves dans de nombreux cas comparables et dans d'autres pays (par exemple en France, dans des régions de plateaux disséqués ; Merckle et Royet, 2010). Mais, dans le cas présent, il n'a pas été possible d'accéder aux documents d'ingénierie cités dans le PRU, ni aux éventuels chiffrages ou aux évaluations de faisabilité en termes fonciers.

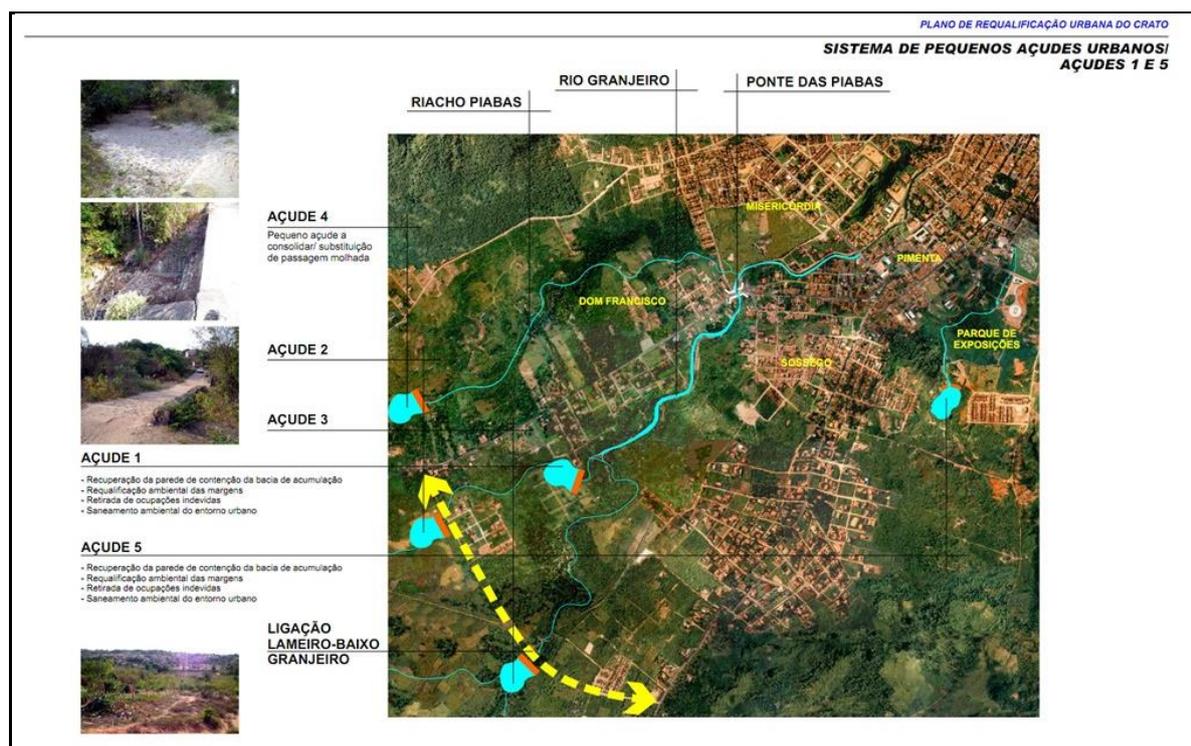


Figure 4.9. Plan de requalification urbaine de Crato (2009). L'implantation des petites retenues (*pequenos açudes*), représentées en bleu, sont prévues pour retarder et atténuer les crues du Rio Granjeiro. Deux d'entre elles utiliseraient des parties surélevées de la liaison routière (*ligação*) Lameiro-Bas Granjeiro, à ce jour non réalisée.

Dans l'immédiat, à défaut d'une planification prenant réellement en compte une gestion intégrée des risques, basée sur les études scientifiques qui commencent à s'entreprendre, les solutions purement techniques, destinées avant tout à rassurer la population et souvent inadéquates, risquent de prendre encore longtemps le pas sur les autres.

4.5. Conclusion du chapitre 4

Après quelques crues dévastatrices récemment survenues dans le Nordeste brésilien, la thématique des aléas et des risques naturels s'impose au géographe autant qu'à l'ingénieur. Elle reste pourtant peu identifiable dans les mentalités ou les comportements, chez la population comme parmi les acteurs locaux. Malgré des dispositions législatives récentes au niveau fédéral, elle n'a guère de traduction dans la planification urbaine, si ce n'est sous forme de mesures plus ou moins ponctuelles répondant aux crises. C'est ce qui s'est produit après la crue survenue à Crato le 28 janvier 2011, avec la réfection hâtive du chenal bétonné (« canal ») du Rio Granjeiro et de la voirie riveraine, sans étude ni traitement du problème hydraulique.

L'enquête menée dans le cadre de ce travail auprès d'un échantillon de population sélectionné dans les quartiers les plus concernés montre que cet événement largement médiatisé a favorisé, malgré

un déficit d'informations précises, une prise de conscience souvent aiguë des risques encourus, chez la population, sinon parmi les acteurs locaux. Appréciée à travers une perception souvent pertinente des phénomènes dangereux, de leurs causes et des solutions possibles, elle n'a encore guère de traduction dans les orientations récentes ou prévues de la gestion des risques en relation avec l'aménagement urbain. Cela d'autant moins que les populations concernées sont habituées à compter sur les solidarités familiales ou de voisinage plus que sur les institutions pour faire face aux conséquences des catastrophes naturelles, ce qui pourrait expliquer que la demande ne soit pas toujours suivie d'effets.

Quoi qu'il en soit, nos résultats, encore préliminaires, montrent l'intérêt de la méthode d'enquête. Utilisée de façon plus systématique, elle pourrait être une des bases de l'élaboration de programmes de prévention et de gestion des risques naturels adaptées au contexte économique et socio-éducatif, et conformes aux attentes de la population comme aux politiques en cours de mise en place au niveau fédéral. Une démarche qui apparaîtra d'autant plus nécessaire avec l'examen de la façon dont ces questions sont actuellement traitées (chapitre 5)

Chapitre 5 : Traitement des risques naturels dans le Nordeste du Brésil : application aux villes de Crato et Barbalha

5.1. Introduction du chapitre 5

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que les récents épisodes de crue ont favorisé une sensibilisation accrue de la population et des acteurs locaux à la question des risques naturels. Cependant, malgré une perception souvent pertinente des phénomènes dangereux, de leurs causes et des solutions possibles, elle n'a encore qu'une traduction partielle ou timide dans les orientations récentes ou prévues de la gestion des risques en relation avec l'aménagement urbain. Pour être efficace, le traitement de cette question doit d'abord s'appuyer sur une identification claire des composantes du problème : celle des aléas (première partie) et celle des enjeux et de leur vulnérabilité, dont la cartographie sera tentée dans le présent chapitre, ainsi que la définition et la cartographie des risques appuyée sur le croisement de ces données.

Selon le Guide général de préparation des Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles (Garry, 1997), la cartographie de ces éléments s'appuie sur les principes suivants :

- (1) La carte des **aléas** localise et hiérarchise les zones exposées à des phénomènes potentiels. Elle représente une phase interprétative effectuée à partir d'une approche qualitative, aboutissant à distinguer des aléas forts, moyens et faibles ou négligeables.
- (2) L'analyse des **enjeux existants et futurs** ainsi que de leur **vulnérabilité** dans les territoires soumis à un ou plusieurs aléas permet d'évaluer les populations en danger, de recenser les établissements recevant du public, les équipements sensibles, les voies de circulation susceptibles d'être coupées, etc., le tout pouvant être cartographié et superposé à la carte des aléas.
- (3) Dans un cadre réglementaire (qui n'est pas celui de notre étude), ces documents doivent aboutir à la **délimitation de zones** dans lesquelles sont définies les interdictions, les prescriptions réglementaires homogènes ou les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde. Ces zones correspondent en fait à des niveaux de risques différents, auxquels correspondent des critères de constructibilité qui servent à définir des zones rouges (interdiction de construction) et bleues (prescriptions moins contraignantes). Ces cartes peuvent être complétées par des cartes hydrogéomorphologiques, des cartes de hauteur de submersion ou de vitesses des écoulements, ou encore des cartes de facteurs de prédisposition aux mouvements de terrain. Sauf exception (mouvements de terrain), la

faiblesse des données disponibles et l'orientation de notre travail ne nous ont permis d'aborder ces derniers aspects que par l'analyse de documents bibliographiques.

Cet essai sera suivi d'une analyse des conditions juridiques et réglementaires dans lesquelles est traitée la question des risques au Brésil. Elle nous permettra de présenter l'état actuel de la gestion du risque à travers le cas le plus étudié dans le cadre de notre recherche : le risque d'inondation à Crato, la gestion des crises et les solutions techniques, en particulier après la crue du 28 janvier 2011.

5.2. Identification et cartographie des risques naturels : risques d'inondation et risques liés à l'érosion et aux mouvements de terrain (aléas, enjeux, vulnérabilité)

5.2.1. Identification des aléas

5.2.1.1. Caractérisation et délimitation des aires inondables

L'analyse des effets de la crue du Rio Granjeiro du 28 janvier 2011 (Magalhães et Peulvast, 2013) a permis de cartographier, à partir d'observations de terrain, de photos et de témoignages, l'extension des aires inondées dans la ville de Crato, donnant ainsi un instantané d'une situation correspondant à un événement de période de retour décennale (voir 2.2.4 et Fig. 2.4). Les secteurs les plus affectés ont été les quartiers Lameiro, Pimenta, Seminário et Centre, les plus proches du canal, mais aussi du Riacho da Vala, dont le cours busé a débordé par les regards disposés tout au long de la rue Tristão Gonçalves. Comme on l'a vu, les rues du centre sont les plus régulièrement atteintes par les inondations car ce secteur est le moins élevé par rapport au talweg. Entièrement construit et imperméabilisé (bâtiments, asphalte), il correspond à l'ancienne plaine d'inondation, encadrée par les basses terrasses composées de vieux dépôts torrentiels et de coulées de débris. C'est aussi le secteur où les rues sont les plus étroites, augmentant la vitesse d'écoulement de l'eau. Les enjeux y sont les plus importants, compte tenu de la concentration de bâtiments publics – y compris la mairie – et d'établissements privés ou publics de commerce, d'artisanat et d'enseignement, outre les habitations.

Parmi les autres tentatives de délimitation des aires inondables, celle de Lima Neto (2013) repose sur une modélisation de type hydrogéomorphologique faite à partir d'images satellite géoréférencées. Dans ce travail, la cartographie des aires inondables a été préparée pour divers profils de crue créés par des simulations hydrauliques, en l'occurrence les débits maximum associés à des périodes de retour de 5, 10, 20, 50 et 100 ans. La résolution spatiale choisie pour cette cartographie a été de 10 m, compte tenu de la taille du bassin-versant du Rio Granjeiro. La figure 5.1, construite après ajustement entre les données images brutes et les cartes en courbes de niveau utilisées, qui ne tiennent pas compte des transformations apportées par la chenalisation artificielle du Rio Granjeiro, représente l'aire qui serait inondée en cas de crue de période de retour de 20 ans. Les secteurs les plus fonceés, qui sont aussi les plus proches du chenal, sont ceux de plus grande profondeur d'eau (jusqu'à 2,23 m).

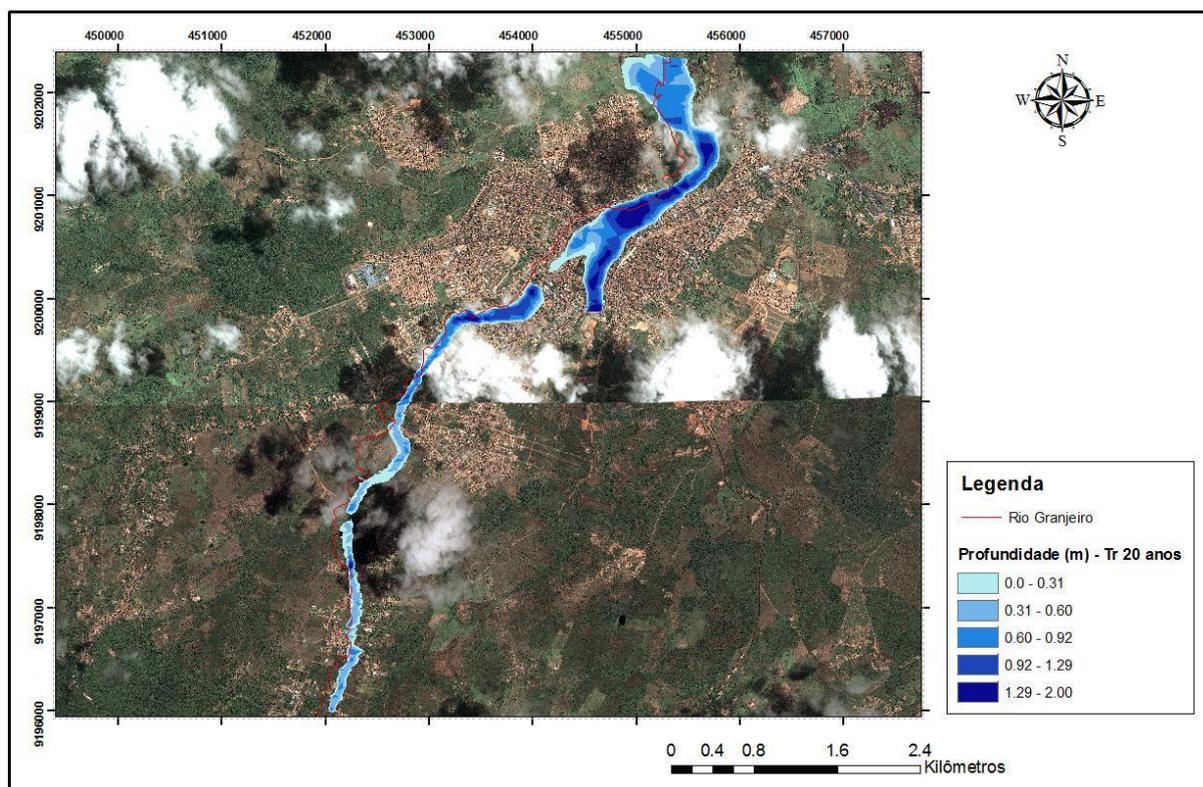


Figure 5.1. Cartographie des aires inondables du bassin-versant du Rio Granjeiro pour une période de retour de 20 ans (Source: Lima Neto, 2013)

Sur cette carte, il apparaît, comme dans notre étude, que les secteurs les plus proches du canal, qui correspondent à une partie des zones résidentielles et commerciales du centre ville, sont les plus touchés par les inondations, comme cela s'est vérifié lors des crues de 2004, 2009 et 2011 (Fig. 2.4). Les hauteurs d'eau y sont suffisantes pour balayer des personnes et des véhicules se trouvant sur les zones de courant rapide (SAFEGE, 2014), c'est-à-dire autour du canal. On notera, en revanche, que les abords du Riacho da Vala (Fig. 5.2) n'apparaissent pratiquement pas, ce qui souligne les limites de la méthode utilisée et montre, *a contrario*, l'intérêt qu'il y a à la combiner avec la cartographie empirique réalisée sur le terrain.

Il en est de même pour la carte de la zone inondable en cas de crue centennale (débit de pointe de $335,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour une pluie de 194 mm en 24 h, essentiellement concentrée sur les 85 premières minutes) telle que modélisée par Cabral *et al.* (2016). La modélisation tient non seulement compte des facteurs pluviométriques, mais aussi de la morphométrie du bassin-versant, des caractéristiques des sols (nature, couverture végétale, occupation, rugosité, état d'humectation, etc.) et des paramètres hydrauliques du chenal naturel et du canal. La plupart de ces paramètres sont seulement estimés et les auteurs reconnaissent que le MNT SRTM utilisé, même complété par des transects tous les 500 m, ne suffit pas à rendre compte de l'extension réelle des zones inondables, lesquelles sont même localement décalées par rapport au tracé du chenal !

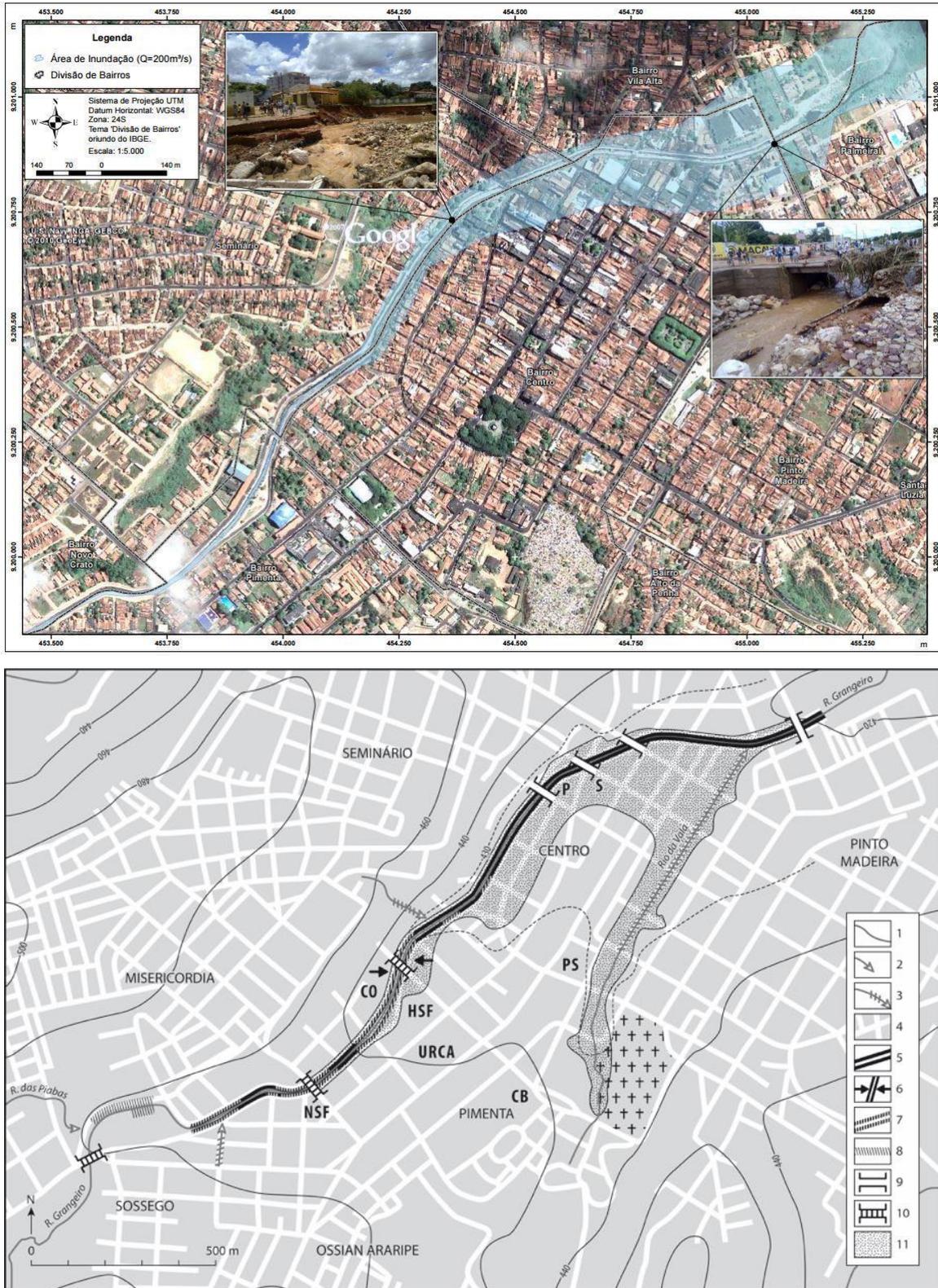


Figure 5.2. La zone inondable du centre-ville de Crato en cas de crue centennale du Rio Grangeiro selon la modélisation de Cabral *et al.* (2016). En médaillon : photographies de parties dégradées du “canal”. En bas, à titre de comparaison, rappel de notre propre carte, établie pour la crue du 28 janvier 2011 (légende : voir Fig. 2.4).

Limitée au centre-ville, la carte ainsi obtenue (Fig. 5.2) ne diffère pas sensiblement de celle de Lima Neto (2013) et n'indique toujours pas l'inondabilité du secteur adjacent au Riacho da Vala, entre le cimetière et le confluent avec le Rio Granjeiro.

La tâche est encore plus délicate à Barbalha, où aucune documentation cohérente ne nous a permis de dresser une carte précise des zones inondées lors des épisodes mentionnés plus haut. D'après les données ponctuelles qui ont pu être consultées (voir chapitre 2), les inondations semblent être restées en général limitées aux abords immédiats du chenal bétonné du Riacho do Ouro et du cours busé du Riacho Seco, dans les quartiers Centro et Nossa Senhora da Fátima ainsi que dans le bas des quartiers Cirolândia et Bela Vista, le long des parties amont du Riacho Seco, en contrebas des pentes ravinees du quartier Santo André (Fig. 1.15) ; elles se limitent à une étroite plaine alluviale (100 à 200 m de largeur) qui ne s'élargit que dans la zone de confluence entre les deux ruisseaux (jusqu'à 400 m de largeur) et au débouché sur le Rio Salamanca, à l'aval du pont de la route Barbalha-Missão Velha. C'est l'extension de cette plaine alluviale qui est représentée sur notre carte, en l'absence de données accessibles dans le cadre de ce travail et pouvant permettre l'établissement d'une véritable carte hydrogéomorphologique (Fig. 5.3).

L'usage exclusivement agricole de la large plaine sableuse du Rio Salamanca, au nord, y rend les inondations peu gênantes par rapport à la zone urbanisée, sauf au niveau du carrefour (Triangulo) des routes de Missão Velha, Juazeiro do Norte et Arajara, proche du pont sur le Rio Salamanca, à l'entrée du centre-ville. Elles sont nettement plus gênantes ou dangereuses à l'amont du confluent, où l'urbanisation de la plaine alluviale des Riachos do Ouro et Seco, déjà complète en rive gauche (ouest), gagne en rive droite du chenal bétonné du Riacho do Ouro, sur une étroite bande à peine surélevée par rapport au bord du "canal" (bas du quartier Alto da Alegria) et le long du Riacho Seco, désormais dépourvu de chenal à l'air libre, jusque dans ses parties amont.

Malgré plusieurs demandes, aucun document officiel concernant les risques d'inondation n'a pu être obtenu auprès de la mairie de Barbalha. Un ingénieur des services techniques consulté par téléphone le 05/10/2018 nous a affirmé ne pas connaître l'existence de carte des zones inondables ou d'un quelconque plan de prévention des inondations ou d'alerte de la population, pas plus que d'un Plan Directeur Municipal.

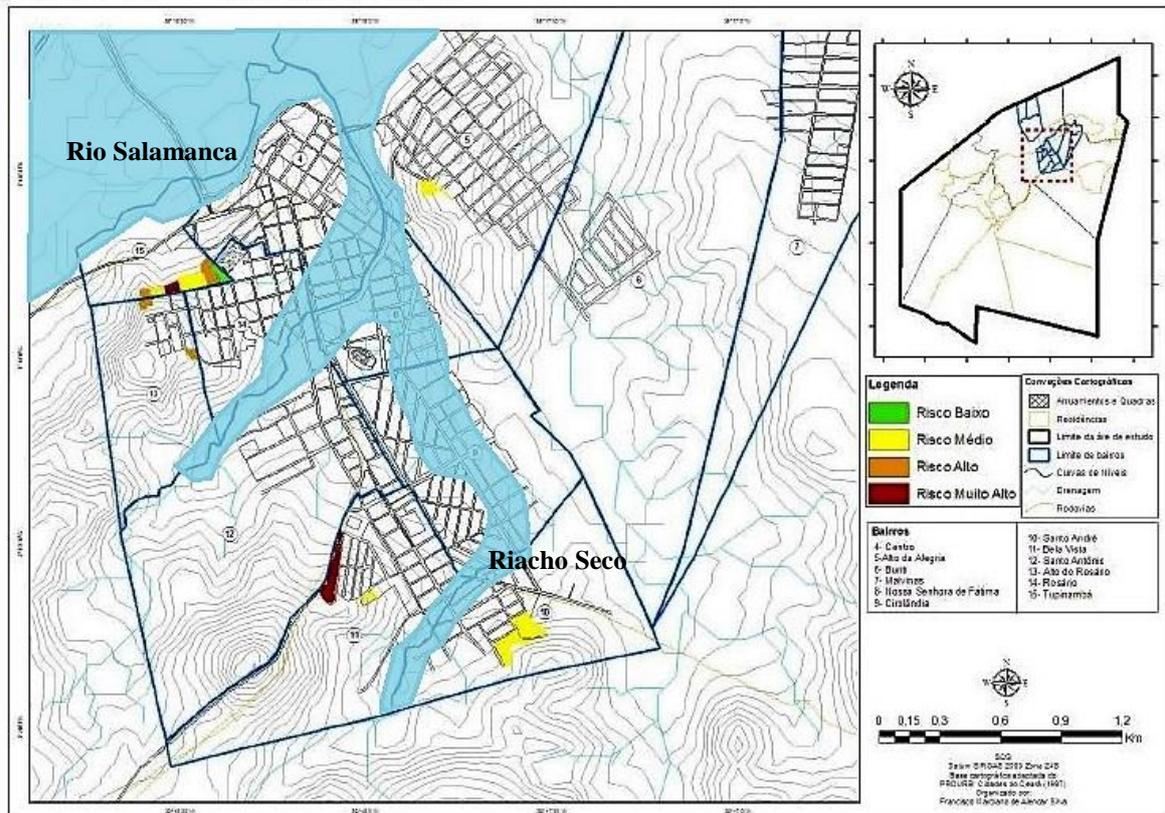


Figure 5.3. Plaine alluviale (en bleu clair) et zones de risques géomorphologiques dans la zone urbaine de Barbalha adapté de Silva (2017). Du fait de l’urbanisation et de l’absence d’affleurements exploitables, l’extension de la plaine alluviale est suggérée sur la base de critères topographiques (bande à profil transversal horizontal entre les versants) et reste approximative dans la zone de confluence des Riachos Seco et do Ouro.

5.2.1.2. Délimitation des aires affectées par les phénomènes érosifs et les mouvements de terrain

Les cartes présentées dans le chapitre 3 (Fig. 3.2, Fig. 3.9), complétées par des observations ponctuelles, indiquent respectivement la localisation des phénomènes érosifs de petite taille (à Crato) et celle des grands mouvements de masse qui se sont produits dans l’ensemble de la région d’étude, dans un passé plus ou moins ancien et non déterminé à ce jour. En tant que telles, elles ne peuvent être utilisées comme cartes d’aléas qu’à titre indicatif, sur les bases du principe d’actualisme, selon lequel les processus qui se sont exercés dans le passé s’exercent encore de nos jours, et de l’observation d’une certaine continuité dans le temps et de l’espace de processus localisés tels que les ravinements, les glissements de terrain et les coulées de débris plus ou moins confinés par les creux du relief qui tendent à les canaliser. Une autre limitation de cette méthode est liée au processus d’urbanisation accéléré et plus ou moins incontrôlé qui peut à tout moment lancer ou relancer des processus d’érosion par suite de défrichements, de décapages et de terrassements inappropriés.

Ainsi, sous réserve qu’une coulée de débris puisse être réalimentée par une recharge de la masse colluviale à l’amont et/ou par la remobilisation de matériaux des terrasses où elle s’est

emboîtée, elle aura en principe tendance à se reproduire le long du même talweg. De même, des glissements de terrain restés haut perchés par rapport au piémont disséqué de la *chapada* peuvent être réactivés et venir menacer des zones jusque là hors de portée, par exemple en se prolongeant par des lobes et des coulées de débris canalisés ou non par des talwegs préexistants (par exemple, Crato : Fig. 1.8 A). Enfin, des parties de l'escarpement jusque là dépourvues de cicatrices et de dépôts de glissement peuvent très bien être affectées par de tels phénomènes, puisque nous avons vu qu'ils s'inscrivent dans les processus habituels de recul et d'évolution de l'escarpement (chapitre 3).

Phénomènes de ruissellement et d'érosion superficielle

À Crato comme à Barbalha, les zones de ravinement restent assez peu nombreuses et en général limitées à quelques rebords de terrasses ou lambeaux de glacis taillés dans les grès tendres de la Formation Batateira, surtout à l'emplacement d'anciennes carrières ou de déversoirs d'égouts, où elles servent en même temps de décharges sauvages. Seules les plus importantes d'entre elles présentent une certaine permanence et peuvent revêtir un caractère menaçant du fait du recul de leur tête (Figs. 3.2, 3.5, 3.8) jusqu'à leur éventuel comblement (Crato: *voçoroca* du Seminário). Cependant, toute opération de déboisement, par exemple pour la préparation d'un lotissement, peut lancer le phénomène dans des secteurs jusque là non touchés si les pentes s'y prêtent. Ainsi, le défrichage et le décapage récents de grandes parcelles situées sur des croupes d'interfluves proches de l'escarpement autour du haut bassin du Rio Granjeiro (Fig. 5.4 A) ont provoqué des ruissellements diffus mais aussi le creusement de nombreuses rigoles et ravines au détriment du manteau colluvial et/ou de l'horizon C des leptosols mis à nu et tronqués, dans les mois qui ont suivi les opérations (Fig. 5.4 B).

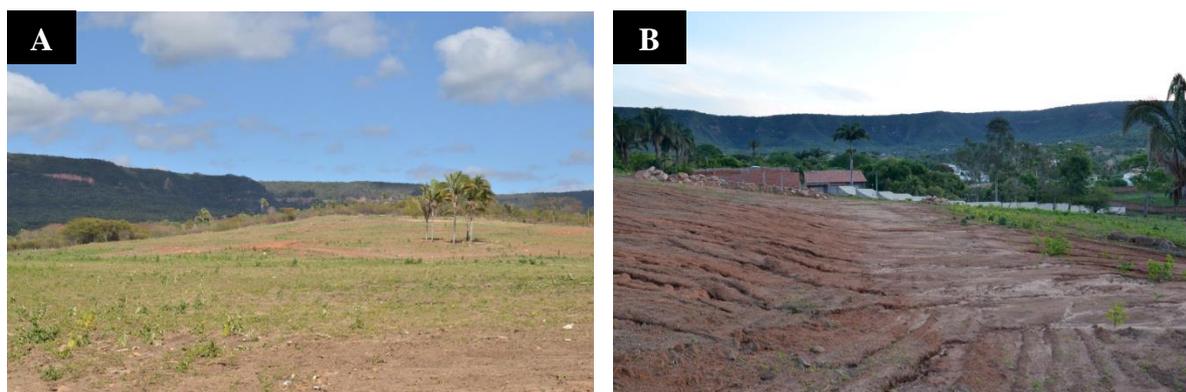


Figure 5.4. Défrichements, ruissellements et ravinements dans le haut bassin-versant du Rio Granjeiro, Crato. **A.** Secteur Baixio Granjeiro, côté ouest, août 2014. **B.** Secteur Baixio Granjeiro, côté est (sous le restaurant Pau d'Arco), novembre 2011. Photos: J.P. Peulvast.

Le phénomène semble plus grave à Barbalha, dont les quartiers périphériques sont en partie construits sur des pentes et collines façonnées dans les grès tendres de la Formation Batateira. Souvent éventrés par d'anciennes carrières (quartier Tupinambá : Fig. 3.8), ils sont colonisés par des ensembles d'habitations modestes, parfois de véritables favelas, jusque sur des pentes fortes où les axes de voirie ouverts dans le sens de la pente favorisent des processus de ruissellement concentré et la formation de ravines ou ravins (Fig. 5.5). Dans ce cas, le phénomène est d'autant plus préoccupant qu'il affecte l'amont du bassin-versant du Riacho Seco, pouvant y favoriser la formation de coulées de boue et crues-éclair (par exemple celle du 23 avril 2015, due à une pluie de 159 mm).



Figure 5.5. Le quartier Santo André à Barbalha. Urbanisation récente sur une colline de grès argileux tendres aux pentes découpées et partiellement ravinées, à l'amont du Riacho Seco (non apparent sur l'image). Les rues tracées dans le sens de la pente facilitent l'écoulement des eaux de ruissellement. Image Google Earth, 2018.

Les phénomènes érosifs restent plus limités dans les secteurs cultivés, même sous les bananeraies qui s'étendent sur les pentes plus ou moins fortes proches des sources et des *levadas*. Ils apparaissent ponctuellement, sous forme de ravinements, après des brûlis suivis par l'implantation de cultures peu couvrantes telles que le manioc (Fig. 5.6 A).

Au total, les phénomènes érosifs superficiels restent, à quelques exceptions près, limités aux zones rurales du piémont de la *chapada* et des glacis disséqués ou démantelés en buttes (Barbalha), surtout si elles sont en proie à une urbanisation plus ou moins incontrôlée. À Crato, leur représentation limitée confirme celle des aires de susceptibilité moyenne aux processus érosifs superficiels proposée par Ribeiro (2004). Par eux-mêmes, ils ne représentent aucun danger identifié, sauf exception (Barbalha : Tupinambá) et n'apparaissent donc pas dans la catégorie des aléas.



Figure 5.6. Ruissellement concentré et ravinement. **A.** Plantation de manioc après brûlis, sur manteau colluvial à blocs et matrice sableuse. Chico Gomes, Crato. **B.** Ravinement sur un chemin taillé dans le sens de la pente sur le grès Arajara. Coqueiro, Crato. Photos: A.O. Magalhães, 2008.

En revanche, on peut penser que le ruissellement ainsi accru contribue à l’augmentation générale des coefficients d’écoulement dans le bassin-versant et à la rapidité de l’écoulement des eaux superficielles vers les principaux drains (notion de “connectivité hydrologique indirecte” : Viel *et al.*, 2014), d’autant plus que, dans les lotissements qui ont été observés, aucune poche de rétention des eaux n’a été aménagée. La voirie, revêtue ou non, peut également jouer un rôle similaire lorsqu’elle est orientée dans le sens de la pente, qu’elle soit ravinée (Fig. 5.6 A) ou pourvue de caniveaux ou de fossés latéraux (bétonnés, partiellement à ciel ouvert et recevant également les eaux usées dans les secteurs urbains ; Fig. 5.7 B) qui accélèrent l’écoulement des eaux. Le cas le plus préoccupant est celui des routes ou chemins aménagés le long des talwegs parfois dans le lit même de cours d’eau restant le plus souvent à sec. On prendra pour exemple le chemin rural aménagé dans le lit du Riacho do Ouro sur plus d’un kilomètre de longueur à l’amont de la ville de Barbalha (Fig. 5.7 C).

Dans tous les cas, la participation de la voirie à l’imperméabilisation des sols et à l’accélération des écoulements reste sans doute le facteur le plus important, dans la mesure où les ravinements observés sur les voies de communication restent au total assez limités et éphémères. En effet, ils finissent par être comblés par les services municipaux et/ou la population locale car, même en mauvais état, les chemins et routes pavées restent fort utilisés dans un contexte d’habitat rural dispersé et de construction non planifiée d’habitations. La desserte par des réseaux convenables de voirie et d’assainissement (même celle des résidences de luxe dispersées sur le piémont de la Chapada à Crato) est généralement postérieure à ce type d’occupation.

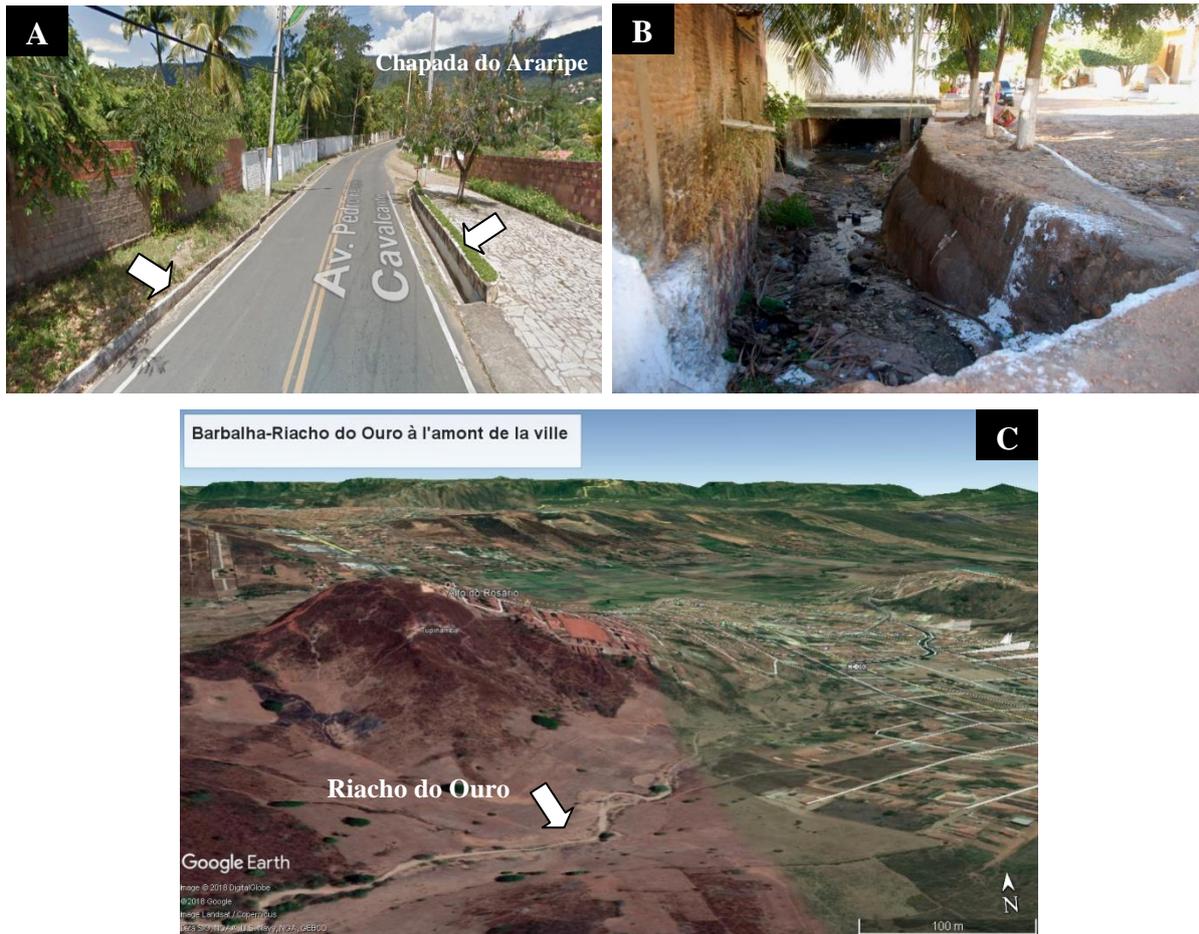


Figure 5.7. Voirie, collecte des eaux de pluie et concentration des eaux de surface. **A.** Quartier Grangeiro, Crato: fossés latéraux bétonnés à ciel ouvert le long de l’avenue Pedro Felício Cavalcante montant à Grangeiro. Image Google Maps, 2012. **B.** Quartier Sossego, Crato. Collecteur d’eaux pluviales dans l’axe d’un petit vallon entièrement urbanisé affluent du Rio Granjeiro, partiellement recouvert par des habitations à l’arrière plan. Photos A.O. Magalhães, 2008 et 2007. **C.** Le lit du Riacho do Ouro partiellement utilisé comme chemin rural à l’amont de la ville de Barbalha (quartier Santo Antônio). Image Google Earth, 2018.

Répartition de l’aléa mouvements de masse

Les travaux récents portant sur les aléas et risques liés aux mouvements de masse dans les communes de Crato et Barbalha (Carvalho et Ribeiro, 2007 ; Silva, 2017) se limitent pour la plupart aux zones habitées, à quelques exceptions près liées à l’instabilité de quelques talus routiers (route d’Arajara à la *chapada*, taillée dans les grès Exu altérés affleurant dans une cicatrice de glissement de la Chapada au-dessus de Farias: Fig. 5.8 A) et ne font état que de phénomènes de taille métrique à décimétrique, de type ravinement et petit glissement de terrain. Ce fait a déjà été noté à Crato (Ribeiro, 2004 ; Fig. 3.2), où les superficies concernées restent très faibles et principalement limitées aux quartiers les plus défavorisés, installés sur des terrains délaissés principalement pour cause de pentes trop fortes. Elles se concentrent sur ces pentes, en particulier les berges et les rebords de

terrasses où la présence de gros blocs favorise les phénomènes de déstabilisation consécutifs aux aménagements (terrassements étagés, talus abrupts...). En outre, la construction de maisons au bord de ces talus exerce une surcharge, aggravée par les déversements d'ordures et le rejet d'eaux usées dans les pentes (Fig. 5.8 B).



Figure 5.8. Mouvements de terrain effectifs ou possibles en zones artificialisées. **A.** Petit glissement rotationnel (*slump*) survenu en fin de saison des pluies à Farias (Barbalha) sur la route de la Chapada taillée dans des grès Exu altérés. **B.** Maison en péril sur un rebord de haute terrasse du Rio Granjeiro, quartier Caixa d'Água, Crato. Bâtie sur un substrat riche en blocs, déstabilisé par des terrassements (tranchée routière), la maison a été ultérieurement démolie et remplacée par un petit immeuble. Photos: J.P. Peulvast/ A.O. Magalhães, 2008 et 2014.

À Barbalha, une étude récente (Silva, 2017) porte sur les risques géomorphologiques dans les zones urbanisées. En réalité, elle ne fait état que de formes et de processus de petites dimensions (d'ordre métrique à décamétrique), dont les principaux correspondent à la zone ravinée (*voçorocas*) déjà décrite dans le quartier Tupinambá (Fig. 3.8). Les glissements proprement dits sont susceptibles, pour la plupart, de se produire dans des talus artificiels de taille métrique, taillés dans les flancs des collines où sont installées des habitations non planifiées. Ils sont identifiés, sur des superficies de quelques ares au maximum, dans les quartiers Alto da Alegria, Santo André, Bela Vista (Fig. 5.3), ainsi que dans le district de Caldas, construit sur les formations colluviales du pied de la corniche de la Chapada. Les facteurs possibles de déclenchement de tels glissements sont les mêmes qu'à Crato : lithologie (terrains plus ou moins meubles, toutefois sans la présence de blocs analogues à ceux des terrasses de Crato), pentes fortes, absence d'assainissement, fuites dans les conduites d'eau clandestines, etc. Ils sont surtout susceptibles de se produire lors de fortes pluies : soit ils menacent d'emporter les habitations construites au sommet du talus, soit ils menacent d'ensevelir celles qui sont construites en contrebas.

À l'inverse, ceux des glissements de terrain de grande ampleur qui ont été identifiés se concentrent en général sur des pentes situées hors des zones habitées (à l'exception du quartier

Belmonte, à Crato), dans la corniche et sur les premières pentes de l'escarpement de la Chapada. Comme on l'a vu (chapitre 3), la plupart correspond à des glissements rotationnels (*slumps*) généralement lents et probablement fixés depuis longtemps, à l'exception de l'un d'entre eux (celui de Coruja, à Crato). Sur la commune de Barbalha, les glissements de Engenho do Meio, Farias et de Macaúba (Fig. 3.9) présentent également des fronts très pentus et hérissés de blocs qui peuvent indiquer un âge relativement récent (Fig. 3.10 A; Fig. 5.9 A et B).



Figure 5.9. Fronts de grands glissements de terrain rotationnels. **A.** Glissement de Coruja près de Bebida Nova (Crato). Photo: A.O., Magalhães, 2010. **B.** Front de la langue de débris prolongeant le glissement rotationnel de Macaúba (SE d'Arajara, Barbalha). Photo: J.P. Peulvast, 2013.

Ces grands glissements occupent un linéaire très important dans les rentrants érosifs de Crato et Barbalha, de l'ordre de 20 km, où ils forment une frange discontinue de 1 à 2 km de largeur. Cependant, la question de leur prise en compte en tant qu'aléas reste posée en l'absence de données sur les âges et les possibles réactivations de ces mouvements. Compte tenu de la quasi-absence de phénomènes signalés et documentés avec certitude depuis le XVIII^e siècle, leur fréquence est probablement basse à très basse, impliquant de longues phases d'inactivité propices à l'oubli ; c'est encore plus marqué pour les phénomènes de type glissement-avalanche de débris comme celui de Carretão (sud de Crato), qui a emporté à une époque encore inconnue un pan de la Chapada sur 1,5 km de longueur. Sa cicatrice concave est adjacente à un promontoire raviné de largeur comparable situé juste à l'ouest (Chico Gomes), dont la position avancée 400-500 m au-dessus des bassins versants des Rios Granjeiro et Saco Lobo pourrait justifier une étude et une surveillance approfondies (Fig. 3.9 ; Fig. 3.13). La survenue d'un tel phénomène, qui a également pu se produire à Belmonte dans un passé plus reculé (Peulvast *et al.*, 2011), serait évidemment catastrophique, puisque les zones d'étalement d'un tablier de débris, partiellement guidées par les vallées comme cela s'observe pour celui de Carretão, coïncideraient avec une grande partie de la ville de Crato. Un risque à la fois trop improbable et impensable pour être réellement pris en compte, sauf étude plus approfondie.

Enfin, les coulées de débris et laves torrentielles dont les dépôts ont été identifiés le long de certaines des principales vallées de la région d'étude correspondent à des phénomènes probablement moins rares que les grands glissements, mais tout aussi mal datés. Leur canalisation par les vallées existantes et la disposition de leurs dépôts en terrasses étagées (jusqu'à deux le long des Rios Granjeiro et Salamanca) indique de probables répétitions de ces phénomènes le long des mêmes axes à intervalles plus ou moins éloignés, de telle façon que l'aléa qu'ils peuvent représenter peut être localisé dans les mêmes zones, jusqu'à 4,5 km du pied de la Chapada (Fig. 3.9). Aucun d'entre eux ne concerne des zones densément habitées sur le territoire de Barbalha. Ils ne seront donc pris en compte que sur la commune de Crato, essentiellement dans les bassins-versants du Rio Grangeiro et accessoirement dans celui du Rio Saco. La présence locale, par exemple à Luanda (terrains du club AABEC, sud-ouest de la ville) de grands volumes mammelonés de matériau colluvial à matrice argilo-sableuse, au pied de la corniche de la Chapada en tête des vallons amont du Rio da Batateira et du Riacho das Piabas, pourrait contribuer à alimenter de futures coulées de débris ou laves torrentielles. Cependant, l'entière privatisation de ces terrains ne nous a pas permis d'en cartographier l'extension exacte ni d'en apprécier le volume. On peut simplement dire que ces masses meubles s'ajoutent aux grandes quantités de matériaux susceptibles d'être remobilisés le long des talwegs par sapement des basses terrasses lors d'épisodes d'écoulement particulièrement violents.

5.2.2. Enjeux et vulnérabilité

Hors des secteurs ruraux, les aléas recensés dans ce travail concernent principalement d'étroites parties des quartiers centraux des villes de Crato et Barbalha (aléa inondation), tandis que les autres touchent plus souvent les secteurs ruraux ou en voie d'urbanisation, beaucoup moins densément occupés et peuplés, mais pourvus d'habitats et d'infrastructures (routes...) éventuellement menacés.

5.2.2.1. Enjeux et vulnérabilité à Crato

En ce qui concerne les inondations, c'est à Crato que les enjeux sont les plus considérables. Chaque crue menace en effet les infrastructures concentrées le long du « canal » du Rio Granjeiro, en particulier les deux avenues qui le longent, les ponts et les passerelles reliant les quartiers situés de part et d'autre, ainsi que les rues parallèles, transversales ou obliques sur une largeur de 100 à 200 m. Les constructions étant dépourvues de sous-sol, les inondations se limitent aux rez-de-chaussée ; elles n'atteignent jamais les étages. Notons que le secteur inondable se confond avec le lit et la basse terrasse du Rio Granjeiro, lesquels sont potentiellement exposés aux coulées de débris ou laves torrentielles qui pourraient se produire lors d'événements exceptionnels. L'analyse par quartier montre que sont exposés aux inondations et autres aléas les secteurs et les édifices suivants (Fig. 5.10) :

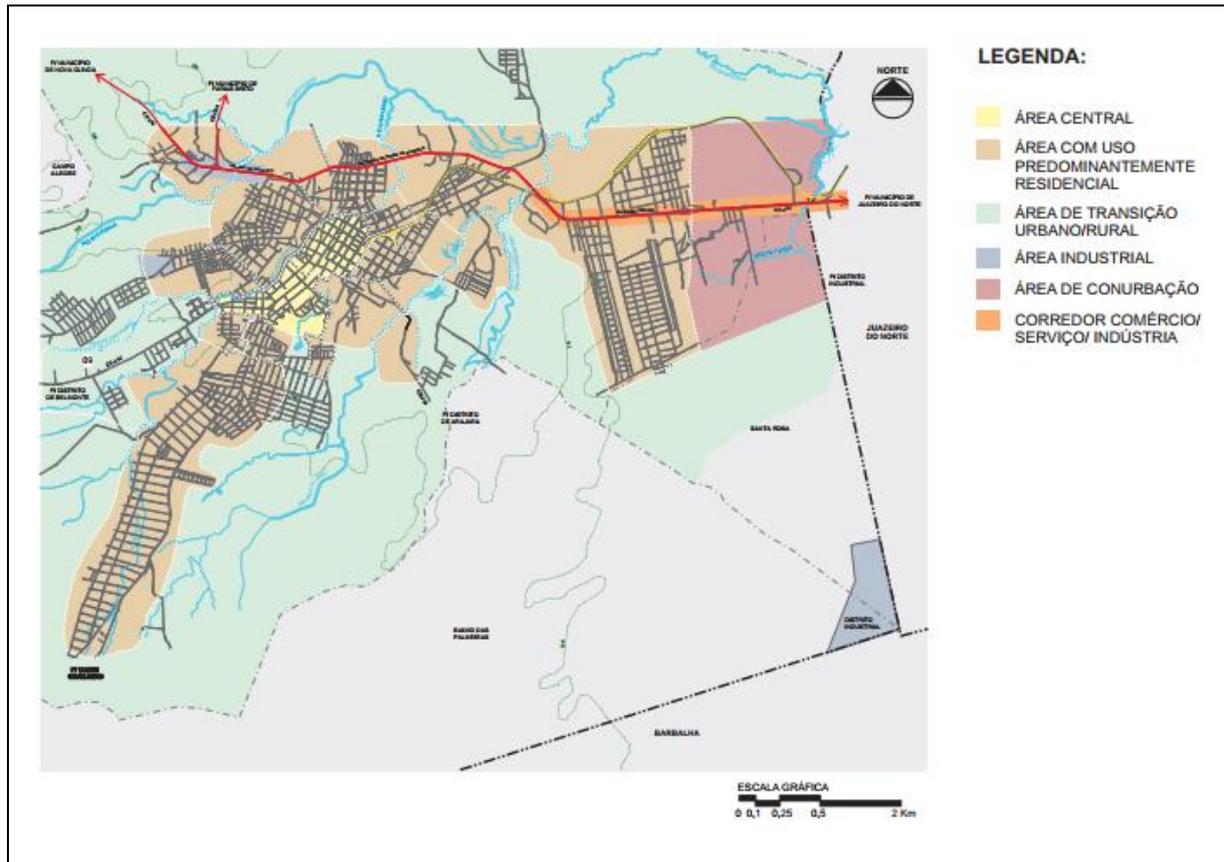


Figure 5.10. Occupation des sols dans la zone urbaine de Crato. Extraits du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005, sur fond hydrographique (en haut) et sur image satellite (en bas). Les quartiers du centre-ville pouvant être concernés par les inondations correspondent principalement à la zone centrale (*área central*) et à des zones d'usage principalement résidentiel (*área com uso principalmente residencial*). (Source : PDM, 2005).

Quartier Centre : Le plus ancien de la ville, c'est son cœur fonctionnel, administratif, bancaire et commercial, le plus densément occupé et le plus sensible (Fig. 5.11). La zone inondable s'étend sur 100 à 200 m de largeur dans la plaine alluviale, en rive droite du chenal bétonné du Rio Granjeiro et le long de la partie aval du Riacho da Vala (busée, avec des regards ouverts, émissifs en cas de crue, au milieu de l'avenue Tristão Gonçalves).

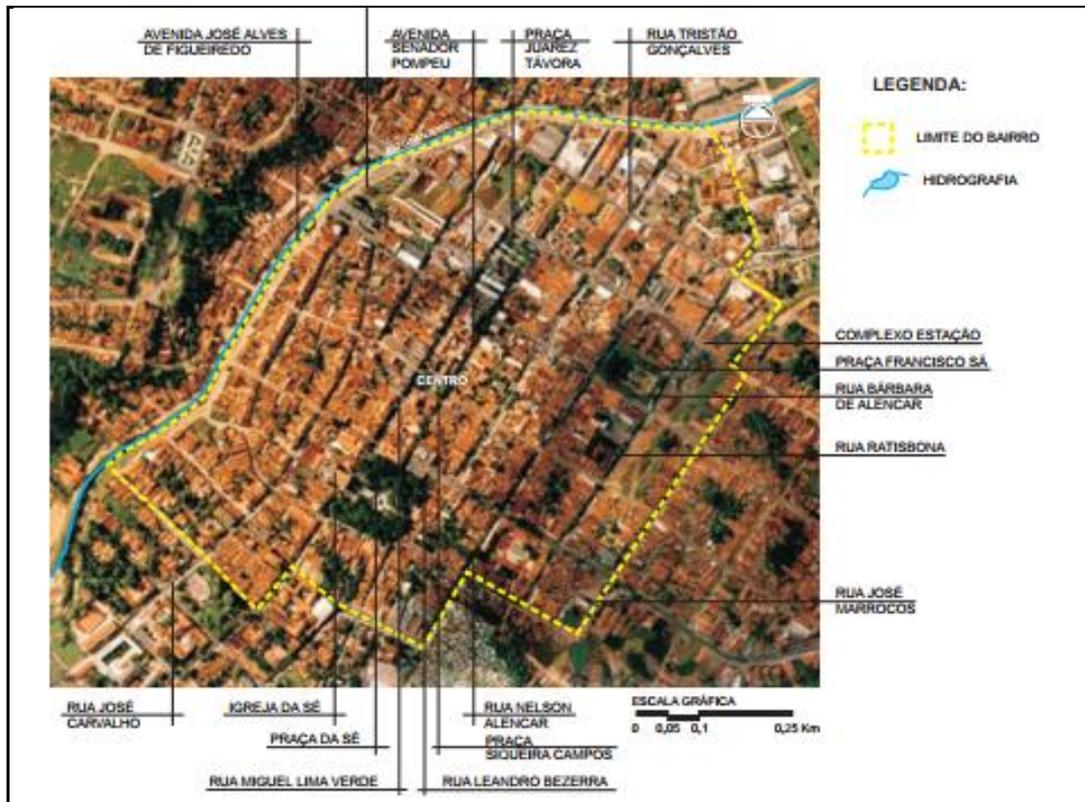


Figure 5.11. Le quartier Centre de Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Cette zone concentre le long de ses rues de nombreux magasins, boutiques, banques (Caixa Econômica, BRADESCO) et appartements situés en rez-de-chaussée (Fig. 5.12), dont seule une petite partie est surélevée par rapport aux trottoirs (par exemple, la Poste, la Banque du Brésil). Les hauteurs d'eau y atteignent 1 à 1,5 m, c'est-à-dire assez pour dégrader ou détruire les locaux et les véhicules affectés et pour menacer la vie des personnes, surtout s'il existe un fort courant (Fig. 2.15 ; Fig. 4.2). Parmi les édifices publics situés en zone inondable, les plus notables sont la mairie et un marché traditionnel (Camelódromo do Crato) aux allées particulièrement exigües. En revanche, la cathédrale et ses abords (noyau urbain initial) sont épargnés du fait de leur position légèrement surélevée. La saturation de la voirie par des véhicules en circulation ou en stationnement, ainsi que le grand nombre de personnes sur leurs postes de travail ou dans les rues rendent potentiellement très dangereuses les

crues éclair pouvant survenir en cours de journée dans ce quartier, en particulier dans l'avenue José Alves de Figueiredo qui longe le canal.



Figure 5.12. Le centre-ville de Crato et ses enjeux en 2011. **A.** Rue Barbara de Alencar (quartier centre, en zone inondable). **B.** Le cimetière de Crato et le Riacho da Vala (quartier Pimenta, 2007). Photos : A.O. Magalhães.

Quartier Lameiro (Fig. 5.13) : situé en interfluve entre les Rios Granjeiro et da Batateira, il est pour l'essentiel à l'abri des inondations, bien que quelques murs et maisons situés à l'amont de l'unique pont qui dessert ce quartier depuis le centre-ville soient très proches de la berge du Rio Granjeiro régulièrement sapée par les crues (Fig. 1.25 B).

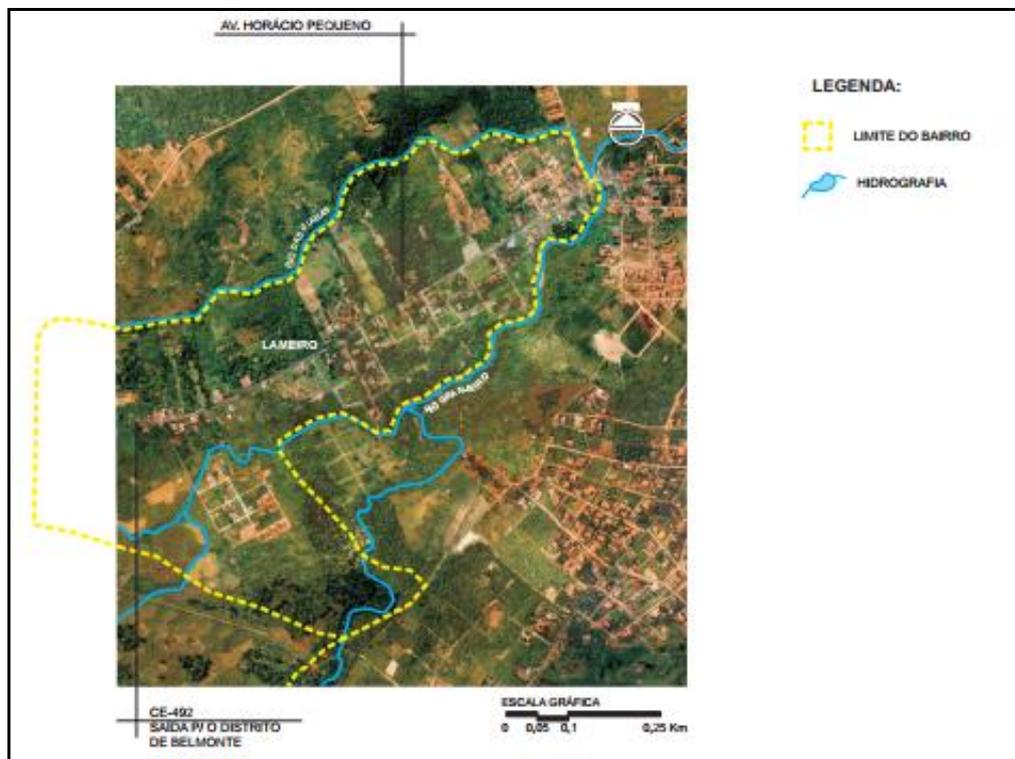


Figure 5.13. Le quartier Lameiro à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Il en est de même pour la rue qui longe la partie aval du Riacho das Piabas (Fig. 5.14 A). Le pont lui-même est vulnérable, une de ses piles étant apparue largement déchaussée et en porte-à-faux après la crue de janvier 2011, par suite de la reprise d'érosion du chenal rocheux sur le fond duquel elle s'appuie (Fig. 2.11).

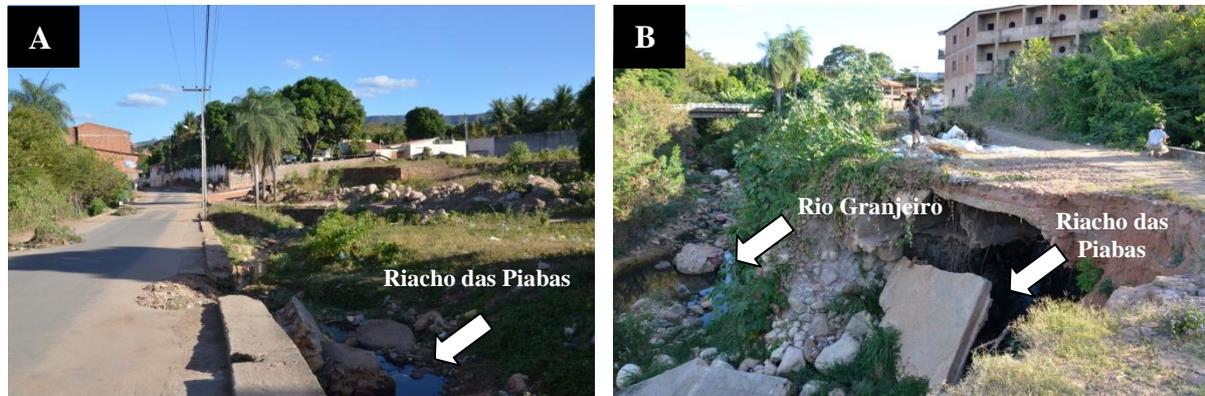


Figure 5.14. Dégradations de voirie aux abords du pont de Lameiro (Crato). **A.** Partie aval du Riacho das Piabas, avec sapement de la chaussée adjacente (août 2014), **B.** Confluence du Riacho das Piabas en aval du pont de Lameiro. Destruction partielle de la buse en béton et de la rue parallèle au Rio Granjeiro après la crue de 2011 et une crue mineure en octobre 2012. Photos : J.P. Peulvast.

Quartier Misericórdia (ou Novo Crato) : Entre les quartiers Lameiro et Seminário, c'était jusque récemment (avant 2017) un quartier de résidences précaires et de bas niveau socio-économique.

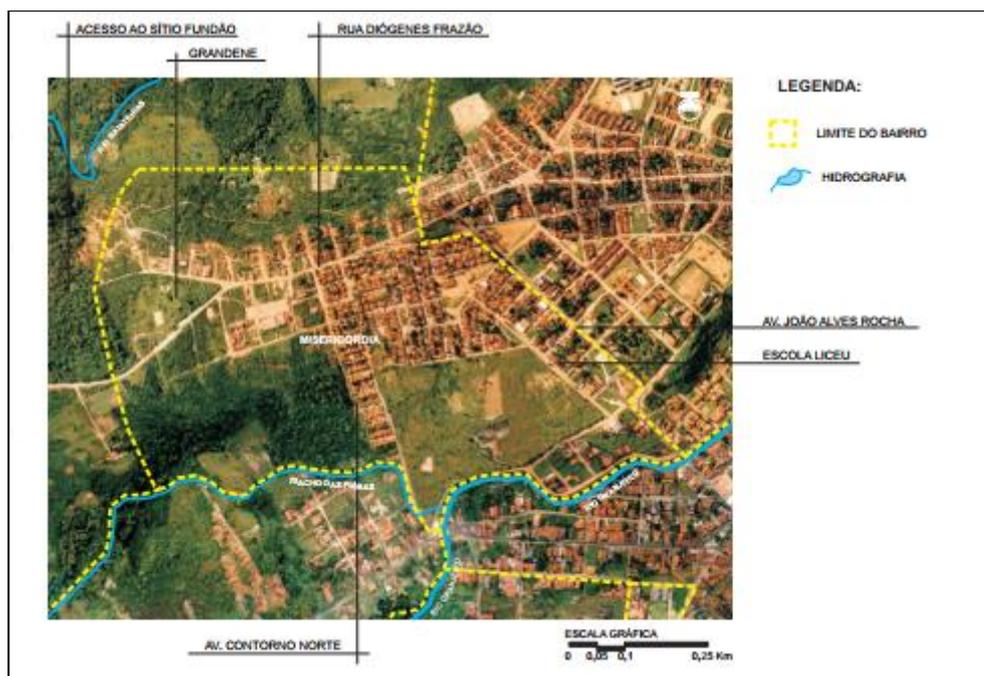


Figure 5.15. Le quartier Misericórdia à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Des lotissements y sont en cours de construction. Seule sa partie basse jouxte le Rio Granjeiro, en rive gauche, immédiatement à l'amont du chenal artificiel (Fig. 5.15). Pouvant jouer un rôle d'étalement des crues par expansion latérale du chenal, le lit majeur est particulièrement sensible aux actions de sapement de la basse terrasse qui, en 2011, ont partiellement détruit la rue qui le longeait, ainsi que la buse construite à la confluence du Riacho das Piabas (Fig. 5.14 B).

Quartier Pimenta : Un des autres grands quartiers vulnérables aux inondations, avec le Centre (Fig. 5.16).

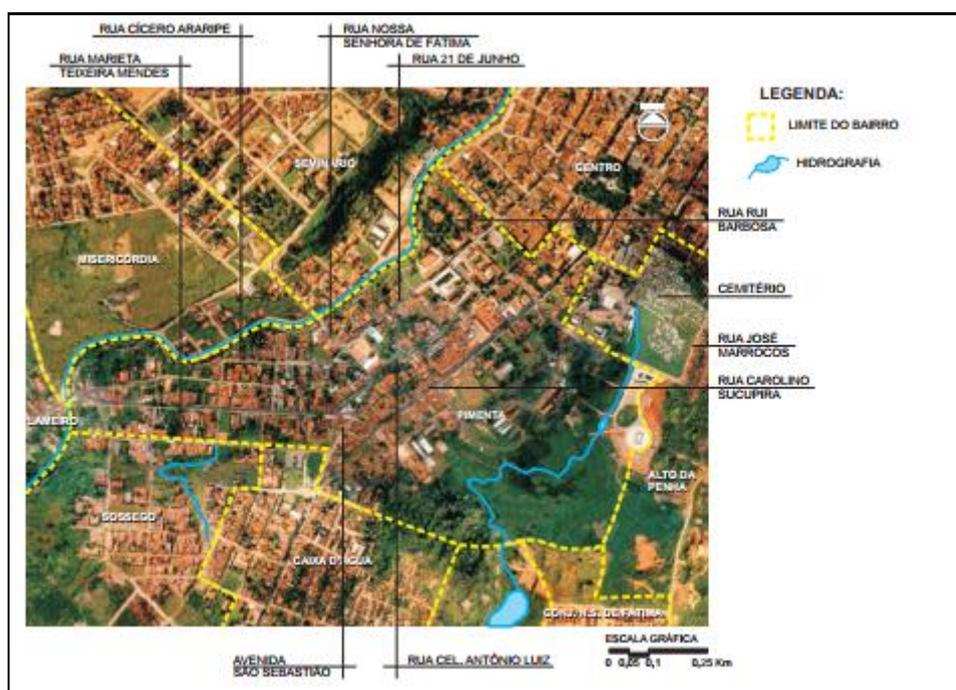


Figure 5.16. Le quartier Pimenta à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

La bande inondable n'est pas très large (quelques dizaines de mètres) mais elle s'élargit à la faveur des rues transversales, et l'avenue qui longe le canal est particulièrement menacée, de même que les habitations et autres constructions qui la bordent, dont l'église Nossa Senhora da Fátima (Fig. 5.17 A). Les établissements scolaires du secteur, les gymnases et autres installations sportives, ainsi que la URCA sont restés à l'abri des dernières grandes inondations, comme ceux de la rive gauche (Fig. 2.11). En revanche, le cimetière, rattaché à ce quartier mais localisé dans le vallon du Riacho da Vala juste en aval du parc des expositions, est exposé au gonflement du ruisseau lors des fortes pluies, capable de détruire et d'emporter certaines sépultures de la partie basse et leur contenu, selon plusieurs témoignages et articles de journaux (Fig. 5.12 B).



Figure 5.17. Vulnérabilité des abords du canal du Rio Granjeiro dans les quartiers Pimenta et Seminário : destructions consécutives à la crue du 28 janvier 2011. **A.** Abords de l'église Nossa Senhora da Fátima (Pimenta). **B.** Abords du collège Objetivo (Seminário). Photos : A.O. Magalhães, 2011.

Quartier Seminário : Naguère exposé au risque de ravinement (*voçoroca*) localisé dans le rebord de haute terrasse et de glacis qui en forme l'essentiel, il reste exposé aux inondations dans la bande de 50 m de largeur qui longe le Rio Granjeiro en rive gauche (Fig. 5.18). Outre l'avenue parallèle au canal, sévèrement dégradée lors des dernières crues, plusieurs ponts et édifices sont exposés à l'inondation ou même à la destruction partielle, en particulier le collège Objetivo (Fig. 5.17 B), qui a dû faire l'objet de protections particulières après 2011 (parois de béton renforcées, remblai compacté à l'arrière).

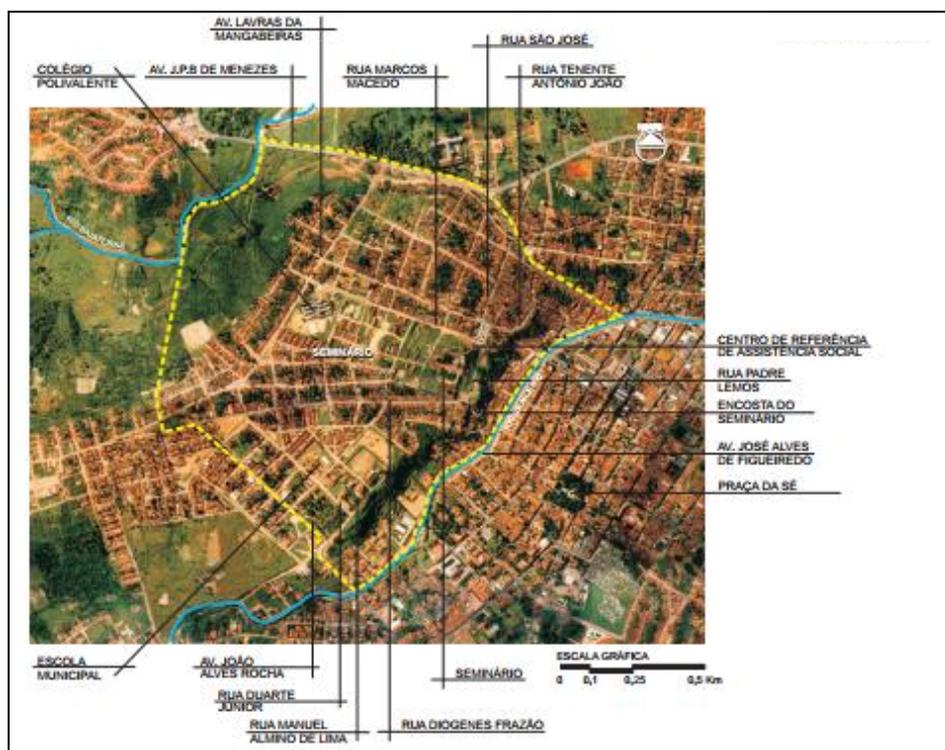


Figure 5.18. Le quartier Seminário à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Quartier Sossego : dans ce quartier résidentiel construit sur les pentes d'une lanrière de glacié dominant la plaine alluviale, seul le versant abrupt et localement élevé qui domine le Rio Granjeiro à l'ouest présente des signes d'instabilité ; il s'agit de petits arrachements dans la rive concave du méandre qui précède le chenal rocheux proche du pont de Lameiro. Mais ce secteur reste boisé (végétation secondaire), sans aucune occupation proche (Fig. 5.19).

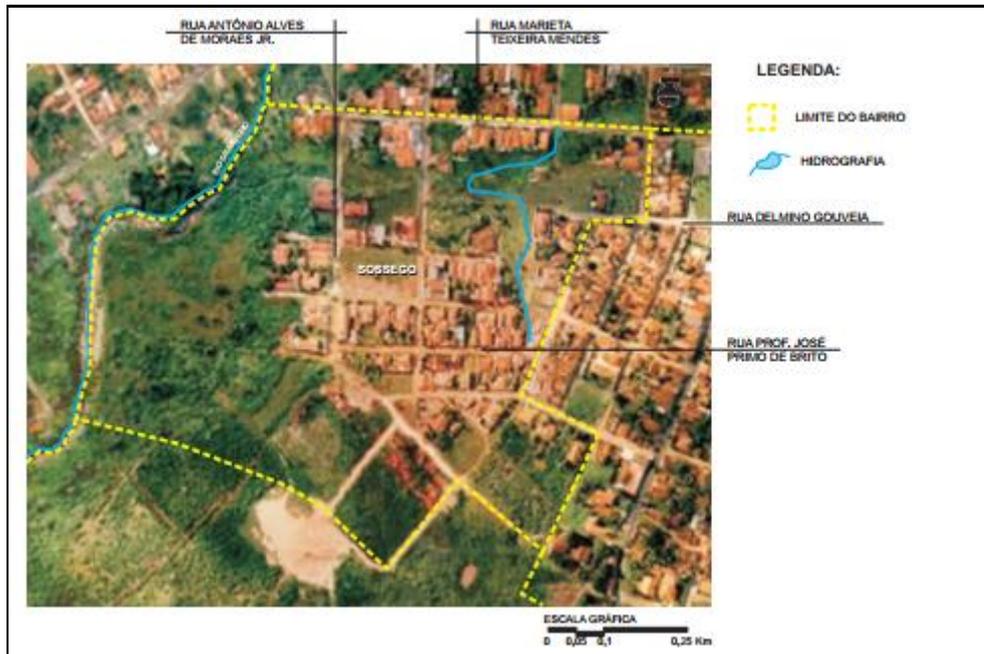


Figure 5.19. Le quartier Sossego à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Quartier Granjeiro : Quartier résidentiel d'abord bâti le long de la route reliant le quartier Pimenta aux contreforts de la Chapada do Araripe (sources du Rio Granjeiro) (Fig. 5.20). Constitué majoritairement de grandes propriétés et de résidences de standing, il est en position d'interfluve, mais il s'étend également dans la haute vallée évasée du Rio Granjeiro où les rues, transversales par rapport au ruisseau, sont bordées de propriétés construites à cheval sur le cours d'eau, sur la large bande de dépôts de coulées de débris qui occupe le fond de la vallée sur au moins 200 m de largeur.

Les crues déjà constituées dans cette partie amont peuvent y abattre les murs de clôture et détruire les ponceaux, comme cela s'est observé lors des derniers gros épisodes pluvieux. Le versant est du vallon est également occupé par des lotissements dont certains subissent les effets de l'instabilité du sous-sol (couches de transition argilo-marneuses entre les grès Batateira et le calcaire Crato, localement exposées) : affaissements de terrasses, maisons fissurées par suite de phénomènes de gonflement-rétraction des argiles.

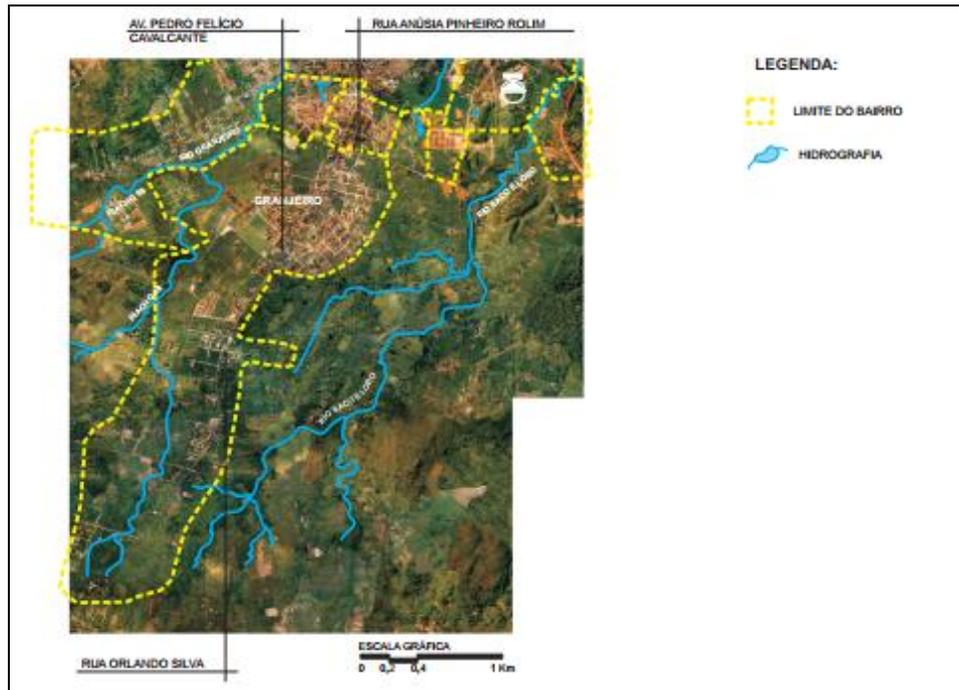


Figure 5.20. Le quartier Granjeiro à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Parmi les « *distritos* » (hameaux), celui de Belmonte, au SW de la ville, est le plus proche de la Chapada (Fig. 5.21). Il est bâti sur ses contreforts, entre 500 et 760 m d'altitude, sur les dépôts démantelés, riches en blocs de grès Exu, d'un ancien glissement de terrain (Fig. 3.9). Occupant une crête d'interfluve entre le haut bassin du Rio Grangeiro et un des entonnoirs de sapement servant de source au Rio da Batateira (club Serrano), il paraît peu exposé à de nouveaux mouvements de terrain.

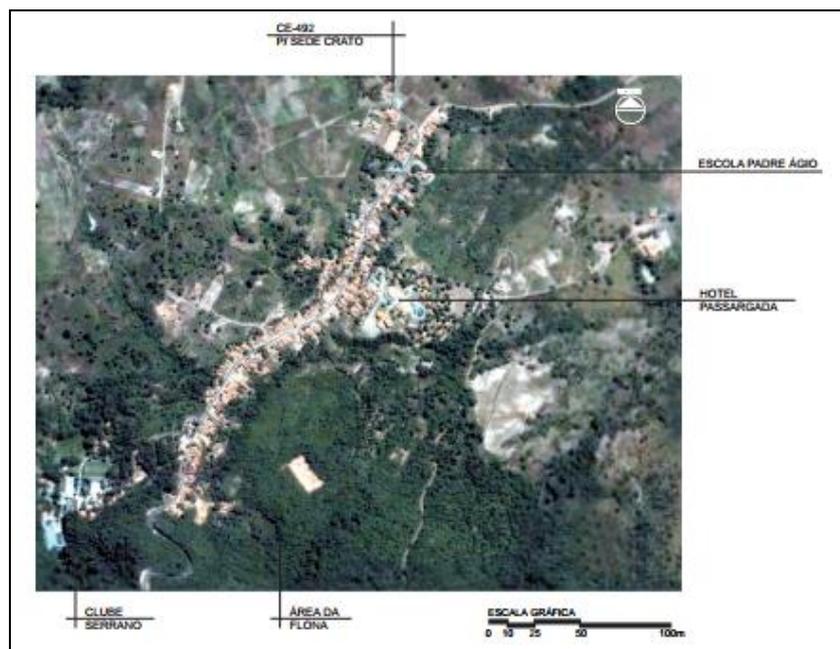


Figure 5.21. Le *distrito* de Belmonte à Crato. Extrait du « Plano Director Municipal (PDM) do Crato », 2005.

Cependant, les pentes ravinées de l'ancienne cicatrice de glissement, éventrées par la route qui monte à la Chapada, sont régulièrement sujettes, au-dessus comme en contrebas de cette route, à de petits glissements affectant les paquets d'altérites argileuses préservées dans la pente et emportant la couverture forestière sur plusieurs dizaines de mètres de longueur. Ces pentes doivent donc être considérées comme instables mais ne surplombent pas directement les zones habitées.

5.2.2.2. Enjeux et vulnérabilité à Barbalha

Les enjeux paraissent plus limités sur la ville de **Barbalha**, où les zones inondables ou soumises à des phénomènes d'érosion restent relativement restreintes en superficie. En ville, ce sont essentiellement des zones résidentielles densément à modérément occupées qui sont concernées, ainsi que la voirie adjacente au chenal du Riacho do Ouro, mais on a vu plus haut que certains établissements publics, en particulier un important complexe hospitalier (Hospital São Vicente de Paulo) situé dans le quartier Centre, sont sujets à des inondations (Fig. 5.22).



Figure 5.22. Le centre ville de Barbalha. Image Google Earth, 2018.

Pour le reste, ce sont surtout des quartiers d'habitat plus ou moins précaire, peu denses, situés dans les versants des collines avoisinantes et sur les contreforts de la Chapada qui sont exposés à des phénomènes d'érosion et d'instabilité. Ces phénomènes y sont accentués par des terrassements inappropriés et des rejets de déchets ou d'eaux usées. Dans ce cas, ce sont surtout des vies humaines plus que des biens de valeur collective ou patrimoniale qui peuvent être en jeu en cas de phénomènes brutaux et catastrophiques. Quant aux grands mouvements de terrain, leurs dépôts généralement

stabilisés ne sont généralement occupés que par des propriétés (*sítios, fazendas...*), dispersées au sein d'un environnement resté rural (cultures, pâturages, couverts forestiers dégradés).

5.2.3. Croiser aléas, enjeux et vulnérabilité : vers une cartographie des risques naturels à Crato et Barbalha

5.2.3.1. Principes et méthodes

Dans un travail portant sur une approche géographique de la question des risques naturels, les techniques de représentation cartographique des risques paraissent naturellement les plus appropriées pour définir la répartition des aléas, des enjeux et pour proposer un zonage des aires concernées, comme cela se fait lors de l'établissement des Plans de Prévention des Risques d'Inondation en France (PPRI ; voir chapitre 7). Il faut cependant souligner que les aires étudiées restent souvent limitées, et que les observations et les méthodes scientifiques utilisées sont souvent entachées d'approximations inhérentes à l'hétérogénéité des territoires et des phénomènes étudiés, à celle des moyens de les évaluer et de les quantifier, à celle des sources utilisables, etc. (Comby, 2004). Selon cet auteur, « *la carte en matérialisant le risque livre un espace visible utile à l'appréhension et à la gestion du risque mais cet espace reste imparfait car incomplet et aux limites... nécessairement arbitraires* » (p. 84). Il faut aussi pouvoir compter sur la sincérité de ces documents : les cartes sont en principe débarrassées des considérations autres que scientifiques, mais des exemples récents montrent que ce n'est pas toujours le cas, si des « arrangements » ont été passés avec les organismes chargés des études, comme cela s'est vu dans d'autres régions du Brésil à l'occasion de procès concernant par exemple l'aménagement du littoral du Ceará (faits de corruption à l'occasion d'un zonage frauduleux de la zone côtière). Même en dehors de tels cas, leurs imperfections sont particulièrement regrettables, voire dangereuses ou inacceptables lorsqu'elles servent de base à des zonages réglementaires et à la délivrance de permis de construire (erreurs d'évaluation des niveaux de risque, inclusions abusives dans des zones à risques ou omissions dangereuses).

Ce problème apparaît déjà à travers les cartes des aléas établies pour ce travail, avec leurs échelles variées et la diversité des phénomènes représentés (nature, intensité, fréquence). De plus, certains de ces aléas sont difficilement transposables en termes de risque, tant il manque de données sur les périodes d'occurrence des phénomènes impliqués et sur leur fréquence. Leur haute intensité et leur dangerosité (à relativiser dans le cas de la plupart des grands glissements rotationnels, généralement lents : voir tableau 3.1) ne font aucun doute, mais du fait de leur fréquence probablement très basse, leur prise en compte en tant que risques naturels ne peut se faire qu'en cas de réactivations avérées et récentes. À notre connaissance, seul le glissement de terrain de Coruja, à Crato, entre dans cette catégorie ; à l'exception de quelques *sítios* et maisons construites sur la partie distale de ses dépôts ou à proximité (Preguiça), il ne menace aucune aire densément habitée, mais la zone couverte par ses dépôts, et en particulier par sa zone frontale, devrait être signalée comme impropre à toute

nouvelle construction. Ce type de risque sera donc considéré comme modéré à faible, en dépit du caractère potentiellement destructeur de l'aléa correspondant.

Les mêmes remarques s'appliquent aux coulées de débris et laves torrentielles, toujours susceptibles de se reproduire dans les vallées où leurs dépôts ont été cartographiés, souvent sur deux niveaux ou plus, sans que leur fréquence ait pu être déterminée. Là aussi, le niveau de risque sera considéré comme modéré à faible.

Le contraste entre ces zones de risques épars est modéré et la concentration d'un autre type de risque (inondation) en zone urbaine justifie l'établissement de deux essais distincts de cartographie des zones exposées aux risques naturels, à deux échelles différentes. Le premier ne porte que sur Crato et ses environs immédiats car à Barbalha, la faible représentation des zones de risques en dehors de la ville ne justifie pas un tel document. Il est dessiné de façon à inclure, outre les quartiers centraux, les aires plus proches de l'escarpement de la Chapada, menacées par divers types de mouvements de terrain. Il ne reproduit pas l'ensemble des aléas, déjà cartographiés dans ce travail (Fig. 3.9), mais se limite à la représentation des quelques secteurs où ils peuvent représenter un risque, par leur possible réactivation et/ou par la présence d'enjeux (habitations, infrastructures) sur leur tracé. L'autre est dressé à l'échelle des centres-villes, surtout concernés par les inondations. Dans le premier cas, le fond de carte utilisé sera celui utilisé par Costa et Das (2003). Dans le second, les zones de risques seront délimitées sur les images Google Earth les plus récentes (2017), délimitées de manière à couvrir l'ensemble des deux zones centre.

Les données utilisées sont essentiellement qualitatives. C'est en particulier le cas des enjeux et de leur vulnérabilité, la carte (Fig. 5.10) ou l'image (Google Earth) ne pouvant indiquer que leur répartition et la densité des constructions, complétées par la localisation de quelques édifices particulièrement sensibles en cas de crise (mairie, caserne de pompiers...). Il en est de même pour les aléas, pouvant simplement être qualifiés de forts (surtout les crues et inondations, du fait de leur fréquence élevée ou moyenne, et dans les limites des zones délimitées sur les cartes pour les plus fortes crues observées), modérés (la plupart des mouvements de terrain, du fait de leur fréquence très basse ou impossible à évaluer et de la lenteur présumée des grands glissements), ou négligeables. Nous avons montré dans le chapitre 3 que certains essais de cartographie de classes d'érodabilité des sols ou de susceptibilité à l'érosion effectués dans le bassin-versant du Rio Granjeiro, sur la base de grilles de croisement de paramètres eux-mêmes évalués de façon semi-quantitative (Ribeiro, 2004), pouvaient être entachés d'approximations ou d'omissions. Dans ces conditions, la carte des risques ne peut être qu'indicative, sauf dans le cas des zones inondables, où les limites de plus hautes inondations connues ou de la plaine alluviale indiquent avec plus de fiabilité que les modélisations numériques disponibles la répartition des aires menacées.

5.2.3.2. Essai de cartographie des risques naturels à Crato et Barbalha

Notre cartographie n'a aucune prétention à servir de base à une réglementation, même si un des objectifs de ce travail est de contribuer au large corpus de travaux constitué depuis plusieurs années sur la question des risques naturels en vue de leur connaissance, de leur gestion et de leur prévention. Préparés dans le cadre universitaire comme dans les cabinets d'ingénierie, ces travaux relèvent aussi bien de la recherche fondamentale que de la recherche appliquée et sont susceptibles de fournir à tous les acteurs impliqués des bases de réflexion en vue d'une amélioration de la gestion des risques et de la planification urbaine. L'autre apport de notre approche réside dans la prise en compte d'autres risques que le risque d'inondation, même si le résultat paraît modeste dans ses aspects applicables. La raison d'un tel résultat ne réside pas dans l'absence de risques liés aux phénomènes identifiés, mais plutôt, au-delà de cette identification, dans une évaluation qui reste très spéculative.

Malgré leurs échelles différentes, les deux types de cartes (Fig. 5.23 ; Fig. 5.24 ; Fig. 5.25) comportent la même légende, inspirée de celle des cartes des Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) de la réglementation française (SAFEGE, 2014). Elles proposent un zonage des aires de risque en fonction de l'intensité de l'aléa (forte, moyenne ou faible, pondérée par la fréquence, haute, moyenne ou basse), des enjeux et de leur vulnérabilité (zones urbaines de densité forte, moyenne ou faible ; bâtiments et locaux sensibles : centres administratifs, écoles, hôpitaux, locaux commerciaux, artisanaux et industriels...). Sur cette base, apparaissent des zones en rouge (risque maximum), en bleu (risques modérés) et en blanc (risque nul ou non identifié). Il reviendra à l'analyse comparative menée plus loin (chapitre 7) de détailler les implications de ce zonage en matière de préconisations possibles pour une meilleure prévention.

La carte générale de Crato et de ses environs immédiats (Fig. 5.23) indique les grandes lignes de la répartition des zones de risques les mieux identifiées. Les secteurs concernés occupent une superficie assez faible, en particulier dans les environs ruraux, où les phénomènes sont dispersés (sauf aux abords de l'escarpement de la Chapada) et les enjeux éventuels surtout représentés par des chemins ruraux et des habitations dispersées ou groupées en petits hameaux.

En rouge (risque maximum) apparaissent principalement la partie inondable de la ville de Crato, particulièrement exposée aux crues éclair du Rio Granjeiro (zone représentée plus en détail sur la carte de la zone urbanisée centrale, Fig. 5.24) et la route de Belmonte à la Chapada do Araripe, régulièrement exposée à des petits arrachements et glissements de terrain. Dans le premier cas, les enjeux sont considérables, en termes d'infrastructures publiques, de locaux professionnels et d'habitat, de biens et de vies humaines. Dans le second cas, beaucoup plus modeste, c'est une portion de route modérément fréquentée, susceptible d'être dégradée ou emportée lors de forts événements pluvieux. Par ailleurs, quelques sites sujets à de petits glissements ont aussi été signalés à la suite d'une campagne de terrain menée par le CPRM dans des quartiers d'habitations précaires établis sur les pentes fortes proches du centre (quartiers Alto da Penha, Pinto Madeira) (CPRM, 2014). Le rapport va jusqu'à préconiser la démolition des quelques habitations menacées, à évacuer et à démolir, mais le caractère ponctuel de ces sites ne permet guère de les localiser sur la carte.

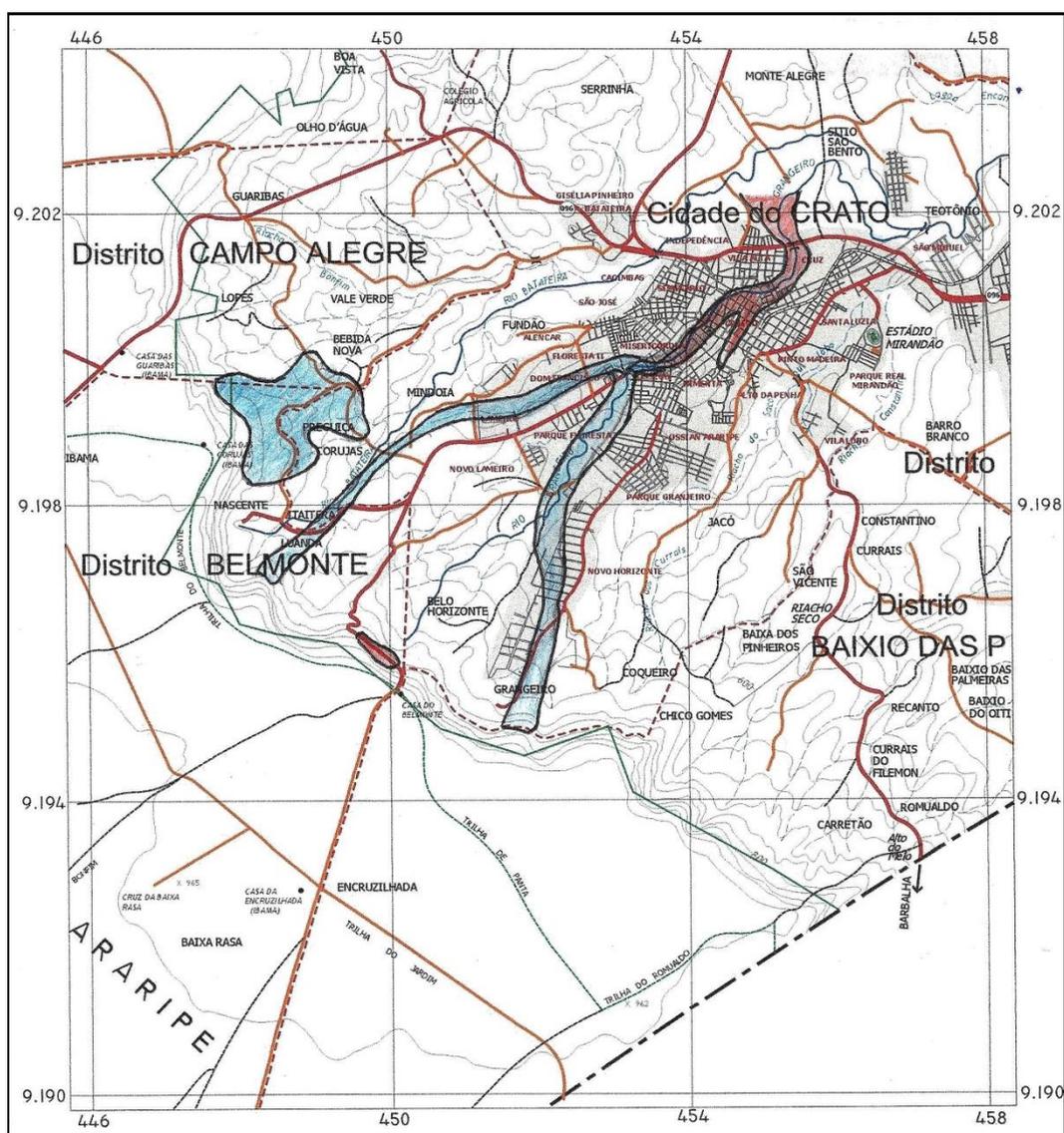


Figure 5.23. Essai de délimitation des zones de risques naturels dans la zone urbaine de Crato et ses environs immédiats. **En bleu** : risques modérés (essentiellement des mouvements de terrain). **En rouge** : risques élevés (essentiellement des risques d'inondation). **NB** : les parties aval des vallées du Rio da Batateira et du Rio Granjeiro, non urbanisées, ne sont pas cartographiées. Fond de carte : Costa et Das (2003). Élaboration par l'auteur.

En bleu sont représentées des zones de risques modérés, essentiellement liés à des mouvements de terrain. Le grand glissement rotationnel de Coruja, qui a connu une réactivation dans les années 1950 (voir 3.3.3), ne peut pas être considéré comme inactif ; les enjeux (quelques habitations, chemins ruraux) n'y sont pas considérables, la vitesse et la fréquence des phénomènes sont basses à très basses, mais le risque ne peut être exclu en cas de constructions nouvelles dans la zone frontale (Bebida Nova). Les coulées de débris ou laves torrentielles descendues de Luanda et de

Grangeiro sont probablement anciennes et leurs dépôts sont en grande partie fixés, sauf le long des chenaux qui s’y emboîtent (Rio Grangeiro, partie aval du Riacho das Piabas). L’urbanisation empiète localement sur leurs dépôts, en particulier dans les parties amont (lotissements des secteurs Grangeiro et Novo Horizonte) et la partie aval (Lameiro, Pimenta) sert d’assise à la voirie et aux constructions qui bordent le chenal du Rio Grangeiro jusque dans le centre ville. En tant que tels, ces phénomènes violents et potentiellement destructeurs ne semblent pas se répéter fréquemment (pas d’occurrence connue depuis le XVIIIe siècle au moins), d’où notre classement dans les risques modérés, mais leurs dépôts très hétérométriques, riches en blocs, sont aisément remobilisables et propices aux sapements, déstabilisations et réalimentations dangereuses sur une bande de quelques dizaines de mètres de largeur en cas de crue éclair ou de lave torrentielle. En témoignent les destructions répétées, depuis les années 2000, de murs et de ponceaux construits sur le cours amont du Rio Grangeiro.



Figure 5.24. Cartographie des secteurs de risques d’inondation (en rouge) dans les quartiers centraux de Crato. (Elaboré par l’auteur sur image Google Earth, 2017). Élaboration par l’auteure (2019).

La carte plus détaillée des zones de risque dans les quartiers centraux de Crato (Fig. 5.24) coïncide pour l’essentiel avec celle des zones inondables définies plus haut. L’ensemble de ces zones est en situation de risque maximum, avec des intensités et des fréquences élevées des phénomènes dangereux. Ont été ajoutés les abords du pont de Lameiro, à l’amont du chenal bétonné (un pont très fragilisé, seul accès aux quartiers sud-ouest de la ville) et les rues voisines de l’hôpital São Francisco, dont l’accessibilité est essentielle pour l’organisation des secours en cas de crise. La mairie est située au cœur de la zone inondable mais la caserne de pompiers est en situation surélevée dans le quartier

Pimenta, avec un accès aisé à tous les quartiers de rive droite (en revanche, ceux de rive gauche sont inaccessibles en cas extrême de destruction des ponts sur le chenal bétonné, l'accès n'étant alors possible que par la route CE 096, au nord de la ville).

La situation est moins facile à définir à Barbalha, où les risques sont un peu plus diversifiés. En ce qui concerne les risques de mouvements de terrain, les analyses précédemment menées sur la principale zone urbaine tendent à souligner leur faible représentation spatiale (Fig. 5.3). Ils n'apparaissent que de façon ponctuelle et dans la catégorie des risques modérés (petits mouvements de terrain d'ordre métrique : Santo André, Bela Vista) sauf en cas de mise en péril d'habitations dans des zones de grands ravinements (risque fort à la tête de la *voçoroca* de Tupinambá). Nous avons vu que les autres grands mouvements de terrain identifiés dans la commune sont inactifs et/ou n'affectent pas de zones habitées (Fig. 3.9).

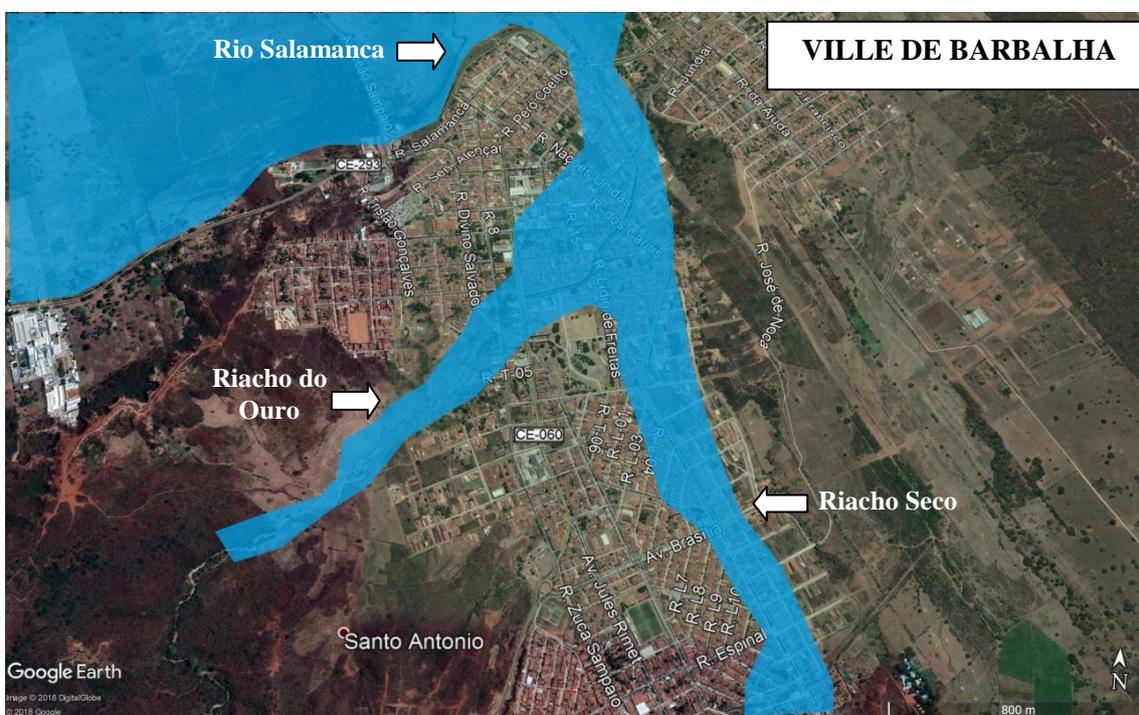


Figure 5.25. Essai de cartographie des secteurs de risques d'inondation (en bleu) dans les quartiers centraux de Barbalha. (Elaboré par l'auteur sur image Google Earth, 2018). Cette cartographie reste purement indicative, compte tenu de l'absence de documents officiels sur les secteurs effectivement inondés lors des crues répertoriées. Élaboration par l'auteure (2019).

Là encore, c'est principalement aux crues et inondations que correspondent les principaux risques identifiés. La lecture des témoignages et articles consacrés aux inondations répertoriées avec certitude dans les dernières décennies (voir 2.3.2) ne fait apparaître aucun phénomène véritablement catastrophique, aucune perte de vie, y compris le long des chenaux bétonnés et buses des Riachos do Ouro et Seco. On y signale tout au plus des chaussées et des maisons inondées sur quelques décimètres

de hauteur et quelques habitations dégradées sur le tracé du Riacho Seco. Sur la base de ces informations, la zone de risque d'inondation correspond approximativement à la plaine alluviale telle qu'elle a été délimitée sur la base des données topographiques (Fig. 5.3 ; Fig. 5.25). La voirie, avec plusieurs avenues parallèles au talweg du Riacho Seco, semble jouer un rôle essentiel dans la circulation et l'expansion de l'eau, le cours naturel étant totalement occulté par les constructions. Les risques d'inondation sont d'autant plus élevés qu'ils dépendent aussi de facteurs conjoncturels. Ainsi, l'état des canalisations et du chenal bétonné du Riacho do Ouro peut faire craindre des obstructions et des embâcles propices aux débordements. Leur encombrement chronique par des débris de toutes sortes jetés par les riverains y est en effet régulièrement dénoncé, par exemple après les crues 2015 (Diário do Cariri).

Plus ponctuellement, les travaux entrepris dès 2015 à l'amont du bassin-versant du Riacho Seco pour la construction du canal de transposition des eaux du Rio São Francisco et ralentis depuis ont entraîné un décapage des sols sur une bande d'une centaine de mètres de largeur en travers du talweg et la mise en place d'un remblai qui montrent déjà les signes d'un fort ravinement sur l'image Google Earth de 2018. Cette zone de ruissellement et d'alimentation de coulées boueuses s'ajoute aux ravines du quartier Santo André et à la zone imperméable du carreau de la cimenterie IBACIP située juste à l'ouest pour constituer potentiellement une source de départ de violents écoulements boueux comme ceux qui ont été décrits au bas du quartier Santo André en avril 2015 (Fig. 5.26).



Figure 5.26. Les parties amont du bassin-versant du Riacho Seco, Barbalha. Image Google Earth, 2018. Le ravinement de la butte du quartier Santo André (voir aussi Fig. 5.7 C) et des remblais du canal de transposition, ainsi que l'aire imperméabilisée du carreau de la cimenterie IBACIP (à droite, près de la route et du canal)

contribuent à la formation de ruissellement et au déclenchement de crues pouvant menacer directement les aires urbanisées (Ciorolândia). Image Google Earth, 2018.

Pour ces différentes raisons, auxquelles s'ajoute l'urbanisation de plus en plus complète de la vallée du Riacho Seco, nous proposons de classer l'ensemble des aires inondables de Barbalha en zones de risque modéré (bleu), surtout parce que l'intensité des phénomènes observés jusqu'ici paraît elle-même plutôt modérée.

Sans portée réglementaire, la cartographie des risques naturels proposée ici est essentiellement indicative. Elle relève de l'approche géographique privilégiée pour ce travail et reste très perfectible, compte tenu des lacunes dans les informations utilisables. Construite de façon empirique, elle pêche sans doute aussi par l'absence de modélisation hydrologique et hydrogéomorphologique autre que celles qui sont citées en bibliographie et dont nous avons relevé les insuffisances. De telles modélisations pourront sans doute être plus fiables dans un proche futur lorsque les données acquises grâce aux matériels de mesure mis en place après les grandes crues de 2011 et des années suivantes auront fourni suffisamment de données sur une durée significative (par exemple la station hydrologique installée en 2014 sur le chenal du Rio Granjeiro à Crato).

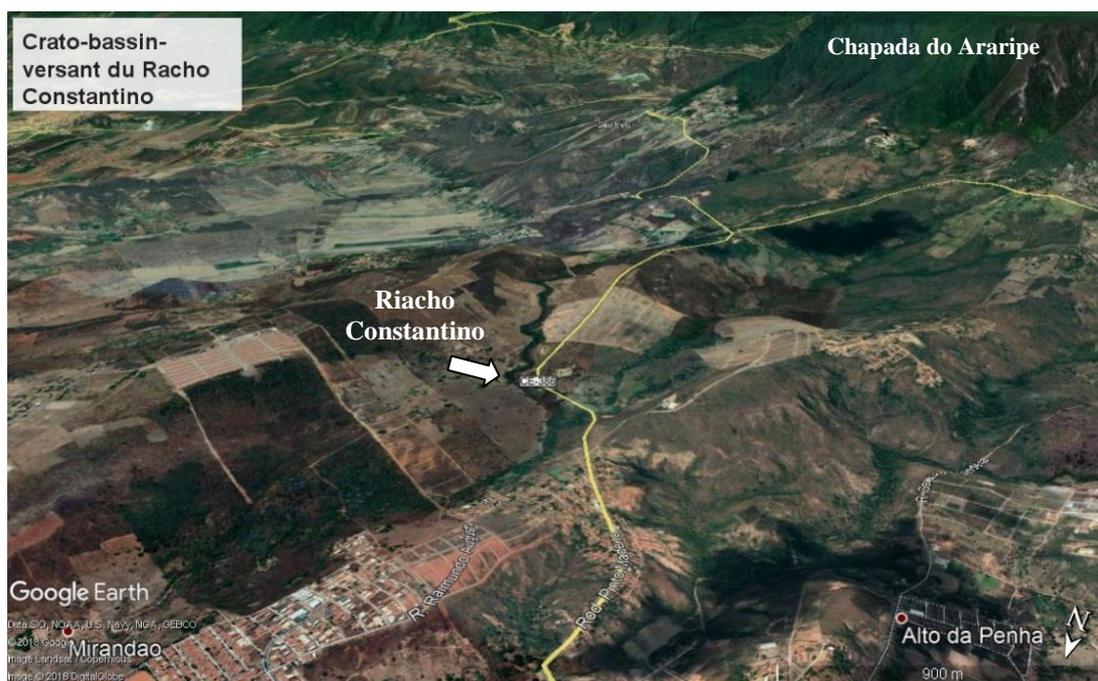


Figure 5.27. Grands lotissements en cours (taches géométriques claires) et zones imperméabilisées dans les parties amont du bassin-versant du Riacho Constantino (Crato). Au fond, les contreforts de la Chapada do Araripe. Image Google Earth, 2018.

Par ailleurs, il est certain que le processus d'urbanisation rapide, en particulier le développement de grands lotissements privés ou institutionnels (programme *Minha Casa Minha Vida*)

sur les interfluves et jusque sur les contreforts de la Chapada (Fig. 5.27) continuera à augmenter les taux d'imperméabilisation des sols et donc les ruissellements responsables d'apports rapides des eaux dans les talwegs, à l'origine de la formation de crues éclair. Dans le cas du Riacho Constantino, jusque là non concerné, il est probable que cette imperméabilisation pourra constituer à l'avenir un facteur de risque pour les quartiers et infrastructures situés à l'aval autour du ruisseau (quartier Mirandão, route Crato-Juazeiro do Norte), même si aucune inondation notable n'y a été mentionnée jusque là.

C'est pourquoi une telle cartographie devrait être évolutive, les phénomènes hydrologiques dangereux étant susceptibles de s'amplifier et de s'étendre à court ou moyen terme. En ce qui concerne les phénomènes érosifs et les mouvements de terrain, ils n'apparaissent que de façon beaucoup plus limitée en tant que risques, mais ne peuvent être négligés. Rappelons que l'environnement des deux villes étudiées est de type semi-montagnard, malgré des altitudes modestes, et que l'effet de domination d'un grand escarpement proche des deux villes, surtout de Crato, reste à tout moment un facteur de risque élevé. Reste à savoir si le cadre réglementaire existant permet un traitement préventif de ces risques, dans le Cariri comme ailleurs au Brésil, au-delà des réponses apportées aux événements catastrophiques.

5.3. Le traitement des catastrophes naturelles dans la région d'étude : cadre politico-législatif de la gestion et de la prévention

5.3.1. Le cadre politique des décisions concernant les risques : prépondérance de l'État Fédéral

Compte tenu de la structure politique et administrative de la République Fédérative du Brésil, les mesures que peuvent prendre les autorités régionales et locales dépendent en grande partie de l'État Fédéral. Celui-ci comporte trois pouvoirs : le Pouvoir Exécutif (Présidence de la République, ministères) ; le Pouvoir Législatif (Congrès National : Chambre des députés, Sénat fédéral) ; le Pouvoir Judiciaire (Tribunal Fédéral Suprême, Tribunaux supérieurs). On ne peut comprendre la façon dont s'est constitué et se met encore en place le système de gestion et de prévention des catastrophes naturelles sans une présentation au moins schématique de son architecture, en particulier de celle du Pouvoir Exécutif où les ministères compétents sont placés directement sous l'autorité de la Présidence de la République (voir Annexe 2).

5.3.2. Législation et organisation administrative au niveau de la Fédération, des États et de la commune (*município*)

5.3.2.1. Organisation politico-administrative

Entreprise après les graves catastrophes survenues dans le sud du pays (Santa Catarina) en 2004, 2008 et 2009, la législation fédérale traitant des catastrophes naturelles au Brésil comporte

essentiellement deux lois récentes. La **loi n° 12.340, du 1er décembre 2010** traite du Système National de Défense Civile (SINDEC) et des transferts de ressources pour les actions de secours, d'assistance aux victimes, de rétablissement des services essentiels et de la reconstruction dans les zones atteintes par les catastrophes. Entre autres dispositions, elle instaure aussi un Fonds Spécial pour les Calamités Publiques (FUNCAP) (www.planalto.gov.br).

La **loi n° 12.608, du 10 avril 2012** institue une Politique Nationale de Protection et de Défense Civile (PNPDEC). Elle organise le Système National de Protection et de Défense Civile (SINPDEC) et le Conseil National de Protection et de Défense Civile (CONPDEC). Elle promeut la création de systèmes d'information et de surveillance des catastrophes.

Cette dernière loi a apporté des avancées importantes pour la législation brésilienne concernant les catastrophes naturelles, en particulier en instaurant une politique de prévention et de réduction des risques. C'est aussi cette loi qui définit les responsabilités du Gouvernement Fédéral, des États et des mairies face à ces catastrophes.

On trouvera en annexe (annexe 3) le contenu du chapitre Ii, section II de cette loi, traitant des compétences des différentes instances (Gouvernement Fédéral, États, communes).

En ce qui concerne la gestion des catastrophes naturelles, il incombe au Pouvoir Exécutif Fédéral de commander les actions de réponse à travers l'application de la législation existante ou la mise en place de nouvelles lois en fonction des nécessités ressenties au niveau des États, des régions et de la population atteintes. Son intervention se fait au niveau fédéral (Présidence, ministères) mais s'étend aussi au niveau des États (représentés par les Gouverneurs) et des communes (représentées par les maires – « *Prefeitos* »).

Au niveau fédéral, les organismes compétents sont : la Présidence de la République ; le Ministère de l'Intégration Nationale (Secrétariat National de la Protection et de la Défense Civile – SINPDEC, et le Conseil National de la Protection et de la Défense Civile – CONPDEC); le Ministère de la Science, de la Technologie et de l'Innovation (Secrétariat des Politiques et Programmes de Recherche et Développement, dont dépend le Centre National de Surveillance et Alertes de Catastrophes Naturelles - CEMADEN) ; et le Ministère de l'Aménagement, du Budget et de la Gestion (dénominations des ministères antérieures à 2016).

Aux niveaux des États et des communes, ces actions sont coordonnées sous la responsabilité de la Défense Civile, qui fonctionne à travers le « *Sistema Estadual de Defesa Civil* » (SEDC). Dans le cas de l'État du Ceará, ce système comporte la « *Coordenadoria Estadual de Defesa Civil* » (CEDEC) ; 11 organismes régionaux de Défense Civile (REDECs), siégeant dans les casernes des corps de pompiers (« *Corpo de Bombeiros* ») ; 184 Coordinations Municipales de Défense Civile (COMDECs) ; des institutions partenaires, gouvernementales et non-gouvernementales, et la population à travers des associations (CEDEC, 2011).

Dès lors qu'une commune se trouve en situation d'urgence ou en état de « calamité publique », un représentant de la Défense Civile de la municipalité doit remplir et envoyer un formulaire de

Notification Préliminaire de Désastre (NOPRED) et/ou un formulaire d'évaluation des dommages, simultanément à la Coordination de la Défense Civile de l'État et au Secrétariat National de la Défense Civile. Cela permet d'officialiser la déclaration de catastrophe (« *desastre* ») par un décret municipal. Ensuite, ce décret est homologué par la publication d'un Arrêté dans le Journal Officiel de l'Union, émise par le Secrétaire National de la Défense Civile ou le Ministre de l'Intégration Nationale (Fig. 5.28). Ce n'est qu'à l'issue de ces procédures que l'État ou la commune recevront l'aide du Gouvernement Fédéral.

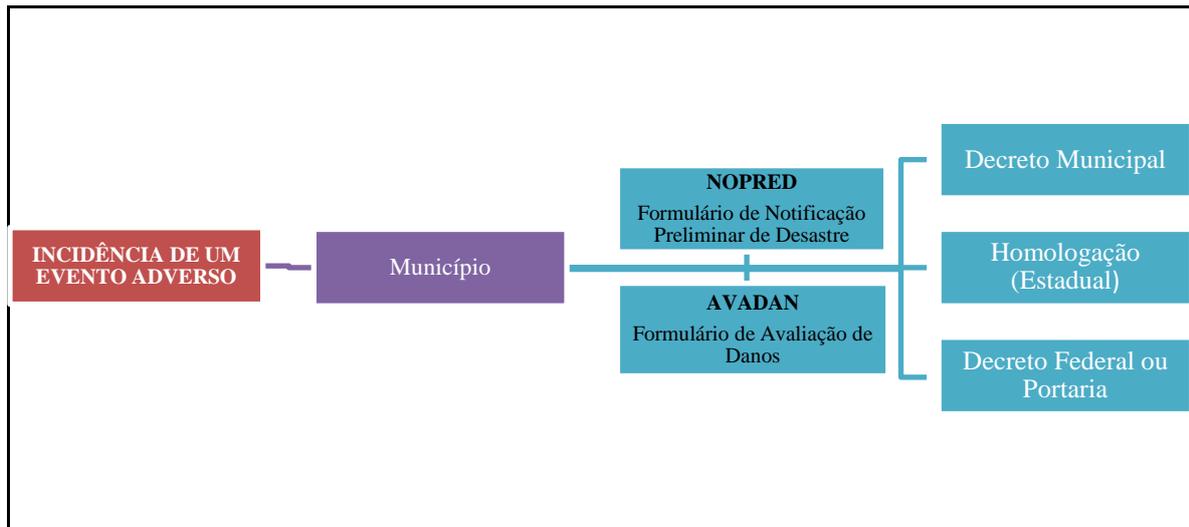


Figure 5.28 : Schéma représentant la procédure de déclaration de catastrophe naturelle au Brésil. Source: Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Ceará/Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED, UFSC, 2011.

5.3.2.2. Schéma d'alerte et de réponse aux catastrophes naturelles

En termes d'actions effectives réalisées par le Gouvernement Fédéral sur les catastrophes naturelles dans le pays, le **Décret N° 5.376 du 17 février 2005** a institué le Centre National de Gestion des Risques et Catastrophes (CENAD), rattaché au Ministère de l'Intégration Nationale et coordonné par le Secrétariat National de Protection et de Défense Civile (SINPDEC) (<http://www.integracao.gov.br>. Accès le : 09.02.2014).

Ce centre a pour objectif la gestion des actions stratégiques de préparation et de réponse aux catastrophes naturelles dans le cadre national et, éventuellement international. Il est chargé de rassembler les informations sur les risques, à partir de l'élaboration de cartes des risques de glissements de terrain et d'inondations, de collecter les données sur les catastrophes naturelles ou technologiques et les dommages associés, etc., en vue d'aider les États et les Communes dans leurs actions auprès des communautés situées dans les zones les plus vulnérables.

Ces actions sont menées selon les axes “*Articulação, estratégia, estruturação e melhoria contínua*” (préparation et réponse aux catastrophes quant à la mobilisation de l’assistance aux victimes) et “*Ação permanente de monitoramento, alerta, informação, mobilização e resposta*” (surveillance des informations sur les catastrophes susceptibles de se produire dans les zones de risque, réduction des impacts, préparation de la population).

Le CENAD fonctionne 24 h sur 24, y compris en fin de semaine et les jours fériés, recevant des informations des autres organes du Gouvernement Fédéral avec lesquels il est partenaire : le Centre National de Surveillance et d’Alerte des Catastrophes Naturelles (CEMADEN), le Service Géologique du Brésil (CPRM), l’Institut Brésilien de l’Environnement et des Ressources Renouvelables (IBAMA), l’Agence Nationale des Eaux (ANA), l’Agence Brésilienne de Renseignement (*Inteligência*) (ABIN), le Centre de Préviation du Temps et des Études Climatiques (CPTEC/INPE), l’Institut National de Météorologie (INMET) et le Centre de Gestion et d’Opérations du Système de Protection de l’Amazonie (CENSIPAM). Ces informations sont évaluées et traitées par les spécialistes du CENAD, puis acheminées aux organes de Protection et de Défense Civile des États et des Communes concernés par les risques en vue d’une alerte correspondant à l’intensité des événements attendus.

De plus, le CENAD coordonne aussi le Groupe d’Appui aux Catastrophes (GADE), composé d’une équipe multidisciplinaire de spécialistes en gestion de crises ayant une expérience en Protection et Défense Civile, dont la mission est de coordonner les actions proposées par le Gouvernement Fédéral, afin d’éviter les doublons et le gaspillage de ressources humaines et matérielles dans l’assistance aux populations victimes de catastrophes.

5.4. L’état actuel de la gestion du risque d’inondation à Crato : gestion des crises et solutions techniques

5.4.1. La gestion des crises, première réponse à la question du risque d’inondation

Au niveau de l’État du Ceará, on note surtout une organisation de la gestion de crises. C’est de la Coordination de la Défense Civile (CEDEC), instituée en 2005, que dépendent les 25 unités opérationnelles de pompiers réparties sur 20 régions administratives. Elle est en outre responsable de la divulgation d’alertes météorologiques, de l’organisation d’actions sociales auprès des communautés établies dans des zones à risques, de l’acquisition et de la collecte de vivres et vêtements pour l’assistance humanitaire dans les zones touchées, de l’homologation des arrêtés de situation d’urgence, de la surveillance sismique et des réserves hydriques, etc. Pour les alertes météorologiques, la FUNCEME (*Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos*) en est encore à l’élaboration d’un projet de prévision de crues à court terme sur la base de modèles climato-hydrologiques dans les régions semi-arides.

Au niveau municipal, le Plan Directeur Municipal (2000) et le Plan de Requalification Urbaine (PRU) de Crato ne font aucune mention de la question des risques. Il en est de même pour le livret intitulé « *Uso do espaço urbano* » publié en 2012 par la mairie. On doit donc se contenter d'analyser les types de réponses aux événements récents, en particulier la crue du 28 janvier 2011.

Au lendemain de cette crue, on relève en particulier le rôle de la mairie, de la Défense Civile et du Corps de Pompiers, qui ont transféré les familles touchées vers des abris d'urgence, des centres de soins, une résidence universitaire et des écoles. Les associations sont aussi intervenues (collecte de dons de nourriture, de vêtements, de couvertures, de médicaments, etc.), ainsi que le Service d'Assistance Sociale (accompagnement psychologique, vaccins aux personnes ayant été directement en contact avec les eaux polluées). Cet événement a aussi été le déclencheur de vastes opérations techniques décidées dans l'urgence (voir 4.4.2), ayant essentiellement pour but de réparer puis de recalibrer le chenal bétonné du Rio Granjeiro.

5.4.2. Solutions techniques : sécurité assurée ou illusoire ?

5.4.2.1. Le réaménagement du « canal » du Rio Granjeiro

Comme cela a été montré plus haut (4.4.4), les travaux censés régler le problème du « canal » ont été réalisés dans l'improvisation et ont surtout semblé répondre au souci de rassurer la population riveraine, aboutissant au remblaiement partiel de certains des segments de parois détruits au moyen de gabions reposant directement sur le fond alluvial mis à nu, accompagnés de variations supplémentaires de profil transversal et de section (Fig. 4.7). Inévitablement, ces réparations de fortune, faites sans aucune étude préalable, ont été mises à mal par la crue du 5 mars 2012 et ont même pu en aggraver les effets sur les berges déjà sapées et privées de protection. Un rapport technique (Prefeitura Municipal do Crato, 2011) réalisé en octobre 2011 après une nouvelle crue dévastatrice (19/10/2011) note les défauts suivants (non corrigés ou même aggravés par les travaux d'urgence) :

- Absence de bassin d'amortissement des crues à l'entrée du canal (entrée brutale d'une onde très turbulente), à l'aval d'un segment « naturel » permettant une certaine expansion latérale des crues (Fig. 5.29).
- Pente du canal (2,6 à 2,8%) typique d'un régime d'écoulement supercritique ou torrentiel, sans aucune structure hydraulique de dissipation de l'énergie, alors que la pente devrait être de l'ordre de 0,01 à 0,015% pour autoriser un écoulement sous-critique (faible énergie cinétique). Les vitesses d'écoulement avaient atteint 11 m/s lors de la crue, ce qui ne pouvait que détruire le canal.
- Galeries de drainage affluentes également en régime supercritique, ou de conduite forcée (la plupart des effondrements de parois se sont produits sur ces confluences).

- Reconstruction de parois verticales en gabions sans fondations suffisantes, et propices à une instabilité structurale hydrodynamique (écoulement supercritique) et géotechnique (surtout au cas où le chenal n'est pas complètement rempli, sans pression suffisante sur la paroi venant compenser celle exercée par l'encaissant et l'eau de la nappe phréatique). La section trapézoïdale est préférable, surtout dans le cas présent où les parois sont assises sur un matériel sensible aux déstabilisations (matériel de terrasse riche en blocs et peu consolidé).
- Variations de calibre et de profil sans transitions.

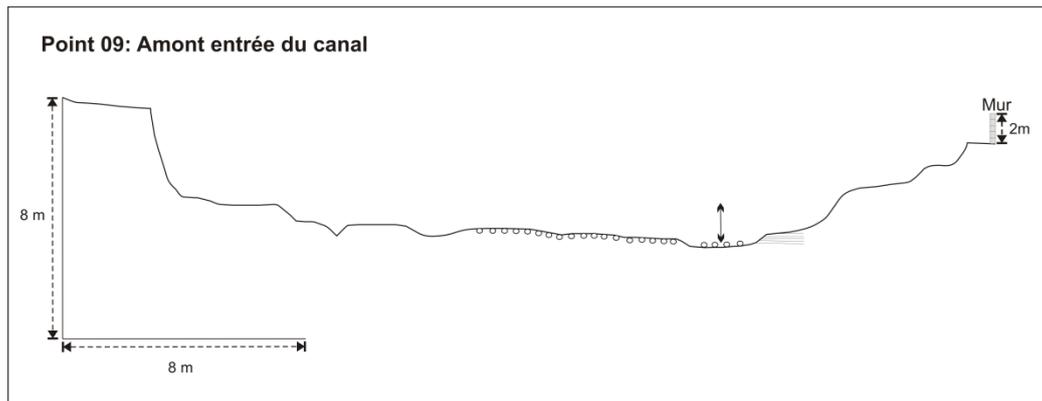


Figure 5.29. Profil transversal du chenal du Rio Granjeiro immédiatement à l'amont de l'entrée du chenal bétonné. Levé topographique de l'auteur. (Profils redessiné par M.L. Carvahó Neta, 2018).

Ce sont donc des travaux de plus grande ampleur qui ont été entrepris en 2012 et 2013, pour un coût de RS 10 M (~2,5 M d'euros). Limités au premier kilomètre amont, où s'étaient produits la plupart des dégâts, ils ne suivent qu'en partie les recommandations de ce rapport. Si les fondations de l'ouvrage, antérieurement posé sur du matériel non consolidé ont été partiellement reprises (Fig. 5.30), l'examen des sections reconstruites et du reste de l'ouvrage ne fait apparaître aucune modification de la pente et montre le maintien ou même l'exagération des variations de calibre et de profil (Sá, 2015 ; Fig. 5.31).



Figure 5.30. Le canal du Rio Granjeiro et sa reconstruction après la crue de janvier 2011. **A.** Destruction partielle après la crue éclair, montrant l’insertion sans fondations dans du matériel de terrasse non consolidé, ainsi que la minceur des plaques de béton. **B.** Reconstruction en juin 2013, avec pose de matériel compacté entre la paroi en béton et le substrat de l’avenue latérale. Quartier Pimenta. Photos : A.O. Magalhães.

Ces variations de profil et de calibre sont spectaculaires au niveau du collège Objetivo et des ponts qui traversent le chenal bétonné dans sa partie amont, que ce soit au niveau des courbes (Fig. 5.31 A) ou des segments plus rectilignes (Fig. 5.31 B).

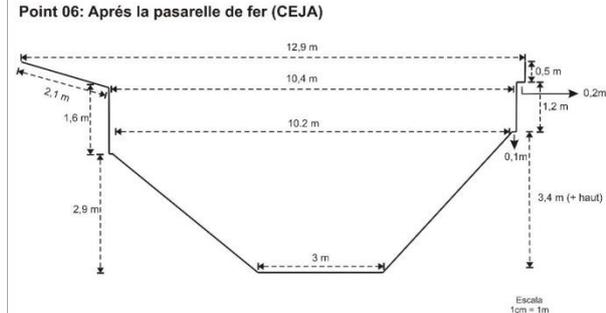
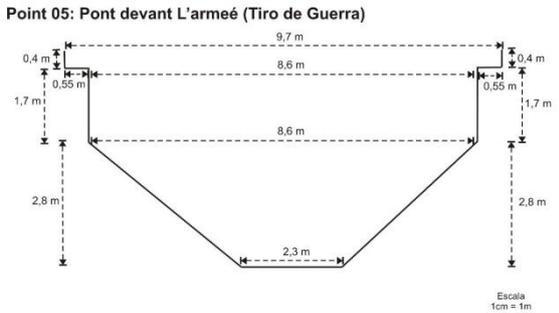
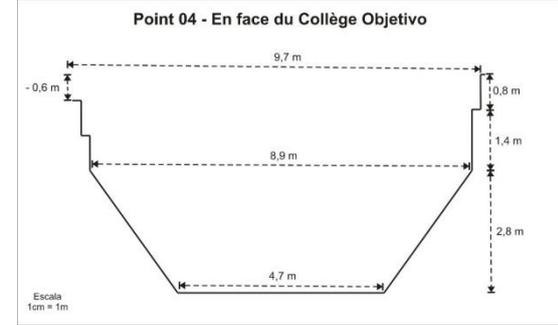
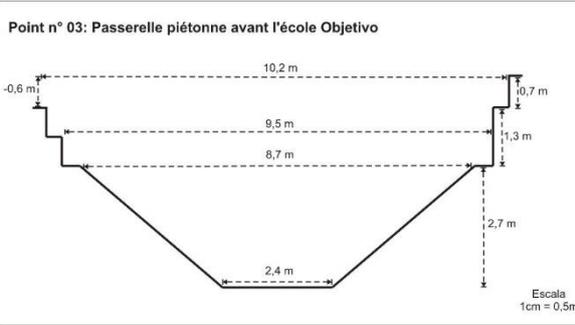
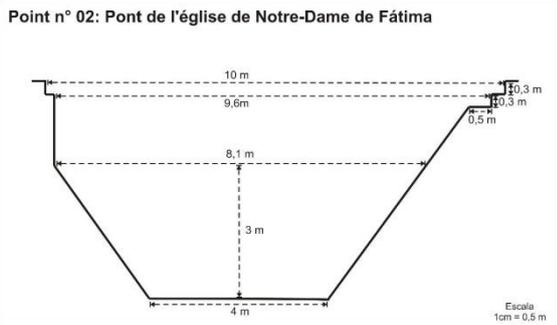
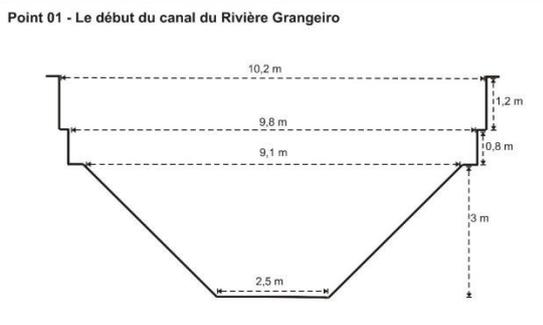


Figure 5.31. Reconstruction du chenal bétonné du Rio Granjeiro aux abords du Collège Objetivo. Photos : A.O. Magalhães, 2014.

Une série de profils transversaux levés en août 2014, à l’aide d’un télémètre laser de marque TruPulse® muni d’un inclinomètre intégré, confirme ce constat (Fig. 5.32) d’une géométrie propice aux effets de ralentissements et d’accélération (effet Venturi) favorables à l’accroissement des turbulences, aux débordements et aux destructions de l’ouvrage.



**Profils transversaux
(Ville de Crato)**



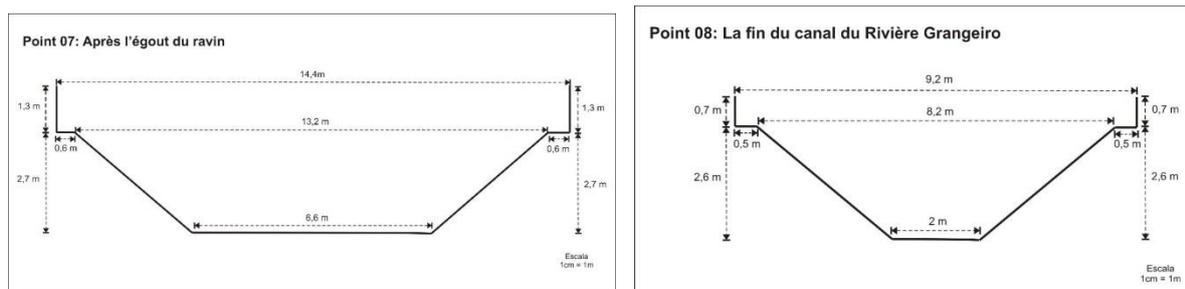


Figure 5.32. Profils transversaux du chenal bétonné du Rio Grangeiro et leur localisation (image Google Earth) à la traversée de la ville de Crato. Levés A.O. Magalhães, août 2014. (Profils redessinés par Carvalho Neta, M.L, 2018).

Les modélisations hydrauliques effectuées par Sá (2015) pour des débits de crue de période de retour de 20 ans, 50 ans et 100 ans (232,8, 256,3 et 274,4 m³/s respectivement) montrent que dans l'état actuel d'un canal restauré sur le premier kilomètre, comme dans le cas d'une restauration complète du même type (et d'un entretien parfait), le mode d'écoulement de l'eau reste supercritique, avec des vitesses de l'ordre de 17 à 20 m/s et une énergie telle que l'ouvrage peut être détruit. La lame d'eau transitant par les différentes sections atteindrait 3,2 à 5,8 m selon les sections, ce qui provoquerait un débordement sur la plus grande longueur, en particulier dans le quartier Centre (rues Araripe, José de Alencar, Barbara de Alencar). Cela sans compter les blocages et embâcles éventuels qui pourraient se former au niveau des sept ponts

5.4.2.2. L'aménagement de la voçoroca du Seminário

Comme on l'a vu, les confluences peuvent aggraver ces phénomènes. C'est le cas au niveau de celle du Riacho da Vala, mais aussi de l'effluent de la voçoroca du quartier Seminário (voir 3.2). Dans la suite des travaux de réaménagement du canal, il a donc été décidé de traiter les phénomènes de ravinement et d'écoulement qui ne cessaient de s'aggraver, et de réduire ces écoulements, tout en valorisant le quartier par un aménagement paysager. Des observations réalisées en août 2014 montrent la nature des travaux de mise en place de cet aménagement (Fig. 5.33). Ils consistent en un talutage (alors non terminé) des versants autour du talweg élargi à l'amont pour le passage des camions et en un remblaiement de la partie aval sur une épaisseur dépassant 20 m. En marge gauche, nous avons pu observer la mise en place d'un système sommaire de canalisations en PVC de petit calibre provenant des habitations voisines, destiné à évacuer les eaux usées (et pluviales ?) vers le drain axial qui doit être enterré sous le remblai. Compte tenu de la forte pente longitudinale du ravin, le remblai s'épaissit vite vers l'aval, sans toutefois restaurer le profil initial du court vallon où s'inscrit le ravin (visible sur la carte de la SUDENE de 1976 : voir Fig. 2.5). Il consiste en 4 banquettes étagées hautes de 2 à 5 m, retenues par autant de murs de contention verticaux épais de 60 cm environ et constitués d'éléments creux en béton de type autobloquant, remplis de terre après la pose (Fig. 5.33 B).



Figure 5.33. Travaux d'aménagement de la *voçoroca* du quartier Seminário. Photos : A.O. Magalhães, 2014.

L'ancrage latéral de ces murs dans la roche altérée paraît minimal (de l'ordre de 1 m ou moins). Le drainage superficiel du remplissage de chaque terrasse est assuré par des caniveaux cimentés axiaux et transversaux. Le tout domine directement les maisons et l'immeuble construits au débouché du ravin. N'ayant pu consulter les documents techniques concernant cet ouvrage, nous ne pouvons pas en évaluer le caractère protecteur. On peut se demander si les caractéristiques observées (murs verticaux peu épais dépourvus de contreforts et faiblement ancrés latéralement, remblais argilo-sableux compactés sans drainage interne apparent) ne comportent pas de dangers potentiels d'écroulement en cas de fortes précipitations et de saturation en eau du matériel.

L'aspect de l'ouvrage terminé paraît satisfaisant, au moins sur le plan esthétique et urbanistique (Fig. 5.34). L'ancienne forme de ravinement est remplacée par un amphithéâtre aux pentes coupées de 5 grands gradins sur une quarantaine de mètres de hauteur. Les pentes des murs qui les délimitent sont très fortes (environ 80°), bien supérieures à l'angle de repos et sans doute peu aptes à contenir une poussée des terres qu'elles retiennent. Le drainage paraît avoir été soigné, au moins en surface. Les drains convergent vers une courte canalisation enterrée qui se raccorde au canal du Rio Granjeiro, de même que les égouts qui convergent vers le même secteur. L'ouvrage se prolonge de part et d'autre de l'ancien ravin, sur le rebord de la haute terrasse, où une rue, une promenade et un square ont été aménagés (Fig. 5.34 B, C).



Figure 5.34. Les aménagements de la *voçoroca* du quartier Seminário en janvier 2016. **A,B.** Photos A.O. Magalhaes, 2016. **C .** vue perspective, image Google Earth, 2018.

C'est seulement avec plusieurs années de recul, comportant des saisons des pluies particulièrement actives, que l'on pourra juger de la stabilité de l'ensemble qui repose sur des grès tendres et altérés couronnés par 1 à 2 m de dépôts meubles à blocs de la haute terrasse. On peut en tout cas se demander si l'objectif de réduction des apports latéraux d'eau de ruissellement au canal (Sá, 2015) peut être atteint, dans la mesure où l'imperméabilisation des sols a été, au total, augmentée sur tout le rebord de la haute terrasse.

5.5. Conclusion du chapitre 5 et de la deuxième partie

La ville de Crato souffre fondamentalement de continuer à se développer sans respecter le cours d'eau qui la traverse. Le petit torrent montagnard qu'est le Rio Granjeiro est, la plus grande partie de l'année, tellement privé de son eau par les captages qu'il en est oublié et que l'on a cru pouvoir le réduire à un ruisseau facilement contenu entre deux parois de béton. Il circule désormais

dans un véritable toboggan aux lignes simplifiées mais irrégulières. Celui-ci n'a pour effet que d'accélérer l'écoulement et de l'acheminer au plus vite hors de la cité, non sans débordements, jusque dans la plaine de confluence où on pourra l'oublier entre les champs de canne à sucre, là où il n'incommoder personne... Ruisseau, mais aussi égout à ciel ouvert, devenant en saison sèche un filet noirâtre qui, serpentant de trou en fissure sur le fond cimenté, incommoder riverains et passants. Et pourtant, pratiquement chaque année depuis ce corsetage inconsidéré, de violentes crues viennent rappeler que l'eau retrouve toujours son chemin et qu'elle peut toujours reprendre ses droits sur son ancienne plaine d'inondation, et même au-delà.

La question qui se pose est donc de savoir comment rendre au Rio Granjeiro son statut de rivière et comment composer avec des excès qui menacent de s'aggraver compte tenu de l'occupation croissante de son bassin-versant. La crue du 28 janvier 2011 et les suivantes sont venues rappeler, après bien d'autres, que cette question est grave, qu'elle demande des solutions urgentes, mais aussi que celles-ci ne peuvent pas être élaborées dans l'improvisation et la dispersion. L'analyse des conditions de déclenchement et des conséquences de cette crue est un pas dans cette direction. Elle vient compléter une approche scientifique plus large et interdisciplinaire dont les résultats devraient s'articuler avec ceux des approches appliquées (ingénierie, urbanisme...). Le but est de fournir aux décideurs les éléments nécessaires à l'élaboration d'une planification urbaine comportant une véritable gestion des risques d'inondation et, plus généralement, des risques « naturels ». Parallèlement, la diffusion de ces résultats auprès de la population devrait améliorer la perception de cette situation, sans laquelle cette gestion peut rester incomprise, mal acceptée et inefficace.

Troisième partie

Discussion générale : La gestion des risques au Brésil et en France : Enseignements d'une analyse comparative

Introduction de la 3e partie

L'élargissement de l'étude et la discussion effectués dans la Partie 3 comportent tout d'abord une revue des catastrophes naturelles et des risques concernant l'ensemble du Brésil ainsi que des mesures prises pour les recenser, les prévoir, les prévenir et les traiter à l'échelle fédérale et à des niveaux plus locaux (chapitre 6). En retour, cette revue permet de mieux comprendre les conditions et les difficultés que connaît la mise en œuvre de ces mesures dans la région d'étude, et elle sert aussi de base pour la brève étude comparative menée dans le chapitre 7. Celle-ci porte principalement sur la façon dont les catastrophes naturelles sont traitées en France, à travers l'exemple de la crue du 15 juin 2010 dans le Var. Elle est surtout basée, comme dans la partie « brésilienne » de la thèse, sur une analyse des effets de cette crue exceptionnelle et des mesures prises par la suite (Plan de Prévention des Risques d'Inondation, en particulier). Bien qu'une brève étude de terrain ait pu être menée à Draguignan, permettant de visualiser les lieux de cette catastrophe et de collecter des informations auprès des services locaux, cette analyse est surtout restée d'ordre bibliographique. Les données obtenues n'en permettent pas moins une mise en perspective des expériences menées des deux côtés de l'Atlantique, tenant compte des spécificités de chaque pays et de chaque modèle socio-économique et politico-juridique.

Chapitre 6 : La question des risques naturels au Brésil : prise de conscience, cadre de la gestion et de la prévention

6.1. Introduction du chapitre 6

La thématique des risques naturels au Brésil a fortement gagné en répercussion, sur la scène nationale comme sur la scène internationale, du fait des pertes humaines, des dommages et des énormes préjudices économiques qui ont affecté plusieurs régions du pays au début des années 2010. Diverses catastrophes (inondations, glissements de terrain, entre autres) survenues au cours de la dernière décennie ont éveillé l'attention de la société civile, mais aussi des autorités politiques, aux niveaux de la Fédération, des États et des Communes, interpellées sur la nécessité de repenser les formes d'usage et d'occupation des espaces, à travers la gestion et l'aménagement des territoires.

Plusieurs questions se posent à ce sujet. Si les catastrophes naturelles (*desastres naturais*) ont bien figuré dans les documents administratifs et les annales historiques du pays depuis quelques décennies, comme le montre l'Atlas Brésilien des Catastrophes Naturelles (CEPED-UFSC, 2013) et les documents complémentaires ; Anuário Brasileiro de Desastres Naturais, 2011 et 2012 : CENAD, 2013 ; Avaliação de Perdas e Danos, 2011 : *in* Banco Mundial, 2012), pourquoi n'est-ce qu'à partir de 2011 que ce sujet est entré dans les priorités gouvernementales, avec l'élaboration et la publication de rapports scientifiques et la promulgation de lois environnementales ? Est-ce dû à une augmentation du nombre de sinistrés enregistrés dans différentes régions ces dernières années ? Ou l'augmentation du nombre de victimes et celle des dommages sont-elles liées à une occupation non contrôlée, toujours plus dense, des aires de risque, à cause des insuffisances de la politique d'aménagement urbain et de la législation ?

Nous tenterons de répondre à ces questions tout d'abord en envisageant l'évolution récente du bilan des catastrophes naturelles enregistrées dans le pays, puis la répartition et les caractéristiques des régions frappées par de telles catastrophes, en particulier depuis les années 2000, période pour laquelle les enregistrements sont devenus de plus en plus complets, ce qui peut contribuer à expliquer une apparente tendance à une augmentation des catastrophes naturelles sur la même période (CEPED-UFSC, 2017). Une brève analyse des catastrophes les plus graves permet d'identifier les principaux types de facteurs en cause et de comprendre ce qui a amené cette question à prendre une place croissante dans la société et les politiques publiques, à l'échelle du pays comme à celle de la région étudiée. Elle ouvre la voie à la partie suivante, consacrée à la façon dont les institutions du pays réagissent à ce problème, en particulier avec la mise au point d'un arsenal juridique et administratif comportant notamment la mise en place d'un système de prévention.

6.2. Les catastrophes naturelles au Brésil : contexte et exemples récents

6.2.1. Un bref recensement général

6.2.1.1. Un pays largement touché par les catastrophes naturelles

Le Brésil est le plus grand pays d'Amérique du Sud, avec une population d'environ 208 millions d'habitants (190.732.694 en 2010 : IBGE, recensement 2010) distribuée sur un territoire de 8 515 767 km². Cette population est répartie en 27 unités fédérales, soit 26 États et le District Fédéral de Brasília (Fig. 6.1). Ces unités fédérales sont regroupées dans les régions Sud, Sud-Est, Centre-Ouest, Nord et Nord-Est. Chacune de ces régions possède des caractéristiques géographiques différentes qui leur confèrent des degrés variables d'exposition aux risques naturels, comme le montre l'analyse des phénomènes catastrophiques survenus ces dernières années.



Figure 6.1. Carte politique du Brésil. (Source : CENAD, 2014).

Dépourvu de zones d'activité volcanique et de forte activité sismique, même dans certaines parties du Nordeste régulièrement touchées par des séismes d'intensité modérée (Bezerra, 2000), le territoire brésilien est surtout frappé par des catastrophes d'origine climatique et hydrologique (Debortoli *et al.*, 2017). Parmi celles-ci, celles qui sont liées à des excès de précipitations ou au contraire à des déficits exceptionnels comptent parmi les plus graves (Londe *et al.*, 2014).

Selon l'Atlas Brasileiro dos Desastres Naturais, 1991-2012 (CEPED-UFSC, 2013), les principaux types d'événements catastrophiques sont :

- les mouvements de masse (*deslizamentos*),
- l'érosion (des sols, des côtes) (*erosão*),
- les inondations progressives (*enchentes, inundações*),
- les inondations brusques et crues éclair (*enxurradas*),
- les débordements de réseaux urbains (*alagamentos*),
- les cyclones et tempêtes (*ciclones, vendavais*),
- les orages locaux (*tempestades*),
- les chutes de grêle (*granizo*),
- les épisodes de sécheresse (*estiagem*),
- les périodes de sécheresse prolongée (*secas*),
- les tornades (*tornados*),
- les vagues de froid et gelées (*friagem, geada*),
- les incendies de forêt.

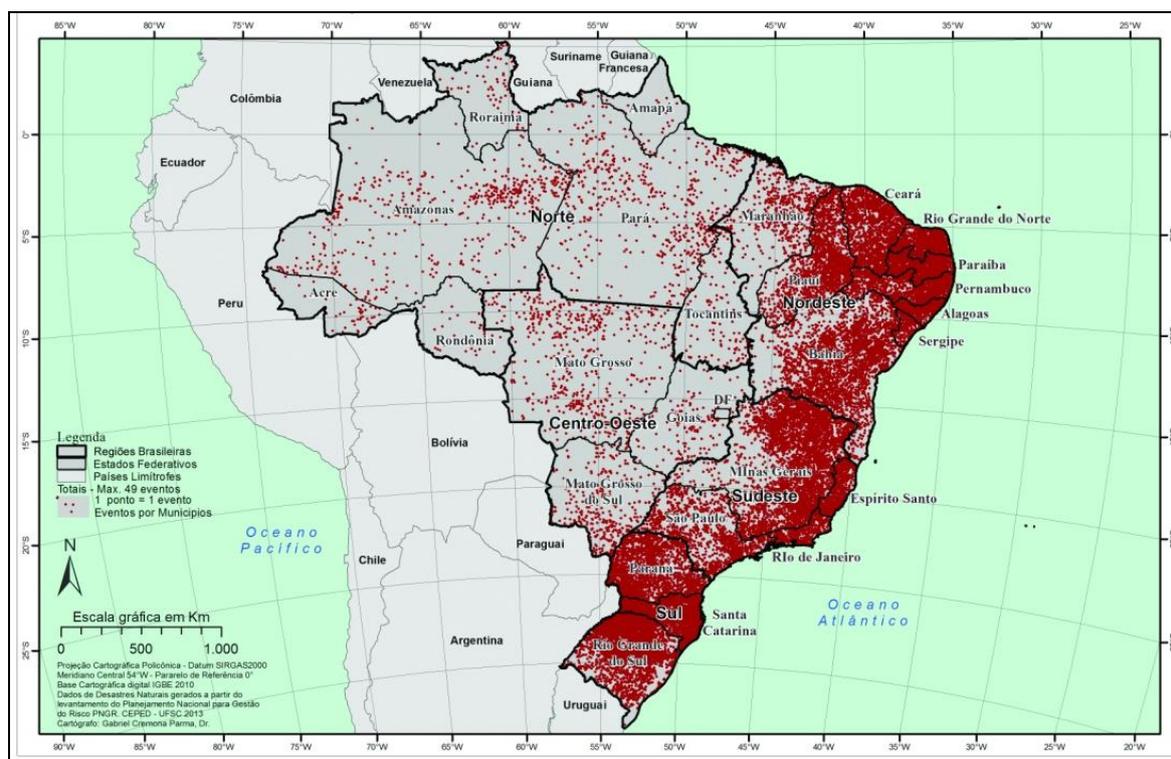


Figure 6.2. Distribution des catastrophes naturelles (tous types confondus) enregistrées par la Défense Civile Nationale sur la période 1991-2012. (Source : CENAD, 2013).

Ces phénomènes affectent aussi bien des régions de plaines (Amazonie) que des zones de relief plus accidenté (est, sud et sud-est). Cependant, les plus brutaux et meurtriers de ces phénomènes surviennent généralement dans des régions dont le relief, plus ou moins élevé et contrasté, amplifie certaines manifestations météorologiques (précipitations orographiques) et permet l'occurrence de phénomènes tels que crues-éclair et mouvements de terrain. Ces derniers sont souvent associés dans les plus graves des événements survenus au cours de la dernière décennie. Leur répartition traduit bien la combinaison de ces facteurs (Fig. 6.2).

Sur cette carte, la région Sud apparaît la plus touchée, en particulier l'État du Paraná, le nord du Rio Grande do Sul et le Santa Catarina. La région Sud-Est, qui est aussi la plus urbanisée, est aussi très affectée : nord de l'État de Rio de Janeiro, nord de Minas Gerais et Espírito Santo. La majeure partie du Nordeste est concernée aussi, à l'exception du Maranhão et de l'ouest de la Bahia. La région Nord est moins touchée, sauf le Pará et l'Amazonas. C'est la région centre-ouest qui est la moins touchée, sauf certaines parties du Mato Grosso et du Mato Grosso do Sul (voir 6.2.3). La figure 6.3 indique la répartition régionale par types de catastrophes (CEPED-UFSC, 2013 : CENAD, 2013).

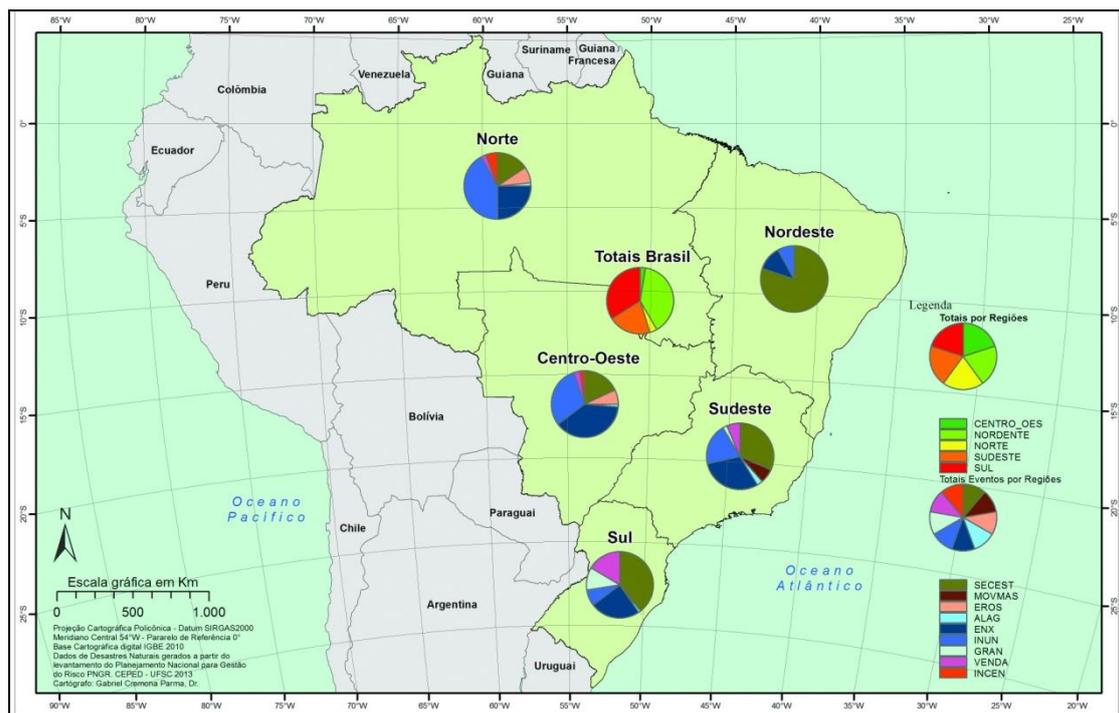


Figure 6.3: Typologie et distribution régionale des catastrophes naturelles au Brésil. (Source : CENAD, 2013).

Légende : **SECEST** : Épisodes et périodes prolongées de sécheresse ; **MOVMAS** : Mouvements de masse ; **EROS** : Érosion ; **ALAG** : Débordements de réseaux urbains ; **ENX** : Crues éclair ; **INUN** : Inondations ; **GRAN** : Grêle ; **VENDA** : Tempête ; **INCEN** : Incendie.

6.2.1.2. Principaux facteurs physiques de répartition des catastrophes naturelles

Ces catastrophes trouvent surtout leur origine dans les rythmes et l'intensité des précipitations pluvieuses, qui varient énormément d'une région à l'autre. En effet, la pluviométrie oppose des régions humides recevant plus de 2000 mm/an (Amazonie ; plaines littorales atlantiques ; reliefs des montagnes orientales telles que la Serra do Mar où les totaux annuels peuvent dépasser 4000 mm ; extrême sud), à des zones de pluviosité moyenne (Plateau intérieur, bande littorale du Nordeste : 1200-1500 mm/an) et à des régions de pluviosité plus faible (intérieur du Nordeste ou *sertão*) (Fig. 6.4). Les pluies énormes liés aux cyclones et ouragans qui affectent de nombreuses aires tropicales, surtout océaniques, sont pratiquement inconnus dans le pays, à la notable exception de l'ouragan Catarina survenu dans la région sud en mars 2004 (CENAD, 2013) mais de forts contrastes saisonniers et d'autres types de situations météorologiques propices à de fortes précipitations, renforcés par des effets orographiques marqués dans les régions montagneuses (Serra do Mar, Borborema, petits massifs de l'intérieur du Nordeste ; Bétard, 2007), affectent de vastes secteurs.

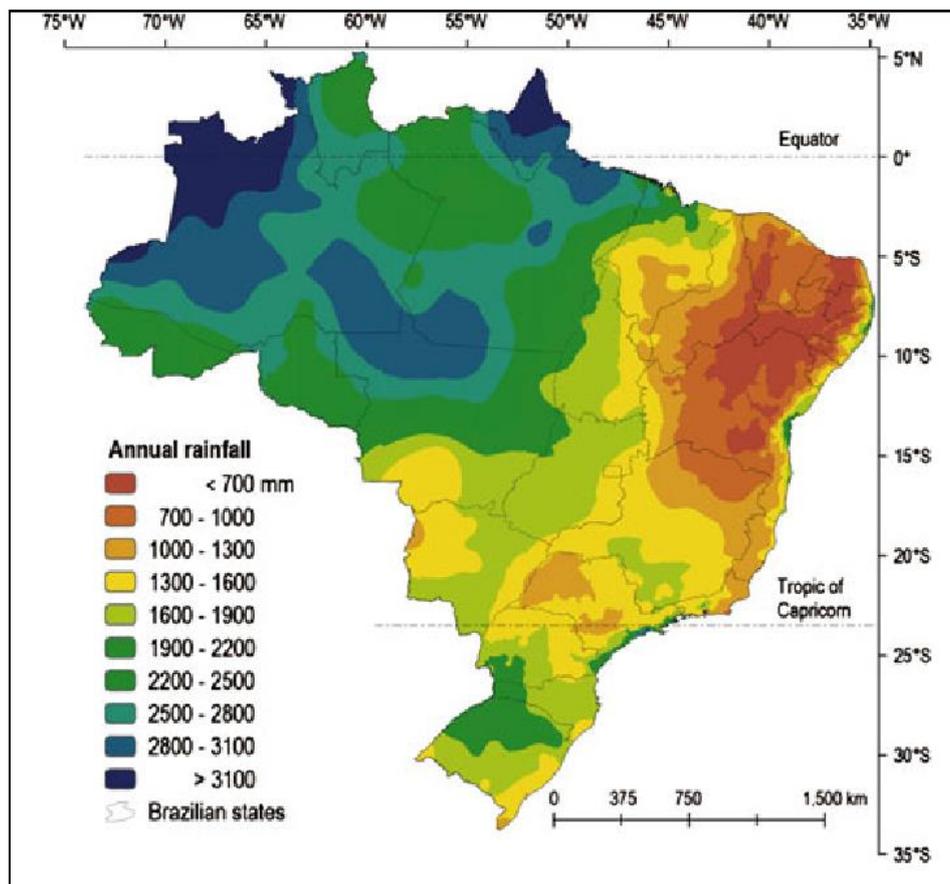


Figure 6.4. Carte pluviométrique du Brésil. (Source : Alvares *et al.*, 2013).

Si les précipitations sont relativement bien réparties sur l'année dans une grande partie du bassin amazonien, elles sont plus groupées sur une saison des pluies estivale (octobre ou décembre à

La carte de répartition des catastrophes naturelles survenues sur la période 1991-2012 (Fig. 6.2) souligne aussi une concentration géographique dans le large bourrelet montagneux haut de 1000 à 2800 m qui domine l’océan Atlantique sur plus de 3000 km, du Rio Grande do Norte au Santa Catarina (Fig. 6.5). Cette distribution traduit un rôle important du relief non seulement lié à ses effets sur le climat (précipitations orographiques : Coelho Netto *et al.*, 2011 ; situations d’abri par rapport aux alizés contribuant à la sécheresse du sertão nordestin : Gunnell, 1998) mais surtout dû aux dénivelées et aux fortes pentes qui caractérisent les reliefs montagneux, même modestes, augmentant la vitesse et la concentration des écoulements et multipliant les situations propices aux mouvements de masse (Fig. 6.6).

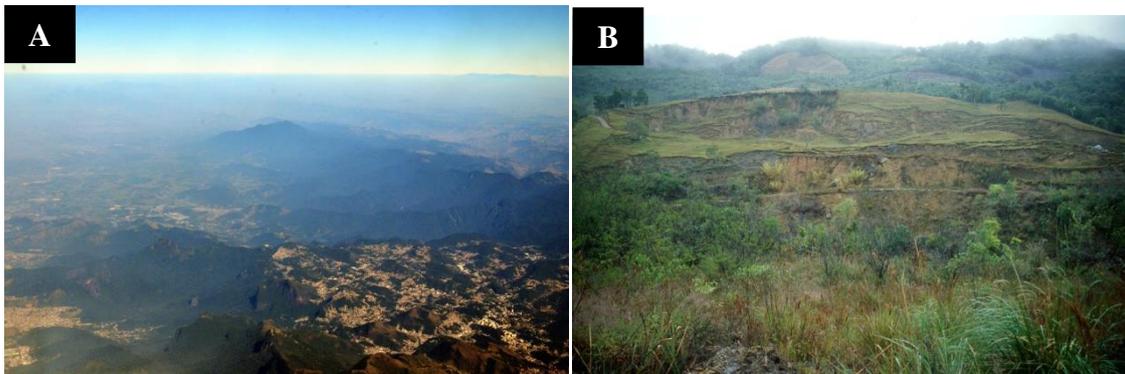


Figure 6.6. Reliefs du Grand escarpement du sud-est et du sud du Brésil. **A.** Petropolis (État de Rio de Janeiro) et la Serra do Mar, vers l’ouest. Photo J.P. Peulvast, 2010. **B.** Serra Geral (Santa Catarina), ouest de Alfredo Wagner ; glissements de terrain sur sédiments permien, en contrebas du plateau basaltique. Photo J.P. Peulvast, 1999.

6.2.1.3. Bilans des catastrophes naturelles

En ce qui concerne le bilan humain des catastrophes naturelles, le nombre total de personnes affectées sur la période 1991-2012 est de 126.926.656 (CENAD, 2013). Elles l’ont été surtout par les étiages et sécheresses (51 % du total des déclarations), suivis par les crues éclair (21 %) et les inondations (12 %) (Fig. 6.7). Dans la région Nordeste, la plupart des catastrophes déclarées sont liées à des épisodes de sécheresse (78 %), suivis par les crues éclair (11,6 %) et les inondations (7,9 %).

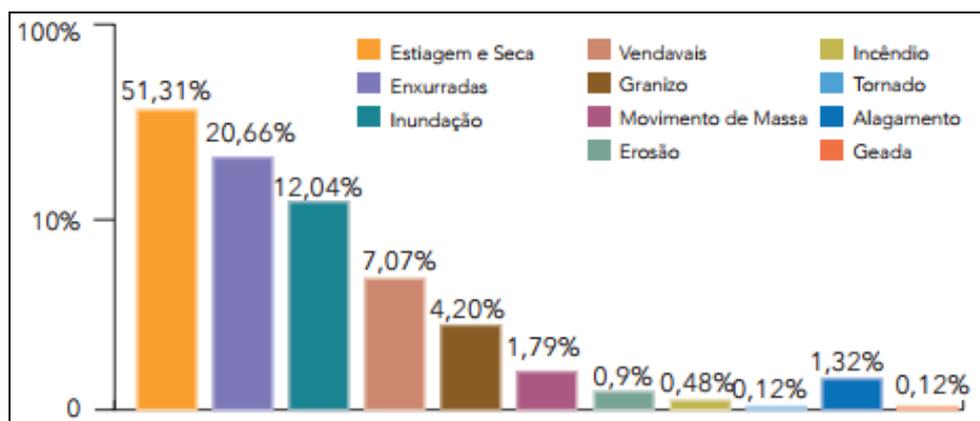


Figure 6.7 : Nombre de personnes affectées par les différents types de catastrophes naturelles au Brésil sur la période 1991-2012. Légende : voir Fig. 6.3. (Source : CENAD, 2013).

Le nombre et le pourcentage de communes atteintes par les catastrophes naturelles en 2013 atteignent un maximum dans le Nordeste (2 893 communes, soit 65,26 % du total : Fig. 6.8). Ce taux correspond surtout aux épisodes de sécheresse (70,99 % ; Fig. 6.9). Suivent les régions sud-est et sud, avec des pourcentages nettement moins élevés (16,83 % et 12,50%).

Region	Nombre de Communes Atteintes	% de Communes Atteintes
Centro-Oeste	95	2,14 %
Nordeste	2 893	65,26 %
Norte	145	3,27 %
Sudeste	746	16,83 %
Sul	554	12,50 %
TOTAL	4 433	100 %

Figure 6.8 : Nombre et pourcentage de communes atteintes par des catastrophes naturelles en 2013 dans les différentes régions du Brésil. (Source : CENAD, 2014).

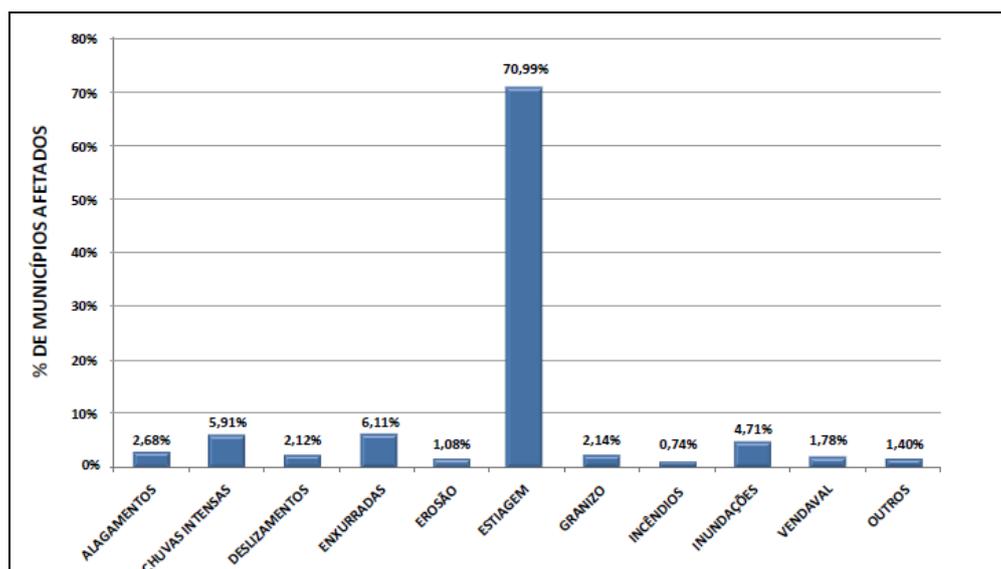


Figure 6.9. Pourcentage de communes atteintes par les différents types de catastrophes naturelles au Brésil en 2013. Les épisodes de sécheresse hydrologique (*estiagem*) sont de loin les plus représentés, du fait de la grande étendue des régions concernées. (Source : CENAD, 2014).

6.2.2. Les catastrophes naturelles au Brésil : contexte et exemples récents.

6.2.2.1. Région Sud

La région Sud du Brésil présente de vastes plateaux inclinés vers l'ouest et la Pampa gaúcho, bordés par d'immenses escarpements sinueux précédés de buttes-témoin. Dominant une plaine littorale qui s'élargit vers le sud, ils sont incisés par des cours d'eau nés sur le revers de la Serra do Mar. Dépassant 1000 m dans l'est du Santa Catarina, ces reliefs sont taillés dans les entablements volcaniques du trapp du Paraná et leur substrat de sédiments grésio-argileux et de roches métamorphiques du socle (Fig. 6.6 B).

Du point de vue climatique, cette région est affectée par un climat de type subtropical, à la transition entre les climats chauds des basses latitudes, principalement gouvernés par un régime de mousson (CENAD, 2013), et les climats mésothermiques des latitudes moyennes. La conjonction de facteurs tels que le relief contrasté, les situations latitudinales, la maritimité ou la continentalité, associés à l'action de différents systèmes tropicaux et extratropicaux des latitudes moyennes (en particulier la ZCAS), entraîne de forts contrastes de température et de pluviosité.

La pluviosité annuelle varie de 1250 à 2000 mm, et dépasse 2000 mm sur le littoral du Paraná et l'ouest du Santa Catarina. La répartition sur l'année est contrôlée par le régime de mousson (pluies estivales du Paraná et du centre-est du Santa Catarina), par l'activité de la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS), par le passage hivernal de perturbations cycloniques extra-tropicales (SE du Rio Grande do Sul) et par les effets orographiques dans la zone côtière et sur les versants de

l'intérieur ; partout, les pluies sont assez également réparties mais, de décembre à mars, la montée des températures sur le continent peut s'accompagner de pluies plus intenses qui peuvent causer de grandes crues et des inondations, comme celles qui se sont produites dans l'État du Santa Catarina en 2008 et en 2011 (CENAD, 2012).

❖ *Les inondations de 2008-2009 et de 2011 au Santa Catarina.*

Les pluies torrentielles qui ont touché l'État de Santa Catarina fin novembre 2008 et début janvier 2011 ont causé deux des pires catastrophes naturelles jusqu'alors recensées dans l'histoire du pays (Fig. 6.10).

En novembre 2008, l'est de l'État de Santa Catarina a été atteint par des pluies persistantes en raison de la présence du système semi-stationnaire de hautes pressions de l'Atlantique Sud près de la côte et d'un blocage prolongé des perturbations atmosphériques en altitude, au-dessus de la bande littorale. Le secteur de la vallée d'Itajaí et les villes de Blumenau et de Joinville (Fig. 6.11) ont reçu des précipitations de l'ordre de 1000 mm, alors que les moyennes mensuelles de novembre y sont de 150 mm.

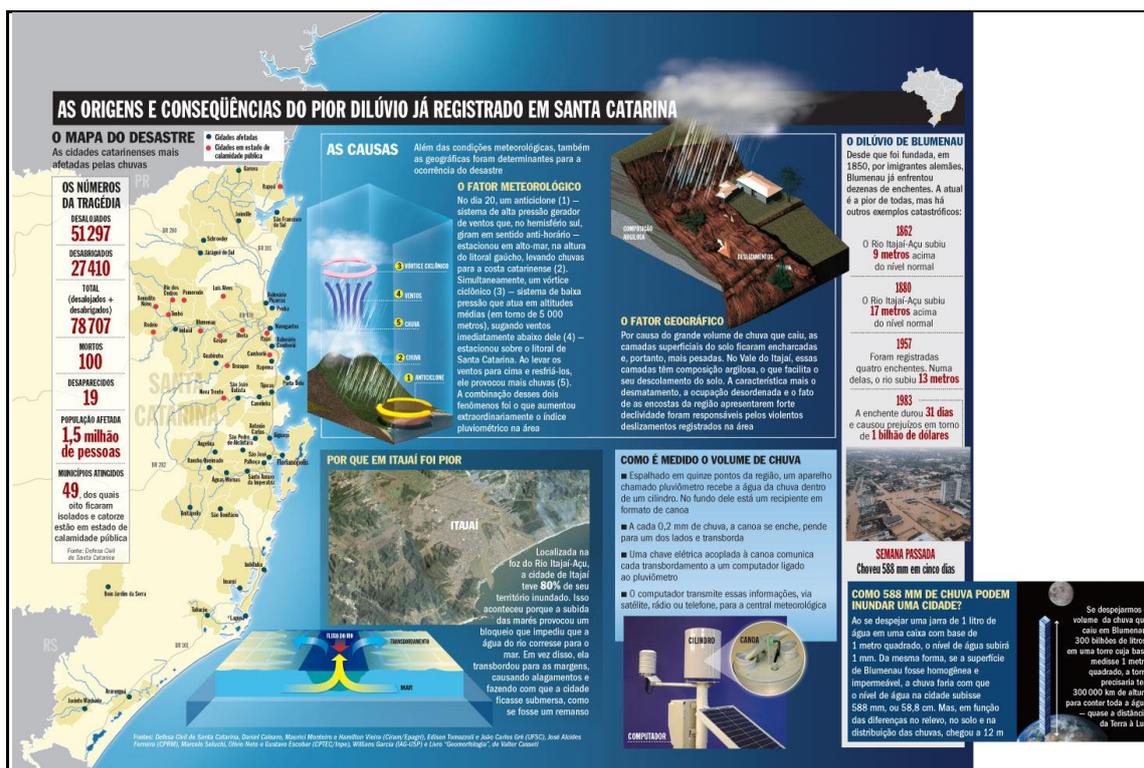


Figure 6.10: La presse couvre les catastrophes de novembre 2008 : les villes du Santa Catarina sont les plus affectées par les pluies, les origines et les conséquences de la catastrophe. (Source : Revue VEJA. N° 2089, 3 décembre 2008).

Les 11 et 12 novembre 2008, des totaux de l'ordre de 200 mm ont été enregistrés dans deux stations. Ces pluies de caractère extrême ont eu de graves impacts, ayant causé des inondations aussi bien lentes (en raison de la durée de la période pluvieuse, propice à la montée des nappes phréatiques) que brusques ou torrentielles, liées au ruissellement, ainsi que de nombreux glissements de terrain (Fig. 6.11). Ces phénomènes sont habituellement connus en été, de janvier à février (Relatório do Banco Mundial "Avaliação de Perdas e Danos : Inundações Bruscas em Santa Catarina - Novembro de 2008").



Figure 6.11. : Centre ville de Itajaí et glissement de terrain à Blumenau (SC) en novembre 2008. (Source : <http://www.ceped.ufsc.br/2008-deslizamentos-e-inundacoes-no-vale-do-itajai-em-santa-catarina/>).

Environ 1,5 million de personnes ont été atteintes, principalement dans la zone littorale et la vallée du Rio Itajaí (Fig. 6.12), mais ces phénomènes ont aussi affecté les régions Ouest, Nord et Sud de l'État, ainsi que le Grand Florianópolis. Au total, 82 770 personnes ont été évacuées, 38 261 se sont retrouvées sans abri, 60 communes ont été classées en état d'urgence et 14 reconnues en situation de catastrophe naturelle (Estado de Calamidade Pública). On a compté 120 morts, dont 97 % de victimes ensevelies par des glissements de terrain, par suite de l'occupation de secteurs à risque (Banco Mundial). Les pertes et dommages ont été évaluées à 4,75 milliards de Reais (~1,5 milliard d'euros), se répartissant entre les infrastructures (routes, ports : 1,45 milliard, soit ~450 millions d'euros), le secteur social (logements : 1,74 milliard, soit ~500 millions d'euros) et le secteur productif (agriculture, élevage, pêche, forêts : 1,39 milliard, soit ~410 millions d'euros).

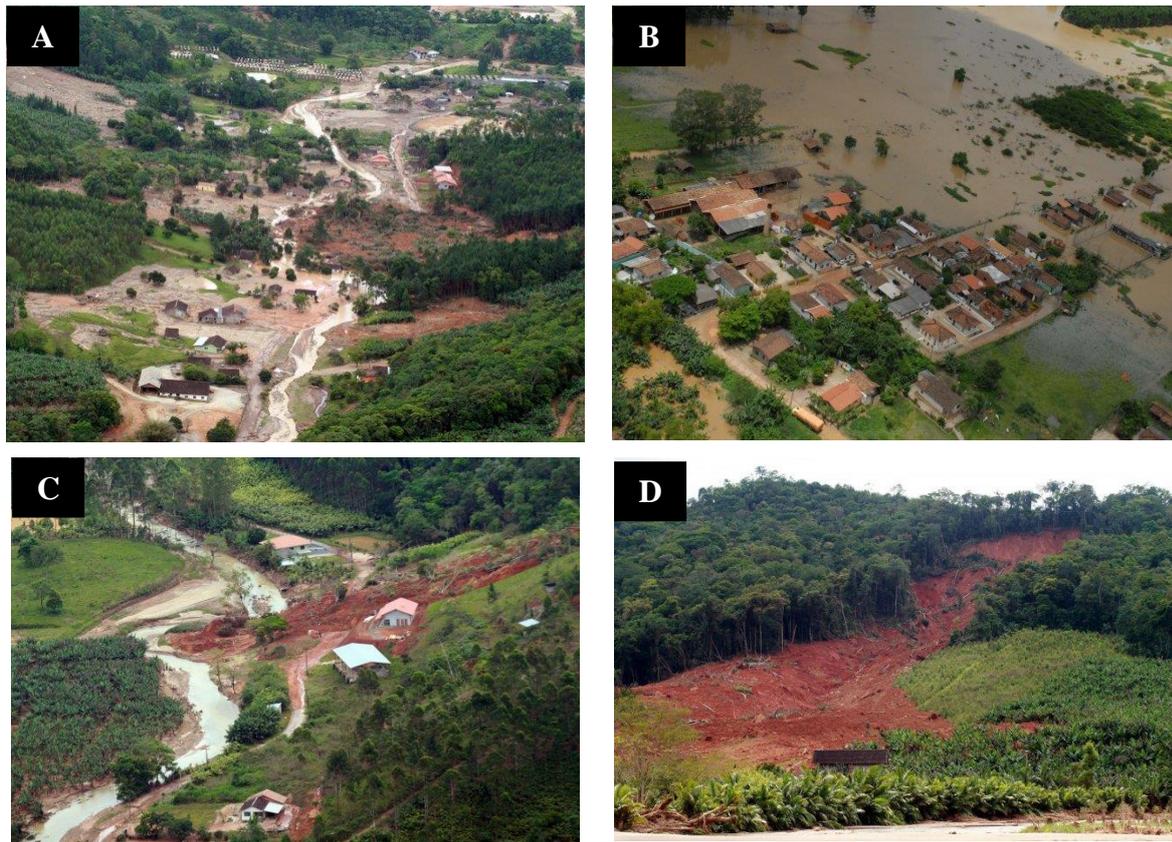


Figure 6.12. Mouvements de terrain (coulée de boue, glissement de terrain) et inondations dans le Vale do Itajaí, Santa Catarina. Novembre 2008. (Source : <http://www.defesacivil.sc.gov.br/>).

En septembre 2011, un mois particulièrement sec et chaud cette année là dans la plus grande partie du Brésil, de fortes pluies ont à nouveau provoqué débordements et inondations dans la vallée du Rio Itajaí (Santa Catarina) (Fig. 6.13). De nouveau, la position de l'anticyclone de l'Atlantique Sud près de la côte du Santa Catarina et du sud-ouest du Paraná, une intensité anormale du jet stream en altitude et une activité renforcée des systèmes frontaux ont favorisé l'intensité de ces pluies. Le cumul de pluies en 72 h a dépassé les 100 mm dans la plupart des communes de l'État, équivalant aux totaux moyens mensuels. Les stations de Campos Novos et Florianópolis ont reçu plus de 200 mm du 7 au 9 septembre. À Blumenau, le Rio Itajaí-Açu a atteint 12 m au-dessus de son niveau normal, inondant rues, maisons, écoles et coupant les routes également obstruées par des coulées de boue et glissements de terrain. Le secteur Morro do Baú, à Ilhota, fut un des plus atteints par les glissements, avec de nombreuses routes coupées. Les écoles ont été fermées dans la ville, ainsi qu'à Santo Amaro da Imperatriz, dans la région du Grand Florianópolis. Dans le quartier Rio Vermelho de Florianópolis, il a fallu drainer l'eau qui avait envahi environ 200 habitations.



Figure 6.13: Crue et inondations dans le Vale do Itajaí, Santa Catarina, septembre 2011.

(Source : <http://molinacuritiba.blogspot.com/2011/09/tragedia-em-sc-enchente-tira-280-mil-de.html> et <https://flaviotin.wordpress.com/tag/enchente/>).

D’après les données du “Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina”, 91 communes ont été touchées, 36 classées en situation d’urgence et 8 en état de “calamité publique” (Agronômica, Brusque, Ituporanga, Rio do Sul, Aurora, Presidente Getúlio, Laurentino, Lontras e Taió). Plus de 170 000 personnes ont dû quitter leur maison, 161 885 évacuées et 15 308 sans abri. On a aussi recensé 3 morts et le nombre total de personnes touchées par les inondations fut de 973 539 (source : www.defesacivil.sc.gov.br. Consulté le 16/06/2014).

6.2.2.2. Région Sud-Est

La région Sud-Est du Brésil se caractérise par des reliefs particulièrement élevés dont la topographie accidentée constitue un facteur favorable aux écoulements rapides et aux mouvements de terrain. Les reliefs cristallins dominant directement l’océan Atlantique ou une étroite plaine côtière (Fig. 6.6 A). Entre le Rio São Francisco et le littoral s’allongent des plateaux dominés par des crêtes de quartzite donnant aux paysages un aspect montagneux, comme la Serra do Espinhaço (entre 1800 m et 1000 m) ou l’étroit massif du Pico da Bandeira (Fig. 6.5). De ces massifs descendent des cours d’eau (rios Muriti, Jequitinhonha, Doce) qui, lorsqu’ils arrivent à la côte, décrivent des méandres derrière d’anciens cordons littoraux consolidés (les *restingas*), avant de déboucher dans des estuaires ouverts sur l’océan.

Plus au sud, ces hautes terres disséquées en crêtes et pics par des vallées encaissées sont séparées par des dépressions (fossés d'effondrement) obliques (haut bassin du Rio São Francisco) ou parallèles au littoral, qui peuvent guider les cours d'eau sur une certaine distance. Ainsi, le Rio Paraíba do Sul s'écoule entre deux imposantes chaînes allongées WSW-ENE, la Serra do Mar et la Serra da Mantiqueira, véritables barrières pour les masses d'air humide venues de l'océan.

Vers 20° S, la façade littorale prend une orientation SW-NE, avec des reliefs d'altitude plus élevée et de plus grandes dénivelées, associées à de hauts escarpements de faille. Le littoral, découpé par les baies de Guanabara, Angra dos Reis, Santos et Paranaguá, est dominé par le haut alignement montagneux de la Serra do Mar, un bloc basculé dissymétrique (Fig. 6.6 A) que l'on suit de l'État de Rio de Janeiro (Serras da Estrela, dos Órgãos) à l'État du Santa Catarina, par les Serras de Bocaina et de Paranaipacaba. Profondément altérées entre les dômes rocheux qui arment de nombreux interfluves, les roches du socle sont revêtues d'épais sols ferrallitiques jusque sur les fortes pentes du pied des « morros » et des demi-oranges des plateaux intermédiaires disséqués (dépression du Paraíba do Sul), favorisant décollements et glissements en cas d'imbibition lors des séquences pluvieuses prolongées et intenses (Fig. 6.14).



Figure 6.14. Nova Friburgo, Serra do Mar, Etat de Rio de Janeiro : Campo do Coelho, glissement de terrain survenu en juin 2011 au détriment des altérites couvrant un dôme rocheux. Photo : A.O. Magalhães, 2014.

Du point de vue climatique, cette région est une région de transition entre les climats chauds des basses latitudes et les climats mésothermiques des latitudes moyennes. La conjonction de facteurs comme les différences de latitude, les reliefs élevés près de l'océan, la plus ou moins grande maritimité ou continentalité, et l'influence de systèmes tropicaux et extratropicaux des latitudes moyennes explique la diversité des régimes climatiques (CENAD, 2012). Ainsi, les basses températures superficielles de la mer et la position par rapport aux déplacements du Front Polaire

Atlantique expliquent une relative diminution de la pluviosité sur le littoral fluminense (région de Rio de Janeiro), tandis que plus au sud (région de Santos), elle remonte à plus de 2000 mm, avec une concentration estivale mais sans période sèche. Le long du littoral pauliste, les moyennes annuelles de précipitations sont supérieures à 2000 mm et peuvent atteindre 4500 mm sur le littoral central. Dans l'État de Rio de Janeiro et l'ouest du Minas Gerais, les totaux pluviométriques varient entre 1500 et 1700 mm. La neige peut tomber sur les plus hauts sommets. Les plateaux de l'ouest pauliste, du centre-nord mineiro, nord-fluminense et l'État d'Espírito Santo reçoivent 1250 à 1400 mm de pluies, tandis que dans l'extrême nord de l'Espírito Santo et le nord-ouest du Minas Gerais les totaux pluviométriques sont inférieurs à 1000 mm (CENAD, 2013).

Cette région est l'une des plus touchées par les catastrophes naturelles, en raison de ces conditions environnementales, des fortes concentrations démographiques et de l'occupation désordonnée des zones à risques. Ainsi, le nord du Minas Gerais est touché par des sécheresses extrêmes, responsables de graves dommages pour l'agriculture (intensive et familiale), ainsi que pour la production hydroélectrique, l'une des plus importantes du pays. Le sud est caractérisé par une grande vulnérabilité aux événements extrêmes tels que les crues rapides des cours d'eau et les inondations, car il concentre les zones de peuplement et de développement économique les plus importantes. Les préjudices matériels et humains y sont majeurs, comme à la suite des inondations et glissements de terrain qui ont frappé la « Região Serrana » de Rio de Janeiro en avril 2010 et janvier 2011 (CENAD, 2012).

❖ ***État d'alerte dans l'État de Rio de Janeiro : les désastres provoqués par les pluies extrêmes du début 2010 et de janvier 2011***

Dans l'État de Rio de Janeiro, les années 2010 et 2011 furent celles de tragédies provoquées par des précipitations énormes qui déclenchèrent crues, inondations, glissements de terrain et éboulements responsables de grandes destructions dans de nombreuses villes et de grands nombres de victimes (Coelho Netto *et al.*, 2011). Début 2010, le contexte météorologique est celui d'une année El Niño sur le Pacifique équatorial, avec des températures de l'eau anormalement élevées sur l'Atlantique sud. Tandis que El Niño s'affaiblit les mois suivants, les températures superficielles de l'Atlantique sud restent élevées. Ces températures océaniques élevées sont sans doute impliquées dans l'occurrence de fortes instabilités et de pluies intenses sur le littoral (Cavalcanti *et al.*, 2009).

Une des localités les plus touchées fut la ville d'Angra do Reis en janvier 2010 (Fig. 6.15). Les conséquences en furent particulièrement graves, par suite de l'occupation irrégulière de reliefs abrupts (*morros*) sujets à des glissements de terrain et éboulements : Praia de Bananal, Morro do Carioca (20 maisons détruites) ; au total, 53 morts furent recensés dans cette cité du sud fluminense.

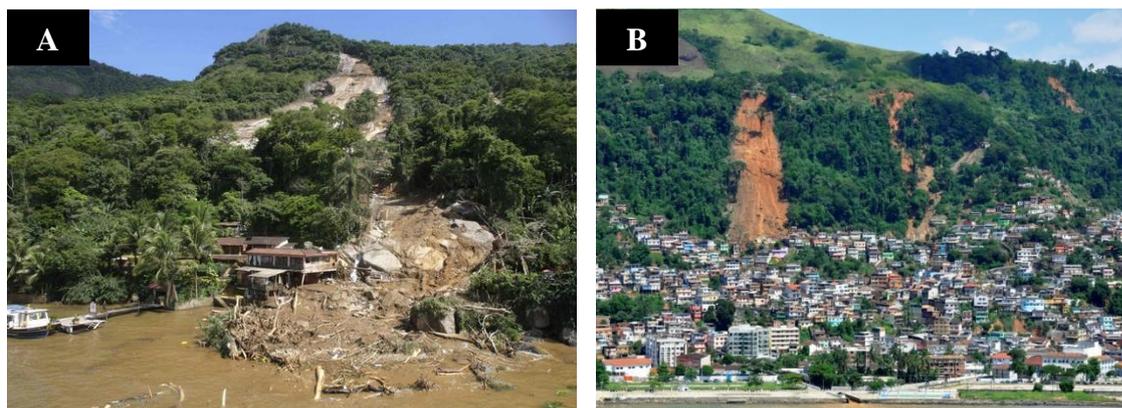


Figure 6.15. Glissements de terrain catastrophiques à Angra dos Reis, RJ, janvier 2010. **A.** Enseada do Bananal (Angra dos Reis, RJ). (Foto: Francinete Froés). Date : janvier 2010. (Source: http://omcchoco.blogspot.fr/2011_01_01_archive.html). **B.** Morro do Bulé e da Carioca (Angra dos Reis, RJ), janvier 2010. (Source : <http://noticias.r7.com/rio-de-janeiro/noticias/tragedia-de-angra-vai-completar-2-anos-sem-mapeamento-das-areas-de-risco-20111217.html>).

Trois mois plus tard (5-6 avril 2010), de fortes pluies provoquèrent 47 décès à Niterói (Morro do Bumba) et d'importantes inondations dans la région métropolitaine de Rio de Janeiro. Ces fortes pluies, survenues à partir du 5 avril 2010 et accompagnées d'éclairs et de forts coups de vent furent provoquées par l'arrivée d'un front froid modérément actif à la rencontre d'une masse d'air chaud, humide et instable. Les pluies les plus intenses tombèrent avant même l'arrivée du système frontal. Dans le cas de Rio de Janeiro, ce front froid s'était déplacé depuis le sud et avait atteint le Santa Catarina le jour antérieur (04.04.2010). Après cette date, l'air froid s'est avancé plus rapidement vers le nord, du fait de la formation d'un cyclone extratropical sur l'océan Atlantique, amenant de l'air plus instable sur les États de São Paulo et Rio de Janeiro, et favorisant l'intensification des pluies sur ces régions.

Selon les données de l'Institut de Géotechnique de la commune de Rio de Janeiro (Georio), la majorité des 32 stations météorologiques de l'État a enregistré des niveaux supérieurs à 167 mm, dépassant la moyenne du mois d'avril et atteignant des valeurs record pour les dernières décennies. Les parties ouest et nord de l'État furent les plus atteintes, principalement les zones proches du centre de la capitale carioca. À Vigidal, ce sont 253 mm qui tombèrent en 24 h, à Rocinha 293 mm ; la Tijuca reçut 274 mm et le Jardim Botânico 292 mm.

Les villes les plus atteintes furent Rio de Janeiro (48 morts), Niterói (105 morts), São Gonçalo (16 morts), Nilópolis, Petrópolis, Magé et Engenheiro Paulo de Frontin, avec un mort dans chacune de ces villes. Au total, on compte 5000 personnes évacuées, 60 disparus, 161 blessés et 251 morts.

Le 7 avril, l'accumulation d'eau provoqua un grand glissement de terrain au Morro do Bumba, à Niterói (Fig. 6.16). Des dizaines de maisons construites sur une ancienne décharge d'ordures désactivée depuis 1981 ont été emportées ou ensevelies dans cette tragédie pourtant annoncée. Les 47

victimes, ainsi que les centaines de personnes sans abri ont ainsi payé un prix très élevé pour cette édification incontrôlée d'habitations sur une zone à risques. Depuis le début des années 2000, en effet, on avait déjà enregistré des glissements et des effondrements de maisons dans cette aire instable et contaminée, qui courait en outre un risque d'explosions dues à la production de méthane et de purin. Malgré cela, les maisons qui ont été ensevelies n'étaient pas classées par les autorités municipales dans une quelconque liste d'habitations situées en zone à risques.



Figure 6.16. Entonnoir (cicatrice de glissement) et langue de débris formés à Niterói après des glissements provoqués par les pluies d'avril 2010. (Source : <http://noticias.r7.com/04/01/2011>).

Une autre série d'événements catastrophiques causés par des pluies extrêmes s'est produite dans l'Etat de Rio de Janeiro les 11 et 12 janvier 2011, sous la forme d'inondations brusques et de très nombreux glissements de terrain (3622) qui firent un grand nombre de victimes et de personnes sans abri (Coelho Netto *et al.*, 2011 ; Avelar *et al.*, 2011 ; Fig. 6.17, Fig. 6.18).

Située sur la zone sommitale de la Serra do Mar, la région atteinte inclut les communes de Nova Friburgo (936 km², 182 000 habitants), Teresópolis (771 km², 163 000 habitants) et Petrópolis (774 km², 296 000 habitants). Autrefois couverte par une forêt pluviale (*mata atlântica*) maintenant très dégradée, elle est soumise à un climat tropical d'altitude particulièrement humide (Nova Friburgo : moyenne annuelle de 2500 mm). Les moyennes mensuelles sont maximales de décembre à février (240 à 340 mm).



Figure 6.17. Image satellite à haute résolution de Nova Friburgo fournie par l'INPE pour la Défense Civile (Photo: INPE). (Source : <http://g1.globo.com/02/02/2011>)



Figure 6.18. Photo aérienne de Nova Friburgo après les pluies de janvier 2011 : coulées de boue et de débris dans un quartier d'habitation (Photo : Mariano Azevedo/Governo do Estado do Rio de Janeiro). (Source : <http://g1.globo.com/12/01/2011>).

Les 11 et 12 janvier 2011, ce sont 140 à 205 mm de pluie qui ont été enregistrés sur les 4 stations automatiques installées à Nova Friburgo et dans les environs (Coelho Netto *et al.*, 2011), soit l'équivalent de plus de 70 % de la moyenne mensuelle de janvier. L'intensité des pluies a pu atteindre 20 mm/h et même, localement, 55 mm/h. Parmi les causes de la catastrophe, on peut noter la conjonction de facteurs climatiques comme l'entrée de masses d'air provenant de la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud ou une séquence pluvieuse précédente responsable de phénomènes d'érosion fluviale et pluviale. Mais on doit aussi souligner le rôle du relief (profonde dissection, interfluves à dômes de granites et migmatites très fracturés et altérés), celui de la dégradation du couvert végétal, celui enfin des formes irrégulières d'usage et d'occupation des sols (urbanisation dense des fonds de vallées et de versants plus ou moins abrupts), que l'on trouve dans toutes les régions montagneuses de l'État de Rio de Janeiro (Fig. 6.19).



Figure 6.19. Nova Friburgo. Dômes rocheux, constructions concentrées dans une vallée étroite et sur les bases de versants. Photo: J.P. Peulvast, 2014.

Parmi les villes les plus atteintes dans la région se trouvent Areal, Bom Jardim, Nova Friburgo, São José do Vale do Rio Preto, Sumidouro, Petrópolis et Teresópolis, qui ont décrété l'état de "*calamidade pública*". Ont été également atteintes Santa Maria Madalena, Sapucaia, Paraíba do Sul, São Sebastião do Alto, Três Rios, Cordeiro, Carmo, Macuco e Cantagalo (Rapport de la Banque Mondiale, op.cit.). Au total, on a recensé 304 562 personnes directement atteintes, dont 16 458 évacuées, 22.479 sans abri, 2.351 blessés et 905 morts, sur 7 villes.

Les communes les plus atteintes ont été Nova Friburgo (180 000 personnes touchées, 3 800 évacués, 4 500 sans abri, 420 morts et 900 blessés), Teresópolis (50 500 touchés; 6 727 évacués, 9 110

sans abri, 355 morts et 837 blessés), suivies de Petrópolis (19 000 touchés, 2 800 évacués, 6 341 sans abri et 68 morts) (Banco Mundial, 2012).

Selon l'Atlas Brasileiro dos Desastres Naturais (CENAD, 2013), entre 1991 et 2010, on a recensé au total, dans l'État de Rio de Janeiro, 1 783 décès causés par des catastrophes naturelles. L'événement de 2011 a été le plus meurtrier jusque là (Fig. 6.20).

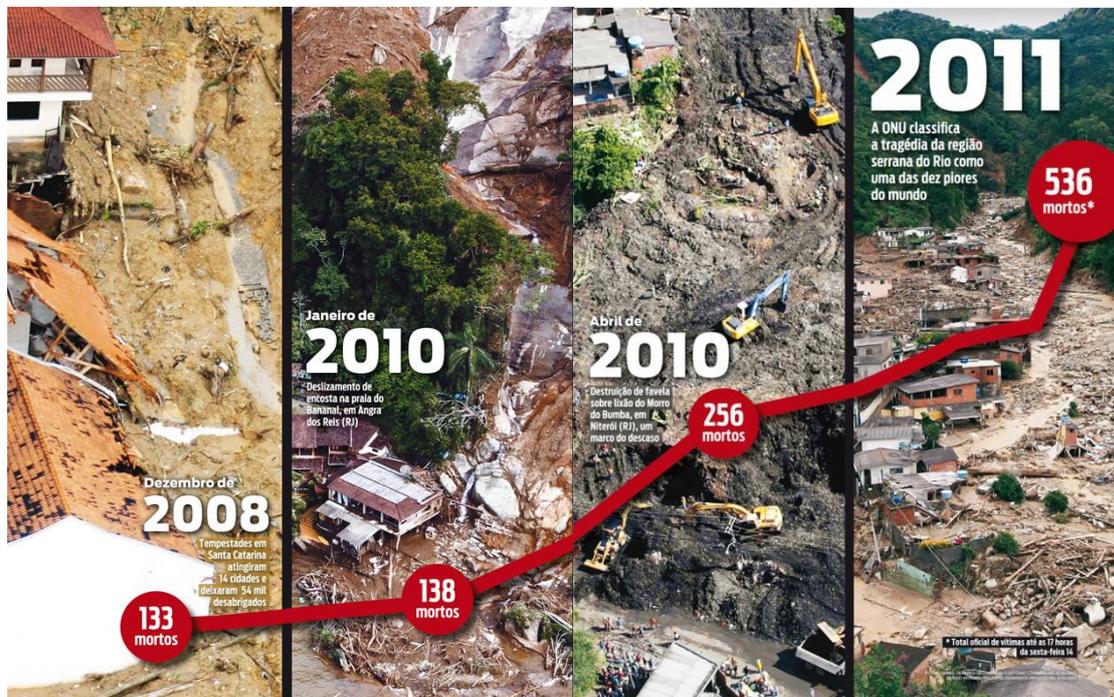


Figure 6.20 : Catastrophes à Rio de Janeiro et nombre de victimes mortes en 2008, 2010 (janvier et avril) et janvier 2011. (Source : <http://blogs.odiario.com/inforgospel/2011/01/15/chuvas-e-mais-dor-sob-os-destrocos-no-rio-de-janeiro/>).

6.2.2.3. Région Centre-Ouest

Comprenant les États du Mato Grosso, du Mato Grosso do Sul et du Goiás, ainsi que le District Fédéral (Brasília), cette grande région (1 606 372 km²) est une aire de divergence hydrographique, d'où partent les principaux tributaires des grands fleuves du pays (ex : bassins de l'Amazone ou du Paraguay) (Fig. 6.5). Elle est dans l'ensemble moins propice aux catastrophes brutales que les régions précédemment évoquées. Les paysages sont caractérisés par de vastes plateaux et *chapadas*, limités par des crêtes et des massifs et dominant les grandes étendues palustres de la plaine alluviale du Paraguay, le Pantanal. Sur les plateaux, la platitude des horizons est interrompue par des vallées encaissées, ainsi que par de longues crêtes rectilignes et par les entablements des *chapadas*, ou encore par des *cuestas* sculptées à la périphérie du socle cristallin.

Dans cette région de transition entre les climats chauds des basses latitudes et les climats mésothermiques de type tempéré du sud, le climat y est principalement de type tropical, avec une saison sèche hivernale. Des variantes de type subtropical humide caractérisent les hauteurs, et le nord du Mato Grosso connaît un climat de mousson. Les moyennes annuelles de précipitations atteignent 1500 mm et dépassent 1800 mm dans les régions influencées par le système amazonien, comme le nord du Mato Grosso.

Cette région est celle du Brésil qui subit le moins de catastrophes naturelles. Cependant, en grande partie couverte de savanes steppiques et de forêts claires décidues (*cerrado*), elle est occasionnellement atteinte par des incendies de forêt qui peuvent affecter de vastes superficies, dont des régions agricoles (Fig. 6.21). D'où des dégâts significatifs, aussi bien d'ordre socio-économique qu'environnemental (CENAD, 2012).



Figure 6.21 : Incendie de forêt dans la région centre-ouest du Brésil. Photo : Luiz Fernandes, 2011. (Source : <https://www.wwf.org.br/informacoes/?29382/Queimadas-assustam-o-Centro-Oeste-do-Pais>).

6.2.2.4. Région Nord

La quasi-totalité de la région Nord du Brésil, la plus vaste du pays (3 853 328 km²), correspond à la grande plaine d'Amazonie, caractérisée par un climat équatorial humide et la présence de la plus grande forêt ombrophile du monde. Cette région n'est généralement pas touchée par des catastrophes naturelles brutales de grande fréquence et de grande magnitude, mais plutôt par des phénomènes récurrents d'ordre hydrologique, éventuellement accompagnés de manifestations brutales de type orageux. Le relief y est peu vigoureux sur d'immenses étendues. De part et d'autre des sédiments alluviaux, sableux et argileux de la plaine centrale, affleure le socle aplani, surmonté au

nord par de vigoureux massifs cristallins et de hautes buttes gréseuses (Guyanes, Roraima) (CENAD, 2012).

Le climat dominant est de type équatorial humide, pratiquement sans saison sèche, avec les plus forts totaux pluviométriques annuels du pays. La pluviosité moyenne de la région est de 2500 mm/an, mais les totaux annuels atteignent 3000 mm dans le nord-ouest de l'État d'Amazonas, et 4000 mm dans la partie est du bassin amazonien, touchée par les oscillations de la ZCIT et par les lignes de grains qui se forment le long de la côte (région de Belém).

Les principales zones à risques se concentrent le long des grands cours d'eau aux régimes hydrologiques complexes reflétant la diversité climatique et les compensations entre les régions traversées (Rios Solimões, Negro, Amazone ; Demangeot, 1999). Du fait d'une occupation inadéquate des berges de ces cours d'eau, les inondations atteignent principalement les populations riveraines, mais aussi celles des centres urbains (Fig. 6.22), sans toutefois entraîner des conséquences aussi meurtrières que dans les autres régions, les populations ayant généralement l'habitude de se protéger (constructions de type palafites) et le temps de se replier hors d'atteinte de l'eau. De sévères étiages saisonniers, lors des années plus sèches, provoquent aussi de grands dommages économiques, en particulier pour la pêche et l'agriculture.



Figure 6.22 : Quartiers et secteurs de risques à Manaus (palafites sujets à inondations et occupation de talus affectés par des glissements de terrain). (Source : <http://temas.folha.uol.com.br/natureza-do-desastre/amazonas/em-manaus-familias-vivem-fois-meses-por-ano-em-casas-inundadas-de-agua-suja.shtml>).

6.2.2.5. La région Nordeste

La diversité des degrés d'exposition aux risques de catastrophes naturelles dans cette région tient à la grande diversité des milieux que l'on y rencontre. Le relief comprend des plateaux sédimentaires d'étendues variées comme les plateaux et Chapadas du Maranhão, du Piauí, de la Bahia (Chapada Diamantina, 1850 m) et du Ceará, parmi lesquelles la Serra da Ibiapaba et la Chapada do Araripe (~1000 m), mais aussi de grandes unités cristallines où des massifs bien circonscrits comme

le plateau de la Borborema (jusqu'à 1200 m) ou la Serra de Baturité dominant de vastes plaines d'érosion parsemées d'inselbergs (la surface d'érosion « Sertaneja ») qui se relèvent doucement du littoral vers l'intérieur (« sertão »), jusque vers 300 m (Fig. 1.2).

Les cours d'eau, rarement permanents en dehors des principaux d'entre eux (São Francisco, Parnaíba), ont sculpté les paysages du *sertão* au littoral, formant de larges vallées soulignées par des rubans de forêts-galeries (ripisylve), là où elles existent encore. Le littoral présente de longues étendues de plages sableuses, bordées de systèmes dunaires et de lagunes. En arrière de la zone côtière, s'étend une bande quasi-continue de bas plateaux de sédiments tertiaires (les "*tabuleiros*") qui sont localement recoupées par le rivage, formant des falaises abruptes.

Tristement célèbres pour les épisodes de sécheresse prolongés (*secas*) qui touchent certaines régions (« Polygone de la sécheresse », ~1 000 000 km²), les climats prépondérants sont de type Littoral humide, Tropical et Tropical semi-aride (CENAD, 2013). La pluviosité moyenne annuelle est variable, pouvant atteindre des valeurs de 2000 mm (du littoral de la Bahia au Rio Grande do Norte), entre 1 000 et 1 200 mm (parties des États de Bahia, Ceará, Maranhão et Piauí), mais dans tout le sertão nordestin, à l'exception d'étroits « *brejos de altitude* » (Cavalcante, 2005 ; Bétard, 2007) comme ceux correspondant aux massifs du Ceará directement touchés par les alizés, elle est inférieure à 600 mm (voir chapitre 1). La végétation dominante y est la *caatinga*. Les températures moyennes annuelles sont élevées, entre 20 et 28° C. La majeure partie du domaine semi-aride est caractérisée par une faible ressource hydrique, et les régimes hydrologiques sont calqués sur la saison des pluies, qui ne dure que 3 ou 4 mois. Les cours d'eau sont pour la plupart intermittents, mais une certaine pérennisation a été localement créée par la construction de barrages-réservoirs (*açudes*), alors que dans des régions de sources comme la Chapada do Araripe, les prélèvements sur la ressource en eau ont au contraire transformé des cours d'eau pérennes en véritables oueds au régime spasmodique (crues-éclair : Magalhães, 2013 ; voir chapitre 2).

Les régimes de précipitations résultent d'interactions complexes entre le relief, la position géographique et la circulation atmosphérique. Les mécanismes des précipitations sont surtout conditionnés par le balancement de la ZCIT (qui laisse se former une puissante cellule anticyclonique sur l'intérieur en hiver), par l'intervention de fronts froids, par la formation de vortex cycloniques d'altitude, par celle de lignes de grains ou de systèmes convectifs d'échelle moyenne, et par les systèmes de brises de mer et de terre. Les variations de leur activité dépendent en partie d'oscillations d'échelle globale (ENSO), des températures de surface de l'Atlantique Sud et Nord, et du balancement des alizés. Du point de vue des événements extrêmes, cette région est connue pour l'occurrence à répétition de périodes de sécheresse (*secas*) pouvant durer 3 à 4 ans, et aussi – fait moins connu – de pluies torrentielles. Cela explique qu'elle puisse être touchée par des crues et des inondations brusques ou par des glissements de terrain, entre autres, atteignant principalement les populations installées dans les zones exposées, urbaines ou rurales. En témoignent les inondations qui se sont produites dans les États d'Alagoas et du Pernambuco en juin 2010 (CENAD, 2012).

Pluies et inondations brusques de juin 2010 dans les États d'Alagoas et du Pernambuco : le sertão les pieds dans l'eau

Les pluies et inondations brusques qui ont atteint l'État d'Alagoas le 5 juin (Maceió : 188 mm) et du 17 au 19 juin 2010 ont été spectaculaires dans sa partie est et « l'agreste ». Contrastant avec la sécheresse régnant alors dans diverses parties de l'intérieur, ces intenses précipitations ont résulté de l'action de fronts froids très actifs qui ont touché le littoral, favorisant la formation de nuages très chargés sur l'est de cette région et du Pernambuco. Les violentes crues correspondantes ont coïncidé avec une forte élévation des eaux de l'Atlantique tropical sous l'influence d'un phénomène El Niño en phase finale et de fortes houles de secteur est qui ont d'abord frappé le Pernambuco avant d'atteindre l'Alagoas. Le résultat fut le débordement des cours d'eau dans les bassins-versants des rios Paraíba et Mundaú, lesquels ont dévasté plusieurs villes (Banco Mundial, 2010).

Maceió, capitale de l'Alagoas, a reçu 270 mm de pluie du 3 au 5 juin, selon les données de l'Institut National de Météorologie (INMET). Jusqu'au 21 juin, le cumul de pluie a atteint 470 mm, alors que la moyenne mensuelle n'est que de 298,3 mm.

Les communes qui ont concentré la plupart des dommages furent : União dos Palmares, Murici et São José da Laje. La population évacuée ou sans abri se répartit entre União dos Palmares, Rio Largo et Santana do Mundaú. Dans plusieurs communes, toute la population a été touchée par cet événement, comme à São José da Laje, Murici, Quebranculo, União dos Palmares, Jacuípe, Branquinha et la zone rurale d'Ibateguara (Fig. 6.23). Au total, 15 communes de l'Alagoas ont été classées en état de calamité publique et 4 en situation d'urgence. Sur les 270 000 personnes directement touchées par ces crues et inondations, 44 052 furent évacuées, 28 577 se sont retrouvées sans abri, 1 131 furent blessées, 1 393 atteintes de maladies et l'on a compté 36 morts.



Figure 6.23. Inondations brusques dans le État d'Alagoas, Villes de Santana do Mundaú et Branquinha, 2010. (Source : CEPED UFSC, 2010).

Le montant total des préjudices a été évalué à 1,89 milliard de R\$ (~430 millions d'euros), dont 1,2 milliard (~270 millions d'euros) pour le secteur privé, 954 millions (~230 millions d'euros)

pour les logements et 125 millions (~27 millions d'euros) pour le commerce. Sur ce total, 57 % correspondent à des dépenses publiques pour le relogement temporaire, la compensation des pertes de loyer dans le marché immobilier et la mise en sécurité des personnes.

Du 17 au 19 juin 2010, l'État de Pernambuco a reçu les pires pluies de la décennie, responsables de crues violentes et des inondations brusques ayant détruit des villes entières comme, par exemple, Palmares, Barreiros et Maraial, selon le Relatório Ação, Pernambuco, 2011, cité dans le Rapport de la Banque Mondiale (Banco Mundial, 2010) (Fig. 6.24).



Figures 6.24. Inondations dans l'État du Pernambuco en 2010. Ville de Barreiros. (Source : CEPED UFSC, 2010).

Dans toute la région, il est tombé 180 mm en seulement 24 heures, ce qui correspond à 70 % du total moyen de juin. Ces précipitations ont été provoquées par advections d'est (*Ondas de Leste*) avec une conjonction de vents forts soufflant de l'océan vers l'intérieur, une grande concentration de nuages à la tête des cours d'eau et un réchauffement massif de l'Atlantique. Dans la capitale, Recife, les pluies ont atteint 455,88 mm, alors que la moyenne mensuelle est de 369,2 mm.

Cet événement catastrophique a touché 67 communes des régions Mata Pernambucana et Agreste de Pernambuco ainsi que la Région Métropolitaine de Recife. Sur ce total, 12 communes ont été déclarées en état de "*calamidade pública*" et 30 en situation d'urgence. La région la plus atteinte comprend les marges des Rios Una et Jaboatão (Zone de la Mata Sul), et l'Agreste Pernambucano, où furent détruits maisons, hôpitaux, édifices publics, écoles, ponts et établissements commerciaux, entre autres.

D'après les données de la Défense Civile (Avadans - Relatórios de Avaliação de Danos, *in* Banco Mundial, 2010), la population directement affectée par la catastrophe a été de 740 001 personnes, ce qui correspond à 9 % de la population de l'État (8 486 638 habitants). Parmi les communes les plus touchées se trouvent Jaboatão dos Guararapes (106 726 personnes concernées),

Gravatá (65 123), Palmares (58 819), Cabo de Santo Agostinho (56 500), Camaragibe (55 029) et Vitória de Santo Antão (50 000).

Sur le total de 740 001, on a décompté 86 464 évacués, 19 520 sans abri, 6 301 blessés, 2 760 malades et 20 morts. On doit ce nombre de victimes relativement réduit aux actions du Gouvernement de l'État, à la mobilisation de la population dans un système d'alerte et dans les opérations de sauvetage, et à l'institution d'un Cabinet de Gestion de Crise regroupant 15 organismes et coordonné directement par le Gouverneur. Ce Cabinet de Gestion de Crise avait pour mission d'intervenir directement dans les zones les plus atteintes et de diriger les opérations de reconstruction.

D'après les données du même rapport (Banco Mundial, 2010), les pertes et dommages dus à cette catastrophe ont été estimés à 3,4 milliards de R\$ (~0,7 milliard d'euros), dont 2 milliards (~450 millions d'euros) pour le secteur social, en particulier le logement des populations les plus atteintes, qui sont celles de revenus modestes (60 %). Ces ressources ont surtout été utilisées pour le relogement dans des aires plus sûres, la reconstruction (16 000 maisons "populaires" avaient été détruites), des aides au loyer (« *auxílio-aluguel* ») et la réalisation d'ouvrages destinés à réduire les risques dans les zones menacées comme, par exemple, des barrages.

Dans les secteurs de la santé et de l'éducation, les pertes et dommages ont été estimés à 145,5 millions et 286,5 millions de reais respectivement (~30 et ~60 millions d'euros), et ont été lourds aussi dans les secteurs des infrastructures (428 millions de R\$, ~100 millions d'euros), de l'assainissement (36 millions de R\$, ~8 millions d'euros) et de l'énergie (12 millions de R\$, ~2,5 millions d'euros). Dans le secteur économique (industrie, agriculture, commerce et services), les valeurs calculées ont été de 424 millions de R\$ (~100 millions d'euros), dont 326 millions (~70 millions d'euros) pour le commerce, qui a subi les impacts directs et indirects de l'événement.

6.2.3. Une augmentation récente du nombre de catastrophes naturelles ?

6.2.3.1. Une augmentation incontestable à l'échelle nationale brésilienne depuis les années 1990

Sur la période 1991-2012 (dernières données publiées dans l'*Atlas Brasileiro dos Desastres Naturais*), une tendance à l'augmentation du nombre annuel de catastrophes naturelles recensées apparaît nettement, en particulier dans les décennies 2000, avec des pics en 2009 et 2012 (Fig. 6.25). Sur 38 996 déclarations (parfois peu fiables, compte tenu de la fragilité du Système de Défense Civile), 8 515 (22 %) concernent la décennie 1990, et 21 840 (56 %) la décennie 2000 ; 8 740 (22 %) se concentrent sur les années 2010, 2011 et 2012 (augmentation de 78 % en 13 ans). L'amélioration constante des systèmes de surveillance a tendance à rendre ces chiffres de plus en plus fiables par rapport à la période antérieure aux années 2000, où n'existaient pas de tels systèmes (CENAD, 2013).

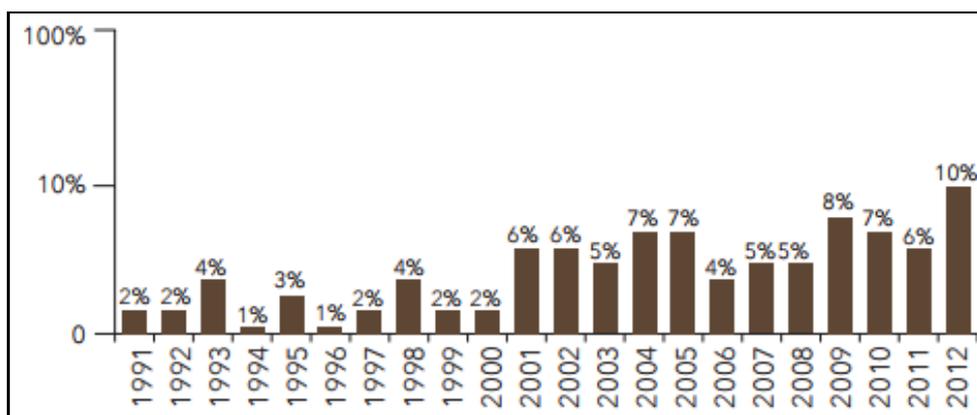


Figure 6.25 : Évolution du nombre de catastrophes naturelles au Brésil sur la période 1990-2012. (Source : CENAD, 2013).

Cette augmentation traduit celle de tous les types de catastrophes de la décennie 1990 à la décennie 2000 (Fig. 6.26), mais plus particulièrement celle des mouvements de masse et de l'érosion des sols et des côtes (augmentations respectives de 21,7 % et de 9,6 %), et un peu moins celle des gelées, des inondations et des périodes de sécheresse (respectivement 6 %, 3,9 % et 2,7 %). Rappelons que 74% des décès intervenus dans cette période sont dus aux crues-éclair et aux mouvements de terrain (Debortoli *et al.*, 2017).

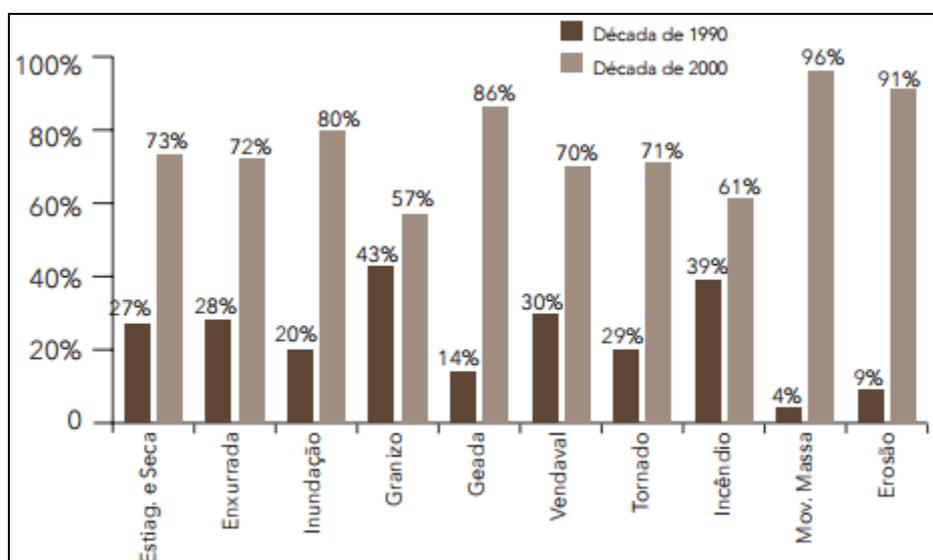


Figure 6.26 : Évolution des types de catastrophes naturelles sur les décennies 1990 et 2000. Légende : voir Fig. 6.3. (Source : CENAD, 2013).

6.2.3.2. Une conjonction de facteurs naturels et socio-économiques à l'heure du changement climatique global

L'occurrence des catastrophes naturelles évoquées plus haut est très généralement liée à des événements hydroclimatologiques ou à des épisodes de sécheresse. Il est donc logique de se demander si l'augmentation de leur fréquence et de leur gravité à l'échelle nationale et mondiale tient à celle des événements extrêmes, associée dans de nombreux travaux au réchauffement climatique global (Debortoli *et al.*, 2017).

En fait, à l'échelle locale, l'analyse des séquences de précipitations et des inondations survenues dans le Cariri au cours des dernières décennies (chapitre 2 ; tableau 2.1) incite à relativiser ce constat. Nous avons vu qu'il n'apparaît pas de tendance très claire sur le moyen terme (dans les quatre dernières décennies) dans la variation de fréquence et d'intensité des événements pluvieux intenses (>100 mm), celles-ci survenant sur années groupées (1980-1988 : 5 événements ; 2003-2011 : 7 événements ; 2015-2016 : 2 événements) tandis qu'on note une plus grande fréquence des crues éclair à Crato depuis 2004 : 5 sur la période 2004-2016, qui est aussi celle de plus grande fréquence des années fortement arrosées (>1400 mm). Une de ces crues est d'ailleurs survenue avec une pluie <100 mm (2008). Certes, la période considérée est brève et peut-être peu significative (voir 2.3.3), d'autant plus que les forts épisodes pluvieux ont souvent un caractère très local et ne sont pas forcément corrélés avec des totaux pluviométriques annuels très marqués.

Année	Episodes El Niño	Précipitations annuelles <800 mm	Précipitations annuelles >1400 mm	Episodes pluvieux >100 mm/24 h	Crues éclair et inondations
1976					
1977					
1978					
1979					
1980					
1981					
1982					
1983					
1984					
1985					
1986					
1987					
1988					
1989					
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					
1995					
1996					

1997					
1998					
1999					
2000					
2001					
2002					
2003					
2004					
2005					
2006					
2007					
2008					
2009					
2010					
2011					
2012					
2013					
2014					
2015					
2016					

Tableau 6.1. Corrélation temporelle des données climatologiques et des épisodes hydrométéorologiques survenus à Crato sur la période 1976-2016. Source : données compilées dans le chapitre 2, Silva, 2017, et <https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/ensoevents.html> (épisodes El Niño). Interprétation : voir texte. (Elaborée par l’auteure, 2019).

Cette période reste cependant marquée par la persistance d’un caractère plus ou moins cyclique du retour des forts épisodes pluvieux. Celui-ci pourrait éventuellement être corrélé, selon divers auteurs (par ex : Gergis *et al.*, 2009) avec des événements régionaux ou planétaires tels que la succession des épisodes ENSO, qui modifient la météorologie de vastes régions du globe *via* un déplacement des zones de pluies tropicales et une modification des structures de vent sur toute la planète. On voit en effet que les années les plus arrosées (>1400 mm) à Crato s’insèrent toutes, à une exception près (2004) entre les années marquées par le phénomène El Niño qui tendent généralement, quoique pas systématiquement, à être plus sèches (tableau 6.1).

On remarquera pour Crato que les périodes de retour annuel ou quasi-annuel d’épisodes pluvieux >100 mm (1985-1988, et surtout 2003-2011) sont séparées par des périodes plus ou moins longues marquées par des années de sécheresse non consécutives (relativement peu marquées dans les années 2000-2010) et par l’absence ou la quasi-absence de tels événements (1989-2002, 2012-2014) (tableau 2.1 ; Fig. 2.12). Comme la période considérée est aussi celle d’une expansion urbaine rapide, y compris dans des zones exposées aux risques, accompagnée d’une imperméabilisation croissante des sols mais aussi de modifications incessantes du chenal du principal cours d’eau de la ville, il apparaît difficile d’établir la part des différents facteurs dans l’évolution des phénomènes. On remarque cependant que le brusque accroissement de la fréquence des inondations autour du Rio Granjeiro à

partir de 2004, accompagné d'une baisse du seuil de déclenchement des crues éclair (2008) coïncide avec l'allongement en 2003-2004 du secteur chenalisé vers l'amont (quartier Pimenta), là où existait auparavant une zone naturelle d'expansion des crues et de dissipation de l'énergie du cours d'eau (Fig. 2.9 B). Par ailleurs, l'augmentation de la vulnérabilité des biens et des personnes (croissance des activités en centre ville, occupation de zones de risque par exemple dans l'amont du bassin-versant) compte pour beaucoup dans l'augmentation des dommages et préjudices constatés.

À l'échelle nationale et continentale, le constat n'est guère différent, même si une tendance planétaire à l'augmentation d'intensité et de fréquence des événements climatiques et hydrométéorologiques extrêmes est relevée dans la plupart des études et modélisations sur le changement climatique global (Debortoli *et al.*, 2017). Sans minimiser l'importance de ce contexte, particulièrement accentué dans plusieurs régions du Brésil, il apparaît que c'est avant tout à l'augmentation de la vulnérabilité liée à la dynamique socio-économique de l'usage des sols dans les zones de risques que sont dus les dommages croissants liés aux catastrophes naturelles (Debortoli *et al.*, 2017). C'est d'autant plus vrai que, selon les mêmes auteurs, le pays aggrave son exposition aux risques par les actions de déforestation incontrôlées, par l'absence de planification territoriale rurale et urbaine institutionnelle, par l'insuffisance des législations et des contrôles, ou encore par l'absence ou l'insuffisance d'une vraie politique de prévention des risques.

6.3. Prévention et gestion des risques et des catastrophes au niveau national : une question en pleine évolution

6.3.1. Catastrophes récentes au Brésil : quelle prévention, quelle gestion ?

6.3.1.1. *L'éveil récent d'un intérêt pour la question*

Les catastrophes naturelles qui se sont produites au Brésil ces dernières années, y compris celles que nous avons mises en évidence dans notre étude de cas sur le Cariri (Partie 2), ont révélé de graves problèmes liés à la gestion et la prévention des risques. On peut donc se demander si le pays est préparé pour affronter de telles catastrophes. Existe-t-il une politique gouvernementale en la matière ? Et si elle existe, pourquoi n'a-t-elle pas fonctionné ? Qu'en est-il de la prévention ?

Ces interrogations ont suscité de nombreux débats entre gouvernants, représentants de tous partis politiques, scientifiques et chercheurs de différentes spécialités, représentants d'associations, etc. Elles se sont retrouvées à la une des principaux médias du pays avec aussi des répercussions au niveau international.

Au Brésil, les revues *Veja*, *Época* et *Isto É* (Fig 6.27 ; Fig. 6.28), à partir des années 2000, ont commencé à publier des reportages sur les catastrophes naturelles, soulignant l'occurrence de pluies, inondations et crues qui atteignent certaines régions quasi-annuellement. On y trouve des commentaires et des critiques sur les malversations politiques, sur les effets de la corruption à tous les

niveaux, sur les occupations irrégulières de zones de risques et sur les actions “limitées” du gouvernement fédéral, entres autres.



Figure 6.27. Couverture de la revue *Veja* sur les événements de 2010 et 2011. (Source : http://veja.abril.com.br/arquivo_veja).



Figure 6.28. Couverture de la revue *Epoca* 2011. (Source : <http://revistaepoca.globo.com/edicoes-antiores>).

L'information sur ces événements a un côté positif en ce sens que, devenue un sujet public au niveau national, elle peut contribuer à inciter les acteurs et la population à faire pression sur le Gouvernement Fédéral pour que soient prises des décisions. Cependant, les analyses véhiculées par la presse écrite et audiovisuelle peuvent couvrir des manœuvres politiques, par exemple pour l'obtention de ressources financières ou de votes lors des élections, sans parler du journalisme sensationnaliste qui profite des malheurs humains à des fins politiques ou commerciales.

Sur le même sujet, Monteiro et Pinheiro (2012) ont soulevé d'intéressantes questions relatives à des interprétations du concept de catastrophe naturelle qui peuvent aussi influencer les prises de décision. Un certain public, important dans un pays religieux comme le Brésil, tend à attribuer de façon irrationnelle ces phénomènes à des actions maléfiques de la nature, vues comme un « châtiment naturel », plutôt qu'aux responsabilités politiques et autres ; on y voit aussi l'intervention d'une force suprême divine ou d'un « châtiment divin ». Malheureusement, au Brésil, ces interprétations liées à des croyances et à des manifestations religieuses engendrent une sorte de fatalisme, aboutissant au sentiment d'impuissance face aux phénomènes naturels et aux tragédies. Cela peut finir par inhiber les actions qui pourraient influencer sur la réalité.

En France, le journal « Le Monde » a publié aussi un article sur le sujet dans son édition du 1^{er} juillet 2010 : « *Au Brésil, la prévention des catastrophes naturelles reste largement défailante* ». Ce constat se réfère aux catastrophes provoquées par les pluies qui ont touché les régions Sudeste et Nordeste du Brésil en 2010. Tout d'abord celle du 1^{er} janvier, à Angra dos Reis (État de Rio de Janeiro), avec des coulées de boue qui avaient fait 40 victimes. Puis, le 6 avril, des inondations et des glissements de terrain, dans l'État de Rio de Janeiro à nouveau, tuant 250 personnes. Enfin, du 20 au 23 juin de la même année, les États d'Alagoas et Pernambuco, dans le Nordeste, avaient aussi été atteints par de fortes pluies dévastatrices et meurtrières.

Selon le journal, l'année 2010 a marqué l'histoire du Brésil, par les conséquences de ces événements catastrophiques. Cependant, on pense que la raison pour laquelle de tels bilans ont été enregistrés est que le pays ne disposait pas de systèmes de prévention et de prévision efficaces. Par exemple, aucun satellite météorologique dédié n'était en position pour fournir les informations permettant d'anticiper l'événement pluvieux qui a atteint l'État de Pernambuco. À l'époque, les organes officiels de l'État ne disposaient que de données satellitaires imprécises. Dans de nombreuses villes atteintes par ces pluies, l'alerte n'a été faite qu'au dernier moment, et diffusée au moyen des cloches des églises ou des hauts-parleurs des voitures municipales. Dans l'État d'Alagoas, il existait bien un radar météorologique, mais les villes les plus vulnérables ne disposaient pas d'un système de Défense Civile.

Selon le journaliste du *Monde*, les deux États ont aussi été victimes de manipulations politiques. En effet, en 2010, le Gouvernement Fédéral n'a libéré que 14 % des fonds de l'Union destinés à la prévention des catastrophes, et la répartition de ces fonds entre les États est apparue contestable. Ainsi, l'État de Bahia a reçu 37 % de ces fonds à lui seul, contre 9 % pour le Pernambuco,

et 0,3 % pour l'Alagoas. À l'époque, ces ressources étaient gérées par le ministre de l'Intégration Nationale, Geddel Vieira Lima, candidat au poste de gouverneur de l'État de Bahia. Si la répartition a été très inégale entre les États du Nordeste, on doit dire qu'elle l'a été aussi dans les autres régions brésiliennes, et ceci en l'absence de toute transparence.

6.3.1.2. La question du recensement officiel des catastrophes

C'est à la Confédération Nationale des Communes (CNM) qu'est revenue l'élaboration d'études techniques comportant le recensement des communes en situation d'urgence et de calamité publique (« Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública »). Le recensement a d'abord été effectué à partir de données du Secrétariat National de la Défense Civile portant sur les années 2010 (de janvier à juin) et 2011 ; puis il a été suivi d'une compilation sur la période 2003 à 2013. Dans ce recensement, la **situation d'urgence** est reconnue par les pouvoirs publics quand elle est provoquée par une ou plusieurs catastrophes ayant causé des dégâts réparables aux communautés affectées. En revanche, la **situation de calamité publique** est déclarée par les pouvoirs publics quand elle est provoquée par des catastrophes ayant causé de sérieux dégâts aux communautés affectées, incluant les atteintes à la sécurité ou à la vie de ses membres (CNM, 2010).

Un des objectifs de ce recensement était de présenter un panorama des principales catastrophes naturelles survenues dans le pays au cours de ces périodes, des localités affectées de manière récurrente avec la fréquence d'occurrence, afin d'alerter sur les répétitions cycliques et le manque de prévention. Cette étude apporte aussi des informations importantes sur les ressources de l'Union affectées aux programmes "*resposta a desastres*" et "*prevenção a desastres*" (réponse aux catastrophes et prévention des catastrophes), ce qui nous aide à réfléchir aux objectifs des grandes dépenses engagées dans les régions touchées par les catastrophes de 2010. Pour cette raison, nous prendrons l'année 2010 comme référence pour notre analyse, du fait de l'importance des événements survenus et de la disponibilité d'informations sur les investissements effectués par l'Union.

Lors du premier semestre 2010 (janvier à juin), il y a eu 1635 arrêtés de Reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique au Brésil, contre 1389 en 2009 (tableau 6.1). Ces chiffres ont été supérieurs en 2005 (1710) et 2003 (1682) (CNM, 2010), mais ce n'est qu'après les événements de 2010 que le pays a commencé à réellement traiter cette thématique, sans doute à cause du grand nombre de victimes cette année-là.

Selon la CNM (2010), il faut prendre en compte le processus bureaucratique impliqué dans l'émission de ces arrêtés, qui peut durer des mois ou même des années, ce qui peut aboutir à la reconnaissance d'événements plus anciens que l'année considérée. Ce peut être la raison pour laquelle certaines régions apparaissent avec plus d'événements pour une année donnée.

Le tableau 6.2 correspondant aux années 2003 à 2010 montre que les régions Sud (753) et Nordeste (472) se distinguent par le plus grand nombre d'arrêtés de reconnaissance émis. La région concernée par le plus grand nombre d'arrêtés a été celle du Nordeste (5661), suivie du Sud (3553) et

du Sudeste (2049). La majorité des arrêtés émis pour janvier à juin 2010 correspond à des événements accompagnés de précipitations (crues, inondations, cyclones, tempêtes, chutes de grêle, mouvements de masse) au nombre de 1028, suivis des épisodes de sécheresse (« *estiagem* », « *seca* »), au nombre de 588. Ce sont ces deux types d'événements qui sont les plus fréquents dans le pays.

Région	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total
Norte	17	7	73	16	37	22	87	94	353
Nordeste	913	616	654	583	1071	876	476	472	5661
Sudeste	479	152	143	119	318	305	235	298	2049
Sul	234	587	740	260	121	289	569	753	3553
Centro-Oeste	39	38	100	13	62	10	22	18	302
Total	1682	1400	1710	991	1609	1502	1389	1635	11 918

Tableau 6.2 Arrêtés de reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique émis par région pour la période 2003-2010. (Source : Estudo Técnico/CNM - Maio 2010. Desastres Naturais no Brasil. Análise das Portarias de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública de 2003 a 2010).

En termes comparatifs, à partir des données du Secrétariat National de Protection et de Defense Civile (SINDEP), il a été possible de compléter les informations sur les arrêtés de Reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique pour les années 2011 à 2014 puis de les comparer à celles de 2010 (tableau 6.3).

Région	2011	2012	2013	2014	Total
Norte	52	102	60	31	245
Nordeste	297	1.554	3.041	1.779	6.671
Sudeste	216	342	305	312	1.175
Sul	657	755	306	466	2.184
Centro-Oeste	60	23	35	49	167
Total	1.282	2.776	3.747	2.637	10.442

Tableau 6.3. Arrêtés de Reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique émis par région sur la période 2011-2014. (Source : élaboré à partir des données du Secrétariat National de la Protection et de la Defense Civile, SINDEP).

Sur ces années 2011 à 2014, l'année de 2013 apparaît avec le plus grand nombre d'arrêtés (3747), dont 3041 pour la région Nordeste. On peut aussi comparer le nombre total d'arrêtés émis par

région sur cette période : là aussi, la région Nordeste se distingue (6671, dont une majorité liée à la sécheresse), précédant les régions Sud (2184) et Sudeste (1175).

Au niveau régional, sur la période 2003-2014, le Nordeste se distingue par le plus grand nombre d'arrêtés de Reconnaissance de Situation d'Urgence et d'État de Calamité Publique (événements pluvieux et sécheresses). Les données de l'*Atlas Brasileiro de Desastres Naturais* (1991-2010 - Volume Brasil : CEPED-UFSC, 2011) font apparaître que cette région représente 59,30 % des arrêtés pour catastrophes liées à la sécheresse (*estiagem, seca*) sur la période considérée. En ce qui concerne les inondations brusques, elle apparaît au troisième rang (24,58 %, représentant 1664 événements, principalement concentrés sur le premier semestre de chaque année). Pour les inondations progressives, le Nordeste (28,4 %) est précédé par les régions Sudeste (31,55 %) et Sud (22,65 %). Ces données montrent que les événements qui affectent la région Nordeste sont surtout ceux liés aux périodes de sécheresse, ce qui suggère que ni le gouvernement fédéral, ni les États, ni les communes de la région n'étaient préparés aux catastrophes liées à des événements pluvieux extrêmes.

Grâce au « Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) », une série historique d'informations est disponible sur les catastrophes naturelles (*Desastres Naturais no Brasil*) de 2013 à 2016, en ce qui concerne la reconnaissance, l'état de calamité publique et la situation d'urgence par commune, mais non par région.

Quant à la distribution des types d'événements par région, il apparaît que de janvier à juin 2010 (tableau 6.4), la région Sud a dépassé les autres régions brésiliennes, avec l'émission de 336 arrêtés concernant des événements pluvieux (crues et inondations), des tempêtes et chutes de grêle (207 arrêtés), et des épisodes de sécheresse (204 arrêtés). En second lieu apparaît le Nordeste, avec 199 événements pluvieux (crues et inondations), mais 265 arrêtés pour événements liés à des épisodes de sécheresse.

Types d'événements	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Total
Crues éclair, inondations, débordements urbains	16	199	74	164	336	789
Sécheresses		265	15	99	204	583
Cylones					4	4
Tempêtes, grêle		2		6	207	215
Glissements				20		20
Erosion marine		3		2		5
Erosion fluviale		1	5			6
Dégradation ou destruction d'ouvrages d'art		1		2		3
Migrations intenses et incontrôlées	1					1
Erosion linéaire	1				2	3
Rupture de barrage		1				1
Gelées				5		5
Total	18	472	94	298	753	1.635

Tableau 6.4. Types d'événements catastrophiques par région (janvier à juin 2010). (Source : Estudo Técnico/CNM - Maio 2010. Desastres Naturais no Brasil. Análise das portarias de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública de 2003 a 2010).

Les États qui ont enregistré le plus grand nombre de catastrophes naturelles cette année-là (2010) furent le Santa Catarina (23,2 %), le Rio Grande do Sul (17,5 %), la Bahia (10,8 %) et le Minas Gerais (10,2 %). Le Ceará n'a obtenu que 5 arrêts, correspondant à 0,3 % du total (tableau 6.5).

Unité Fédérative	Crues éclair et inondations	Sécheresses	Cyclones	Tempêtes et grêle	Glissements	Erosion marine	Erosion pluviale	Rupture de barrage	Gel	Total
Acre	1									1
Alagoas	14	34				2				50
Amazonas	36						5			41
Bahia	35	140					1			177
Ceará	5									5
Espirito Santo	22	4		1	2	2				31
Goiás	1									2
Maranhão	78									78
Minas Gerais	66	94		4						166
Mato Grosso do Sul	10									10
Mato Grosso	5									6
Pará	36									36
Paraíba	-	4								4
Pernambuco	16	75		2		1				94
Piauí	40	12							1	53
Paraná	45	15		26						88
Rio de Janeiro	24	1			9					34
Rio Grande do Norte	11									11
Rondônia	1									1
Roraima	-	15								15
Rio Grande do Sul	168	61	1	56						286
Santa Catarina	124	128	3	125						380
São Paulo	51	-		1	9					66
Total	789	583	4	215	20	5	6	1	5	1.635

Tableau 6.5. Types de catastrophes naturelles les plus fréquentes par État (janvier-juin 2010). (Source : Estudo Técnico/CNM - Maio 2010. Desastres Naturais no Brasil. Análise das portarias de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública de 2003 a 2010). Traduction de la légende : voir 6.2.1.1.

Sur les 1635 événements recensés sur l'ensemble du Brésil, de janvier à juin 2010, les crues et inondations sont au nombre de 785, les sécheresses de 583, et les tempêtes et chutes de grêle, de 215. Parmi les types de catastrophes naturelles les plus fréquentes dans chaque État sur cette période, ceux

liés aux précipitations (crues et inondations) prédominent dans le Rio Grande do Sul (168) et le Santa Catarina (124). Viennent ensuite les événements liés aux épisodes de sécheresse, dans la Bahia (140) et le Santa Catarina (128). Enfin, les tempêtes et chutes de grêle, au Santa Catarina (125).

Pour 2011, la CNM a aussi présenté une étude, moins complète que pour 2010 (CNM, 2010), avec des données importantes sur des problèmes récurrents liés aux précipitations et aux périodes de sécheresse dans les différentes régions. Cette année est importante pour notre travail car elle coïncide avec de grandes pluies qui ont affecté le Cariri Cearense (sud de l'État du Ceará), où se situent les villes de Crato et Barbalha.

En 2011 furent publiés 1245 arrêtés concernant 987 communes. S'y distinguent les États de Santa Catarina (358), du Rio Grande do Sul (248), du Pernambuco (91) et du Mato Grosso (85). L'État du Ceará n'a été concerné que par 13 arrêtés de Situation d'Urgence.

6.3.1.3. La question des catastrophes naturelles vue à travers les incidences financières

Les données de la CNM (2010) montrent les dépenses du Gouvernement Fédéral dans les deux programmes liés à la défense Civile : « Prévention et Préparation aux Catastrophes » et « Réponse aux Catastrophes ».

On voit dans le tableau 6.6 que sur la période 2006-2011, ces sommes se répartissent entre 13 % seulement pour la prévention et 87 % pour la réponse aux catastrophes. C'est en 2010 qu'ont été faits les plus grands investissements dans la rubrique « prévention » (178 099 594 de R\$, soit ~55 millions d'euros), mais les actions de réponse recevaient encore 2 485 256 167 de R\$, soit ~800 millions d'euros. Ceci suggère que sur cette période le pays a beaucoup plus investi dans les actions de gestion de crise et de réponse aux catastrophes que dans la prévention.

Programme	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Total
Prévention des Catastrophes	48.211.127	67.790.434	134.472.299	157.844.569	178.099.594	158.623.904	745.041.927
Réponse aux Catastrophes	168.386.064	440.265.690	565.303.901	1.577.415.444	2.485.256.167	1.068.848.395	6.305.475.660

Tableau 6.6. Dépenses pour les programmes de prévention, de préparation et de réponse aux catastrophes naturelles dans la période 2006 - 2011. (Source : Estudo Técnico Confederação Nacional dos Municípios - CNM, 2011).

Pour Almeida (2009), « le Brésil ne possède pas de culture du risque et ne développe pas une gestion du risque, seulement une gestion de crise ». Ce qui existe en réalité, c'est une concentration des actions du Gouvernement Fédéral tournées vers l'après-catastrophe. Ces actions comportent la

libération de ressources financières d'urgence, la distribution de kits d'assistance humanitaire et l'organisation des interventions de Défense Civile (corps de pompiers, forces armées, etc.). Ce n'est que dans les 6 dernières années que l'on a commencé à donner plus d'importance aux questions de protection, de prévision et de prévention.

En 2016, la Banque Mondiale, en partenariat avec le CEPED (Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres - UFSC) a lancé un document intitulé « *Relatório de Danos, Materiais e Prejuízos Decorrentes dos Desastres Naturais no Brasil (1995-2014)* » (Rapport sur les dommages matériels et préjudices dus aux catastrophes naturelles au Brésil, 1995-2014), où sont organisées les données et informations envoyées par les communes aux États et à l'Union (Fig. 6.29. Selon ce rapport, sur la période considérée, les pertes totales ont été 182,7 milliards de R\$, dont 137,3 milliards de R\$ en préjudices publics et privés, et 45,4 milliards de R\$ en biens matériels (CEPED, UFSC, 2016).

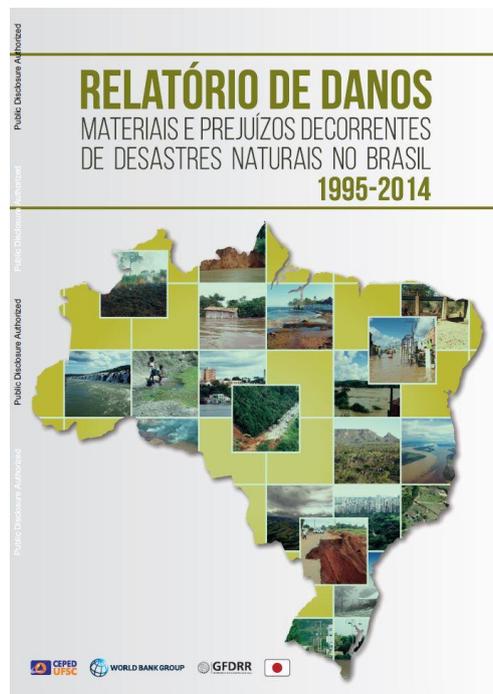


Figure 6.29 : « Relatório de Danos, Materiais e prejuízos decorrentes dos desastres naturais no Brasil (1995-2014) ». (Source : <http://www.cepud.ufsc.br/relatorio-de-danos-materiais-e-prejuizos-decorrentes-de-desastres-naturais-no-brasil-1995-2014/>)

Les dommages matériels les plus significatifs concernent les infrastructures (59 %), puis les habitations (36 %), tandis que 5 % seulement concernent les installations de santé, d'enseignement, etc. Les préjudices publics représentent 14 % du total, et les préjudices privés 86 % (dont 70 % du total pour l'agriculture, 20 % pour l'élevage, 6 % pour le secteur des services et 4 % pour l'industrie). Comme montré plus haut (6.2.1.2), une hausse de la fréquence et de l'intensité des catastrophes

apparaît à partir de 2000, sans qu'il apparaisse clairement si cela peut être lié à une amélioration du système de collecte des données (CEPED-UFSC, 2016).

Les catastrophes climatiques (surtout les épisodes de sécheresse affectant le Nordeste) sont les plus coûteuses : 54 % des montants, 48 % des déclarations. Les catastrophes d'origine hydrologique (crues, inondations) représentent 40 % du total des montants et 39 % des déclarations (93 % des montants dans la région Nord, 62 % dans la régions Sud-Est). Quant aux catastrophes météorologiques (tempêtes, chutes de grêle), elles entraînent 5 % du montant des dommages et préjudices (12 % dans la région Sud) pour 12 % des déclarations (27 % dans la même région).

Ces chiffres suffisent à montrer que le Brésil est exposé à une large gamme de catastrophes naturelles, avec des pertes annuelles supérieures à 9 milliards de R\$ (~2,3 milliards d'euros), soit un très fort impact économique (CEPED-UFSC, 2016).

6.3.2. Des textes aux actes : mise en place d'un système de prévention des risques et de gestion des catastrophes naturelles

6.3.2.1. Mise en œuvre du cadre législatif

Après les événements catastrophiques survenus dans les États de Santa Catarina (2008), Pernambuco et Alagoas (2010) et principalement de Rio de Janeiro (2011), sous la présidence Lula, le gouvernement a amplifié ses actions en réponse aux catastrophes naturelles. Depuis, la thématique "Gestion des Risques et des Catastrophes" est devenue un sujet prioritaire, et des initiatives importantes ont été prises, en particulier sur le plan législatif, avec les deux lois récentes mentionnées plus haut (5.3.2.1) : les lois **n° 12.340, du 1er décembre 2010** (création d'un Système National de Défense Civile - SINDEC - et transferts de ressources pour les actions de secours, d'assistance aux victimes, de rétablissement des services essentiels et de la reconstruction dans les zones atteintes par les catastrophes ; Fonds Spécial pour les Calamités Publiques - FUNCAP) et **n° 12.608, du 10 avril 2012** (Politique Nationale de Protection et de Défense Civile - PNPDEC -, Système National de Protection et de Défense Civile - SINPDEC - et Conseil National de Protection et de Défense Civile - CONPDEC).

Cette période est aussi celle de :

1. La création du Programme n° 2040 « **Gestion des Risques et Réponse aux catastrophes** » dans le Plan Pluriannuel (2012-2015), traitant de cette thématique ;
2. L'élaboration du **Plan National de Gestion des Risques et de Réponse aux Catastrophes** (PNGRD), ayant pour objectif de réaliser la cartographie des zones de risque et la mise en place d'un système de surveillance, d'alerte et de réponse aux

catastrophes naturelles. Ses actions, relevant de plusieurs ministères, comportent les 4 axes thématiques suivants :

L'axe **Surveillance (*Monitoramento*) et Alerte** a pour objectif de renforcer le Système de Surveillance et d'Alerte au moyen de l'extension du réseau d'observation et des structures du « *Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais* » (CEMADEN) et du « *Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres* » (CENAD). Il doit aussi implanter des « salles de situation » dans tous les États pour la surveillance hydrologique assurée par l'Agence Nationale des Eaux (ANA). Cette structure destinée à fonctionner 24/24 h permettra au CEMADEN de transmettre au CENAD les alertes d'événements imminents dans les zones de risques reconnues (jusqu'à 6 h à l'avance), et au CENAD de transmettre ces alertes aux États, aux communes et autres organismes concernés.

L'axe **Cartographie et acquisition des données** prévoit la cartographie des zones de risques élevés de glissements de terrain, crues et inondations dans 821 communes jugées prioritaires. Dans ces communes devront être élaborés des plans municipaux d'intervention, ayant pour but d'identifier la vulnérabilité des habitations et des infrastructures situées dans les zones de risques, et de proposer des solutions aux problèmes rencontrés. Il convient aussi d'élaborer des cartes géotechniques d'aptitude à l'urbanisation, devant servir à établir des directives d'urbanisme pour les nouveaux projets de lotissement.

La cartographie des zones à risques a été réalisée dans 538 communes sur les 821 prioritaires, celles qui présentent les risques les plus élevés d'inondations et de mouvements de masse, les nombres les plus élevés de victimes et de personnes sans abri ou déplacées. Les levés ont été faits par la Compagnie de Recherche de Ressources Minières (*Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*, CPRM), selon laquelle il existe actuellement 560 000 logements situés dans ces zones de risques. Ces données seront utilisées par le CEMADEN pour mieux cibler les alertes.

Le MCTI (Ministère de la Science, de la Technologie et de l'Information) est aussi à l'origine de l'installation de pluviomètres automatiques et semi-automatiques dans les régions concernées. Il en existe déjà plus de 600, dont 501 ont déjà transmis des données, augmentant ainsi la couverture des zones de risques. La région Serrana de l'État de Rio de Janeiro dispose de 92 unités.

L'Agence Nationale des Eaux (ANA) a implanté des « salles de situation » dans 23 États et cartographié les risques hydrologiques dans tout le pays. L'objectif de ces salles est de suivre les tendances hydrologiques, avec l'analyse du volume des pluies, des niveaux des rivières et des réservoirs, des débits, afin de prévoir les événements extrêmes et d'aider à la prévention.

L'axe **Réponse aux Catastrophes** englobe un ensemble d'actions de réponse à la survenue de catastrophes, telles que la création d'une Force Nationale d'Urgence et la mobilisation de la Force Nationale de Sécurité en appui aux États et communes atteints. Cela passe par la structuration de la Force Nationale du Sistema Único de Saúde (SUS) (formation de professionnels, constitution d'hôpitaux de campagne et de stocks de matériel et de médicaments pour faire face jusqu'à trois

catastrophes simultanément, etc) ; par l'implantation d'une Carte de Paiement de la Défense Civile qui sera renforcée, afin de faciliter les versements aux États et aux communes ; par la mise à disposition de logements du Programme « *Minha Casa, Minha Vida* » et de ressources de secours, assistance et reconstruction dans les zones atteintes.

Le Ministère de l'Intégration Nationale (MI) a livré aux défenses civiles municipales des kits composés de pick-up 4x4, de tablettes, GPS et radio, pour 91 communes. De son côté, le Ministère de la Défense a acquis et mis à disposition des modules comportant des équipements d'intervention sur les catastrophes naturelles dans les régions Sud, Sudeste, Nord et Nordeste. Chaque unité comporte 600 items, tels que ponts mobiles, véhicules, embarcations et engins de chantier, systèmes de communication par satellite, ambulances, tentes ou baraquements et hôpitaux de campagne. Enfin, le Ministère de la Santé a structuré une Force Nationale du SUS, avec la mise sur pied de 42 équipes régionalisées toujours prêtes à intervenir.

La transmission des fonds aux communes atteintes est désormais plus facile. Actuellement, la Carte de Paiement de Défense Civile (CPDC) – dépendant du Ministère de l'Intégration Nationale – est utilisée par 1761 communes lors des crises et toutes les ressources sont accessibles par le « *Portal da Transparência* ». Sur le total des mairies qui ont déjà utilisé la carte, 700 appartiennent à la liste des 821 communes prioritaires.

C'est aussi pour accélérer l'assistance aux victimes de catastrophes naturelles qu'ont été implantés des « Centres de Stockage Stratégique » à usage humanitaire dans les villes de Brasília (DF), Rio de Janeiro (RJ), Porto Alegre (RS), Manaus (AM) et Recife (PE), capitales stratégiques pour l'approvisionnement de toutes les régions du pays. En cas d'urgence, ces centres doivent assurer la distribution de produits tels que des colis alimentaires, de l'eau, des produits d'hygiène personnelle, de couchage ou de nettoyage, entre autres.

L'axe **Prévention** regroupe les travaux du Programme d'Accélération de la Croissance (PAC) consacrés à la réduction des risques de catastrophes naturelles. Parmi les actions prévues, on citera : les travaux de confortement des versants, le drainage urbain et le contrôle des inondations ; la construction de systèmes de captage, distribution et adduction d'eau potable dans les régions semi-arides pour combattre les effets des périodes de sécheresse ("*secas*"). On notera que cet axe porte davantage sur des mesures de protection (ou mesures structurelles) que sur des mesures préventives *stricto sensu*.

Les investissements fédéraux portent ainsi sur l'exécution de travaux de drainage, de stabilisation de versants et de protection contre les crues, avec des ressources provenant du Programme d'Accélération de la Croissance (PAC). Depuis 2007, le Ministère a libéré 286 219 595 R\$ (~60 millions d'euros) - dont 100 603 990 R\$ (~22 millions d'euros) entre janvier et août 2011. Il était alors prévu d'investir 21 milliards de R\$ (~5 milliards d'euros) dans ces actions, dont 19 milliards R\$ (~4,5 milliards d'euros) déjà engagés.

C'est à travers les Secrétariats des Infrastructures Hydriques (SIH) et de la Défense Civile (SEDEC) que le Ministère de l'Intégration Nationale a récemment investi dans la « prévention », avec le financement de 48 chantiers de protection contre les crues dans 7 États (Rio de Janeiro, Pernambuco, Tocantins, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Roraima et Bahia), à hauteur de 1,8 milliard de R\$ (~400 millions d'euros). Parmi les travaux du SIH, on trouve des ouvrages de canalisation de cours d'eau, de dragage de canaux, de désensablement et de restauration de systèmes de drainage (ex : Restauration du Système de Drainage de la Baixada Campista, Rio de Janeiro ; drainage et contrôle des inondations à Navegantes, Santa Catarina).

6.3.2.2. Premières réalisations

En 2011, immédiatement après les catastrophes survenues dans la région Serrana (montagnes) de Rio de Janeiro, le Centre National de Gestion des Risques et Catastrophes (CENAD) a reçu des investissements du Gouvernement Fédéral pour l'extension de ses infrastructures et l'acquisition d'équipements. Des secteurs plus spécialisés dans ce domaine ont été mis en place, tels que : une salle de gestion de crise, un Centre de la Surveillance et des Opérations, des logements et même une salle des coffres pour abriter les systèmes informatiques. En 2012, le nombre d'employés a augmenté, avec le recrutement de spécialistes tels que des analystes en Défense civile, analystes en systèmes, ingénieurs, géologues, météorologues, chimistes, assistantes sociales, statisticiens (<http://www.integracao.gov.br>).

C'est aussi en 2011 que le Gouvernement Fédéral a créé le Centre National de Surveillance et d'Alerte des Catastrophes Naturelles (CEMADEN), relevant du Secrétariat aux Politiques et Programmes de Recherche et Développement (SEPED) du Ministère de la Science, de la Technologie et de l'Information (MCTI). Il s'agissait de développer, tester et implanter un système de prévision des catastrophes naturelles dans les zones sensibles du pays (<http://www.cemaden.gov.br>. Accès le 09.02.2014).

Son action consiste à identifier les vulnérabilités dans l'utilisation et l'occupation des sols, en relation avec l'aménagement urbain et les infrastructures, mais elle porte aussi sur l'aide à la prise de conscience des habitants des zones de risques. Son but est de fournir des données sur les zones de risques de mouvements de masse, de crues et d'inondations à partir de recherches scientifiques en météorologie, hydrologie, géologie et cyndinique (science des risques), avec un accent mis sur la prévision, la préparation, la prévention et la réduction des impacts des événements extrêmes dans les bassins-versants urbains et ruraux.

Actuellement, le CEMADEN surveille 958 communes (chiffre actualisé le 22.11.2018) des régions Sud, Sudeste, Centre Ouest, Nord et Nordeste (Fig. 6.30). Pour être surveillées, ces communes doivent obligatoirement présenter une cartographie de leurs zones de risques de glissements, d'éboulements, de crues, d'inondations et d'érosion des sols, ainsi qu'une estimation des conséquences probables d'une catastrophe naturelle.

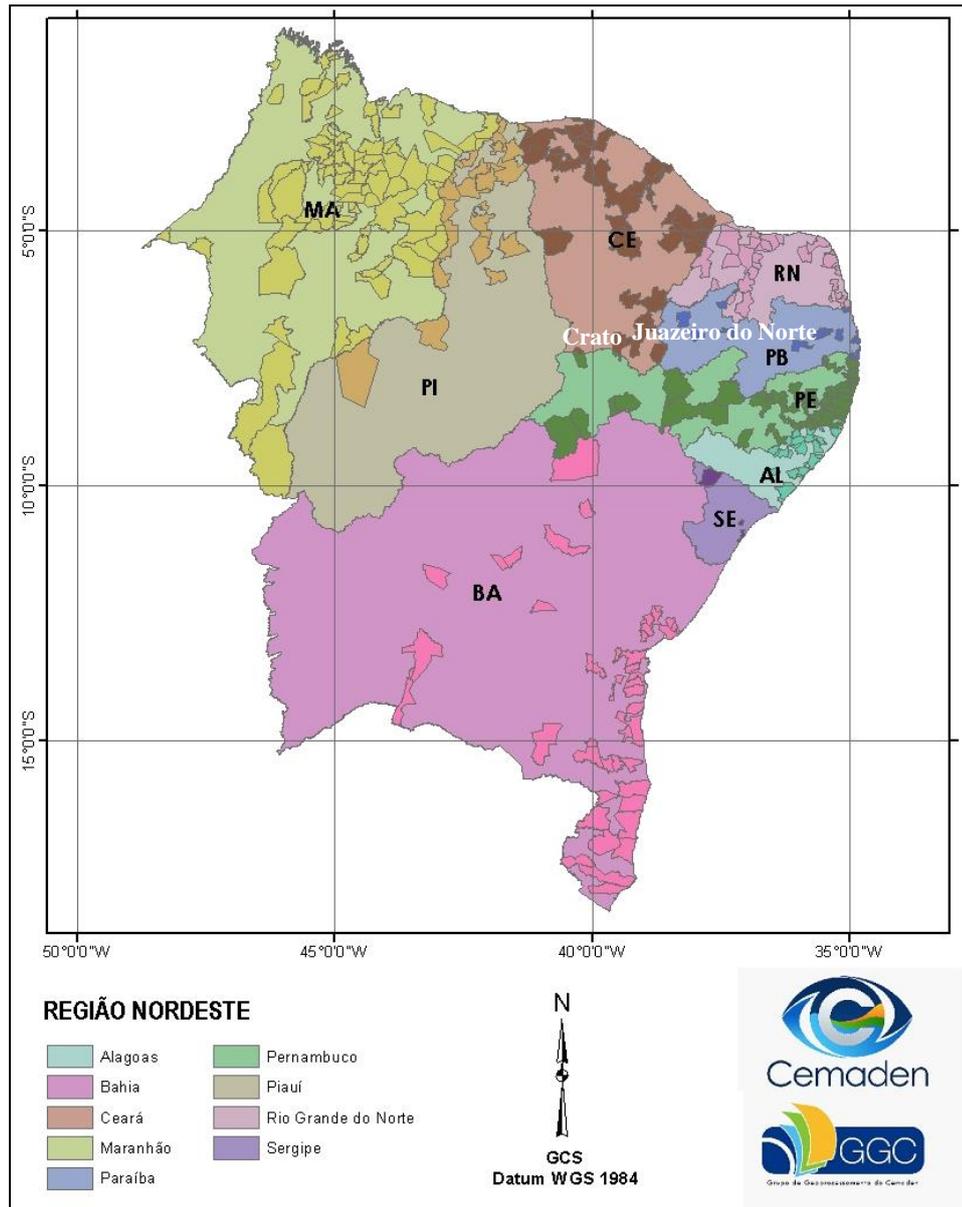


Figure 6.30. Communes surveillées par le CEMADEN dans le Nordeste brésilien. Les communes de Crato et Juazeiro do Norte (frontière sud du Ceará) y figurent, pas celle de Barbalha. (Source : <http://www.cemaden.gov.br/>)

Grâce au projet “*Desenvolvimento de Sistema de Previsão de Enxurradas, Inundações e Movimentos de Massa em Encostas para Prevenção de Desastres Naturais*” (Développement d’un système de prévision des inondations brusques et progressives, et des mouvements de masse dans les versants pour la prévention des catastrophes naturelles), le CEMADEN a pu acquérir 186 plateformes de collecte de données hydrologiques (PCDHidro) en vue de la mise en place de réseaux de télésurveillance automatique.

Dans l’État du Ceará, un partenariat entre le CEMADEN et la COGERH (*Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos*) a permis l’installation de onze « Plateformes de Collecte de Données

Hydrologiques » ou PCDs. Au sein de la région du Cariri (bassin-versant du Rio Salgado), ce sont les communes de Crato et Lavras da Mangabeira, propices aux inondations récurrentes, qui ont été sélectionnées pour être ainsi surveillées. La station hydrologique de Crato est située sur le Canal do Rio Granjeiro, au niveau du pont de l'église Nossa Senhora de Fátima, quartier Pimenta (Fig. 6.31). Elle a commencé à enregistrer ses premières données en décembre 2014. Mais les données obtenues jusque là ne sont pas encore exploitables.



Figure 6.31 : Plateforme de collecte de données hydrologiques (pluviométrie, hauteur d'eau, débit) installée en 2014 sur le Canal do Rio Granjeiro, Crato. (Source : <https://www.blogcariri.com.br/2014/12/crato-ce-plataformas-de-dados.htm>).

De son côté, et dans le cadre de la mise en place du Plan National de Gestion des Risques et de Réponse aux Catastrophes (PNGRD), le CPRM (Service Géologique du Brésil) a produit un certain nombre de **Cartes de Susceptibilité aux mouvements gravitaires de masse et aux inondations**, dans le cadre du Plan Pluriannuel 2012-2015. Élaborée à partir d'un large ensemble de données géographiques, géologiques et géotechniques combinées dans des SIG, cette cartographie de l'aléa basée sur des fonds cartographiques du 1:25 000 au 1:250 000 concernait 300 communes à la date de janvier 2016. Parmi elles, sept étaient localisées dans le Ceará, dont une seule dans le Cariri (Lavras da Mangabeira), surtout affectée par des risques d'inondation.

6.3.2.3. Amélioration de l'information sur les catastrophes naturelles

En 2012, le Secrétariat National de la Défense Civile, rattaché au Ministère de l'Intégration Nationale, a pris lui aussi des initiatives importantes dans le domaine des catastrophes naturelles, susceptibles d'avoir des répercussions au niveau communal.

La première consista en l'élaboration d'un "**Atlas Brésilien des Catastrophes Naturelles**" (1991-2010 : volume Brésil et ses régions), par le « *Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres* » (CEPED) de l'Université Fédérale de Santa Catarina - UFSC.

Cet atlas a pour but de compiler et de présenter les informations sur les catastrophes naturelles survenues au cours des 20 dernières années dans tout le territoire, avec la publication de 26 volumes, un pour chaque État (dont le Ceará) et un pour le Brésil. On y trouve des cartes thématiques élaborées à partir de 31 909 déclarations de catastrophes montrant, pour chaque année, les risques et dommages dûs aux sécheresses ("*estiagem*", "*seca*"), aux inondations brusques ou graduelles, aux tempêtes, cyclones et tornades, à la grêle, au gel, aux incendies de forêt, aux mouvements de masse, à l'érosion fluviale, au ravinement et à l'érosion littorale.

Les informations proviennent des organismes d'État de la Défense Civile, du Ministère de l'Intégration Nationale, du Secrétariat National de la Défense Civile, des Archives Nationales et de l'Imprimerie Nationale. Le rassemblement de ces informations, conjointement avec l'analyse des données sur les dommages et les pertes humaines, devrait servir à mieux cibler les actions d'aménagement, de gestion et de réduction des catastrophes.

Cet atlas a été actualisé en 2013 (CEPED-UFSC : Atlas Brésilien des Catastrophes Naturelles, 1991 à 2012 : volume Brésil), avec les données des années 2011 et 2012 ainsi que de nouvelles méthodes pour la caractérisation des catastrophes. Parmi d'autres publications importantes, on peut signaler les rapports de « *Avaliação de Perdas e Danos* » élaborés par la Banque Mondiale en collaboration avec le gouvernement de l'État du Santa Catarina, publiés en 2012 et traitant des inondations brusques au Santa Catarina (2008), Alagoas et Pernambuco (2010) et Rio de Janeiro (2011). En 2017 a été publié le « *Relatório de Danos, Materiais e prejuízos decorrentes dos desastres naturais no Brasil (1995-2014)* » (CEPED-UFSC, 2017).

L'autre mesure a été la création d'un **Système Intégré d'Information sur les Catastrophes (S2ID)**, qui a pour rôle l'informatisation des processus de transfert des ressources en cas de catastrophe. Il comporte deux volets : gestion du processus (déclaration et reconnaissance, sollicitation et libération des ressources ; contrôle et vérification des comptes) ; et consultation des informations, à trois niveaux (banque de données et analyse spatiale, atlas brésilien des catastrophes naturelles, bibliothèque virtuelle).

En 2012, le Centre National de Gestion des Risques et des Catastrophes (CENAD) a lancé la première édition d'un « *Anuário Brasileiro de Desastres Naturais 2011* », suivie de la publication d'éditions annuelles (catastrophes de 2012 et 2013). Le but est de rassembler les informations sur la distribution des catastrophes naturelles dans le pays et de créer une banque de données permettant la

comparaison des fréquences et lieux d'occurrence de tel ou tel type d'événements aux niveaux national et régional.

Les informations utilisées proviennent des anciens formulaires d'Évaluation des Dommages (AVADAN) et de Notification Préliminaire de Catastrophe (NOPRED), des Décrets de Déclaration d'État de Calamité Publique (ECP) ou de Situation d'Urgence (SE) et Arrêtés de Reconnaissance Fédérale, ainsi que des données collectées dans les Coordinations d'État de la Défense Civile (CEDECs) (CENAD, 2012).

Outre ces réalisations techniques, le Secrétariat de la Défense Civile a aussi investi dans la prévention, la préparation et la réponse aux crises, avec l'organisation de cours de formation, d'ateliers et de simulations. En 2013, il a enrôlé 10 000 personnes dans des simulations de situations de catastrophes naturelles dans 18 villes à travers le pays. Cette année-là, pour la première fois, des habitants du Nord et du Centre-Ouest du pays ont aussi participé aux entraînements dans les communautés menacées par des risques imminents.

On remarquera enfin que c'est le Ministère des Villes qui détient le plus gros budget fédéral pour les actions de confortement des versants et de macrodrainage, et donc la majeure partie du budget de la prévention vue sous l'angle technique.

Par ailleurs, d'autres efforts ont été faits dans le domaine de la prévention. Parmi eux, l'élaboration de matériaux bibliographiques par le CEPED et par le Ministère de l'Environnement servant de support aux cours de formation dans certaines régions, ou l'organisation d'événements scientifiques réunissant des chercheurs brésiliens et étrangers (dont des géographes, des ingénieurs, etc.). En 2018, sous l'égide du Ministère de l'Intégration Nationale, un accord de coopération entre le Brésil et le Japon a permis l'élaboration d'un « *Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais* » (projeto GIDES) destiné à l'élaboration de manuels de plans de contingence pour les catastrophes liées aux mouvements de masse. Au nombre de 6, ces manuels sont destinés aux responsables et personnel de la Défense Civile et ont d'abord été élaborés pour les communes du Sud et du Sudeste les plus touchées au début des années 2010.

La prévention est également traitée dans le cadre municipal, à travers des compléments apportés aux Plans Directeurs Municipaux, et la mise en place de Plans de Prévention des Risques dans les communes. Cependant, beaucoup de villes brésiliennes ne disposent pas encore de ces documents, ce qui complique l'action du Gouvernement Fédéral en cas de catastrophe. Par exemple, selon les informations mises à disposition sur le site du Ministère des Villes, seules 9 communes possèdent un Plan de Prévention des Risques dans la région Nordeste, dont aucune dans le Ceará (tableau 6.7), alors que ce sont surtout les régions Sudeste, Nordeste et Centre-Ouest qui concentrent le plus grand nombre de ces plans (États de São Paulo et de Rio de Janeiro).

Plan de Prévention des Risques dans les Communes			
	État	Comune	Année
Région Nordeste	Pernambuco	São Lourenço da Mata	2005
	Pernambuco	Cabo de Santo Agostinho	2006
	Pernambuco	Camaragibe	2006
	Pernambuco	Igarassu	2006
	Pernambuco	Jabotão dos Guararapes	2006
	Pernambuco	Olinda	2006
	Pernambuco	Paulista	Sans date
	Alagoas	Maceió	2006
	Rio Grande do Norte	Natal	2008

Tableau 6.7. Communes de la région Nordeste dotées de plans de prévention des risques. (Source : Élaboré à partir des données du site www.cidades.gov.br.)

On observe que ces documents ont été élaborés à partir de 2004, bien avant les grandes catastrophes de 2010 et 2011, ce qui traduit la récurrence de tels événements dans diverses régions. Enfin, on peut souligner que la grande majorité de ces plans ont été élaborés par des entreprises d'ingénierie et des bureaux d'étude, sans participation directe de professionnels spécialistes de l'environnement (météorologues, climatologues, géologues, géographes...) ni de chercheurs universitaires.

6.3.2.4. Incertitudes quant à un changement culturel et politique en matière de risques naturels ?

Dès 2013, la Commission de Législation Participative de la Chambre des députés (« Câmara ») a débattu de l'application de la loi de prévention des catastrophes environnementales n° 12.608, du 10 avril 2012. Cette commission a critiqué le Gouvernement Fédéral sur la non-application de plusieurs articles, faute de décrets. Il s'agit, entre autres, de la création d'un registre national des communes comportant des zones de risques, de la permission d'accomplir le service militaire dans la Défense Civile et de l'enseignement dans les écoles des pratiques de prévention des catastrophes (Agência Câmara Notícias, 24.09.2013).

Le nouveau cadre législatif apporte incontestablement d'importantes réponses, y compris pratiques, au défi que posent les catastrophes naturelles. Cependant, le Secrétaire national des Droits de l'Homme de "Força Sindical", Lélío Falcão, rappelle qu'il est urgent d'avancer dans l'application

de cette loi du 10 avril 2012 : « *Nous devons responsabiliser les gestionnaires vis-à-vis des fautes, des carences* ». De même, selon le représentant du Mouvement National des Victimes de Catastrophes Naturelles, Corcino Medeiros « *rien n'est résolu des problèmes de sécurité, de prévention et de reconstruction dans les zones affectées par les catastrophes. À cause de la maudite corruption, des détournements de fonds, les ressources envoyées par le Gouvernement Fédéral n'arrivent pas à destination* ». Elles n'arrivent pas dans les aires touchées ni aux populations réellement atteintes.

En 2013, la Commission Mixte Permanente sur les Changements Climatiques du Gouvernement Fédéral a lancé une série de débats au sein de l'Assemblée Législative de l'État de Santa Catarina dans le but de discuter des réalités environnementales dans les États brésiliens les plus vulnérables face aux catastrophes naturelles, et des mesures prises pour réduire les préjudices causés par les événements climatiques.

Pour Vanessa Grazziotin (Partido Comunista do Brasil - AM), présidente de cette commission, « *Le pays souffre d'un passif historique dans le domaine de la défense civile, où il manque encore une culture de la préparation. Nous devons modifier notre forme de pensée, afin d'éviter la survenue de nouveaux désastres* ». À cette occasion, fut réaffirmée la nécessité de promouvoir la mise en œuvre urgente d'une Politique Nationale de Réponse aux Événements Extrêmes, principalement axée sur la prévention (Agência Câmara Notícias, 30. 08.2013).

Le traitement déficient de récentes catastrophes qui ne sont pas toujours d'origine naturelle (rupture des barrages de Mariana et de Brumadinho, Minas Gerais, le 25/01/2019) montre que ces débats restent d'actualité, surtout depuis la mise en place en janvier 2019 d'une nouvelle présidence qui annonce son intention de reléguer les questions environnementales au second plan...

6.4. Conclusion du chapitre 6

Si c'est surtout à partir de 2011 que le sujet des catastrophes naturelles et des risques est entré dans les priorités gouvernementales, il apparaît que c'est bien dû à une augmentation du nombre de sinistres enregistrés dans différentes régions ces dernières années, sans qu'apparaissent toujours clairement les raisons de l'augmentation du nombre de victimes et des dommages. Cette augmentation est-elle liée à des facteurs naturels, à une occupation non contrôlée, toujours plus dense, des aires de risque, à cause des insuffisances de la politique d'aménagement urbain et de la législation, et/ou à une médiatisation accrue et meilleur recensement de ces événements ?

Depuis les années 2000, il apparaît clairement que les enregistrements des catastrophes sont devenus de plus en plus complets, ce qui peut contribuer, aux côtés d'autres facteurs (croissance démographique, occupation croissante de zones de risque, etc.) à expliquer l'apparente tendance à une augmentation de ces événements sur la même période. L'analyse des catastrophes les plus graves du début des années 2010 a permis d'identifier les principaux types de facteurs en cause et de comprendre

ce qui a amené cette question à prendre une place croissante dans la société et les politiques publiques, à l'échelle du pays comme à celle de la région étudiée.

Le pays s'est incontestablement engagé dans la voie d'un réel traitement de ces problèmes, en particulier avec la mise au point d'un arsenal juridique et administratif comportant en particulier la mise en place d'un système de prévention. Nous remarquons cependant que la plupart des documents et des mises à jour qui ont pu être consultés sont antérieurs à 2015-2016, ce qui ne permet guère de juger de la réelle mise en œuvre de tout l'arsenal constitué dans cette période. Il faut dire qu'aucun événement naturel de l'ampleur de ceux qui ont été décrits dans diverses régions du Brésil, dont notre région d'étude, n'est survenu à la date de rédaction finale de ce chapitre (janvier 2019) et que la mémoire des événements, si stimulante pour un traitement efficace, est souvent courte...

Chapitre 7 : Enseignements d'une approche comparative avec le cas français pour la prévention et la gestion des risques naturels dans la région du Cariri

7.1. Introduction du chapitre 7

L'approche géographique comparative était initialement prévue pour constituer le cœur de ce travail, avec comme idée de départ la recherche des enseignements à tirer de l'expérience française en matière de traitement et de prévention des risques naturels et des possibilités de les transposer dans le cadre brésilien. En fait, il est apparu en cours d'élaboration de la thèse que l'ampleur de la recherche à mener du côté brésilien était telle, avec ses nombreuses voies nouvelles d'investigation, qu'elle justifiait une réorientation vers une approche plus centrée sur la principale région d'étude. Ceci d'autant plus que c'est pendant la même période, et suite à de grandes catastrophes survenues au même moment (années 2010), que le Brésil a commencé à se doter d'une législation spécifique et d'organismes dédiés au traitement de cette question, à l'échelle nationale comme sur le terrain. Il convenait donc de prendre en compte ce nouveau contexte de façon approfondie.

Le choix des deux principaux sites étudiés au Brésil (Crato-Barbalha) et en France (Draguignan) s'était fait en fonction de la survenue alors récente (2010-2011) de catastrophes liées à des inondations brusques, touchant dans les deux cas des agglomérations partiellement construites en fond de vallée à proximité de hauts plateaux d'où dévalent des cours d'eau encaissés et pentus au régime irrégulier, susceptibles de connaître des crues éclair alimentées par des pluies d'autant plus intenses qu'elles sont renforcées par des effets orographiques. Malgré la réorientation de notre travail, il a paru utile de conserver la comparaison, même plus limitée que ce qui était prévu, car elle montre dans les deux cas une forte réactivité des différents acteurs face à la gravité croissante du problème des risques naturels, et aussi des différences de stratégie dont il convient de chercher les facteurs. Une approche nécessaire avant d'envisager toute transposition d'un pays à l'autre, et qui pourrait d'ailleurs se faire dans les deux sens.

7.2. La catastrophe des 15 et 16 juin 2010 dans le Var et ses enseignements

Les épisodes pluvieux violents ne sont pas rares sur la façade méditerranéenne de la France, comme le démontre la répétition quasi-annuelle d'inondations catastrophiques et meurtrières aussi bien en plaine que dans les vallées de l'intérieur. Qualifiés d'épisodes méditerranéens en Provence, ils sont aussi connus sous le nom d'épisodes cévenols sur le rebord SE très escarpé du Massif Central (départements de l'Hérault, du Gard, de l'Ardèche) (Fig. 7.1).



Figure 7.1. Un épisode méditerranéen rapporté par la presse à destination du grand public : octobre 2016.

(Source : www.lefigaro.fr/.../01008-20161012ARTFIG00339-meteo-qu-est-ce-qu-un-episode-me).

Dans les deux cas, ces épisodes orageux sont renforcés par des effets orographiques dus au relief montagneux de l'arrière-pays de l'arc méditerranéen français, mais ils correspondent surtout aux forts gradients thermiques qui caractérisent ces régions lors des saisons où le contraste est fort entre des masses d'air froid apportées par les perturbations cycloniques et l'air réchauffé au-dessus des eaux chaudes superficielles de la Méditerranée. La présence de gouttes froides d'altitude au-dessus de ces basses couches humides transforme leur instabilité potentielle en instabilité réelle responsable de la formation d'orages très actifs (Beltrando, 2007). C'est un événement de ce type, d'une intensité exceptionnelle, qui a affecté le Var en juin 2010.

7.2.1. Un événement pluvieux exceptionnel

Le 15 juin 2010, des pluies orageuses particulièrement violentes s'abattent sur les bassins versants des affluents de l'Argens autour de Draguignan et des Arcs (Aille, Florièye, Réal, Nartuby et Endre), du Luc au Muy, des Maures aux reliefs calcaires de Comps sur Artuby à Vérignon (SAFEGE, 2012). Ce périmètre subit des pluies approchant ou dépassant 300 mm, et même 400 mm à Lorgues, Taradeau ou aux Arcs dans la seule journée du 15 juin (Fig. 7.2). Ces valeurs sont très supérieures au maximum de 200 mm enregistré jusqu'alors. Cet événement avait fait l'objet d'une prévision quant à l'activité convective et à sa traduction hydrologique ; il a ensuite été suivi en temps réel en raison de son caractère sévère. Plusieurs Avis d'Orage Violent ont également été émis durant cette journée du 15 juin par l'Observatoire Français des Tornades et des Orages Violents (Artigue *et al.*, 2010), et ce dès le matin.

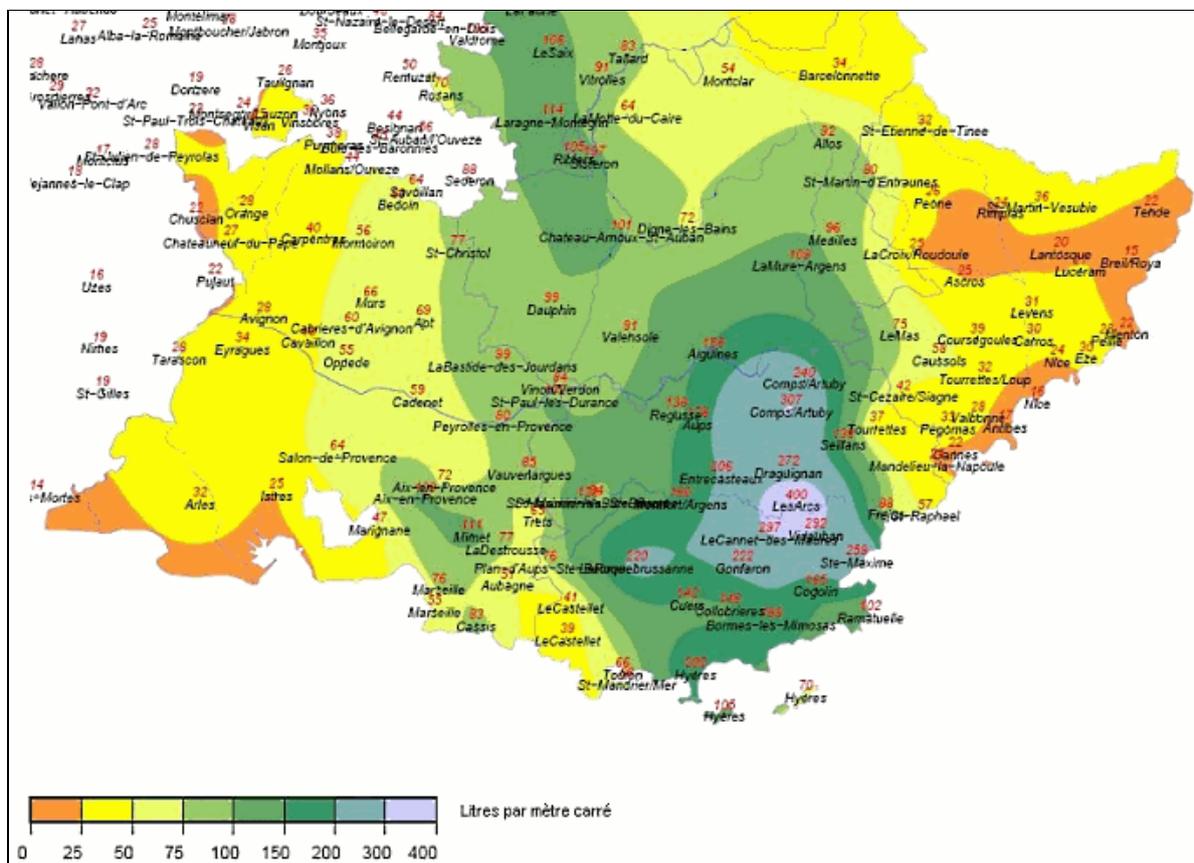


Figure 7.2. Isohyètes maxima du 15 juin 2010 en Provence. (Source : Météo France, *in* SAFEGE 2013).

Selon ces auteurs, la configuration météorologique générale se caractérisait, le 15 juin 2010, par le positionnement d'une dépression d'altitude migrant en cours de journée du Golfe de Gascogne vers les Pyrénées. Cette dépression a redressé le flux d'air au secteur sud à sud-est vers les régions

méditerranéennes. À moyenne altitude (vers 5000 m), de l'air froid circulait et contribuait à déstabiliser la masse d'air. Au sol, une convergence des vents s'est mise en place sur le littoral du Var, y provoquant l'arrivée d'une masse d'air chaud et humide venant du sud du bassin méditerranéen, humidifiée et rendue instable avec un caractère orageux lors de son passage au dessus de la mer.

Dès le matin du 15 juin, un premier passage pluvio-orageux très actif, affecte surtout un axe SN Hyères-Carnoules. Pris dans un flux de Sud, il conduit au déversement constant d'abondantes précipitations (intensités horaires dépassant souvent 150 l/m² durant 3 heures). Sur une zone réduite de l'intérieur varois, s'étendant de Saint-Tropez à Draguignan, les précipitations ont été plus intenses. Les cumuls y ont généralement atteint 200 à 300 l/m², mais ils ont dépassé ponctuellement 350 l/m², près de Draguignan, où les quantités de précipitations ont été celles qui tombent normalement sur plusieurs mois (SAFEGE, 2013). Dès la mi-journée, les cumuls sont très importants sur le Var, avec des lames d'eau qui avoisinent déjà 200 mm localement. Les records de précipitations sont approchés, alors même que des pluies orageuses abondantes sont attendues jusqu'en fin de soirée.

En soirée, un deuxième tourbillon d'altitude remontant de la Méditerranée vers les côtes de la Provence a réactivé la convection. La convergence des vents s'est maintenue au même endroit, et l'extrême faiblesse de la vitesse de déplacement des orages a permis la conservation de leur caractère stationnaire. Les pluies, toujours intenses, avec des noyaux convectifs peu orageux mais très pluvieux, ont donc continué de s'abattre sur l'axe de convergence principal, essentiellement le Var, y ajoutant aux lames d'eau du matin de nouvelles lames d'eau énormes. Les cumuls sont devenus exceptionnels, en particulier dans les secteurs de Draguignan et des Arcs, atteignant 400 mm et même jusqu'à 456 mm sur 24 h près de Lorgues (Esposito, 2013) (Fig. 7.2).

Dans cette zone, le bassin de la Nartuby dans sa totalité et celui de l'Argens ont donc été touchés par les précipitations les plus intenses, ce qui a provoqué des inondations catastrophiques. Il s'agit probablement, pour la zone des précipitations les plus fortes, d'un événement à caractère plus que centennal. La crue dévastatrice la plus connue de la Nartuby avait eu lieu en 1827.

7.2.2. Le bassin-versant de la Nartuby : une configuration propice à la formation de fortes crues

Le bassin-versant de la Nartuby, où se situent les villes de Draguignan et de Trans-en-Provence est onze fois plus grand que celui du Rio Granjeiro dont les crues éclair posent tant de problèmes à la ville de Crato. Cependant, sa déclivité d'ensemble, l'effet de domination des hauts plateaux situés à l'amont, sa compacité, la rapidité de la formation des crues, la présence d'enjeux importants et l'occurrence de puissantes inondations dévastatrices autour du cours d'eau principal et de certains de ses affluents, dont une agglomération de près de 40 000 habitants, autorisent des comparaisons utiles à une réflexion sur la façon dont les risques d'inondation et les catastrophes sont traités en France et au Brésil.

7.2.2.1. Le bassin versant de la Nartuby, un amont semi-montagnard de l'Argens aval

L'Argens est le fleuve principal du département du Var. Son bassin versant est entièrement situé dans le département du Var (SAFEGE, 2012). Sa forme est sensiblement rectangulaire, avec une longueur d'environ 70 km dans le sens Est-Ouest et une largeur de l'ordre de 40 km dans le sens Nord-Sud. Sa superficie totale est de 2721 km². La longueur du fleuve est de l'ordre de 115 km. L'Argens possède un grand nombre d'affluents répartis de façon assez régulière tout au long de son linéaire. Au sein de la zone impactée lors de la crue de juin 2010, le sous-bassin-versant de la Nartuby (229 km²) alimente un des principaux affluents de rive gauche (Fig. 7.3).

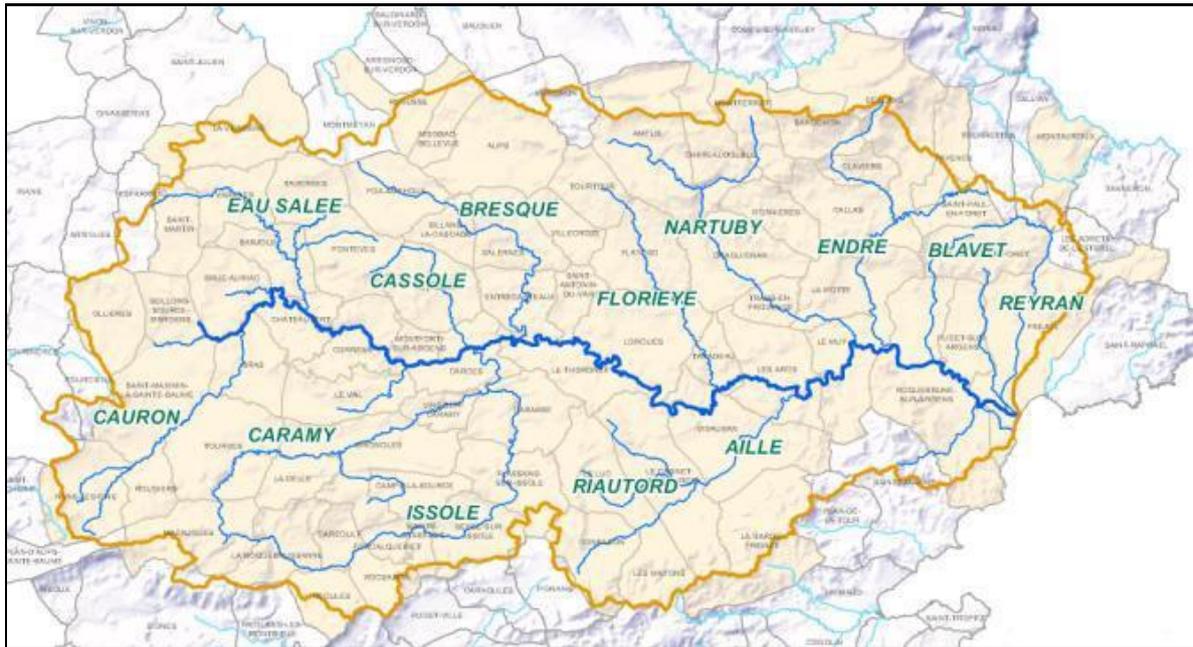


Figure 7.3. Carte du bassin-versant de l'Argens. (Source : PAPI Argens, 2015. www.var.gouv.fr/le-papi-du-bassin-versant-de-l-argens-avance-a4871.html).

Le bassin versant de l'Argens s'inscrit en grande partie dans la Provence calcaire orientale mais englobe aussi, au sud et au sud-est, une partie du massif cristallin des Maures et de la dépression périphérique qui le sépare des plateaux calcaires. Il est bordé par le massif de la Sainte Baume à l'ouest, au Nord par l'escarpement qui délimite les Plans de Canjuers, à l'est par le massif de l'Estérel, et au sud-ouest par le plateau de Rians. Globalement rural, il est en grande majorité couvert par des bois ou des friches. Les principaux lieux de concentration d'urbanisation se trouvent sur la partie aval du bassin versant, avec le secteur de Draguignan - Trans-en-Provence, et sur la basse plaine, du Muy à Fréjus (Fig. 7.4). Les secteurs de vignes et de culture mixte sont concentrés aux alentours des agglomérations. Ils sont pour la plupart situés dans les plaines alluviales.

Dans la partie nord du bassin versant de l'Argens, le sous-bassin versant de la Nartuby culmine à 1130 m d'altitude. Globalement orienté du nord-ouest vers le sud-est, il est élargi en amont

(nord de Draguignan) et étroit et allongé sur sa partie aval (de Draguignan au Muy). La Nartuby traverse les communes de Montferrat, Châteaudouble, Ampus, Draguignan, Trans-en-Provence, La Motte et Le Muy, après avoir reçu les apports de ses principaux affluents, essentiellement situés dans la partie amont du bassin versant. Ce bassin versant est constitué à 67,34 % de forêts et milieux semi-naturels, à 21,44 % de territoires agricoles, à 11,29 % de territoires artificialisés (principalement l'agglomération de Draguignan).

La forme d'ensemble du bassin versant de la Nartuby est celle d'un entonnoir : 60 % de sa superficie se situent en amont de Rebouillon, sous la confluence des Nartuby d'Ampus et de Châteaudouble (SAFEGE, 2012) (Fig. 7.4). Combinée avec les trois ruptures de pente identifiées sur l'ensemble du tracé, cette configuration lui donne un temps de réponse aux précipitations pouvant être très bref : la pente du cours d'eau est plus forte dans sa partie amont avec 3,4 % entre la source et la Nartuby d'Ampus, et plus faible dans sa partie aval avec une valeur de 1,1 % entre Trans et Le Muy.

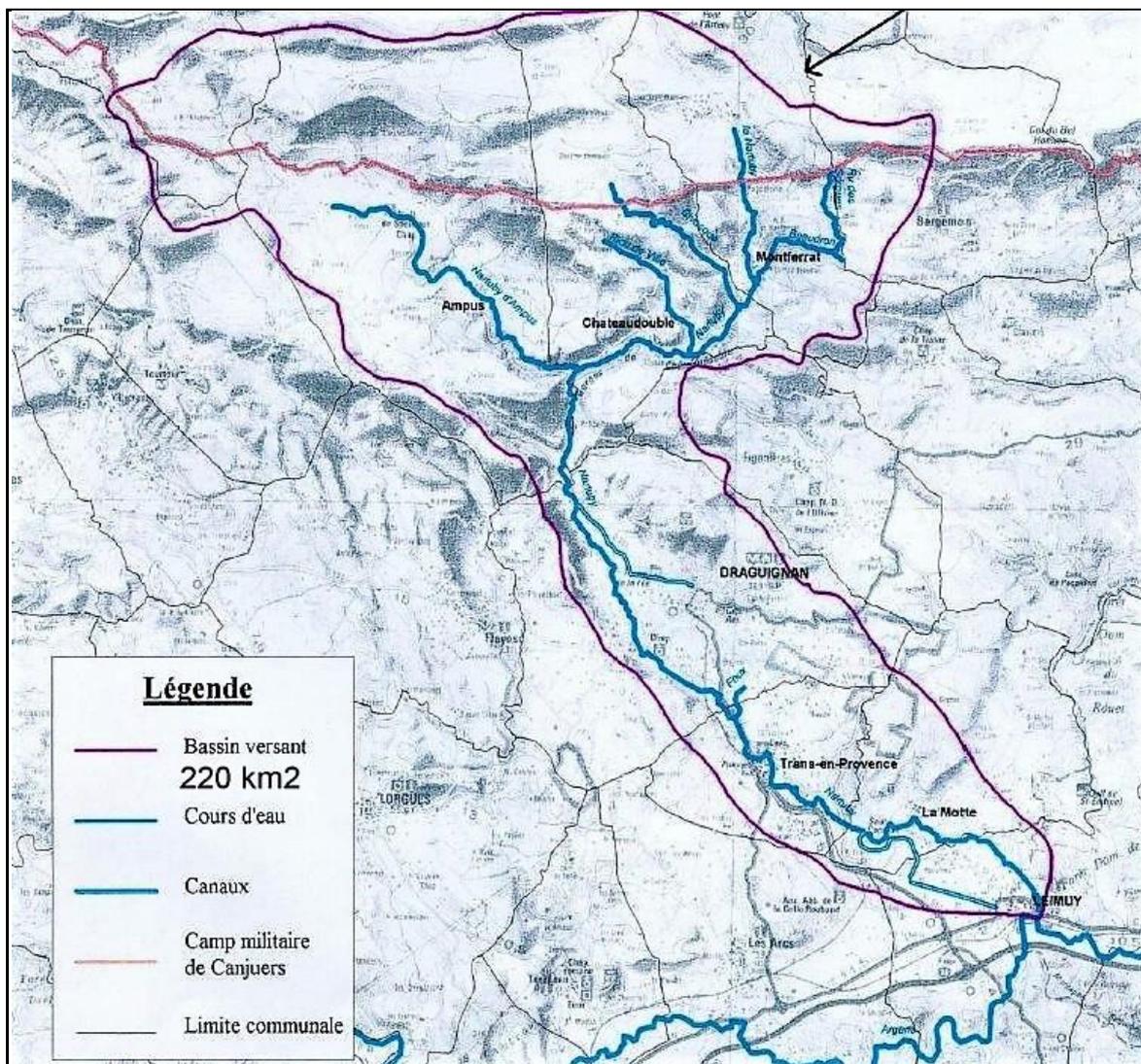


Figure 7.4. Carte du sous-bassin versant de la Nartuby. (Source : paysdefayence.free.fr in Meaudre, 2012).

La longueur totale de la rivière est de 37,4 km. À l'amont, elle naît de la confluence de deux branches encaissées en gorges dans leurs parties inférieures : la Nartuby d'Ampus, à l'Ouest (12,5 km), qui draine essentiellement la commune d'Ampus, et la Nartuby de Châteaudouble, à l'Est, qui draine Châteaudouble et Montferrat, ainsi qu'une petite partie d'Ampus et de Bargemon (Fig. 7.5). Leurs bassins versants respectifs mesurent 50 et 60 km² et culminent à 1130 et 1089 m. Le bassin versant de la Nartuby d'Ampus est plus allongé que celui de la Nartuby de Châteaudouble, plus ramifiée. En amont de Rebouillon, les gorges de la Nartuby d'Ampus et de Châteaudouble, profondes parfois de plus de 200 m, incisent un large gradin morcelé en éléments de plateaux et en alignements de collines entre 600 et 700 m d'altitude, 200 à 300 m en contrebas du rebord du haut plateau calcaire des Plans de Canjuers.



Figure 7.5. Le cadre géographique du bassin-versant de la Nartuby et des villes de Druguignan et Trans-en-Provence, vue perspective. Image Google Earth, 2018.

Les deux ruisseaux ont une pente longitudinale de 6 % environ dans le secteur des gorges et de 3 % en amont de celui-ci. Constituée à partir de Rebouillon, la Nartuby entre dans la commune de Druguignan, avec une dérivation en rive gauche qui alimente un canal d'irrigation aménagé en pied de versant de la Clappe jusqu'aux vallons proches du centre-ville. Peu après, la source de la Foux apporte un peu d'eau salée à la rivière (1000 litres par seconde en hiver et au printemps, 600 litres par seconde à l'étiage) (SIAN, 2007). Dans le secteur Druguignan-Trans-en Provence, la Nartuby reçoit en rive gauche plusieurs vallons secs ou pérennes, pour la plupart repris par le réseau pluvial communal, qui

jouent un rôle important dans la formation des crues et des phénomènes d'inondation : les Vallons de la Valère, de la Riaille, des Tours, de Sainte Barthe et de la Foux.

En aval de Draguignan, la Nartuby, moins encaissée dans le bas plateau qui sépare les hauts plateaux de la dépression périphérique des Maures, présente le plus souvent une pente faible, de l'ordre de 0,12 %. Mais cette section aval est coupée par trois ruptures de pente importantes : à Trans-en-Provence (Fig. 7.6), à la Motte (saut du Capelan, 30 m) et au Muy. Chacune d'elles correspond à une phase d'érosion régressive commencée au cours du Quaternaire (Nicod, 1967). Du fait de leur présence, la déclivité moyenne du profil en long de la Nartuby s'élève à 1,3 % entre Trans et le Muy. Dans cette partie de la vallée, se sont constituées d'énormes accumulations de travertins holocènes, traversées par d'étroits chenaux rocheux et des cascades.



Figure 7.6. La Nartuby à Trans-en-Provence. **A.** Les cascades et le Pont Vieux, à l'arrière-plan. **B.** Plaque commémorative de l'inondation du 15 juin 2010, indiquant également la hauteur d'eau atteinte lors des crues de 1827 et 2010. Photos : A.O. Magalhães, mai 2012 et septembre 2013.

7.2.2.2. Contexte structural et géomorphologique

Sur le plan géologique une grande partie du bassin versant, et notamment le bassin de la Nartuby d'Ampus repose en grande partie sur des bancs épais de calcaires massifs et de dolomies du Jurassique susceptibles d'accueillir d'importantes circulations karstiques. Ces formations constituent des plateaux au sein desquels le cours d'eau a creusé ses gorges. Le bassin versant de la Nartuby, du fait de ce caractère karstique, stocke assez facilement les pluies. Cependant, au-delà d'un certain seuil, le réservoir est plein et l'augmentation de débit est brutale.

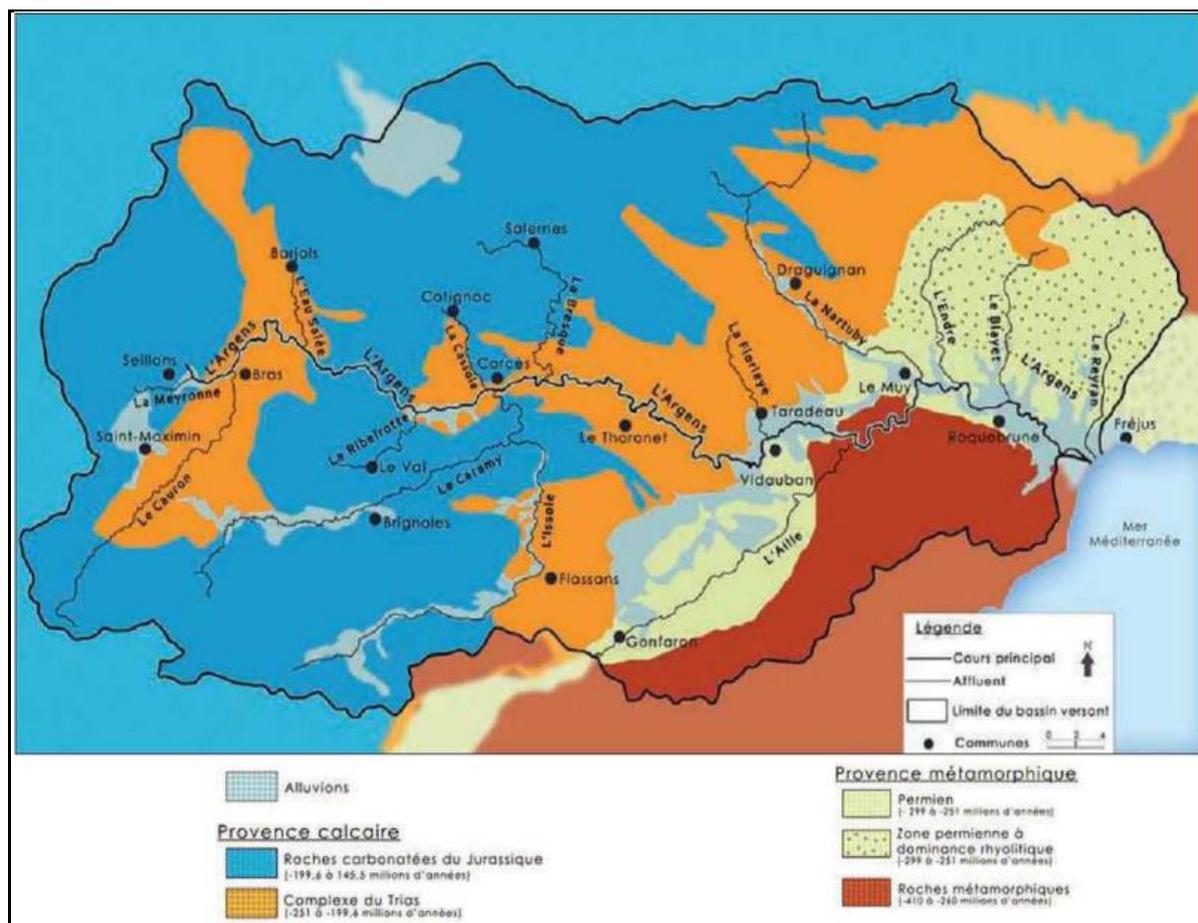


Figure 7.7. Carte géologique simplifiée du bassin versant de l'Argens. (Source : Seitz et Collange, 2015).

La Nartuby recoupe perpendiculairement les auréoles de sédiments permien et mésozoïques qui affleurent autour de la terminaison NE du massif des Maures (Fig. 7.7). Le soulèvement tardif de ce massif, lié à l'ouverture de l'océan algéro-provençal, a été déterminant dans cette disposition qui interfère avec les héritages structuraux des orogénèses pyrénéo-provençale (Eocène) puis alpine (Mio-Pliocène) responsables des entrecroisements de fractures, de plis et de chevauchements EW et NW-SE qui déforment plus ou moins fortement la couverture sédimentaire (Peulvast, 2013). Issue des hauts plateaux de Canjuers constitués de calcaires du Lias et du Jurassique moyen, localement accidentés de petits fossés d'effondrement oligocènes subméridiens (Ampus), elle s'enfonce rapidement dans les sédiments triasiques (grès, dolomies, marnes, argiles avec lentilles de gypse du Keuper) sous-jacents, dès Montferrat, mais surtout à partir de Rebouillon, à l'aval des gorges de Châteaudouble. Sur 4 km, ces dernières sont taillées dans un long promontoire de calcaires jurassiques qui s'étire vers le SE jusqu'au-dessus de Draguignan (Colle Pelade, Malmont, 550 m), au-dessus des basses pentes d'argiles et de gypse servant de site à une partie de la ville. À partir de là, la vallée de la Nartuby s'enfonce doucement dans un bas plateau de calcaires triasiques (300 m) avant de déboucher dans la dépression

permienne (conglomérats et grès rouges) de l'Argens près de la Motte en dévalant une dernière cascade (Saut du Capelan, 30 m de hauteur).

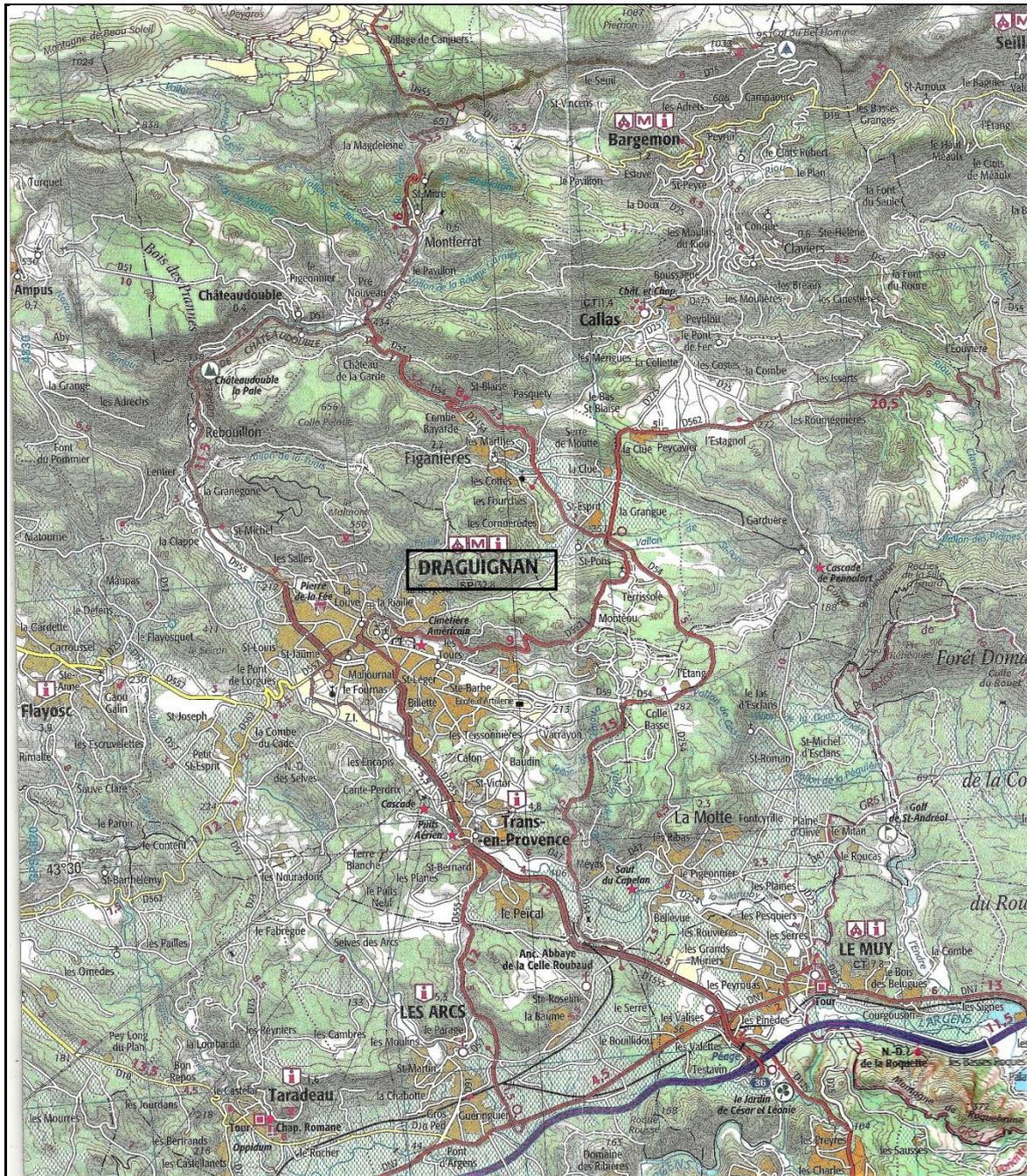


Figure 7.8. Extrait de la carte IGN à 1/100 000 n° 165, secteur de Draguignan et vallée de la Nartuby (série Top 100, 2008).

S'ouvrant un peu en amont de Draguignan (la Clappe), la plaine alluviale de la Nartuby reste assez étroite jusqu'à Trans-en-Provence (500 m à 1 km) et ne s'étale réellement qu'à partir de la Motte, autour du Muy et de la confluence avec l'Argens, à 20 m d'altitude (Fig. 7.8). C'est donc un

couloir relativement resserré correspondant en grande partie au lit majeur du cours d'eau, qui relie Draguignan aux grands axes traversant la Provence orientale (autoroute A8, voie ferrée). D'ailleurs, cette situation partiellement enclavée a contribué, parmi d'autres facteurs plus administratifs et politiques, au déclassement de la ville en tant que préfecture au profit de Toulon. Une situation qui vaut aussi à cette agglomération l'étroitesse des sites propices à l'établissement de zones industrielles et commerciales, mais aussi d'habitat, le long du cours d'eau et souvent en zone inondable.

7.2.2.3. *Caractères hydrologiques*

Sous l'influence du climat méditerranéen, alimentée par des précipitations au caractère aléatoire, qui contrastent avec des étés chauds et secs, la Nartuby présente un régime hydrologique de type pluvial méditerranéen. Elle possède un caractère torrentiel, avec des étiages sévères (présence de tronçons à sec) et des crues brutales.

Les fluctuations saisonnières du débit sont assez peu marquées – du moins dans le contexte méditerranéen –, avec des hautes eaux d'hiver-printemps portant le débit mensuel moyen à un niveau situé entre 1,67 et 2,04 m³/s, de janvier à mai inclus (avec un maximum en janvier), et des basses eaux d'été, de juillet à septembre inclus, avec une baisse du débit moyen mensuel jusqu'à 0,53 m³/s au mois de septembre (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nartuby#la_Nartuby_à_Trans-en-Provence ; accès le 10/01/2019). Les plus fortes précipitations ont lieu au mois de novembre alors que les hautes eaux ont plutôt lieu en janvier, soulignant ainsi l'effet tampon des karsts du bassin. On note un certain effet tampon des aquifères karstiques (calcaires jurassiques, gypses triasiques) susceptibles de soutenir les débits de base pendant quelque temps, mais il est vite limité lors des périodes de fortes précipitations.

Le débit a été observé sur une période de 41 ans (1969-2009), à Trans-en-Provence, peu avant son confluent avec l'Argens (Esposito, 2013). La surface prise en compte y est de 190 km², soit la quasi-totalité du bassin versant de la rivière. À cet endroit, le module de la rivière est de 1,35 m³/s. Les débits atteints lors de la crue du 15 juin 2010 restent inconnus, la station hydrologique de Trans-en-Provence ayant été emportée dès le 14 juin (Meaudre, 2012).

7.2.3. Chronologie et extension de la crue des 15-16 juin 2010

7.2.3.1. *En amont de Draguignan*

Les précipitations exceptionnelles des 15 et 16 juin 2010 ont entraîné une des crues les plus dévastatrices et meurtrières jamais enregistrées sur le bassin-versant de l'Argens. Comme indiqué plus haut, et pour les besoins de notre approche comparative, notre analyse se limite au sous-bassin-versant de la Nartuby, où se trouve la ville la plus peuplée et la plus affectée. Du fait d'une étude de terrain limitée à deux visites générales du bassin-versant et de quelques segments du lit de la Nartuby (mai 2012, septembre 2013), elle reprend en grande partie en la résumant l'étude de la crue incluse dans le

rapport général intégré au PPRI de Draguignan (SAFEGE, 2013), complétée par des indications reprises dans les travaux universitaires menés à la suite de cet événement (entre autres, Martin, 2010 ; Meaudre, 2012, 2013) et par la documentation recueillie auprès de la mairie et de divers sites officiels.

Les amonts du bassin-versant de la Nartuby sont entièrement inclus dans les zones qui ont reçu une lame d'eau comprise entre 200 et 300 mm. Sur la Nartuby d'Ampus, le pic de crue a été assez tardif (17h) du fait de la perméabilité du substrat et de l'abondance de la végétation. Des pics de crue secondaires y ont été observés, dus aux décharges des réseaux karstiques. Les débits issus de la Nartuby de Châteaudouble ont été supérieurs à ceux issus de la Nartuby d'Ampus car les précipitations, selon l'image radar, y ont été plus importantes, supérieures à 300 mm sur un quart de la surface du bassin versant (Artigue *et al.*, 2010). En outre, le substrat y est moins perméable (argiles rouges, gypses, dolomies et cargneules du Keuper), et la forme du bassin versant, en éventail, favorise les concomitances, les temps de concentration courts, les pics de crue prononcés. Selon les riverains, le pic de crue est intervenu à 17h30 à Montferrat, où l'inondation est restée limitée. Il s'est produit à 18h plus en aval, à Châteaudouble.

À l'aval des gorges, à Rebouillon, la crue a commencé à 14h. Un peu avant 16h, un premier pic de crue, issu de la Nartuby d'Ampus, et un embâcle au niveau du pont sur la Nartuby ont provoqué un débordement qui a emporté trois personnes ; le principal pic de crue, responsable de la destruction de plusieurs habitations, a été atteint vers 18 h et la décrue a commencé à 19 h 15.

À l'aval de Rebouillon, le bassin versant de la Nartuby, principalement situé en rive gauche du cours d'eau, est urbanisé (Fig. 7.8). Les précipitations intenses ayant affecté Draguignan entre 12h et 20h ont fourni des ruissellements abondants dont les pics ont été perçus par les riverains entre 15h et 18h30 suivant la taille du bassin drainé et son urbanisation.

Deux kilomètres à l'amont de la ville (la Clappe), l'inondation a débuté brusquement à 16h et le maximum a été atteint à 18h (fin à 22 h). Les dégâts se sont limités à un recouplement de méandre au détriment de la terrasse alluviale et à l'accumulation de matériaux grossiers en amont du pont d'accès à la route d'Ampus. En aval du Pont de la Clappe, le débordement, accompagné d'une vitesse élevée, a emporté une partie de la vigne. Ses conséquences sont devenues plus graves à partir de l'entrée de la ville proprement dite (lieux dits Pont d'Aups, La Garrigue, le Petit Plan, Fig.7.9). C'est là que l'occupation urbaine devient plus importante dans la plaine inondable ; c'est aussi à partir de ce lieu que la crue a pu s'étaler fortement dans des quartiers d'habitation et les zones d'activités de Draguignan et de Trans-en-Provence.

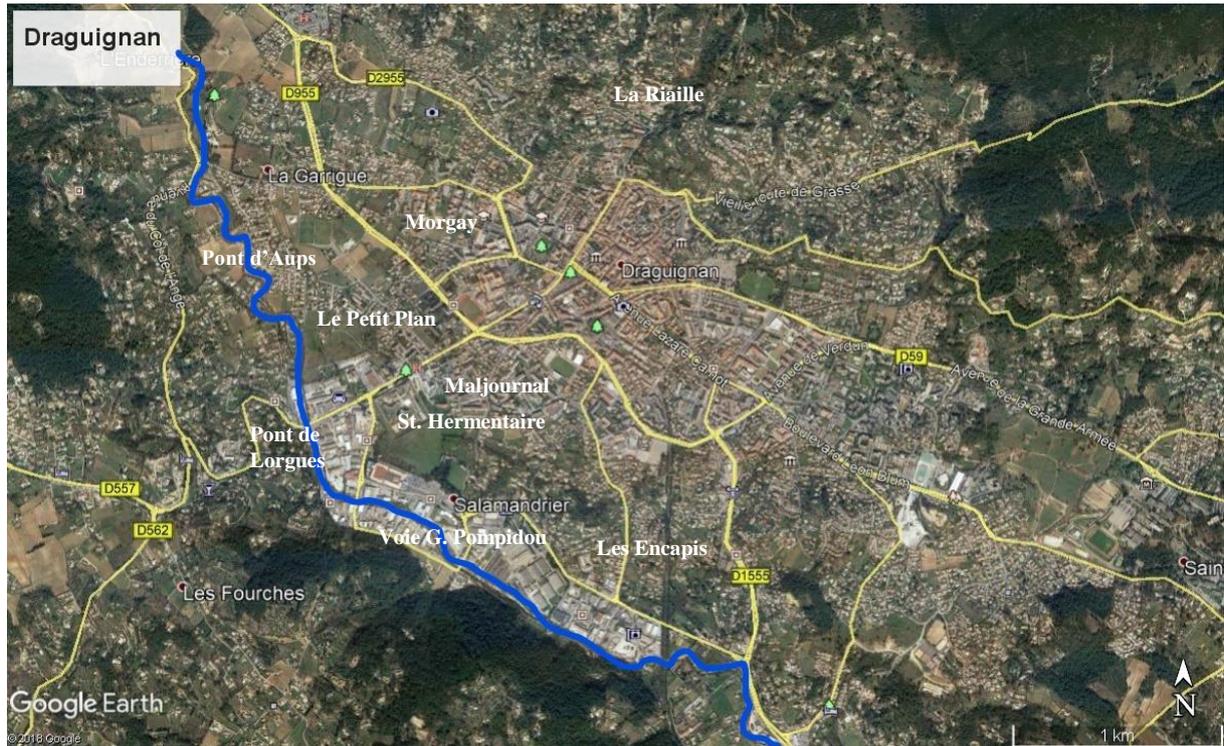


Figure 7.9. La ville de Draguignan et la Nartuby. Image Google Earth, 2018.

7.2.3.2. Au niveau de Draguignan

De ce secteur du Petit Plan, une ancienne zone marécageuse, jusqu'à la zone industrielle Saint Hermentaire, la bande inondée correspond au lieu de rencontre des eaux du ruissellement urbain et du débordement en rive gauche de la Nartuby, avec un pic de crue entre 17h et 18h. Contenue au pont d'Aups sur 250 m de largeur, la crue a déversé la majeure partie de son débit dans la plaine de rive gauche peu urbanisée au Petit Plan, la berge étant peu élevée. Selon le rapport général du PPRI (SAFEGE, 2013), le débit a pu atteindre 250 à 350 m³/s, tandis qu'il est estimé à 350-510 m³/s par Payastre *et al.* (2012). La largeur inondée en rive gauche a atteint 900 m au maximum au droit de l'avenue qui mène au pont de Lorgues, dans la partie la plus large du lit majeur. Dans le quartier de Maljournal, juste au sud du centre ville, la hauteur d'eau a atteint 3,50 m sur cette avenue. La prison de Draguignan a enregistré des hauteurs records qui illustrent le phénomène de cumul des écoulements pluvial et fluvial. Les eaux sont montées jusqu'à 4 m au fond de la prison contre le mur d'enceinte. L'occupation du sol par les bâtiments industriels ou commerciaux a freiné le retour des eaux débordées vers le lit de la Nartuby : un dysfonctionnement dû à la présence de la prison, à la densité des constructions et à la difficulté de retour des eaux par dessus la berge de la Nartuby.

À l'aval du Pont de Lorgues, le champ d'inondation de la crue s'est progressivement élargi jusqu'à 500 m jusqu'en amont du pont de l'ancienne voie ferrée, dont le remblai a constitué un obstacle majeur à l'écoulement de la crue. Jusqu'au nord de la zone industrielle des Encapis (Fig. 7.9), les hauteurs d'eau ont atteint les 3 m. En aval de ce remblai, le cours de la Nartuby rejoint

progressivement le lit majeur en rive gauche de la vallée (Fig. 7.10 A). La capacité de la rivière, déjà réduite en amont de la voie ferrée, diminue encore. Cette faible capacité a exposé de tout temps la plaine de Trans, aujourd'hui occupée par d'importantes activités industrielles et commerciales, à des débordements fréquents.



Figure 7.10. La crue du 15 juin 2010 à Draguignan. **A.** Quartier des Incapis, rive droite de la Nartuby (après la crue). **B.** Vallon de la Rialle, Boulevard de la Liberté. (Source : SAFEGE, 2013).

La Nartuby n'est pas la seule responsable de l'inondation survenue le 15 juin 2010. Les vallons qui traversent la ville installée en rive gauche sur les basses pentes du massif du Malmont (voir 7.2.2.1) ont été responsables de violents ruissellements et de débordements qui ont envahi plusieurs quartiers, d'anciennes dépressions mal drainées et des zones basses du centre-ville (abords du Palais de Justice et de la Communauté d'Agglomération Dracénoise...). Le canal d'irrigation (le « Saint Jaume ») dont la prise d'eau se situe en amont immédiat du pont de la Clappe et dont le tracé suit le pied de versant, a participé aux écoulements, recueillant en partie les ruissellements vers la partie enterrée (Galerie du Canal). Celle-ci forme un exutoire majeur du réseau pluvial communal débouchant sur la Nartuby près de la rocade sud (voie Georges Pompidou). À l'ouest du centre-ville, le quartier de Morgay a été envahi par les eaux du vallon de la Valère, les buses ayant été insuffisantes. Les eaux venues du Malmont par le profond vallon de la Rialle ont également envahi le centre-ville et les quartiers ouest, dévalant les rues en pente forte (boulevard de la Liberté ; Fig. 7.10 B)) et aggravant aussi les inondations de la Nartuby en aval, car le réseau de canalisations destiné à les évacuer a été obstrué par des embâcles (Martin, 2010). Les axes d'écoulement ont été parcourus par des lames d'eau rapides, hautes de 0,30 m à 0,50 m et capables d'emporter véhicules et piétons. Dans les quartiers ouest, les hauteurs d'eau ont dépassé 1 m. À l'est et au sud-est, l'eau issue du vallon des Tours est sortie des canalisations souterraines, s'écoulant le long de la plus grande pente et envahissant

avenues et lotissements, jusqu'à rejoindre la zone d'inondation de la Nartuby en aval du pont des Encapis.

7.2.3.3. Au niveau de Trans-en-Provence

L'onde de crue est arrivée à Trans-en-Provence, avec un retard dû au passage dans la zone urbaine de Draguignan, où le champ d'expansion est large et où les écoulements ont été gênés par les infrastructures, habitations et entrepôts construits dans le lit majeur de la Nartuby.

À l'amont de Trans, sur la zone commerciale, le magasin Carrefour implanté sur un terrain remblayé sur 1 m à 1,5 m et deux ponts permettant l'accès aux parkings ont fait obstacle à l'écoulement (tablier trop bas pour le pont de l'amont et buses arches de section insuffisante pour l'ouvrage aval). L'insuffisante capacité du lit de la Nartuby et la perte de charge occasionnée par le pont d'accès aval ont provoqué le débordement sur la voie express en amont du giratoire de l'entrée de ville (Fig. 7.11). En aval du remblai du magasin Carrefour, les eaux ont rencontré l'obstacle de la voie express construite également en remblai ainsi qu'un ancien pont qui jouxte le pont de la voie express et limite le tirant d'eau. La crue a donc provoqué un déversement massif sur la voie et en rive droite, le long de cette voie et de l'ancienne voie ferrée.



Figure 7.11. Trans-en-Provence et la Nartuby, vue oblique. Image Google Earth, 2018.

Plus à l'aval, le vieux centre de Trans doit son inondation à son implantation autour des cascades de la Nartuby, où la rivière descend de 30 mètres sur une distance de 500 mètres (Fig. 7.6 A).

Le lit s'encaisse d'abord progressivement à partir de la RD 555 jusqu'au centre-ville, dans la plaine alluviale qui conserve la même pente qu'à l'amont. Malgré sa position surélevée, celle-ci s'est trouvée inondée. En rive droite, les eaux ont envahi la voie express et encerclé le centre ville. En rive gauche, les eaux ont emprunté la voirie ; une fraction du débit a rejoint la Nartuby à travers voirie et clôtures, le reste s'est déversé en contrebas des cascades. La plus grosse partie du débit a débordé sur la voie express, là où elle franchit la vallée en biais à l'ouest du village ; l'eau est enfin venue buter contre le Pont Vieux, provoquant une augmentation de débit dans l'Avenue de la Gare jusqu'au centre (place de l'Hôtel de Ville ; Fig. 7.6 B). Ce même fait s'était produit en 1827, mais alors tout le débit avait pu se concentrer sous le Pont Vieux ou près de lui car les obstacles qui ont favorisé les débordements en 2010 n'existaient pas à cette époque. Le cimetière lui-même a été impacté avec des effondrements de terrain dus au sapement de la paroi rocheuse dominant le chenal à l'aval des cascades.

À l'aval de son resserrement au niveau de Trans, la vallée de la Nartuby s'élargit de nouveau en amont de la Motte de façon conséquente. En rive gauche, la station d'épuration, située à 1 km en aval de la zone urbaine, a été inondée. En direction de La Motte, les premiers débordements sont survenus en soirée, avec des pointes de crue entre 20h30 et 22h. Ils se sont largement étalés dans la plaine alluviale malgré l'incision progressive de la rivière dans d'épais dépôts de travertin.

7.2.4. Bilan de la crue du 15 juin 2010 dans la vallée de la Nartuby.

Maisons emportées ou dégradées, ponts détruits ou contournés, lits bouleversés, ripisylves arrachées, digues emportées, campings dévastés, inondations dépassant les niveaux du plan de prévention du risque inondation de 2005 : l'excès des dommages témoigne à la fois de l'ampleur et de la rareté du phénomène qui a tragiquement affecté ces vallées.

Selon le CEMAGREF (Lang *et al.*, 2010), la période de retour de la crue enregistrée sur la Nartuby en juin 2010 est de l'ordre de 500 ans, alors qu'elle serait de 100 à 250 ans sur d'autres secteurs du bassin-versant de l'Argens. Les dégâts et le bilan humain de cette crue sont considérables.

Le milieu et les infrastructures ont été fortement affectés (Esposito, 2013). Dans la gorge de Châteaudouble, la ripisylve a été dégradée et les berges lessivées. Suite au passage de la crue, plusieurs éboulements se sont produits dans les gorges (Fig. 7.12) et deux d'entre eux ont entraîné une déstabilisation et une destruction partielle de la chaussée de la D955 au niveau de la Baume de St-Jean. À la sortie des gorges et à la Granegone, les berges ont été érodées et la Nartuby a coupé son bras naturel. Le flux d'eau a endommagé 4 ponts : un dans les gorges à Rebouillon et 3 autres à Draguignan dans la zone commerciale et industrielle de Salamandrier et des Incapis. Cette zone étant étroite, la ripisylve a aussi été touchée dans ce secteur. Entre Trans-en-Provence et La Motte, plusieurs parties des berges sont parties avec la crue.



Figure 7.12. Destruction partielle de la route D 955 dans la gorge de Châteaudouble à la suite de la crue de la Nartuby du 15 juin 2010. Photo : A.O. Magalhães, 2012.

En ce qui concerne le bilan humain, dans l'ensemble du bassin-versant de l'Argens, l'épisode méditerranéen du 15 juin 2010 a fait 25 morts, dont 10 à Draguignan et 5 à Trans-en-Provence, la plupart hors de leur domicile, dans leur véhicule ou piégés dans leur garage (Meaudre, 2012). Il a fallu sauver 2450 personnes (1100 au sol et 1350 par voie aérienne).

Les dégâts ont été énormes. Selon la Fédération Française des Sociétés d'Assurance, 44 communes du bassin-versant de l'Argens ont été sinistrées et 35 700 sinistres ont été déclarés, pour un coût moyen par sinistre de 17 230 euros. Les dommages directs ont représenté 1 milliard d'euros, dont 615 millions à charge des assureurs. Les dommages aux biens des particuliers représentent 56,6 % des sinistres, les véhicules 31,7 %, les dommages aux biens professionnels 11,8 %. 22 habitations ont dû être rachetées et démolies.

Draguignan a été la commune la plus touchée (26 % des sinistres, 41 % des indemnités avec un coût moyen de 27 979 euros par sinistre).

7.2.5. Pourquoi des conséquences aussi graves ?

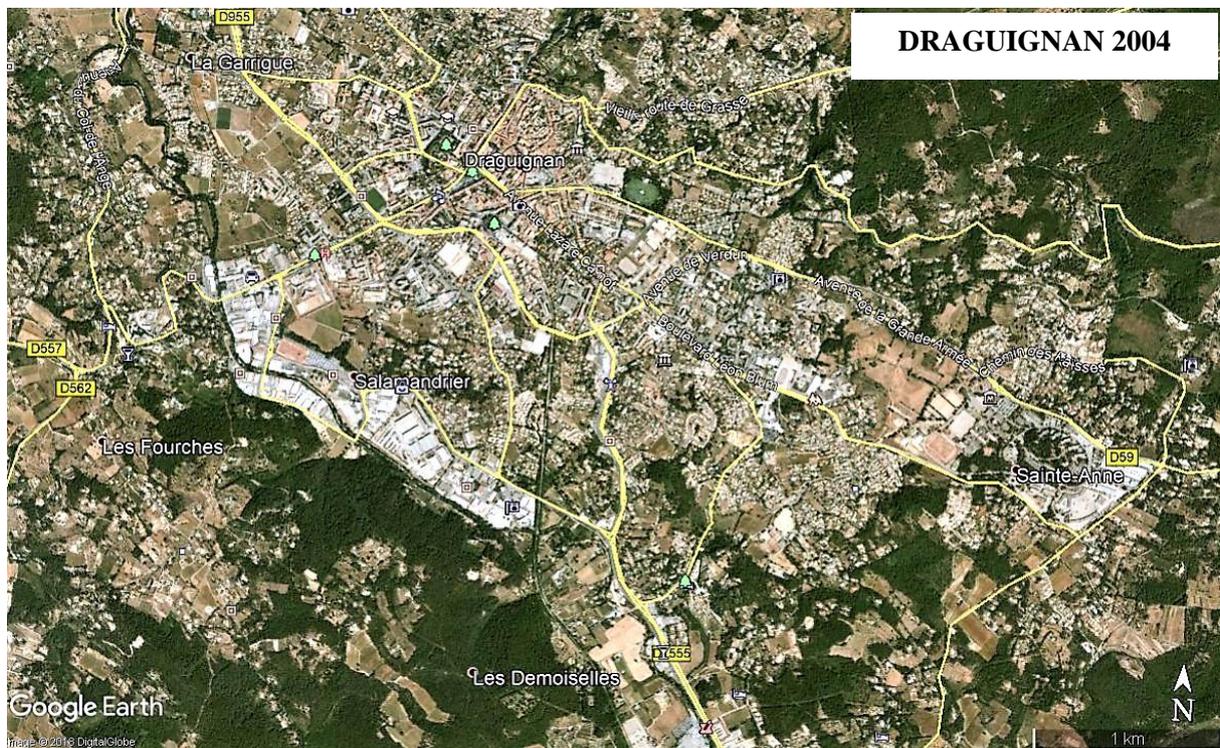
7.2.5.1. Facteurs naturels

La gravité de la crue et des inondations du 15 juin 2010 à Draguignan et le long de la Nartuby tient en grande partie aux caractéristiques exceptionnelles de l'événement (épisode méditerranéen) décrit plus haut, caractéristiques mal anticipées (seule une alerte orange, largement banalisée, avait été émise par Météo France). Mais elle résulte aussi de la conjonction de ces très fortes précipitations

renforcées par effet orographique, avec la configuration morphologique en entonnoir du bassin-versant et une très forte montée des eaux de la rivière combinée avec des ruissellements intenses en provenance des versants et des vallons affluents. Partout, l'intensité des pluies a dépassé la capacité d'infiltration des sols. Quant au rôle du karst, il reste discuté, dans la mesure où il paraît ne pas pouvoir absorber plus de 40 mm/jour (Martin *et al.*, 2010) et où il pourrait, au-delà de ce seuil, restituer rapidement l'eau infiltrée.

7.2.5.2. Facteurs humains et problèmes de conscience du risque

À eux seuls, les facteurs naturels ne suffiraient évidemment pas à expliquer un bilan aussi grave. L'urbanisation du département du Var (et de la vallée étudiée) a explosé dans les années 1970, et de 1988 à 2006 le total des surfaces urbanisées a augmenté de 59 % (Conseil Général du Var). Le plus remarquable est la quantité d'habitations construites en zone inondable : 146 100 en 2006 (+ 10 900 depuis 1999), sur 46 359 ha, alors même que la population concernée (dont ¼ en résidences secondaires) est mal informée des risques (Martin *et al.*, 2010) (Fig. 7.13). Il existait depuis 2005 un Plan de Prévention du Risque d'Inondation pour la Nartuby mais là comme ailleurs, la corrélation avec les documents d'urbanisme (Plan local d'urbanisme, Schéma de cohérence territoriale, Plan d'occupation des sols) restait insuffisante, permettant les contestations de tous ordres et empêchant toute application (Martin *et al.*, 2010). La crue de juin 2010 est venue imposer la révision des plans existants.



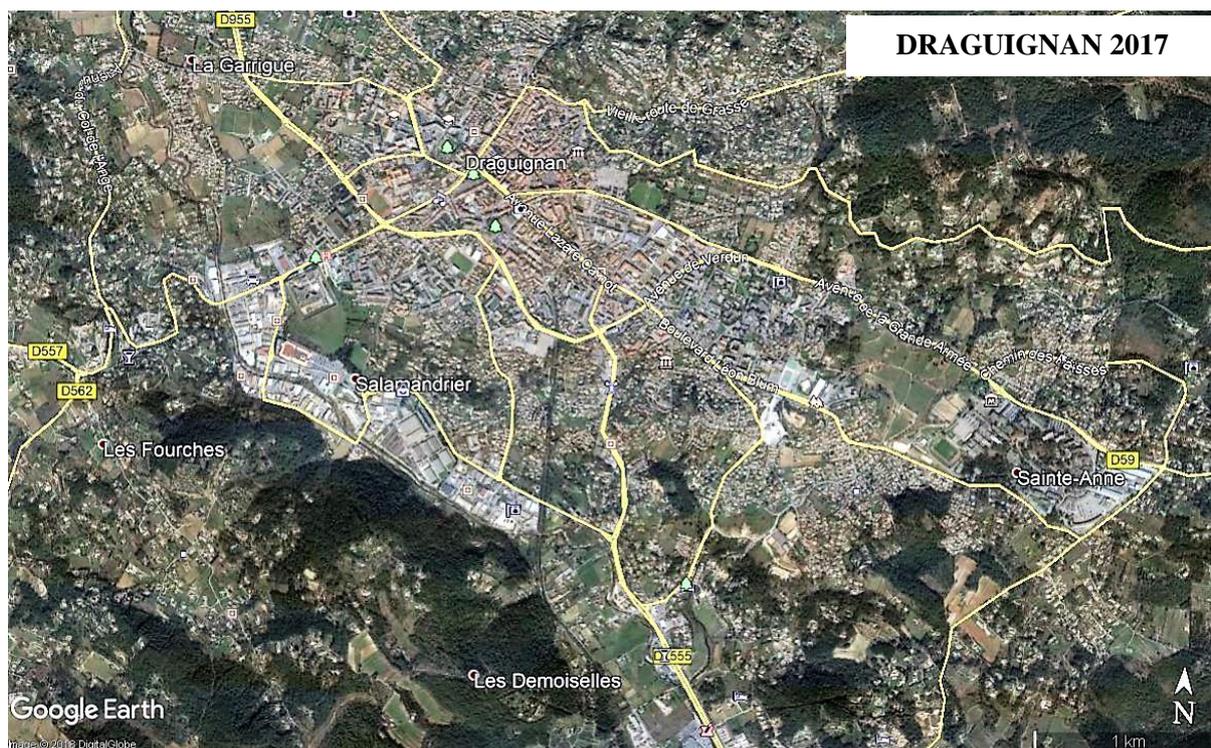


Figure 7.13. L’agglomération de Draguignan en 2004 et en 2017. Images Google Earth. L’essentiel de l’urbanisation en zone inondable (vallée de la Nartuby) était déjà réalisé en 2004, c’est-à-dire avant le premier PPRI. En revanche, l’urbanisation a progressé à l’est de la ville, sur les bassins-versants des ravins affluents, contribuant à l’imperméabilisation des sols.

Une des conséquences de cette urbanisation croissante est l’imperméabilisation des sols, qui aggrave les ruissellements, au point d’engorger les réseaux d’écoulement des eaux pluviales et d’assainissement en zone urbaine (ce qui s’est vérifié à Draguignan, comme on l’a vu : 7.2.3.2).

Face à ces phénomènes, et pour pouvoir continuer à gagner des terrains constructibles le long des cours d’eau, les aménagements ont été multipliés, entretenant un faux sentiment de sécurité et aggravant encore les risques : canalisations, busage, digues de protection, empiètement sur des lits de cours d’eau intermittents (Meaudre, 2010). Beaucoup de ces ouvrages étaient sous-calibrés et ont été détruits par la crue (arches de ponts, canalisations…), alors que les ouvrages les plus anciens, comme le Pont Vieux de Trans-en-Provence, ont mieux résisté grâce à leurs arches secondaires permettant l’étalement du cours d’eau et le passage de la charge solide lors des crues : on ne cherchait pas alors à occuper les terrains proches du cours d’eau !

Enfin, selon C. Martin *et al.* (2010), ces problèmes ont été aggravés par la localisation en zone inondable, à Draguignan, d’organismes importants de gestion de ce type de crise, comme le Service Départemental d’Incendie et de Secours (SDIC) et du Centre de Secours Principal (SCP) : 160 véhicules et le PC (Poste de Commandement) mobile se sont retrouvés hors service. Il est apparu que

le directeur départemental des secours ignorait que ces installations se trouvaient dans la zone rouge tracée sur le PPRI de la Nartuby...

7.3. Mise en place de mesures de prévention : mesures d'urgence et élaboration du PPRI de Draguignan

7.3.1. Contexte national

Ce n'est qu'après une succession de graves catastrophes dans les années 1999-2002, en particulier les inondations survenues dans l'Aude (36 morts le 13 novembre 1999, pour ne parler que du bilan humain) et le Gard (23 morts les 8-9 septembre 2002), outre les tempêtes Lothar et Martin qui ont balayé une large partie du pays les 26 et 28 décembre 1999 (92 morts), qu'une vaste refonte des systèmes de prévention des risques a été entreprise, dès 2003. Les axes principaux de cette refonte ont été (Meaudre, 2010) :

- La connaissance des aléas et des risques (collecte et mise en forme des données, mise à disposition, etc.) ;
- La surveillance (mise en place d'outils pour anticiper les phénomènes) ;
- L'information préventive et l'éducation ;
- La prise en compte des risques dans l'aménagement (en principe déjà effective avec la création des Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles-PPRN par une loi du 2 février 1995) ;
- La mitigation (implication des acteurs afin de réduire la vulnérabilité des enjeux) ;
- La planification de l'organisation des secours, avec la création de Plans Communaux de Sauvegarde (PCS), obligatoires dès qu'un PPRN est approuvé ;
- La prise en compte du retour d'expérience.

C'est également en 2003 qu'a été créé le Service Central d'Hydrométrie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), basé à Toulouse pour une meilleure coordination avec Météo France et ses services de prévision. Simultanément ont été créés les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI), en partenariat entre les services de l'État et les acteurs locaux de la gestion du risque.

Plus récemment, la gestion des risques d'inondation a été revue dans le cadre de la directive européenne 2007/60/CE, dite « directive inondation ». Celle-ci a été transposée en droit Français dans la loi LENE du 13 juillet 2010 et dans le décret N°2011-227 du 2 mars 2011, relatifs à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. L'objectif de cette directive est de fournir un cadre aux États

membres pour réduire les conséquences négatives des inondations sur la santé humaine, l'activité économique, l'environnement et le patrimoine culturel.

Dès 2010 (tempête Xynthia et phénomènes de submersion marine en Vendée et Charente Maritime, 53 morts et 500 000 sinistrés ; inondations du Var), des failles sont apparues dans ce système, nécessitant de nouveaux ajustements. Les projets PAPI ont été relancés, par exemple dans le Var, avec des bilans mitigés (PAPI d'intention : Meaudre, 2013). Plus récemment, depuis le 1er janvier 2018, de nouvelles compétences ont attribuées aux communes ans le cadre de la loi GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations): il leur revient désormais l'entretien et la restauration des cours d'eau et des ouvrages de protection contre les crues. Avant cela, toutes les collectivités territoriales (Régions, Départements, Communautés de Communes, Communes...) pouvaient s'en saisir, mais aucune n'était spécifiquement responsable. En ce sens, la nouvelle loi a modifié cette situation en termes de gestion des risques et de responsabilité légale et pénale en cas de catastrophe.

7.3.2. Réponses à la crue du 15 juin 2010 dans le bassin-versant de la Nartuby

Une des premières questions a porté sur le rôle des aménagements de la rivière, jusque là réputée peu dangereuse (pas de grosse crue depuis 1827). Il est apparu que de nombreux aménagements (seuils, remodelage des berges, ponts...) ont contribué à aggraver les effets de la crue. Il a donc paru utile de restaurer celles des caractéristiques de la rivière dont les modifications ont provoqué le plus d'inconvénients. En ce qui concerne le profil en long, un rapport d'expertise (Lefort et Koulinsky, 2011) juge nécessaire la suppression de seuils correspondant à d'anciennes prises de canaux d'irrigation, du fait des engravements qu'ils provoquent. C'est le cas du seuil de la Foux, au sud de Draguignan. Ce même rapport insiste sur la nécessité de préserver des zones d'expansion des crues, en particulier dans les secteurs entre la Clappe et le Pont d'Aups et entre le Pont d'Aups et le petit Plan, en rive droite, là où la berge est moins haute et où les habitations sont moins nombreuses (Fig. 7.8). Il recommande aussi d'élargir le lit de la Nartuby ou de diminuer sa rugosité là où l'élargissement n'est pas possible (chenal rocheux), d'entretenir la ripisylve et de protéger les berges (végétalisation, enrochements). On remarquera qu'aucun endiguement n'est préconisé : une approche totalement différente de celle que nous avons décrite à Crato. De même, il n'est pas non plus prévu de construire de barrage écrêteur dans le bassin-versant, dont la morphologie et le substrat se prêtent d'ailleurs mal à de tels aménagements.

C'est donc une gestion intégrée qui semble se mettre en place après la crue, en particulier à travers les nouvelles missions du Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Nartuby (SIAN), créé en 1997 et regroupant les communes d'Ampus, Montferrat, Châteaudouble, Draguignan, Trans-en-Provence, La Motte et Le Muy (Meaudre, 2013). Dès la fin de l'inondation en 2010, il s'est engagé dans le nettoyage et le dégagement des cours d'eau (désembâclements, enlèvement d'épaves et déchets

divers...). Pour la suite, le Plan Nartuby élaboré par le SIAN après le rapport d'expertise (Lefort et Koulinsky, 2011) et financé à hauteur de 21 millions d'euros (dont 13 à la charge du SIAN) comporte le confortement des berges et la restauration des capacités d'écoulement, le PAPI d'intention Argens et la maîtrise d'ouvrages d'art. Les premiers travaux ont porté sur la restauration des berges et du pont de la Nartuby à Rebouillon, au confluent de la Nartuby avec la Nartuby d'Ampus.

7.3.3. Gestion et prévention du risque : élaboration du PPRI de Draguignan

Ces premières réponses techniques ne suffisent évidemment pas à prévenir le retour de telles catastrophes et à réduire leur impact. C'est donc toute une politique de prévention qu'il a fallu repenser, avec la mise en place d'un nouveau plan de prévention des risques d'inondation (PPRI). Les PPRI constituent la partie réglementaire des outils de gestion de ce risque, dont les principaux sont les Plans de Gestion du Risque d'Inondation (PGRI), arrêtés par les préfets coordonnateurs de bassin en décembre 2015 dans le cadre de la mise en place d'une Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation (SNGRI ; arrêté interministériel du 7 octobre 2014) (<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prevention-des-inondations> consulté le 03/12/2018). Le PGRI est au cœur de la mise en œuvre de la directive inondation. Cet outil stratégique définit à l'échelle de chaque grand bassin (district hydrographique : 7 pour la métropole) les priorités en matière de gestion des risques d'inondation :

- prévention des inondations au regard de la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau ;
- surveillance, prévision et information sur les phénomènes d'inondation ;
- réduction de la vulnérabilité des territoires face aux risques d'inondation, notamment des mesures pour le développement d'un mode durable d'occupation du sol et la maîtrise de l'urbanisation ;
- information préventive, éducation, résilience et conscience du risque.

Les 13 PGRI français ont été approuvés et publiés au Journal officiel n° 0296 du 22 décembre 2015.

Les PPRI, quant à eux, sont régis par les articles L.562-1 à L.562-9 et R.562-1 à R.562-10-2 du Code de l'environnement (SAFEGE, 2013). Les circulaires du 24 janvier 1994 (prévention des inondations et gestion des zones inondables), du 24 avril 1996 (dispositions applicables au bâti et ouvrages existants en zone inondable), du 30 avril 2002 (gestion des espaces urbanisés situés derrière les digues) et du 21 janvier 2004 (maîtrise de l'urbanisation et des constructions en zones inondables) complètent le cadre nécessaire à l'élaboration des PPRI.

Par arrêté du 8 septembre 2010, le préfet du Var a prescrit la révision de l'ancien PPRI de la Nartuby approuvé en 2005. Son élaboration a été confiée au bureau d'étude SAFEGE.

Certaines dispositions du projet de PPRI ont été rendues immédiatement opposables aux projets nouveaux dès le 1er mars 2012. Puis le PPRI de Draguignan a été définitivement approuvé par arrêté préfectoral le 10 février 2014. Comme tous les plans de prévention des risques, il comporte une note de présentation, un règlement et des cartes de zonage réglementaire. Sur ces dernières, le territoire de la commune est découpé en zones selon l'exposition au risque des terrains. Chaque zone dispose d'un règlement spécifique qui détermine les utilisations du sol permises ou interdites :

- les zones rouges, où la constructibilité est très limitée,
- les zones bleues, les zones basses hydrographiques et les zones exposées à un aléa exceptionnel dans lesquelles les constructions ou aménagements sont autorisés sous conditions.

7.3.4. Cartographie du risque et zonage règlementaire

La cartographie des zones de risque a été élaborée à partir des données recueillies et compilées par le bureau d'étude SAFEGE : levé topographiques à partir de données LiDAR (MNT au pas de 1 m, sur 700 km²), profils en travers (222 sur la Nartuby), étude des laisses de crue sur le terrain et par photos aériennes (en juillet-août 2010, soit peu de temps après la crue), de façon à déterminer l'enveloppe maximale de la zone inondée, selon une méthode de cartographie hydrogéomorphologique.

Pour cette dernière, la définition retenue par le bureau d'étude SAFEGE est la suivante : **la cartographie hydrogéomorphologique** est basée sur l'identification des unités spatiales homogènes modelées par les différents types de crues au sein de la plaine alluviale. Les critères d'identification et de délimitation de ces unités sont la topographie, la morphologie et la sédimentologie, souvent corrélées avec l'occupation du sol. Dans le détail, on identifie les unités hydrogéomorphologiques actives, les structures géomorphologiques secondaires influençant le fonctionnement de la plaine alluviale et les unités sans rôle hydrodynamique particulier, c'est-à-dire l'encaissant (les versants ; Fig. 7.14). Les données hydrogéomorphologiques utilisées pour la cartographie des zones inondables (cartographies d'aléa) sont issues de l'Atlas des Zones Inondables produit par les services de l'État (DREAL, ex-DIREN).

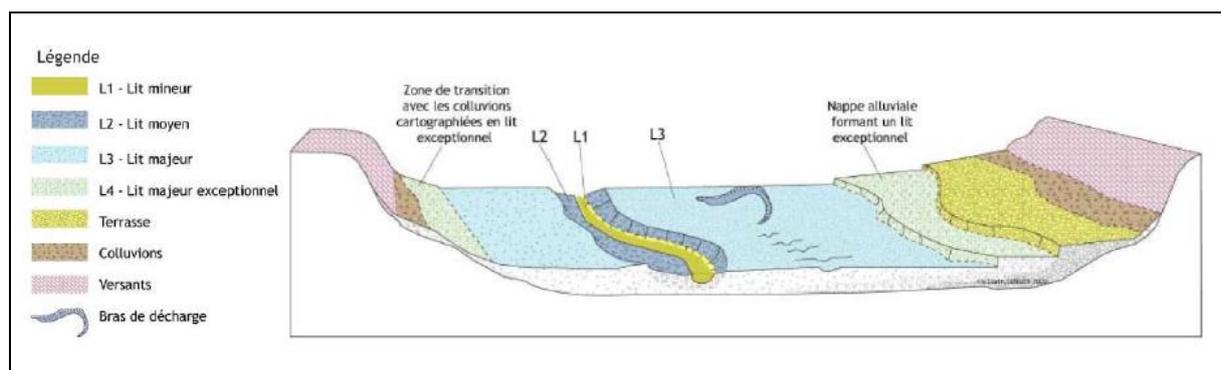


Figure 7.14. Cartographie des unités hydrogéomorphologiques. Dans les faits, elle s'applique surtout à la partie aval de la vallée de la Nartuby. (Source : Atlas des Zones Inondables, DIREN LR, 2009, cité in SAFEUGE, 2013).

Cette approche est complétée localement par une méthode spécifique (EXZECO), qui vise à **délimiter des zones de concentration des écoulements à partir d'un modèle numérique de terrain et du tracé du réseau hydrographique correspondant** (SAFEUGE, 2013). Il s'agit « d'identifier tous les pixels du MNT qui se trouvent à une altitude inférieure à $+H$ mètres du thalweg le plus proche, et de définir comme « zone inondée » les pixels pour lesquels la hauteur d'eau dans le thalweg est de H mètres (jusqu'à présent des valeurs de H de 1 à 2 mètres ont été retenues). Cette méthode fait bien ressortir automatiquement les zones situées à une faible altitude par rapport aux thalwegs, aidant ainsi au calcul d'indicateurs relatifs aux enjeux présents en secteurs vulnérables, à proximité immédiate des thalwegs ». Elle est utilisée dans les secteurs où les enjeux sont importants notamment en termes d'urbanisation ou d'aménagement et où aucune autre donnée n'est disponible. Elle doit être complétée ultérieurement par des approches hydrologiques et hydrauliques.

Le but de **l'étude hydrologique** est de définir, pour l'ensemble des cours étudiés, le débit de référence. Le débit de référence est le débit le plus fort observé ou le débit centennal si celui-ci est plus important. Le débit centennal est le débit qui a un risque sur cent de se produire dans l'année. La première étape de calcul du débit centennal est la détermination du débit décennal à partir des données issues de relevés pluviométriques et hydrométriques. La seconde étape consiste à calculer de débit de la crue vicennale (20 ans) à partir des paramètres déterminés pour la crue décennale pour ensuite extrapoler les résultats pour une crue centennale. En effet le calcul du débit vicennale est nécessaire car, selon les auteurs, le contexte géologique et la capacité d'infiltration assez élevée des sols permettent de considérer qu'un ruissellement généralisé ne se produirait qu'au-delà du débit vicennale.

De la comparaison des résultats obtenus par ces calculs avec les débits atteints lors de la crue du 15 juin 2010, il ressort que celle-ci a été un événement de référence pour de nombreux cours d'eau, dont la Nartuby à Rebouillon et à Trans-en-Provence ($500 \text{ m}^3/\text{s}$).

La **détermination des zones inondables** du Plan de Prévention des Risques d'Inondation est issue de l'exploitation de modélisations hydrauliques. Le type de modélisation utilisé est un modèle

couplé 1D/2D Mike FLOOD (SAFEGE, 2013). Un premier modèle à une dimension (1D) simule les écoulements dans le lit mineur des cours d'eau. Le second modèle en deux dimensions (2D) simule les écoulements dans le lit majeur. Des liens entre les modèles 1D et 2D sont définis au niveau des berges des cours d'eau afin de modéliser les échanges entre le lit mineur et le lit majeur. L'utilisation de tels modèles permet de :

- Simuler les écoulements dans le lit majeur où les écoulements ne sont pas nécessairement parallèles à l'axe du cours d'eau ;
- Prendre en compte les ouvrages dans le lit mineur des cours d'eau et notamment leur mise en charge.

Sur la Nartuby, où la crue de référence est la crue de juin 2010, les débits de cette crue ont été injectés dans les modèles hydrauliques et les niveaux d'eau issus de la modélisation ont été comparés aux niveaux d'eau relevés lors de cette crue. La comparaison a permis d'ajuster les paramètres de rugosité de façon à retranscrire le fonctionnement général du champ d'expansion de la crue. La figure 7.15 représente une vue globale du modèle de la Nartuby de Rebouillon à Trans-en-Provence.

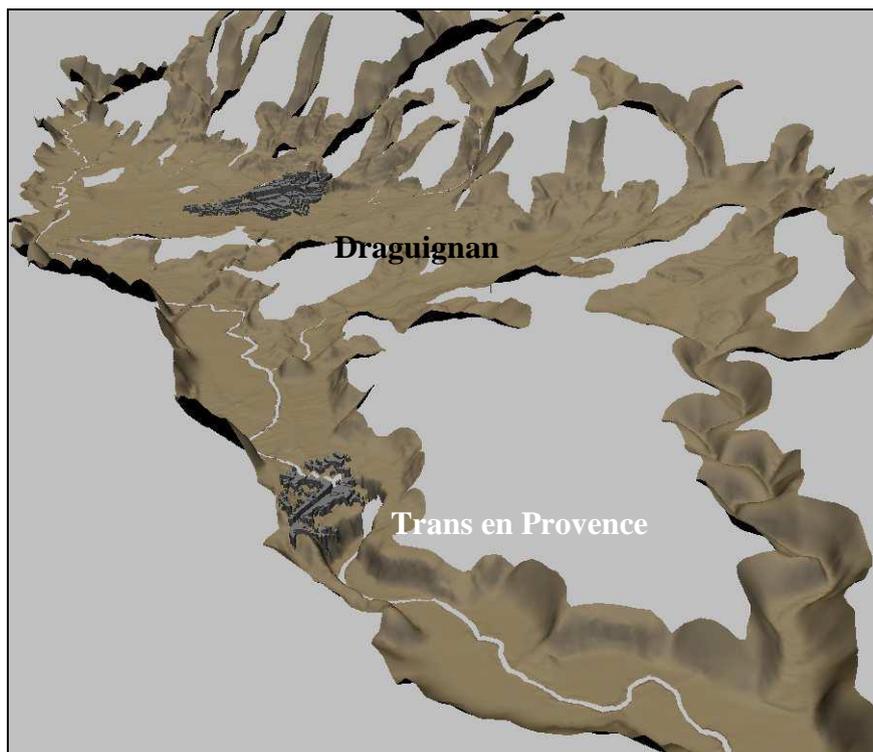


Figure 7.15. Modélisation hydraulique de la Nartuby entre Rebouillon et Trans-en-Provence. Les villes apparaissent en gris. Bonne représentation du lit mineur et du lit majeur de la rivière. Noter le nombre et l'importance des ravins convergeant vers le site de Draguignan en rive gauche de la Nartuby. (Source : SAFEGE, 2013).

Il s'agit ensuite de procéder à la **classification de l'aléa inondation**, en s'appuyant sur les données de hauteur d'eau et de vitesse. Cette approche répond à l'analyse conduite par des responsables de la sécurité civile sur les conditions d'écoulement susceptibles de mettre en danger les vies humaines (Fig. 7.16).

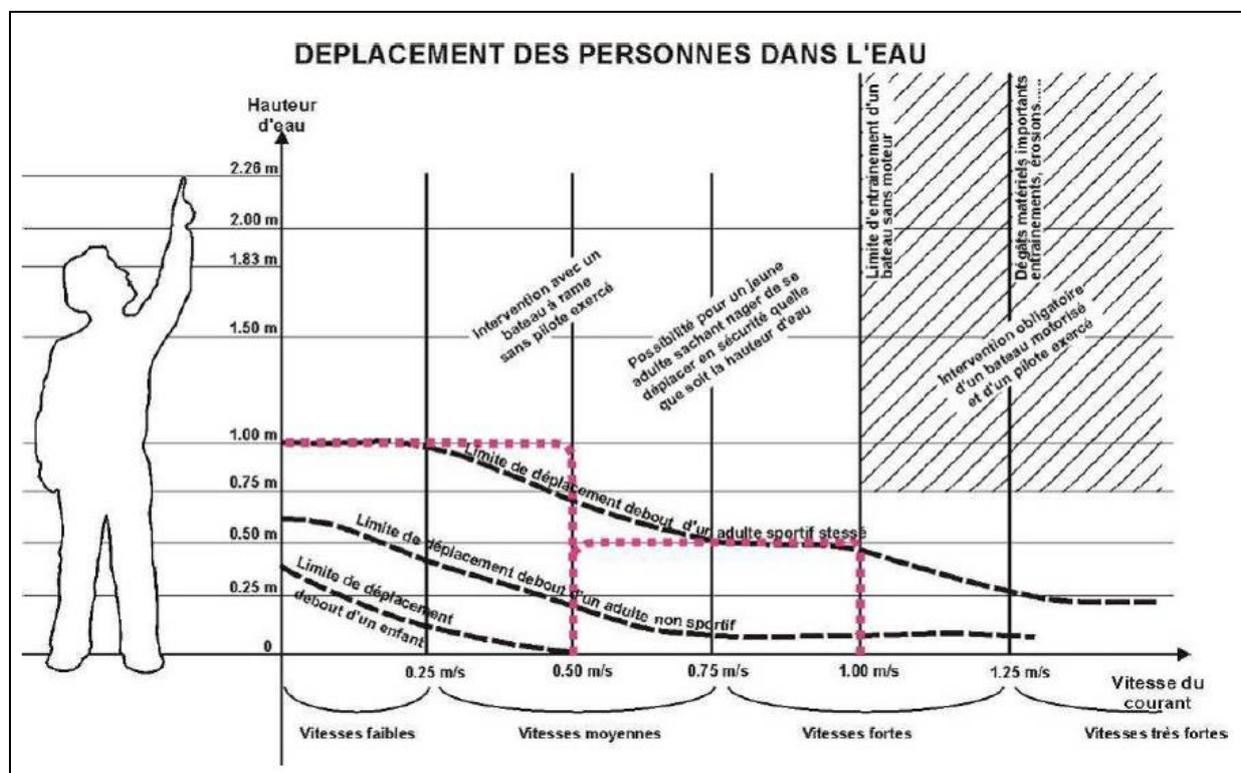


Figure 7.16. Schéma de déplacement des personnes dans l'eau. (Source : SAFEGE, 2013).

La grille de croisement hauteur – vitesse utilisée dans la carte d'aléa se base sur des éléments physiques qui précisent les capacités d'une personne humaine à évoluer dans un champ d'inondation. Le schéma de déplacement des personnes dans l'eau a permis de définir des seuils d'intensité utilisés dans le classement de l'aléa (Fig. 7.17).

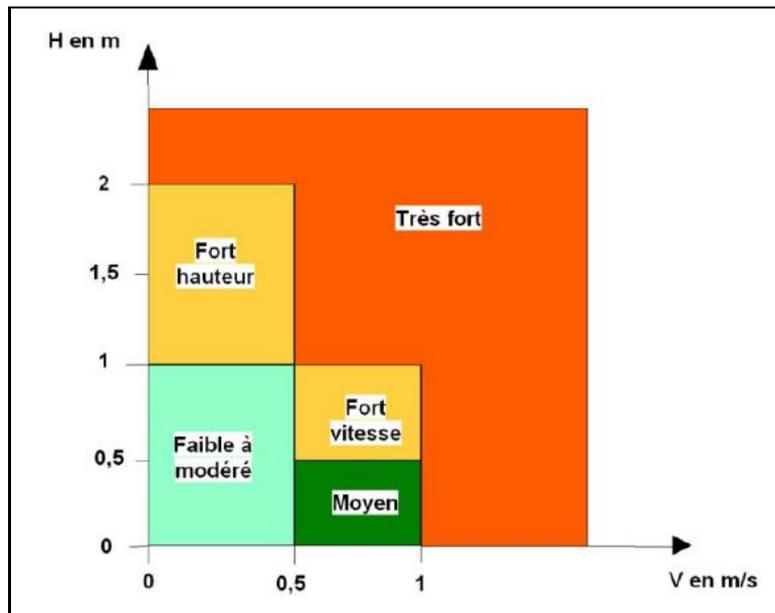


Figure 7.17. Grille de lecture des aléas inondation. (Source : SAFEGE, 2013).

Enfin, pour passer de la cartographie de l'aléa à celle du risque, il a été procédé à un **croisement aléa-enjeu**. La **caractérisation des enjeux** a été conduite en identifiant d'une part les enjeux ponctuels qui, de par leurs fonctions, sont particulièrement exposés au risque inondation, et d'autre part les enjeux d'occupation du territoire. Dans le premier cas, il s'agit des établissements utiles à la gestion de crises (pompiers, forces de l'ordre, etc.), des établissements sensibles (hôpitaux, crèches, hébergeant des populations à mobilité réduite, etc.), des établissements susceptibles de drainer une population importante (grands magasins, cinémas, etc.) et qui peuvent faire l'objet de mesures particulières de réduction de la vulnérabilité. Dans le second cas, l'espace a été repartitionné en trois zones :

- **Le Centre Urbain Dense (CUD)**, défini en fonction de 4 critères qui sont « l'histoire des lieux concernés », « une occupation du sol de fait importante », « une continuité bâtie » et « une mixité des usages entre logements, commerces et services » ;
- **Les Zones Peu ou Pas urbanisées (ZPPU)** : zones naturelles, zones agricoles, zones habitées caractérisées par un tissu très desserré. Lorsqu'ils sont inondables, ils jouent un rôle déterminant en participant à l'expansion des crues.
- **Les Autres Zones Urbanisées (AZU)** : l'ensemble du territoire urbanisé en dehors des deux zones précédentes. L'urbanisation de ces secteurs est souvent récente et l'opportunité d'étendre cette urbanisation est à examiner au regard des aléas d'inondation auxquels ils sont confrontés.

Cette carte a été élaborée à partir du zonage des documents d'urbanisme communaux et des orthophotos de 2008. Elle a été transmise à chaque commune afin de confronter les analyses. À l'issue de ces échanges et réunions, des corrections ont été apportées à la cartographie des enjeux.

Le résultat final est un **zonage réglementaire** qui détermine les règles applicables en tenant compte à la fois de l'enjeu et de l'intensité de l'aléa inondation auquel il est soumis. Il comprend :

- les zones rouges, zones d'interdiction, avec des sous-zones pour tenir compte de l'exploitation agricole selon les niveaux d'aléa. Ces zones comprennent l'ensemble des secteurs exposés à un aléa inondation par débordement moyen, fort ou très fort à l'exception des centres urbains, ainsi que les secteurs d'aléa faible à modéré en zone peu ou pas urbanisée afin de préserver les champs d'expansion des crues et les capacités d'écoulement. Elles peuvent aussi être exposées à un aléa ruissellement "fort hauteur", "fort vitesse" ou "très fort" dans les zones urbanisées à l'exception des centres urbains.

- des **zones bleues, zones où les constructions**, ouvrages, aménagements et exploitations nouveaux sont soumis à prescriptions avec des sous-zones dans lesquelles les prescriptions sont modulées en fonction de la stratégie de prévention.

- des **zones basses hydrographiques** (essentiellement l'ensemble du lit majeur) dont le niveau d'exposition au risque n'est pas précisé dans le PPRI.

- des **zones exposées à un aléa exceptionnel** qui est un événement supérieur à celui pris en compte pour le PPRI (crue millénale).

On notera que l'existence d'un PPRI ne permet pas aux assureurs de déroger à leur obligation de garantie aux effets des catastrophes naturelles pour tout contrat comportant cette garantie, lorsqu'il s'agit de biens et activités existant antérieurement à la publication de ce plan. Les exceptions concernent les biens dont la mise en conformité avec des mesures rendues obligatoires par ce plan n'a pas été effectuée par le propriétaire, l'exploitant ou l'utilisateur (Garry, 1997).

À titre d'exemple, nous reproduisons ci-dessous les quatre types de cartes qui constituent le PPRI de Draguignan, en prenant, parmi les 6 feuilles, celle qui couvre le centre-ville et la vallée de la Nartuby en amont de Trans-en-Provence (Figs 7.18, 7.19, 7.20, 7.21). Le fond de carte est la carte IGN à 1/25 000.

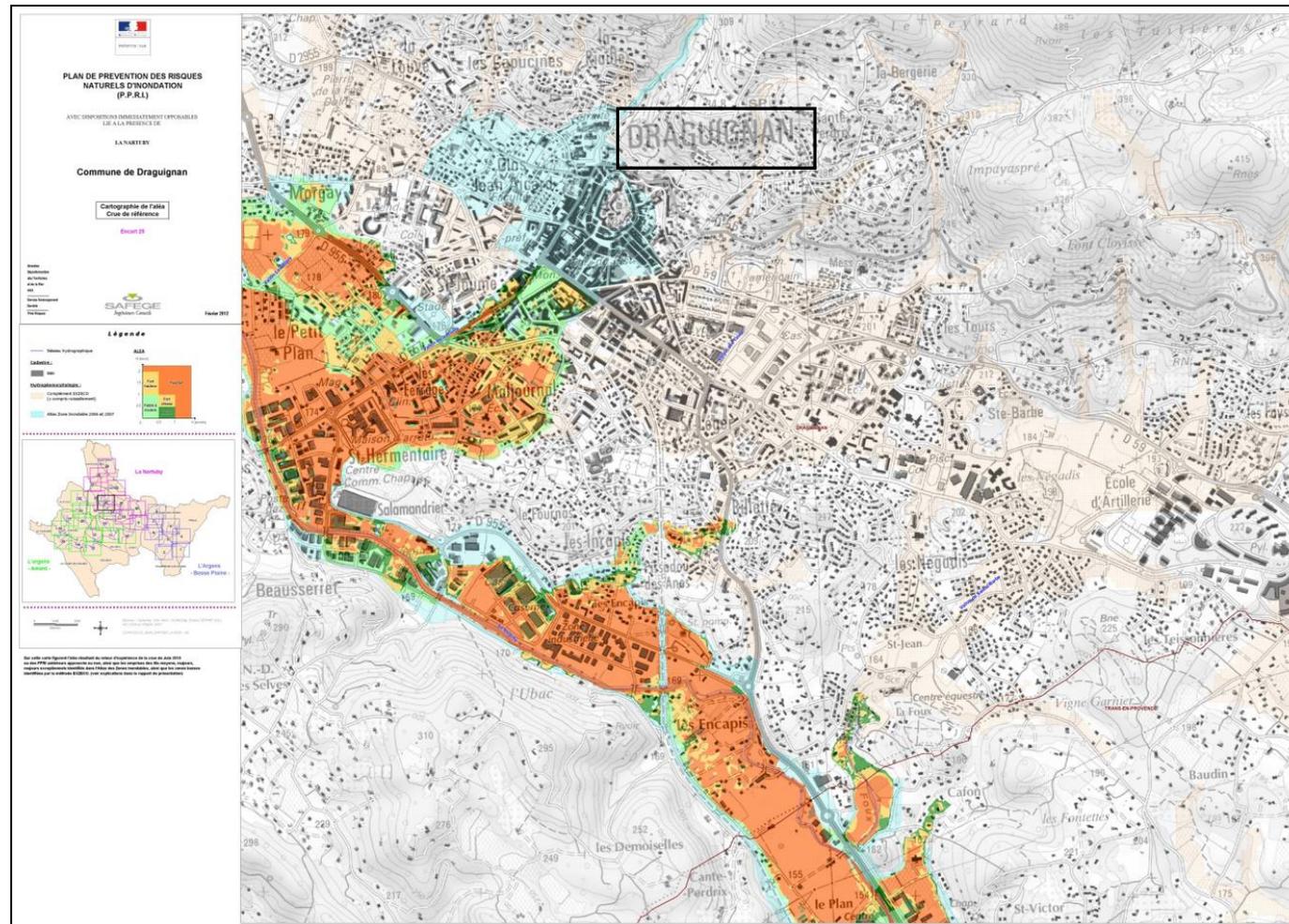


Figure 7.18. Carte de l'aléa crue de référence, Commune de Draguignan. Le lit majeur de la Nartuby et les bas quartiers de Draguignan sont les plus affectés, mais le noyau ancien de la ville, plus élevé est également concerné (apports des vallons affluents). Légende détaillée des couleurs : voir Fig. 7.16. (Source : PPRI Draguignan, SAFEGE, 2012).

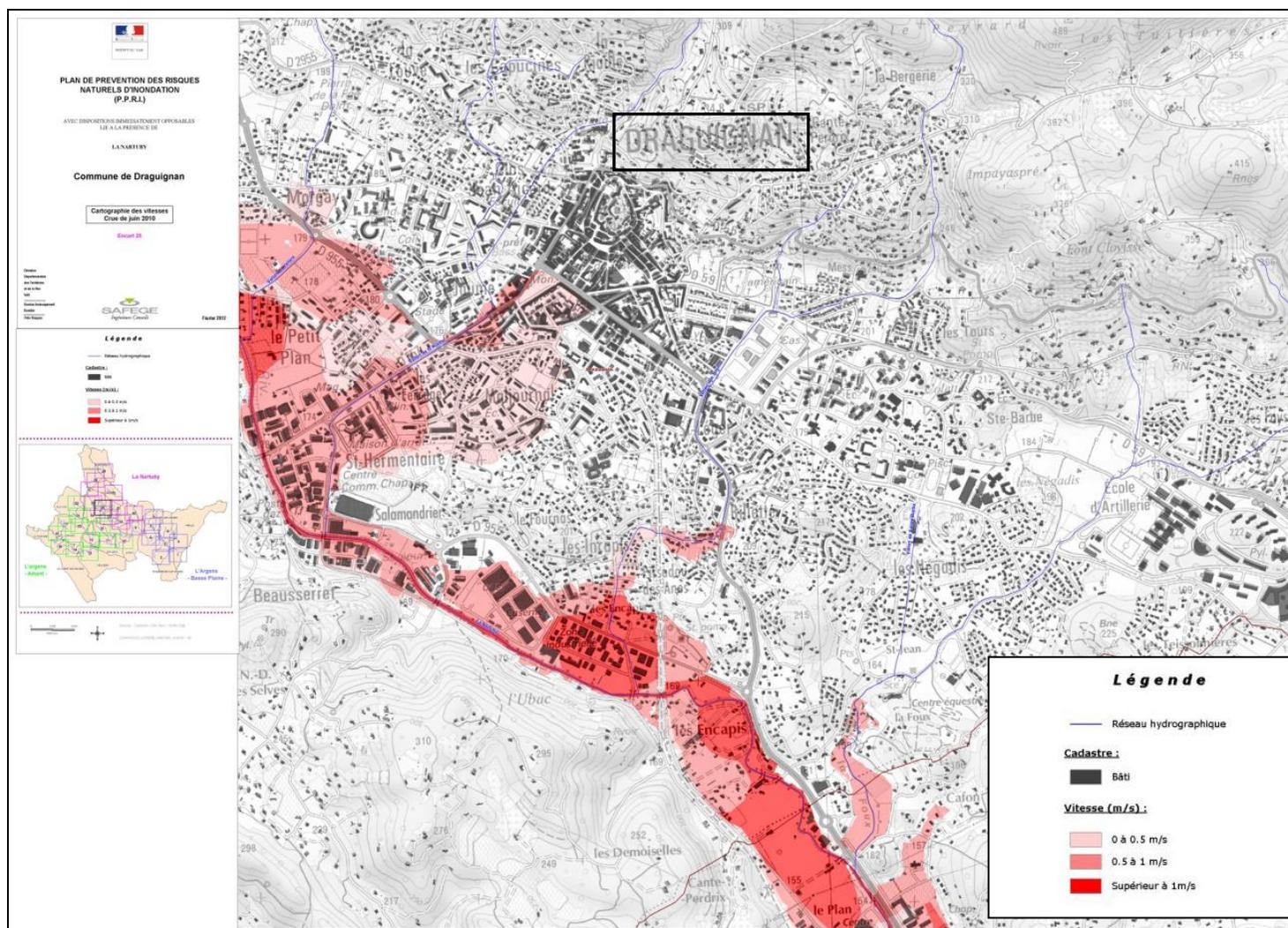


Figure 7.20. Carte des vitesses d'écoulement, crue de juin 2010. Commune de Draguignan. (Source : PPRI Draguignan, SAFEGE, 2012).

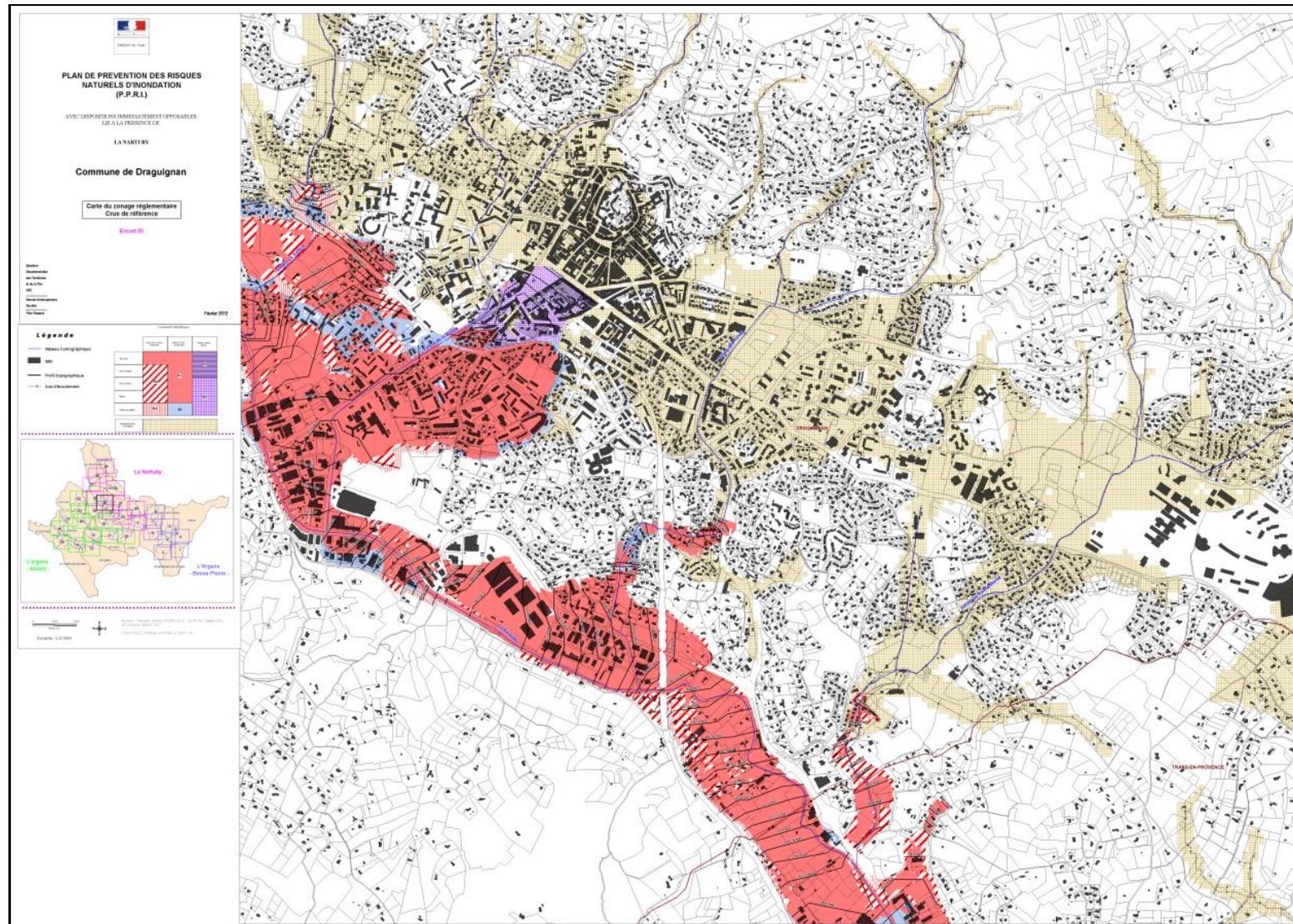


Figure 7.21. Carte du zonage réglementaire, crue référence. Commune de Draguignan. (Source : PPRI Draguignan, SAFEGE, 2012).

7.3.5. Les enseignements en termes de gestion et de prévention

Les mesures de prévention décrites ci-dessus sont encore récentes et le recul reste insuffisant pour juger de leur efficacité, d'autant plus qu'aucun événement de violence comparable à celle du 15 juin 2010 n'est survenu depuis dans le secteur de Draguignan. Cependant, le bilan des quelques catastrophes naturelles plus récentes survenues dans la région ces dernières années (Var-Côte d'Azur) montre que tous les enseignements de cette crue n'ont sans doute pas été tirés et que la mise en place de mesures de prévention du type de celles du secteur de Draguignan, si elle a eu lieu, ne semble pas avoir été à la hauteur des enjeux.

Il s'agit notamment, et à titre d'exemples, des épisodes méditerranéens survenus du 2 au 11 novembre 2011 dans le bassin-versant de l'Argens (crue de retour vicennal sur la Nartuby, de retour cinquantennal pour l'Argens, du Reyran ; 5 morts, 2500 évacués, inondation de zones industrielles à Fréjus... : Meaudre, 2012), ou encore de celui qui a frappé la Côte d'Azur (Mandelieu-la-Napoule, Biot, Vallauris, Golfe Juan, Antibes, Le Cannet, Cannes : basses vallées de Siagne et de la Brague) les 3 et 4 octobre 2015 (21 morts, 65 000 sinistrés, 605 millions d'euros de dommages matériels).

Le constat est le même à chaque fois : des pluies diluviennes (plus de 300 mm en 3 jours en plusieurs endroits du Var en novembre 2011 ; 100 à 200 mm de pluie en 2h sur le bassin-versant de la Brague en octobre 2015), de brusques débordements des cours d'eau dans les basses vallées, inondant les quartiers et zones industrielles construits en zones pourtant connues comme inondables. Dans une émission de France Inter du 5 octobre 2015, selon Jean-Claude Marcus (administrateur de l'Association Française pour l'Étude du Sol), ce sont bien l'artificialisation et l'imperméabilisation des sols qui ont contribué à ce qui s'est passé dans les Alpes-Maritimes (publié le lundi 5 octobre 2015 à 17h35 par [Axel Villard@Axel VF](mailto:Axel.Villard@Axel.VF), [Gaudéric Grauby-Vermeil@GaudericG](mailto:Gauderic.Grauby-Vermeil@GaudericG), [Mathieu Vidard@mathieuidard](mailto:Mathieu.Vidard@mathieuidard)). Il prend pour exemple deux photographies aériennes du delta de la Brague, zone proche du complexe Marineland à Antibes, en 1961 et de nos jours :

« En 1961, cette zone est composée de petites parcelles agricoles et la rivière était freinée par ses méandres et une forêt sur le long de la rive. Ce fleuve était amené à déborder régulièrement de son lit. Mais l'occupation humaine était faible et les habitations en étage permettaient de protéger les populations. De nos jours, les parcelles sont devenues des lotissements avec des maisons à la provençale, donc sans étages. Les murets ont remplacé les haies, et la terre a été recouverte de bitume et de béton. Tout ce qui aurait pu absorber l'eau, retenir l'écoulement et éviter les torrents de boue a disparu en moins d'un demi siècle ».

Malgré les dispositions réglementaires contraignantes qu'ils comportent en matière d'occupation des sols et de normes de constructions nouvelles ou de modification de l'existant, les Plans de Prévention des Risques d'Inondation, là où ils existent, ne prémunissent pas à eux seuls contre le retour de catastrophes dues à des inondations touchant les quartiers et infrastructures déjà en place. Leur domaine d'intervention doit en effet respecter les compétences des communes en matière

d'aménagement (documents d'urbanisme) et de police, et les responsabilités à la charge des particuliers (Garry, 1997).

7.4. Comparaison avec l'approche brésilienne à travers le cas du Cariri

7.4.1. Instruments juridiques : intérêt et limites de l'expérience française

Il est évidemment très difficile de transposer ou même de comparer l'expérience acquise d'un pays à un autre, et plus encore l'ensemble des mesures mises en place pour traiter de la question des risques, tant les contextes naturel, historique, socio-économique, culturel, politique et juridique sont différents. Néanmoins, les phénomènes et les impacts humains sont du même ordre, et c'est à partir de là que la démarche comparative peut apporter des éléments intéressants.

On l'a vu plus haut, quelques cas emblématiques, dont le plus dramatique fut celui de la tempête Xynthia en 2010, montrent que l'expérience que l'on peut tirer du cas français résumé plus haut n'est pas parfaite. Parmi les explications, on peut évoquer le caractère tardif (essentiellement depuis une vingtaine d'années) de la prise de conscience et des actes. Le temps écoulé depuis la mise en œuvre de stratégies et de mesures censées être plus efficaces n'est pas suffisant pour que l'on dispose du recul nécessaire à une appréciation de leur efficacité. On peut simplement penser que la connaissance des éléments à prendre en compte bénéficiera beaucoup des approches interdisciplinaires mises en place, en particulier avec la mise en place des projets PAPI (Meaudre, 2013).

L'arsenal juridique et réglementaire mis en place au cours de la dernière décennie, complété par des améliorations en matière de prévision des crues et d'alerte (en particulier à travers le SCHAPI et Météo France : voir 7.3.1) paraît complet, en tout cas conforme à la réglementation européenne (directive inondation de 2007). L'organisation des secours, en particulier avec les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) instaurés par la loi du 13 août 2004 et dans les deux ans suivant l'adoption d'un PPRI, est elle aussi efficace, d'autant plus qu'elle est élaborée en concertation avec tous les acteurs de la gestion du risque (pompiers, personnels municipaux, etc.) et la population, même s'il peut exister des dysfonctionnements comme celui observé à Draguignan en juin 2010 du fait de l'inondation du centre de secours. Les problèmes observés lors des catastrophes suivantes résultent surtout des retards pris dans la prévision et l'alerte des phénomènes météorologiques et hydrologiques (un domaine encore améliorable malgré les investissements en radars hydrométéorologiques, en pluviographes, ou encore la mise à disposition du public des prévisions de crues sur le site internet www.vigicrues.fr) et des aberrations accumulées au cours des décennies précédentes en matière d'imperméabilisation des sols dans les bassins-versants et d'urbanisation mal maîtrisée des zones inondables. Sauf en cas de mesures d'interdiction totale de construction, et de délocalisation par rachat et démolition de bâtiments existants dans les zones de risques majeurs (submersion marine, reculs de falaises...), les plans de gestion et de prévention, ainsi que les ouvrages de protection, si élaborés soient-ils, ne pourront pas

régler ce problème dans un avenir prévisible, même dans un contexte d'urbanisation contrôlée. Il en est bien sûr de même, sinon pire, dans la région brésilienne étudiée dans le cadre de cette thèse.

7.4.2. La prise en compte des risques dans les communes brésiliennes étudiées

À Crato comme à Barbalha et dans les très nombreuses autres communes brésiliennes exposées à des risques naturels, la gestion et la prévention des risques devraient passer par la mise en place de plans comparables dans leurs objectifs et leurs méthodes, sinon par leurs cadres réglementaires, à ceux qui ont été décrits dans le cas français. Cependant, notre recensement des plans locaux existants au Brésil montre que la démarche est encore peu avancée, en dépit du cadre législatif et des nouveaux organismes de gestion et de prévention des risques qui ont été mis en place à l'échelle nationale au cours de la décennie 2010 (voir 6.3.2).

En ce qui concerne la **connaissance des aléas**, dans le cadre du Programme National de Gestion des Risques et de Réponse aux Catastrophes Naturelles, le CPRM (Service Géologique du Brésil) a lancé l'établissement de cartes de susceptibilité aux mouvements gravitaires de masse et aux inondations. Les cartes, à l'échelle 1/5000, sont complétées par des bases de données et un visualiseur SIG. En juillet 2018, il apparaît que dans l'État du Ceará, seulement 7 communes étaient concernées par cette cartographie, dont une seule dans le Cariri (Lavras da Mangabeira). Il n'est pas prévu que Crato et Barbalha en soient pourvus avant au moins 2019 (CPRM, comm. pers, 05/12/2018).

En ce qui concerne les **plans de prévention des risques** d'inondation et de ruissellement ou plus généralement les instruments dédiés à la prévention des catastrophes naturelles, 59,4 % des 5570 communes brésiliennes n'en possédaient pas à la date du 03/07/2018 (IBGE). De tels plans peuvent être intégrés aux plans directeurs municipaux (34,9 %), aux règlements d'occupation des sols (*Lei de Uso e Ocupação dos Solos*, 34,6 %), correspondre à des arrêtés ou plans spécifiques concernant les crues ou les ruissellements (5,4 %), ou bien apparaître à part entière comme des Plans Municipaux de Réduction des Risques (11,7 %), ou comme des cartes géotechniques d'aptitude à l'urbanisation produites par le CPRM (5,2 % ; aucune dans le Nordeste). La réduction des risques y est traitée non seulement sous un angle préventif, mais aussi à travers des actions de gestion de crise, avec le recensement de l'ensemble des intervenants.

Par exemple, et pour s'en tenir au Nordeste, le Plan Municipal de Réduction des Risques de Natal (PMRR, 2008) comporte l'identification des instruments de prévention et d'intervention dans les aires de risque, la cartographie des aléas et de la vulnérabilité, celle des secteurs et des degrés de risque (volume 1), mais aussi un véritable catalogue des interventions préventives et correctives à réaliser (« *mesures structurelles et non structurelles* »), pour les différents quartiers (ouvrages d'art, relocalisation d'habitations, récupération d'aires dégradées, etc.). Il contient aussi des propositions de mitigation pour la réduction des risques (inondations, phénomènes géomorphologiques), ainsi que le cadre légal des interventions et les lignes de financement (volume 2). En ce sens, il apparaît plus

complet que le PPRI français, mais avec une vocation en partie différente, car il combine aussi, dans le même document, certaines des caractéristiques des plans d'urbanisme et d'aménagement, des plans communaux de sauvegarde et de rapports techniques plus spécifiques, sans comporter l'aspect réglementaire des PPRI.

Dans la région étudiée, les communes de Crato et Barbalha sont signalées par l'IBGE en 2018 comme possédant des instruments de prévention des risques naturels. À Barbalha, il s'agirait d'un Plan Directeur Municipal comportant un volet de prévention des crues, des inondations graduelles et des crues éclair. En réalité, ce document daté de 2000 représente principalement, comme celui de Crato, les caractères et vocations des différents quartiers de la ville et ne comporte aucune cartographie ni aucun zonage lisible des aires inondables et plus généralement des aires de risque. En ce qui concerne la ville de Crato, il existerait, selon l'IBGE, un Plan Municipal de Réduction des Risques, une Carte Géotechnique d'Aptitude à l'Urbanisation et une Carte des Risques de Crues et Inondations, mais à ce jour (12/2018), il ne nous a pas été possible d'avoir confirmation de leur existence auprès des services de la mairie.

7.4.3. Approches interdisciplinaires et enseignements croisés des cas brésiliens et français

7.4.3.1. *Interactions entre scientifiques, professionnels et acteurs*

Que ce soit dans les cas brésiliens étudiés ici ou dans le cas français présenté à titre de comparaison, les données acquises et publiées dans le cadre des études commandées par les organismes publics ou collectées dans le cadre de travaux scientifiques universitaires, sans parler des articles de presse, couvrent l'essentiel de ce qu'il faut connaître en termes d'aléas, d'enjeux, de vulnérabilité et de risques. Tout au long des recherches bibliographiques, on a même pu observer une certaine redondance de ces données, même si le plus souvent, c'est bien une complémentarité qu'il faut remarquer dans ce domaine qui requiert les approches multidisciplinaires les plus larges possibles. Par exemple, la connaissance de la constitution des écoulements et des crues dans la vallée du Rio Granjeiro et la ville de Crato bénéficie aussi bien de l'étude géographique globale du bassin versant (géomorphologie, géologie, sols, végétation, climatologie, hydrogéologie, géographie rurale et urbaine, histoire, etc.) que des rapports techniques et modélisations effectuées par des ingénieurs et des bureaux d'étude dans la basse vallée, le long du chenal bétonné en principe destiné à traiter le problème des inondations (Chapitres 1, 2 et 5). Elle bénéficie aussi de résultats d'enquêtes effectuées auprès des populations exposées à ces risques, qui permettent de mieux connaître les réactions face aux événements, les impacts réels des événements survenus et les attentes par rapport à leur traitement en cas de retour (Chapitre 4). Par ailleurs, l'étude interdisciplinaire a permis, dans le cas brésilien, d'étendre l'identification et la connaissance des aléas à des mouvements de terrain d'échelle et de temps de récurrence tels qu'ils étaient jusque là passés inaperçus (Chapitre 3).

Dans le cas de Draguignan, l'élaboration du PPRI par un bureau d'étude privé (SAFEGE) a évidemment bénéficié de la combinaison des travaux d'ingénierie (modélisation hydrologique, etc.), des approches juridiques (volet réglementaire) et de documents et travaux scientifiques ou techniques externes (cartographie topographique et géologique, bulletins de Météo France, publications et travaux universitaires...) dont les résultats ont été compilés dans le rapport général. En revanche, il n'apparaît pas, à notre connaissance, de participation directe du monde scientifique, universitaire à ce travail, même si des compte-rendus post-crue comme celui de Martin *et al.* (2010) ont pu être utilisés.

Il en est de même pour les cas étudiés dans le Nordeste brésilien, où les Plans Directeurs Municipaux des villes étudiées ont été élaborés par des bureaux d'études privés. Cependant, certains travaux des étudiants et chercheurs, en particulier du Département d'Ingénierie de l'Université Fédérale du Cariri (UFCA, Juazeiro do Norte) ont été menés en liaison avec les services techniques de la ville de Crato, en particulier après la crue éclair de janvier 2011. En 2015, une conférence intitulée « Risques environnementaux : observer leur espace » a été organisée à Crato (quartier Pinto Madeira) dans le cadre d'un programme « Actions de gestion des aires de risque dans les quartiers précaires de la région métropolitaine du Cariri », par l'Université Fédérale du Cariri, en partenariat avec la Défense Civile de Crato (source : <https://defesacivilemcrato.blogspot.com/2015/09/palestra-riscos-ambientais-observando-o.html>).

L'implication des chercheurs a été plus forte et plus ancienne dans le sud-est du Brésil, avec la participation d'équipes universitaires (en particulier de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro, UFRJ) aux études sur les catastrophes des années 2010, ou avec des manifestations et congrès réunissant chercheurs universitaires, ingénieurs et acteurs administratifs (par exemple, le II^{ème} INCT-REAGEO Workshop, Rio de Janeiro, 2014).

C'est encore plus vrai dans le sud du Brésil, où une coopération entre le Secrétariat National de la Défense Civile et l'Université Fédérale du Santa Catarina (Centre Universitaire d'Études et de Recherches sur les Catastrophes, CEPED-UFSC) est, entre autres, à l'origine de l'élaboration des Atlas Brésiliens des Catastrophes Naturelles publiés de 2010 à 2013. Elle avait été précédée dans le même cadre, dès 2003, par la fondation d'un groupe d'étude sur la prévention des catastrophes naturelles dans les communes du Santa Catarina touchées les années précédentes. Une de ses premières entreprises avait été l'élaboration d'un matériel didactique à l'attention des professeurs de l'enseignement public et des membres des commissions municipales de Défense Civile (Kobiyama *et al.*, 2006). Parmi les travaux ultérieurs du CEPED, on notera par exemple une proposition pilote de méthodologie d'évaluation de vulnérabilité pour la cartographie des aires exposées aux mouvements de terrain et inondations, avec un rapport sur la capacité de protection et de réponse (actions non structurelles de réduction des risques) dans la commune d'Alfredo Wagner (SC) (CEPED-UFSC, 2014). On a vu plus haut (6.3.2.3) que ces actions sont complétées, depuis 2018, par l'élaboration de manuels de plans de contingence pour les catastrophes liées aux mouvements de masse, à l'attention des personnels de la Défense Civile, dans le cadre du projeto GIDES.

Récemment aussi, des agences nationales ont mis en place des formations destinées aux cadres et techniciens municipaux chargés du problème des risques. Ainsi, en août 2013, le CPRM (Service géologique du Brésil) a organisé une formation de techniciens communaux pour la prévention et la gestion des risques naturels, en partenariat avec la Coordination de la Défense Civile (CEDEC) du Ceará. À Crato, des techniciens du CPRM et de la défense civile locale ont réalisé conjointement des levés de terrain.

7.4.3.2. *Conditions différentes et options techniques divergentes (chenaux, bassins de rétention...)*

Les études de cas menées ou résumées dans cette thèse font apparaître des différences notables dans les conditions mêmes d'occurrence des catastrophes et dans les types de réponses qui y ont été apportés.

Le choix des deux principaux sites étudiés au Brésil et en France s'était fait en fonction de la survenue alors récente de catastrophes liées à des inondations brusques, touchant dans les deux cas des villes partiellement construites en fond de vallée à proximité de hauts plateaux d'où descendent des cours d'eau encaissés et pentus au régime irrégulier, susceptibles de connaître des crues éclair alimentées par des pluies d'autant plus intenses qu'elles sont renforcées par des effets orographiques. Mais au-delà de cette relative similitude, des différences significatives sont apparues. D'ordre de grandeur tout d'abord : la catastrophe de juin 2010 à Draguignan a été très meurtrière, alors que celle de janvier 2011 à Crato a surtout entraîné de lourds dégâts matériels et leur lot de sinistrés. Crato est plus peuplée que Draguignan (respectivement 120 000 et 32 000 habitants - 38 000 avec Trans-Provence), mais le bassin-versant où Crato s'inscrit est onze fois plus petit, avec des linéaires de cours d'eau et des débits de pointe de retour décennal à centennal nettement plus petits (encore que proportionnellement très élevés à Crato, compte tenu de la compacité du bassin-versant du Rio Granjeiro). Différences de contexte géologique et hydrogéologique aussi, puisque le bassin-versant du Rio Granjeiro, également affecté par des mouvements de masse, ne bénéficie pas d'effets tampons analogues à ceux des karsts qui peuvent atténuer ou retarder temporairement les pics de crue de la Nartuby.

En revanche, dans les deux cas, des constats similaires apparaissent quant aux aberrations et aux excès de l'urbanisation (imperméabilisation des sols, occupation d'aires inondables), mais avec des variantes. À Crato, les secteurs les plus touchés correspondent essentiellement à un centre-ville ancien et densément occupé, partiellement construit en zone inondable sur des basses terrasses bordant un ancien chenal torrentiel instable. Ils sont aussi potentiellement menacés par le retour d'événements violents tels que ceux dont témoignent les dépôts sur lesquels une partie de la ville est bâtie (coulées de débris, laves torrentielles) ; mais la période de retour de tels événements, probablement très longue, est inconnue, ce qui les rend imprévisibles. Les zones d'urbanisation récente ou actuelle et plus ou moins incontrôlée gagnent surtout des secteurs ruraux situés sur les interfluves d'un piémont disséqué et sur les contreforts du haut plateau, contribuant à l'imperméabilisation des sols et aux ruissellements

qui aggravent les crues éclair et leurs effets en ville. À Draguignan, le centre-ville est construit en marge du lit majeur de la Nartuby mais se trouve exposé aux ruissellements issus des pentes et vallons affluents de rive gauche (les plus concernés par les problèmes d'imperméabilisation des sols), tandis que les zones commerciales et industrielles récentes, construites dans le lit majeur de la Nartuby, ainsi que plusieurs lotissements, sont directement exposés aux crues de la rivière.

Ces conditions différentes peuvent expliquer en partie les réponses différentes apportées jusqu'à présent aux inondations catastrophiques. À Crato, où les quartiers les plus denses sont traversés par un cours d'eau généralement à sec mais pouvant se transformer quasi-instantanément en torrent dévastateur, la première préoccupation, au-delà des phases de secours et de réparation des dégâts, a été d'essayer de contenir ce torrent et de l'empêcher de déborder dans les zones les plus sensibles ou même d'en attaquer le substrat par migrations latérales. D'où la construction par étapes du « canal » et ses reconstructions successives, aboutissant à un ouvrage inadapté, mal calibré, sans doute encore plus dangereux que le chenal naturel (voir 5.4.2). À Draguignan, les mêmes erreurs ont été commises avec le busage sous-dimensionné des eaux venues des vallons affluents de la Nartuby et du collecteur que constitue l'ancien canal d'irrigation de Saint Jaume. En revanche, la Nartuby, bien que localement artificialisée (seuils) n'a fait l'objet d'aucun endiguement, probablement parce que la ville était initialement située à l'écart de son lit et que les terrains adjacents étaient restés agricoles et donc moins protégés, jusque dans les dernières décennies. Ce sont les ponts qui la franchissent, de Draguignan à Trans, qui ont le plus souvent freiné l'écoulement du fait de dimensionnements insuffisants (comme à Crato), provoquant les embâcles et débordements décrits plus haut.

À Draguignan, les actions consécutives à la crue de 2010 ne comportent, on l'a vu, aucun projet d'endiguement de la Nartuby, ni aucun barrage écrêteur (7.3.2) : donc, pas d'artificialisation supplémentaire du cours d'eau, pour lequel on prévoit au contraire de créer ou restaurer des zones d'expansion de crue à l'amont de la ville.

La stratégie est exactement inverse de celle qui prévaut à Crato (et aussi à Barbalha), où l'on tente de contenir les cours d'eau et de leur faire traverser la ville le plus rapidement possible afin de propager rapidement la crue vers l'aval, en espérant que le calibre de l'ouvrage sera suffisant pour éviter les débordements, ceci en dépit de calibrages, profils et solutions techniques inadaptées. De même, le principal exemple de lutte contre le ruissellement et le ravinement, dans le quartier Seminário, est un spectaculaire ouvrage de contention d'un versant raide également exposé à des mouvements de masse. Nous avons vu qu'il reste à espérer que le dispositif de drainage, la pente (très forte) et la qualité des matériaux utilisés (de minces parois de béton sans ancrage profond) suffiront à compenser la poussée d'une épaisse altérite susceptible d'être saturée d'eau en période de fortes précipitations (voir 5.4.2.2). Enfin, la solution des réservoirs écrêteurs situés dans l'amont du bassin versant a été envisagée dans le Plan directeur municipal de Crato (Fig. 4.9), mais n'a jusque là pas été mise en œuvre.

7.4.3.3. *Prévention des risques : place de l'approche géographique et rôle essentiel de la cartographie*

La brève présentation de la question des risques hydrologiques à Draguignan a fait apparaître le rôle fondamental de la cartographie, et donc de l'approche géographique, dans la mise en place des stratégies de prévention à l'échelle locale. Cet outil progressivement perfectionné et normalisé en France depuis ses premières versions (cartes ZERMOS – Zones Exposées aux Risques de MOuvement du Sol et du sous-sol, années 1970) s'est généralisé depuis 1995. La carte a donc été placée au cœur du dispositif français de prévention territoriale et d'appropriation des risques naturels, dans sa version informative (localisation des aléas) et réglementaire (contraintes d'occupation du sol) (Léone *et al.*, 2010). Matérialisant le risque et permettant d'en mesurer les conséquences prévisibles en termes de dommages et coûts potentiels, elle est de maniement délicat tant les enjeux (fonciers, économiques...) peuvent être importants et sources de conflits. Les cartes incluses dans les PPRI constituent donc, selon les auteurs cités, des espaces de concertation, de négociation, utiles à la décision, accessibles au grand public et réactualisables grâce à leur production sous SIG. Parallèlement, de nombreux autres documents cartographiques exploratoires, explicatifs ou prédictifs traitant des risques naturels, sont élaborés dans le cadre des activités des institutions de recherche et de diverses agences publiques (Institut Géographique National, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Météo France, etc.) et sont mis à la disposition du public et des acteurs sur divers portails internet et sites interactifs (ex : Géoportail, Cartorisque, Géorisque...). L'information peut donc circuler assez aisément, jusqu'au niveau des communes et de la population (malgré les nombreux témoignages de sinistrés de plus ou moins bonne foi affirmant ne pas avoir connu l'importance de tel ou tel risque au moment d'acheter leur habitation...).

Les travaux géographiques et cartographiques portant directement ou indirectement sur les risques naturels sont également nombreux au Brésil, mais moins systématiques et moins complets, ce qui peut en partie s'expliquer à la fois par l'immensité du territoire à couvrir et par le caractère récent (décennie 2010) de la législation et de la mise en place des organismes dédiés. Les progrès sont cependant rapides et l'on peut être frappé, par exemple au Ceará, par la qualité des données et des cartes thématiques fournies par des agences telles que le CPRM, la FUNCEME, la COGERH, l'IPECE (ex IPLANCE) ou l'IBGE, dans les domaines de la géologie, de la climatologie, de l'hydrologie ou de la géographie humaine. La structure fédérale du pays explique aussi la diversité des approches et des types de prévention mis en place ainsi que l'inégal avancement des travaux de reconnaissance des aléas et de cartographie des risques d'un État à l'autre ou d'un type de risque à l'autre.

Quant aux travaux universitaires, on a vu plus haut que leur densité géographique reflète souvent celle des événements catastrophiques récents et la proximité des Universités et des Centres de recherche des régions concernées. Sans même reparler ici de l'exemple pilote des travaux du CEPED-UFSC (7.4.3.1), on peut évoquer l'importance des publications sur les catastrophes de la région de Rio de Janeiro après 2010 (travaux des géographes de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro-UFRJ) ou,

dans le Cariri, le grand nombre des articles et mémoires produits par les chercheurs et étudiants des universités locales (UFCA, URCA) sur la seule commune de Crato, voire sur le seul Rio Grangeiro. Ces travaux tendent à se raréfier vers les zones rurales les plus reculées, où les enjeux sont d'ailleurs moindres, sauf vis-à-vis de certains risques spécifiques (sécheresse, par exemple). Enfin, l'inégal avancement de la connaissance et de la cartographie des aléas et des risques tient aussi à l'inégale implication des communes et des acteurs locaux, qui peuvent inclure ou non des plans de prévention dans les plans directeurs municipaux. Elle peut aussi résulter de l'inégale disponibilité des bases cartographiques nécessaires au travail des agences nationales (ex : le retard imposé pour cette raison au CPRM pour la cartographie des aléas naturels dans les communes du Cariri).

7.5. Conclusion du chapitre 7 et de la troisième partie

La question des risques naturels se pose en termes aussi aigus au Brésil qu'en France. Dans les deux cas comme à l'échelle globale, on a noté une incontestable augmentation des événements catastrophiques d'origine climatique, hydrologique et géodynamique, explicable à la fois par le changement climatique global et par une occupation croissante des zones de risque, pouvant elle-même contribuer à l'aggravation des phénomènes observés (imperméabilisation des sols, aménagements inadaptés). Cette tendance participe à une amélioration de la prise de conscience des risques naturels de la part des populations menacées et des acteurs, mais les enquêtes menées sur le terrain (chapitre 4) montrent que cette prise de conscience est encore bien partielle et peine à se transcrire dans les pratiques, en particulier dans le contexte brésilien où des populations défavorisées n'ont guère le choix des lieux où elles habitent.

C'est cependant ce mouvement qui explique la réaction des pouvoirs publics, dès la fin du XXe siècle en France, et dans les années 2010 au Brésil, à la fois pour mieux recenser, connaître et prévoir les catastrophes naturelles et traiter leurs conséquences, et aussi pour mettre en place des outils de prévention adaptés en vue d'une réduction des risques (Chapitre 6). Cette démarche bénéficie en France, un pays centralisé, du rôle des organismes publics nationaux qui agissent en concertation avec les autorités locales. Elle se met aussi en place au Brésil, où la structure fédérale entraîne à la fois une certaine complexité de la mise en œuvre des directives nationales et une plus grande proximité du terrain pour les agences des États, avec des difficultés de coordination dont témoignent les informations divergentes que nous avons obtenues auprès d'agences comme l'IBGE et des communes (état d'avancement de la cartographie des aléas et des risques, etc.).

L'approche comparative atteint rapidement ses limites du fait des grandes différences qui apparaissent dans les dimensions et les contextes naturels, historiques, politiques, administratifs, juridiques et socio-économiques de deux pays aussi différents que le Brésil et la France. Cependant, l'exercice a pu mettre en évidence de nombreux points communs qui tiennent principalement à la nature même des aléas envisagés. Les différences résident surtout dans la nature et la répartition des

enjeux ainsi que dans les stratégies propres à chaque pays dans les domaines de la gestion des crises et de la prévention des risques. À cet égard, la différence d'approche entre l'endiguement d'un cours d'eau aux excès dangereux (Rio Granjeiro, Crato) et la restauration d'espaces d'expansion sur une rivière dont les crues affectent les zones d'activités et lotissements récents (Nartuby, Draguignan) s'explique peut-être par des cultures différentes dans le domaine de l'ingénierie et de la gestion des cours d'eau, mais aussi par des priorités différentes : dans le premier cas, la protection à tout prix d'infrastructures adjacentes au cours d'eau et menacées de destruction, et dans le second, le souci de réduire le niveau et l'impact des inondations dans des zones de toute façon inondables en cas d'événement extrême. Deux approches différentes vis-à-vis des problèmes posés par l'existant, le plus souvent non assuré dans le cas brésilien étudié...

Enfin, si les besoins en matière de délimitation des aires de risque sont les mêmes, les conséquences qui en sont tirées ne sont pas les mêmes, puisqu'on ne retrouve pas jusqu'à présent dans la région étudiée au Brésil l'équivalent du zonage réglementaire contenu dans les PPRI français tandis qu'on y trouve des éléments relevant plutôt, en France, des plans d'urbanisme et d'aménagement ou des plans communaux de sauvegarde. Si des enseignements peuvent paraître transposables d'un pays à l'autre, c'est avant tout dans ce domaine réglementaire, à cette réserve près qu'il s'agit d'une question délicate, source potentielle de conflits qui peuvent être particulièrement aigus dans un pays où les zones à risque sont souvent occupées par les populations les plus défavorisées et où les intérêts économiques ou spéculatifs l'emportent encore plus souvent qu'en Europe sur les autres considérations.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La thématique des risques naturels a fortement gagné en répercussion, sur la scène nationale comme sur la scène internationale, du fait des pertes humaines, des dommages et des énormes préjudices économiques qui ont affecté de nombreuses régions du monde sur un rythme et avec une intensité qui semblent s'être accrus au cours des dernières décennies. Leurs conséquences sont particulièrement graves dans les pays du Sud, où les facteurs socio-environnementaux rendent les populations particulièrement vulnérables aux phénomènes catastrophiques. Les crues et inondations, parfois associées à divers types de mouvements de terrain (Tiranti et Cremonini, 2019), figurent parmi les plus fréquents et dévastateurs de ces phénomènes. En s'intéressant à certains de ces événements récemment survenus dans l'intérieur semi-aride du Nordeste brésilien, notre thèse s'inscrit parmi les recherches qui portent sur cette thématique aux enjeux cruciaux pour les populations concernées. Elle aborde les conditions de la survenue de ces phénomènes catastrophiques et s'intéresse à leurs effets, à leur perception et aux moyens mis en œuvre pour remédier à leurs conséquences, aux échelles locales et nationales, pour réduire leurs impacts et prévenir leur répétition. Elle s'appuie en particulier sur un exemple, celui de la crue-éclair du Rio Granjeiro, un petit cours d'eau de moyenne montagne qui a provoqué d'importants dommages dans le centre-ville de Crato (Ceará), le 28 janvier 2011.

Malgré la répétition récente d'événements comparables, ici et dans d'autres régions du Brésil, on a vu à travers les différents chapitres qu'il n'existe guère de « culture » ou même d'appréhension locale des risques, ni de réelle expression de cette problématique dans l'aménagement et la planification urbaine. Dans la littérature scientifique relative à la région d'étude, il n'existait jusque récemment que quelques travaux sur des crues et des mouvements de terrain de petite taille affectant les systèmes de vallées et d'interfluves qui forment le site urbain. La connaissance des aléas a commencé à s'étendre avec nos travaux, grâce à l'identification de grands mouvements de masse ayant affecté l'escarpement et les fonds de vallées, probablement avec des temps de récurrence assez longs pour que ces événements soient jusqu'alors restés ignorés (Peulvast *et al.*, 2011) et restent encore négligés. En revanche, les crues et, en particulier, les crues-éclair, sont beaucoup plus fréquentes. Elles restent pourtant mal étudiées et gérées, en dépit des nombreuses annonces faites après chaque inondation, ce qui a aussi justifié un approfondissement de l'étude de cet aléa.

La thèse ayant été préparée en France, une approche géographique comparative était initialement prévue pour constituer le cœur de ce travail, portant sur les communes de Crato et de

Barbalha, au Brésil, et la région de Draguignan, en France. L'idée de départ était la recherche des enseignements à tirer de l'expérience française en matière de traitement et de prévention des risques naturels et des possibilités de les transposer dans le cadre brésilien. En fait, il est apparu au cours de ce travail que l'ampleur et les difficultés de la recherche à mener du côté brésilien étaient telles, avec ses nombreuses voies nouvelles d'investigation, qu'elle justifiait une réorientation vers une approche plus centrée sur la principale région d'étude. Les objectifs initiaux ont donc évolué, incluant une définition plus étendue des aléas et des risques naturels auxquels la région d'étude principale est exposée (des inondations brusques, mais aussi des mouvements de terrain de plus ou moins grande ampleur), une étude de la façon dont ces risques sont subis, perçus et traités par la population et les acteurs locaux, et une analyse de la prise en compte des contextes nationaux, géographiques, juridiques et réglementaires dans lesquels cette question est abordée. C'est d'ailleurs à ce niveau que la comparaison avec le cas français devient la plus significative.

- **Principaux résultats**

S'agissant de la question des risques naturels, le contexte de forte vulnérabilité socio-environnementale de la région d'étude face aux aléas naturels comme aux impacts anthropiques, nécessitait une connaissance approfondie du milieu et de son fonctionnement dans la région d'étude (Première partie : chapitres 1 et 2). Parmi les aléas et les risques d'ordre morphodynamique décrits dans ces chapitres, il n'apparaît pas encore clairement si ceux qui sont liés à de grands mouvements de terrain (chapitre 3) doivent être pris en compte dans la planification urbaine. Bien que préliminaire et encore dépourvue de datations absolues, notre étude de ces phénomènes donne cependant des indications sur la nature et la distribution des événements passés ainsi que sur les aléas associés qui peuvent inciter les décideurs à les prendre en compte dans toute politique d'aménagement local.

Inscrire ces observations dans une amélioration de la gestion du milieu et de la planification urbaine passait, entre autres, par la réalisation d'un diagnostic géographique et socio-environnemental avec une évaluation plus détaillée des impacts environnementaux et des conditions socio-économiques de la population. Elle a été partiellement réalisée dans notre travail (chapitre 4), mais la constitution future d'une base de données spatialisée (iconographie, témoignages et enregistrements historiques, etc.) pourra aider à déterminer non seulement les facteurs naturels mais aussi les facteurs socio-environnementaux qui contribuent à la dégradation et à la vulnérabilité accrue de la région. La seconde partie de la thèse s'inscrit partiellement dans cette réflexion.

Notre travail montre que les deux villes étudiées (Crato, Barbalha) souffrent de continuer à se développer sans respecter les cours d'eau qui les traversent. Ainsi, à Crato, le petit torrent montagnard qu'est le Rio Grangeiro est, la plus grande partie de l'année, tellement privé de son eau par les captages qu'il en est oublié et que l'on a cru pouvoir le réduire à un ruisseau facilement contenu entre deux parois de béton. Un ruisseau, mais aussi un égout à ciel ouvert, devenant en saison sèche un filet

noirâtre qui, serpentant de trous en fissures sur le fond cimenté, incommode riverains et passants. Et pourtant, pratiquement chaque année depuis ce corsetage inconsideré, de violentes crues viennent rappeler que l'eau retrouve toujours son chemin et qu'elle peut toujours reprendre ses droits sur son ancienne plaine d'inondation, et même au-delà.

Une des questions qui se posaient était donc de savoir comment rendre à ces cours d'eau leur statut de rivières, y compris dans les mentalités, et comment composer avec des excès qui menacent de s'aggraver compte tenu de l'occupation croissante de leurs bassins-versants. La crue du 28 janvier 2011 et les suivantes sont venues rappeler, après bien d'autres, que cette question demande des solutions urgentes, mais aussi que celles-ci ne peuvent pas être élaborées dans l'improvisation. L'analyse des conditions de déclenchement et des conséquences de ces crues est un pas dans cette direction. Elle vient compléter une approche scientifique plus large et interdisciplinaire, essentiellement menée dans les universités locales (URCA, UFCA Cariri), dont les résultats devraient s'articuler avec ceux des approches appliquées (ingénierie, génie civil, urbanisme...). L'approche géographique est au centre de ce travail, avec la spatialisation des phénomènes impliqués, avec la compréhension des chaînes de rétroactions amont-aval ou entre chenal et lit majeur, et avec la prise en compte des dimensions temporelles (mémoire des risques, reconstitutions basées sur l'analyse des formes et des sédiments...). Notre participation à cette démarche, constituant un des principaux résultats de notre travail, a principalement comporté l'identification et la cartographie des aires de risques des deux villes étudiées (aléas, enjeux, vulnérabilité et croisement de ces données), dans le but d'améliorer l'état des connaissances et de fournir aux décideurs les éléments nécessaires à l'élaboration d'une planification urbaine comportant une véritable gestion et une prévention réelle des risques d'inondation et, plus généralement, des risques « naturels » (chapitre 5). Ultérieurement, la diffusion de ces résultats dans la communauté scientifique, auprès des acteurs de la protection civile et auprès de la population devrait contribuer à améliorer la perception de cette situation, sans laquelle cette gestion peut rester incomprise, mal acceptée et inefficace.

Nous avons également tenté d'étendre notre réflexion au cadre national, et même international, en suggérant une comparaison avec un exemple français de gestion d'une catastrophe naturelle et de mise en place de mesures de prévention. En effet, la question des risques naturels se pose en termes aussi pressants au Brésil qu'en France (Troisième Partie), même si certains aspects, en particulier en matière de vulnérabilité socio-environnementale, diffèrent considérablement. Dans les deux cas comme à l'échelle globale, on a noté une incontestable augmentation des événements catastrophiques d'origine climatique, hydrologique et géodynamique, explicable à la fois par le changement climatique global et, surtout, par une occupation croissante des zones de risque, pouvant elle-même contribuer à l'aggravation des phénomènes observés (imperméabilisation des sols, aménagements inadaptés). Face à cette tendance, l'amélioration de la prise de conscience des risques naturels de la part des populations menacées et des acteurs progresse, mais les enquêtes menées sur le terrain (chapitre 4) et l'occupation constante des zones pourtant répertoriées comme zones de risques, en France comme au

Brésil, ont montré que cette prise de conscience est encore bien partielle et peine à se transcrire dans les pratiques, en particulier dans le contexte brésilien où des populations défavorisées n'ont guère le choix des lieux où elles habitent.

C'est cependant ce mouvement qui explique la réaction des pouvoirs publics, dès la fin du XXe siècle en France, et dans les années 2010 au Brésil, à la fois pour mieux recenser, connaître et prévoir les catastrophes naturelles et traiter leurs conséquences, et aussi pour mettre en place des outils de prévention adaptés en vue d'une réduction des risques (Chapitre 6). Cette démarche bénéficie en France, un pays centralisé, du rôle des organismes publics nationaux qui agissent en concertation avec les autorités locales (chapitre 7). Elle se met aussi en place au Brésil, où la structure fédérale entraîne à la fois une certaine complexité de la mise en œuvre des directives nationales et une plus grande proximité du terrain pour les agences des différents États, avec des difficultés de coordination dont témoignent les informations divergentes que nous avons obtenues auprès d'agences comme l'IBGE et des communes (état d'avancement de la cartographie des aléas et des risques, etc.). Dans les deux cas, et quels que soient les progrès des connaissances et les outils mis en place, la prévention reste imparfaite car, selon Pigeon et Rebotier (2016) : « *The improvement of disaster prevention is not only understood in the elimination of uncertainties or in the progression of knowledge. It is also in the discussion of values and social orders, which govern arbitrations and the priorities among which the policies of disaster prevention take root* » (L'amélioration de la prévention des catastrophes ne consiste pas seulement en l'élimination des incertitudes ou dans le progrès des connaissances. Elle réside aussi dans la discussion des valeurs et des ordres sociétaux, qui gouvernent les arbitrages et les priorités parmi lesquels s'enracinent les politiques de prévention des catastrophes).

Quant à elle, l'approche comparative atteint rapidement ses limites du fait des grandes différences qui apparaissent dans les dimensions et les contextes naturels, historiques, politiques, administratifs et socio-économiques de deux pays aussi différents que le Brésil et la France. Cependant, l'exercice a pu mettre en évidence de nombreux points communs qui tiennent principalement à la nature même des aléas envisagés. Les différences résident surtout dans la nature et la répartition des enjeux ainsi que dans les stratégies propres à chaque pays dans les domaines de la gestion des crises et de la prévention des risques.

Si les besoins en matière de délimitation des aires de risque sont les mêmes, les conséquences qui en sont tirées ne sont pas les mêmes puisque, jusqu'à présent, on ne retrouve pas l'équivalent du zonage réglementaire contenu dans les PPRI français dans la région étudiée au Brésil. Pourtant, si des enseignements peuvent paraître transposables d'un pays à l'autre, c'est avant tout dans ce domaine réglementaire, à cette réserve près qu'il s'agit d'une question délicate. C'est en effet une source potentielle de conflits qui peuvent être particulièrement aigus dans un pays où les zones à risques sont souvent occupées par les populations les plus défavorisées et où les intérêts économiques ou spéculatifs, souvent accompagnés de faits de corruption et d'impunité, l'emportent encore plus souvent qu'en Europe sur les autres considérations. Surtout dans le contexte politique brésilien né des

élections de 2018, où les préoccupations environnementales sont escamotées et ne se réveillent – temporairement – qu’à l’occasion de nouveaux événements catastrophiques comme les ruptures répétées de barrages miniers dans le Minas Gerais (Mariana, novembre 2015 ; Brumadinho, janvier 2019)... Dans l’immédiat, les perspectives pour une approche géographique de cette problématique restent immenses, tant l’approche territoriale de la question reste essentielle (Laganier, 2006), en particulier pour la connaissance et la prise en compte de la vulnérabilité des personnes et des biens dans un pays particulièrement inégalitaire (Debortoli *et al.*, 2017). Bien que ses apports concernent tous les acteurs, elle est avant tout d’ordre scientifique, avec l’amélioration des connaissances relatives aux différentes composantes de la question des risques naturels et la poursuite des efforts d’inventaire et de cartographie nécessaires à toute amélioration de la prévention quel que soit le contexte actuel et futur.

- **Limites et perspectives**

Il reste que ce travail comporte nécessairement des lacunes, liées aussi bien aux conditions personnelles, financières et matérielles de préparation de la thèse qu’à l’ampleur des questions scientifiques et à la multiplicité des méthodes et des techniques à intégrer dans toute approche de la question des risques. Le traitement de cette question requiert en effet une véritable approche interdisciplinaire, qui n’a pu être réalisée que partiellement à travers quelques collaborations et le recours à une documentation très variée et inégalement disponible. Si les données relatives au milieu physique, à la géographie humaine et à la réglementation ont pu être obtenues assez aisément, de même que les documents émis par les agences fédérales, il n’en a pas été de même pour certaines de celles relatives aux plans d’aménagement urbain ou de prévention des risques, qui se sont parfois révélées inexistantes, disparues ou sensibles. Si des orientations futures peuvent se dégager de ce travail, elles résident surtout dans les améliorations de connaissances que l’on peut attendre de collaborations interdisciplinaires étendues et mieux ordonnées, dans le milieu de la recherche comme avec des professionnels tels que ceux, ingénieurs, urbanistes ou autres, qui œuvrent dans les bureaux d’études, les agences publiques et les collectivités territoriales. En ce qui concerne la géographie, la mise en place d’enseignements spécifiques en matière de risques naturels dans les universités du Nordeste est encore peu développée ou limitée à certains domaines (climatologie, hydrologie) et apparaît plus nécessaire que jamais.

Enfin, les résultats obtenus risquent de rester lettre morte s’ils ne font pas l’objet, non seulement de publications scientifiques, mais aussi d’une diffusion auprès des premiers concernés, c’est-à-dire des habitants de la région étudiée et des acteurs locaux. Cela pourra constituer une des étapes ultérieures de notre travail, avec une traduction en portugais des principaux résultats et leur communication aux agences et services impliqués dans l’aménagement urbain, dans la gestion et la prévention des risques (mairies, Protection civile, etc.) ainsi qu’aux associations et communautés

concernées, les mieux placées pour en finir avec la passivité historique de grandes parties des populations concernées. Une manière de contribuer ainsi à rapprocher les travaux universitaires des préoccupations de la société civile, pour le bénéfice des deux parties...

BIBLIOGRAPHIE

- ALMEIDA, L.Q.**, 2009. Desastres naturais: no Brasil, não há gestão de risco! *Jornal da Ciência*, SBPC. <http://www.ecodebate.com.br/2009/05/20>
- ALVARES, A.A.**, Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6), DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ANGELI M.G.**, Gasparetto P., Menotti R.M., Pasuto A., Silvano S., Soldati M. (1996) – Rock avalanche. In Dikau R., Brunsden D., Schrott L., Ibsen M. (eds): *Landslide recognition: identification, movement and causes*. J. Wiley and Sons, Chichester, 190-201.
- APA** Chapada do Araripe, 1999. *Projeto Araripe*. FUNDETEC, Crato.
- ARTIGUE, G., DUMAS, D., MERTZ, C., WESOLEK, E.**, 2010. Episode pluvio-orageux du 15 juin 2010 sur le Var. Retour d'expérience sur la prévision météorologique et hydrologique d'un épisode diluvien exceptionnel. *KERAUNOS, Observatoire français des tornades et des orages violents*, 1-20. http://www.keraunos.org/recherche_inondations_var_15_juin_2010_prevision.pdf.
- ASSINE M.L.** (1994) - Paleocorrentes e paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Geociências*, 24, 223-232.
- AVELAR, A.S., COELHO NETTO, A.L., LACERDA, W.A., BECKER, L.B., MENDONÇA, M.B.**, 2011. Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil, *Proceedings 2nd World Landslide Forum*, Rome, pp. 1-5.
- BANCO MUNDIAL**, 2008. *Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Santa Catarina - Novembro de 2008*. Brasília.
- BANCO MUNDIAL**, 2010. *Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco - Juin 2010*. Brasília.
- BANCO MUNDIAL**, 2012. *Avaliação de perdas e danos. Inundações e deslizamentos na região serrana de Rio de Janeiro, Janeiro 2011*. Brasília.
- BARBERINI V., BURLINI L., RUTTER E.H., DAPIAGGI M.** (2005) – High-strain deformation tests on natural gypsum aggregates in torsion. In Bruhn D., Burlini L. (eds): *High-strain zones: structure and physical properties*. Geological Society, London, Special Publications, 245, 277-290.
- BAUDIN F., BERTHOU P.Y.** (1996) - Environnement de dépôt de la matière organique des sédiments aptiens-albiens du bassin d'Araripe (NE du Brésil). *Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 20, 213-227.

- BEHLING H., ARZ H.W., PÄTZOLD J., WEFER G.** (2000) – Late Quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB 3104-1. *Quaternary Science Reviews*, 19, 981-994
- BELTRANDO, G.**, 2007. *Les climats, processus, variabilité et risques*, Collection Universitaire, Armand Colin, Paris. 260 p.
- BÉTARD, F.**, 2007. *Montagnes humides au cœur du Nordeste brésilien semi-aride : le cas du massif de Baturité (Ceará). Apports d'une approche morphopédologique pour la connaissance et la gestion des milieux*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne, 442 p.
- BÉTARD, F., FORT, M.**, 2014. Les risques liés à la nature et leur gestion dans les Suds. *BAGF-Géographies*, 3, 231-240.
- BÉTARD, F., PEULVAST, J.P., MAGALHÃES, A.O., FREITAS, F.I.**, 2017. Géopatrimoine et biopatrimoine, à la croisée entre conservation et développement. Une approche des trajectoires patrimoniales dans le Cariri du Ceará (Nordeste brésilien). *Annales de Géographie*, 717, 544-565.
- BÉTARD, F., PEULVAST, J.P., MAGALHÃES, A.O., CARVALHO NETA, M.L., FREITAS, F.I.**, 2018. Araripe Basin: A major geodiversity hotspot in Brazil. *Geoheritage* 10,543–558, DOI 10.1007/s12371-017-0232-5
- BEZERRA, F.H.R.**, 2000. Neotectonic movements in northeastern Brazil: implications for a preliminary seismic-hazard assessment, *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 3 (2000) 562-564.
- BRAVARD, J.P., PETIT, F.**, 1997. *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Armand Colin, Paris, 222 p.
- BRITO, D.S.**, 2016. *Risco de inundação em enclaves úmidos no semiárido: o caso da bacia do Rio Salamanca, Barbalha/Ceará*. Dissertação de Mestrado, UECE, Fortaleza,.
- BRITO, D.S., SILVA, J.M.O.**, 2012. Análise hidroclimática da microbacia do Rio Granjeiro/Crato, Ceará. *Revista Geonorte*, Ed. Especial, 2, 1, 5, 359-369.
- CABRAL, S.L., CAMPOS, J.N.B., SILVEIRA, C.S., TEIXEIRA, F.A.A.**, 2016. Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana : aplicação à bacia do Rio Granjeiro-CE. *Geociências*, 35, 1, 90-101.
- CARVALHO, S.M., RIBEIRO, S. C.**, 2007. Identificação das áreas de riscos de deslizamentos urbanos e periurbanos da cidade do Crato/CE. *Cadernos de cultura e ciência*, URCA, 2, 1-9.
- CARVALHO NETA, M.L., BÉTARD, F., CÔRREA, A.C.B.**, 2018. Mapeamento da geodiversidade do Geopark Araripe. *XII Sinageo*, Crato, Anais, 6 p.
- CASTRO, A.R.S.F., MANSUR, K.L., CARVALHO, I.S.** (2015), Diagnóstico da relação da comunidade com o patrimônio geológico por meio do instrumento de coleta de dados, *Terræ Didactica*, 11(3), p. 162-172.
- CAVALCANTE, A.**, 2005. Jardins suspensos no Sertão. *Scientific American Brasil*, 32, 6973.

- CAVALCANTI, N.J., et al** (dir.), 2009. *Tempo e clima no Brasil*. Oficina de textos, São Paulo.
- CENAD**, 2012. *Anuário Brasileiro de desastres naturais 2011*. Brasília.
- CENAD**, 2013. *Anuário Brasileiro de desastres naturais 2012*. Brasília.
- CENAD**, 2014. *Anuário Brasileiro de desastres naturais 2013*. Brasília.
- CEPED-UFSC**, 2010. 2010 – *Inundações Bruscas em Alagoas*. Florianópolis.
- CEPED-UFSC**, 2012. *Atlas Brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil*. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis.
- CEPED-UFSC**, 2013. *Atlas Brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Ceará*. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis.
- CEPED-UFSC**, 2017. *Relatorio de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil, 1995-2014*. Florianópolis.
- CNM**, 2010. *Desastres Naturais no Brasil. Análise das portarias de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública de 2003 a 2010*. Brasília.
- COELHO NETTO, A.L., SATO, A.M., AVELAR, A.S., VIANNA, L.G.G., ARAÚJO, I.S., FERREIRA D.L.C., LIMA, P.H., SILVA, A.P.A., SILVA, R.P.**, 2011. *The extreme landslide disaster in Brazil. Second World Landslide Forum*, Rome, Italy, p. 1-6.
- COGERH**, 2007. *Vamos conhecer o Salgado (Cartilha técnica)*. Crato/CE, 13 p.
- COMBY, J.**, 2004. La mise en carte et risques de dérive technocratique dans la prévention des risques. In: Veyret, Y., Garry, G., Meschinet de Richemont, N. (dir) : *Risques naturels et aménagement en Europe*, Armand Colin, Paris, p. 79-85.
- COROMINAS J., REMONDO J., FARIAS P., ESTEVÃO M., ZÉZERE J., DIAZ DE TERÁN J., DIKAU R., SCHROTT L., MOYA J., GONZÁLEZ A.**, 1996. Debris flows. In Dikau R., Brunsden D., Schrott L., Ibsen M. (eds): *Landslide recognition: identification, movement and causes*. J. Wiley and Sons, Chichester, 161-180.
- COSTA, F. DAS C.S.** 2003. *Análise geoambiental do Cariri*. URCA, Crato.
- COSTA, M.C.L., DANTAS, E.W.** (dir.), 2009. *Vulnerabilidade socioambiental na região metropolitana de Fortaleza*. Edições UFC, Fortaleza, 298 p.
- COSTA, V.D.**, 1999. Recursos hídricos. In Gervaiseau P. (ed.): *Projeto Araripe, vol. 5*. MMA, FUNDETEC, URCA, Crato, 622-713.
- CPRM**, 2005. *Hidrogeologia da porção oriental da bacia sedimentar do Araripe*. Rede Cooperativa de Pesquisa, Brasília.
- CPRM**, 2014. *Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa*. Crato – Ceará, 15 p.
- DAUPHINÉ, A.**, 2001. *Risques et catastrophes. Observer – Spatialiser – Comprendre – Gérer*. Armand Colin, Paris, 288 p.

- DEBORTOLI, N.S., CAMARINHA, P.I.M., MARENGO, J.A., RODRIGUES, R.R.**, 2017. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural hazards*, DOI 10.1007/s11069-016-2705-2
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L., IBSEN M.** (eds) (1996) – *Landslide recognition: identification, movement and causes*. J. Wiley and Sons, Chichester, 274 p.
- DNPM**, 1996. *Projeto de avaliação hidrogeológica da bacia sedimentary do Araripe*. Fase 1. DNPM, Recife.
- EMBRAPA** - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária, 1999. *Manual de classificação dos solos*. Brasília: Embrapa, 1999.
- ESPOSITO, C.** 2013. *Crue de juin 2010 dans le Var : érosion, dépôts et dégâts*. Wikydro, Récupéré de : <http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php?>
- ESTADO DO CEARÁ, SEINFRA. PROURBE-CE.** Prefeitura Municipal do Crato, 2000. *Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município do Crato*. Fortaleza/Crato: Consórcio VBA/espaco Plano, 2000.
- FIGUEIREDO, M.A.**, 1989. Vegetação. In: IPLANCE. *Atlas do Ceará*. Fortaleza: 1989. p. 24-25.
- FORT M., PEULVAST J.P.** (1995) – Catastrophic mass movements and morphogenesis in the Peri-Tibetan ranges: examples from west Kunlun, east Pamir and Ladakh. In Slaymaker O. (ed.): *Steepland geomorphology*. J. Wiley & Sons, Chichester, 171-198.
- FUNCEME**, 2011. *Gráficos de chuvas dos postos pluviométricos. Postos Crato e Lameiro*. www.funceme.br, accès du 15/05/2013.
- FUNCEME**, 2013. Download de séries históricas, Postos Crato e Lameiro. www.funceme.br, accès du 12/02/2013.
- FUNCEME**, 2015. *Base de dados pluviométricos*. Fortaleza. Disponible sur www.funceme.br
- FUNDETEC**, 1998. *Mapa da Zona de Conservação e Desenvolvimento do Equilíbrio Ambiental da Região Metropolitana CRAJUBAR*. 1:50000. Crato.
- Garry, G.**, 1997 *Guide général de préparation des Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles*. La Documentation Française, Paris.
- GERGIS, J.L., FOWLER, A.M.** 2009. A history of ENSO events since A.D. 1525: implications for future climate change. *Climatic Change* 92, 3-4, 343-387.
- GLADE T., CROZIER M.J.** (2004) – The nature of landslide hazard impact. In Glade T., Anderson M., Crozier M.J. (eds): *Landslide hazards and risks*. J. Wiley and Sons, Chichester, 43-74.
- GLASTRON, S.**, 2003. Culture des risques. In : V. Moriniaux (dir.), *Les risques*. Editions du Temps, Nantes, pp. 71-87.
- GOUDIE, A.S.**, 2010. Geomorphological hazards and global climatic change. In I. Alcantara-Ayala and A.S. Goudie (eds), *Geomorphological hazards and disaster prevention*, Cambridge University Press, pp. 245-255.

- GUICHARD**, 1970. *Les sols du bassin du Rio Jaguaribe*. Mém. ORSTOM, Paris, 40, 146 p.
- GUNNELL Y.** (1998) – Passive margin uplifts and their influence on climatic change and weathering patterns of tropical shield regions. *Global and Planetary Change*, 18, 47-57.
- HEIM A.**, 1932. *Bergsturz und Menschenleben*, Fretz und Wasmuth, Zurich.
- HORTON, R.E.**, 1945. Erosional development of streams and their drainage basin. Hydrophysical approach to quantitative geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 3, 275-370.
- IBGE.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/barbalha/historico> consulta: 04.07.2018.
- INPE**, 2011. Análise sinótica : 28/01/2011-00Z. *Boletim técnico*. www.inpe.br>, accès du 08/05/2012.
- IPECE**, 2016. *Perfil Básico Municipal 2016, Barbalha*. Fortaleza.
- IPLANCE**, 1989. *Atlas do Ceará*. Governo do Estado do Ceará, Secretaria do Planejamento e Coordenação – SEPLAN, Fortaleza., 65p.
- KOBIYAMA, M., MENDONÇA, M., MORENO, D.A., OLIVEIRA MARCELINO, I.P.V., MARCELINO, E.V., GONÇALVES, E.F., BRAZETTI, L.L.P., GOERL, R.F., MOLLERI, G.S.F., RUDORFF, F.M.**, 2006. *Prevenção de desastres naturais. Conceitos básicos*. Editora Organic Trading, Florianópolis, 110 p.
- LAGANIER, R.** (Dir.), 2006. *Territoires, inondation et figures du risque*. La prévention au prisme de l'évaluation. L'Harmattan, Paris, 257 p.
- LANG M., JAVELLE P., AUBERT Y.**, 2010. *Estimation de la période de retour de la crue du 15 juin 2010 aux alentours de Draguignan*, CEMAGREF, note du 15 septembre 2010.
- LEFORT, P., KOULINSKI, V.**, 2011. *Crue de juin 2010, expertise post-crue*, Tome 3 : "Argens, Florieye, Réal", 98 p.
- LÉONE, F., MESCHINET DE RICHEMOND, N., VINET, F.**, 2010. *Aléas naturels et gestion des risques*. PUF, Paris, 288 p.
- LIMA NETO, O.C.**, 2013. *Mapeamento das áreas de inundação da microbacia hidrográfica do Rio Granjeiro na cidade do Crato/Ce*. Monografia, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 79 p.
- LIMA NETO, R.T., MENDONÇA, L.A.R., PEREIRA, J. A., SOUSA, C.A.V., GONÇALVES, J.Y.B., FRISCHKORN, H.**, 2008. Análise morfométrica e ambiental da microbacia hidrográfica do rio Granjeiro, Crato/CE. *Rev. Esc. Minas*, 61, 3, pp. 1-10.
- LONDE, L.R., COUTINHO, M.P., DI GREGORIO, L.T., LIMA SANTOS, L.B., SORIANO, E.**, 2014. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, XVII, 4, 133-152.
- MAGALHÃES A.O.** (2006) – *Análise ambiental do alto curso da microbacia do Rio da Batateira no município do Crato/CE: subsídios ao zoneamento ecológico-econômico*. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza, 199 p.

- MAGALHÃES, A.O.**, 2014. Crues éclair et inondations urbaines dans le sertão du Nordeste brésilien (Rio Grangeiro, Crato, Ceará) : perception et gestion d'un risque naturel méconnu. *BAGF – GÉOGRAPHIES* – 2014-3, p. 257-275.
- MAGALHÃES, A.O.M., PEULVAST, J.P.**, 2013. Aléas et risques naturels dans l'intérieur semi-aride du Nordeste brésilien : la crue-éclair du Rio Grangeiro (Crato, Ceará) du 28 janvier 2011. *EchoGéo* [En ligne], 26 | 2013, mis en ligne le 19 décembre 2013. URL : <http://echogeo.revues.org/13596> ; DOI : 10.4000/echogeo.13596
- MAGALHÃES, A.O. ; PEULVAST, J.P. ; BÉTARD, F.**, 2010. Geodinâmica, perigos e riscos ambientais nas margens úmidas de planaltos tropicais: levantamento preliminar na região do Cariri oriental (Ceará, Brasil). *VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física-II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física*, Coimbra, abstract.
- MARENGO, J.A., TORRES, R.R., ALVES, L.M.**, 2016. Drought in Northeast Brazil. Past, present and future. *Theoretical and Applied Climatology, Theor Appl Climatol* DOI 10.1007/s00704-016-1840-8
- MARTIN, C.**, 2010. Les inondations du 15 juin 2010 dans le centre Var : réflexion sur un épisode exceptionnel. *Études de Géographie Physique*, XXXVII, p. 41-76.
- MARTIN C., PAUC JC., ROUZEAU M.**, 2010. *Retour d'expérience des inondations survenues dans le département du Var les 15 et 16 juin 2010*, 87 p. en ligne sur : www.amv83.com.
- MATOS, R.M., MEDEIROS, R.M., SILVA, P.F., FRANCISCO, P.R.M., SABOYA, L.M.F.**, 2015. Variação climatológica da precipitação no município de Barbalha - CE. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia- CONTECC'2015*, Fortaleza, 1-4.
- MEAUDRE, J.**, 2012. *Evolution de la prévention du risque d'inondation en France. Exemple des évènements de juin 2010 et novembre 2011 dans le Var*. Mémoire de master 1, Université Paris-Diderot, 107 p.
- MEAUDRE, J.**, 2013. *Gouvernance et conscience du risque, les enjeux de la prévention des inondations. Exemple du PAPI d'intention Argens et affluents dans le département du Var (PACA)*. Mémoire de master 2, Université Paris-Diderot, 89 p.
- MELO, A.B.C.**, 2011. As chuvas podem continuar escassas no extremo sul do Brasil. *Infoclima, Boletim de Informações climáticas do CPTEC/INPE*, ano 18, 1, 4 p.
- MENAD, W., DOUVINET, J., BELTRANDO, G., ARNAUD-FASSETTA, G.**, 2012. Evaluer l'influence de l'urbanisation face à un aléa météorologique remarquable : les inondations des 9-10 novembre : 2001 à Bab-el-Oued (Alger, Algérie). *Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement*, 3, 337-350.
- MERCKLE, S., ROYET, P.**, 2010. *Petits barrages de ralentissement dynamique en Seine Maritime. Principes de conception et de réalisation*. CEMAGREF, 35 p.

- MOEYERSONS J., VAN DEN EECKHAUT M., NYSSSEN J., TEFMAMICHAEL G., VAN DE WAUW J., HOFMEISTER J., POESEN J., DECKERS J., HAILE M.** (2008). Mass movement mapping for geomorphological understanding and sustainable development: Tigray, Ethiopia. *Catena*, 75, 45-54.
- MONTEIRO, J.B., PINHEIRO, D.R.C.**, 2012. O desastre natural como fenômeno induzido pela sociedade: abordagens teóricas e metodologias operacionais para identificação/mitigação de desastres naturais. *Revista de Geografia – PPGEO* -, 2, 1, 1-9.
- MONTEIRO, J.B.**, 2011. *Chover, mas chover de mansinho: desastres naturais e chuvas extremas no estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza.
- MOREIRA, A.A.C.**, 2013. *Modelagem hidrológica de bacia hidrográfica do Rio Granjeiro-Crato-CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo*. Dissertação de Mestrado, UFCA, Juazeiro do Norte, 163 p.
- MOREIRA, A.A.C.**, Costa, C.T.F., Tavares, P.R.L., Mendonça, L.A.R., 2013. Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Salamanca, Barbalha, CE. *XIX Simpósio Brasileiro de recursos hídricos*, resúme étendu, 1-15.
- NICOD, J.**, 1967. *Recherches morphologiques en Basse-Provence calcaire*. Thèse de Doctorat d'État, Univ. Aix-Marseille, Édité. Ophrys, Gap, Études et Travaux de Méditerranée, n° 5, 1968, 557 p.
- NIMER, E.** 1989. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 1979. 421 p.
- OLIVEIRA, R. R. DE**, 2011. *Danos ocasionados pelas chuvas ao longo do canal do Rio Grangeiro e da encosta do Bairro Seminário (Relatório Técnico)*. GEOSOMA - Geologia, Sondagens e Meio Ambiente Ltda. Crato, 17 p.
- PAYASTRE O., GAUME E., et al**, 2012. Analyse hydrologique de la catastrophe du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (Var, France), *Congrès SHF "Evènements extrêmes fluviaux et maritimes"*, 1-2 février 2012, Paris. 8 p.
- PDM Crato. Plano Diretor Municipal**, 2009. Leitura Técnica/Caracterização. Crato, 208 p.
- PEULVAST, J.P., BÉTARD, F.**, 2015. Basin inversion, scarp retreat and shallow denudation in NE Brazil: the Araripe basin as a keystone for understanding long-term landscape development. *Geomorphology*, 233, 20-40.
- PEULVAST, J.P., BÉTARD, F., MAGALHÃES, A. O.**, 2011. Scarp morphology and identification of large-scale mass movements in tropical tablelands: the eastern Araripe basin (Ceará, Brazil). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 33-52.
- PEULVAST, J.P.**, 2013. Reliefs et géodynamique : l'ossature du territoire français et sa place dans le bâti ouest-européen. In : D. Mercier (dir.) : *Géomorphologie de la France*. Dunod Editeur, Paris. p. 3-17.

- PEULVAST J.P., CLAUDINO SALES V.** (2004) - Stepped surfaces and palaeolandforms in the northern Brazilian “nordeste”: constraints on models of morphotectonic evolution. *Geomorphology*, 62, 89 - 122.
- PEULVAST J.P., CLAUDINO SALES V., BÉTARD F., GUNNELL Y.** (2008) - Low post-Cenomanian denudation depths across the Brazilian Northeast: implications for long-term landscape evolution at a transform continental margin. *Global and Planetary Change*, 62, 39-60.
- PEULVAST J.P., CLAUDINO SALES V., BEZERRA F.H., BÉTARD F.** (2006) - Landforms and neotectonics in the equatorial passive margin of Brazil. *Geodinamica Acta*, 19(1), 51-71.
- PIGEON, P., REBOTIER, J.**, 2016. *Disaster prevention policies. A challenging and critical outlook*. ISTE Perss, London et Elsevier, Oxford, 218 p.
- PIANCÓ, A.R.D.**, 1998. *A constituição de bairros periféricos em Barbalha - CE*. 120 folhas. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- PONTE F.C., PONTE-FILHO F.C.** (1996) – *Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe*. MME/DNPM, Recife, 66 p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO CRATO**, 2005. *Plano Director Municipal (PDM) do Crato*.
- PROJETO RADAMBRASIL**, 1981. *Levantamento integrado dos recursos naturais do Brasil. Folha Jaguaribe-Natal*. Ministerio das Minas e Energia-MME, Rio de Janeiro, 740 p.
- REBELO, F.** 2010. *Geografia física e riscos naturais*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, 215 p.
- RIBEIRO, S.C.**, 2004. *Susceptibilidade aos Processos Erosivos Superficiais com Base na Dinâmica Geomorfológica na Microbacia do Rio Grangeiro, Crato/CE*. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/PPGG.
- RIBEIRO, S. C., Guerra, A.J.**, 2003. Fatores sócio-ambientais na aceleração de processos erosivos em áreas urbanas: o bairro Seminário, Crato/CE. *Revista do Departamento de Geografia – Geo UERJ*, n° especial, 1827-1829.
- SÁ, P.E.F.**, 2015. *Modelagem hidráulica do canal do Rio Grangeiro: análise do escoamento após a reconstituição da calha*. Monographie de « Graduação », Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, 54 p.
- SAFEGE**, 2013. *Plan de Prévention des risques naturels d'inondation (P.P.R.I) lié à la présence de la Nartuby. Commune de Draguignan*. 1. Note de présentation. 201 p.
- SAFEGE**, 2014. *Plan de Prévention des risques naturels d'inondation (P.P.R.I) lié à la présence de l'Argens et la Vernède. Commune de Fréjus*. 1. Note de présentation. 231 p.
- SEITZ, F., COLLANGE, L.**, 2015. *Présentation du bassin-versant de l'Argens*. Groupe de travail BD TOPAGE-PACA, Département du Var.

- SIAN**, 2007. *Contrat de rivière Nartuby- Dossier minute*. Département du Var. 59 p.
- SILVA, F.O.E. DA**, 2011 a. *Relatório de visita técnica e parecer preliminar sobre o evento hidrológico de enxurrada e os colapsos estruturais ocorridos no canal do Rio Granjeiro na cidade do Crato no mês de Janeiro/2011*. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 13 p.
- SILVA, F.O.E. DA**, 2011 b. *Laudo técnico de vistoria das obras de recuperação do canal do Rio Granjeiro na cidade do Crato durante o evento chuvoso de 19/10/2011*. Prefeitura Municipal do Crato, Secretaria de Infraestrutura e Serviço Urbano, Crato, 34 p.
- SILVA, F.M.A.**, 2017. *Zoneamento de áreas de risco geomorfológico no município de Barbalha-CE*. Dissertação de Mestrado, UFCA, Juazeiro do Norte.
- SILVA, F.M.A.**, Bandeira, A.P.N., Ribeiro, S.C., Nascimento, D.C., 2017. Percepção dos riscos geomorfológicos em assentamentos precários no município de Barbalha – Ceará. *Ciência e sustentabilidade – CeS*, 3, 2, 145-162.
- SILVA, J.M.O.**, 2017. Utilização de anos-padrão no estudo da variabilidade pluviométrica no município de Crato/Ceará. *XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, Campinas. DOI – 10.20396/sbfga.vli2017.2421
- SOARES, R. C.**, 2006. Carta de Cadastro das Cicatrizes de Feições Erosivas e Movimentos Gravitacionais de Massa nas Áreas Urbanas e Periurbanas de Barbalha/CE com vistas ao Planejamento Urbano-Ambiental. Anais do *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology*, Goiânia.
- SOUSA, C.A.V., MENDONÇA, L.A.R., GONÇALVES, J.Y.B.**, 2006. Análise preliminar de riscos ambientais devido a expansão urbana na micro-bacia hidrográfica do Rio Granjeiro no município do Crato - CE. *VIII Simpósio Italo Brasileiro de Engenharia sanitária e ambiental*, Fortaleza, CE, Anais, 5 p.
- STRAHLER, A.N.**, 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38, 6, 913-920.
- SUDENE-ASMIC**, 1967. *Estudo geral de base do vale do Rio Jaguaribe. Vol. IV. Hidrologia*. GVJ.
- THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R.**, 1957. Instructions for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in climatology*, 10(3), 185-311.
- TIRANTI, D., CREMONINI, R.**, 2019. Editorial : Landslide hazard in a changing environment. *Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003>
- VAREJÃO SILVA, M.A.**, 1990. *Programa balanço hídrico*. FUNCEME, Fortaleza.
- VEYRET, Y.** (Dir.), 2007. *Os riscos. O homem como agressor e vítima do meio ambiente*. Editora Contexto, São Paulo, 310 p.
- VIEL, V., DELAHAYE, D., REULIER, R.**, 2014. Impact de l'organisation des structures paysagères sur les dynamiques de ruissellement de surface en domaine bocager. Etude comparée de trois

petits bassins versants bas-normands, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20, 2, 175-188.

WANG X.F., AULER A.S., EDWARDS R.L., CHENG H., CRISTALLI P.S., SMART P.L., RICHARDS D.A., SHEN C.C. (2004) – Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature*, 432, 40-43

ANNEXES

Annexe 1. Texte du questionnaire soumis en juin 2013 à deux échantillons d'habitants de Crato et Barbalha respectivement concernés par les inondations du Rio Granjeiro et du Riacho do Ouro.

Esse questionário objetiva realizar uma enquête sobre a **Percepção dos Riscos Naturais** com a população das cidades de Crato e Barbalha (Ceará). Os dados e informações coletados serão utilizados na pesquisa intitulada *Perigos e Riscos Naturais no Brasil e na França: Abordagem geográfica comparativa aplicada a Região do Cariri (cidades de Crato e Barbalha), Ceará*, desenvolvida pela Profa. Msc. Alexandra de Oliveira Magalhães (Profa. da Universidade Regional do Cariri - URCA e Doutoranda na Université Denis-Diderot Paris 7, França).

ESSE QUESTIONÁRIO É ESTRITAMENTE ANÔNIMO E CONFIDENCIAL E SERÁ UTILIZADO SOMENTE PARA FINS DA REFERIDA PESQUISA

QUESTIONÁRIO

Cidade:

QUESTÃO 01

O Sr. (a) já foi atingido por alguma catástrofe natural na sua cidade ou região? () Sim () Não

Se a resposta for SIM de qual tipo?

Tipo	Mês	Ano	Quantas vezes?
() Deslizamento de terreno			
() Queda de blocos			
() Cheias e inundações dos rios			

<input type="checkbox"/> Erosão dos solos (voçoroca etc)			
Outros (Quais?)			

QUESTÃO 02

O Sr.(a) já foi atingido por cheias e inundações na sua cidade? Sim Não

Se a resposta for SIM. Qual a altura da água? (em relação à altura de um homem)

Qual a velocidade da água? Muito rápida Rápida Muito lenta Lenta

QUESTÃO 03

Quais foram os principais prejuízos causados pelas cheias e inundações no seu imóvel?

Danificação da estrutura do imóvel (rachaduras nas paredes, queda de muro, degradação da pintura, calçada quebrada etc)

Perda de móveis, eletrodomésticos, computador, roupas, livros, objetos pessoais etc

Outros (especifique)

O Sr.(a) pode estimar o custo total dos prejuízos no seu imóvel provocado pelas últimas cheias e inundações?

Entre R\$ 1.000,00 - R\$ 3.000,00

R\$ 3.000,00 - R\$ 6.000,00

R\$ 6.000 - R\$ 9.000,00

R\$ 9.000 ou mais

QUESTÃO 04

O seu imóvel tem seguro? Sim Não

O Sr.(a) acha importante fazer um seguro para o seu imóvel? Sim Não

Por que?

QUESTÃO 05

O Sr.(a) recebeu alguma ajuda financeira após a ocorrência dessa catástrofe? Sim Não

Qual?

De quem?

Por quanto tempo? uma semana 1 mês 2 meses mais

Essa ajuda foi suficiente? Sim Não Por que?

QUESTÃO 06

O Sr.(a) sabe informar quais foram os locais mais atingidos pelas cheias e inundações?

- Zona residencial (casas, apartamentos etc)
- Zona comercial (shopping, lojas, armazéns etc)
- Zona industrial
- Prédios públicos e privados (Prefeitura, Bancos etc)
- Áreas de lazer (praças etc)
- Escolas
- Terrenos desocupados
- Avenidas e ruas
- Estradas
- Pontes
- Outros (especifique)

QUESTÃO 07

O Sr.(a) sabe quantas pessoas foram atingidas aproximadamente nas últimas cheias e inundações da sua cidade?

- nenhuma
- 5 - 50
- 50 - 100
- 100 - 200
- 200 ou mais (especifique)

Após a ocorrência dessas cheias e inundações quais foram as primeiras providências tomadas?

- Retirada da população das áreas de risco
- Alojamento da população em locais seguros. Onde?
- Atendimento médico-hospitalar
- Ajuda financeira (aluguel social etc)
- Distribuição de cestas básicas, roupas, medicamentos etc.

QUESTÃO 08

Em sua opinião, quais foram os principais problemas ocorridos após as cheias e inundações da sua cidade?

- Evacuação e alojamento da população num local seguro
- Problemas de saúde
- Isolamento da família, amigos etc
- Estragos matérias
- Perda dos bens pessoais
- Limpeza da casa
- Limpeza das ruas
- Falta de ajuda financeira
- Falta de informações
- Ausência do trabalho, da escola por vários dias
- Outros (especifique)

QUESTÃO 09

O Sr. (a) acha que alguns bairros foram mais atingidos pelas cheias e inundações?

- Sim Não

Se a resposta for SIM, quais bairros?

Em sua opinião por que isso ocorreu?

QUESTÃO 10

O Sr.(a) tem conhecimento da realização de algum trabalho feito para evitar as catástrofes naturais na sua cidade?

Sim Não

Se a resposta for SIM. Por quem?

Governo do Estado Prefeitura Órgão ambientais Entidades particulares

Associação de bairros Outros (especifique)

Qual tipo de trabalho?

Reconstrução do canal

Recolocação das pontes

Reflorestamento da mata ciliar (ou floresta ribeirinha)

Retirada dos entulhos, lixo, blocos de rocha do leito do rio etc

Trabalhos de prevenção e proteção individual realizados por particulares no seu próprio imóvel (como por exemplo reconstrução e elevação dos muros e calçadas etc).

Outros (especifique)

QUESTÃO 11

O Sr.(a) pensa que a população está bem protegida das catástrofes naturais na sua cidade? ()
Sim Não

O Sr.(a) acha que sua cidade pode estar ameaçada por outros riscos naturais?

Sim (Quais?)

Não

QUESTÃO 12

O Sr.(a) sabe informar quais foram os órgãos, entidades públicas ou privadas etc que atuaram na ajuda as vítimas das cheias e inundações da sua cidade?

Governo do Estado

Prefeitura (Secretaria do Meio Ambiente, Planejamento etc)

Organizações não-governamentais (Ong's)

Corpo de bombeiros

Defesa Civil

Representantes (comércio, construção civil, políticos, igreja, escolas, universidades etc)

População (voluntários etc)

Outros (especifique)

QUESTÃO 13

O Sr.(a) sabe o que é uma ÁREA DE RISCO? () Sim Não

Se a resposta for SIM, explique:

QUESTÃO 14

O Sr. (a) já recebeu alguma informação sobre os riscos naturais na sua cidade? () Sim () Não

Se a resposta for SIM, através de qual meio?

- () Cartilhas e folhetos informativos
 () Jornal
 () Televisão
 () Rádio
 () E-mail (SMS, Facebook, Tweeter etc)
 () Em reuniões realizadas por técnicos da prefeitura, especialistas, representantes de órgãos ambientais, associações de bairros, sindicatos etc
 () No seu ambiente de trabalho
 () Na família, amigos, vizinhos etc
 () Outros (especifique)

QUESTÃO 15

O Sr.(a) acha que é perigoso morar perto do rio, do canal ou da Chapada do Araripe?

- () Sim () Não () Mais ou menos () Não sei

Se a resposta for SIM. Por quê?

QUESTÃO 16

O seu bairro tem associação? () Sim () Não

Se a resposta for SIM, já foi discutido nas reuniões algum tema sobre aos perigos e riscos naturais na cidade?

- () Sim () Não

QUESTÃO 17

O Sr.(a) conhece algum documento da sua cidade que faz referência aos riscos naturais (como por exemplo cheias e inundações, deslizamentos de terreno, queda de blocos etc)? () Sim () Não

Se a resposta for SIM. Qual?

QUESTÃO 18

O Sr.(a) conhece o Plano Diretor da sua cidade? () Sim () Não

Se a resposta for SIM, poderia dizer de que trata esse documento?

QUESTÃO 19

Como o Sr. (a) vê o desenvolvimento da sua cidade em relação ao Meio Ambiente?

.....

O Sr.(a) sabe informar se existem leis que protegem as pessoas e os bens que estão nas áreas de riscos naturais na sua cidade? Qual (ais)?

.....

Em sua opinião, o que pode ser feito para melhorar a situação das cheias e inundações na sua cidade? E quem deve fazer?

.....

O Sr.(a) poderá escrever outras informações sobre o tema “PERIGOS E RISCOS NATURAIS NA MINHA CIDADE”. Sua opinião será muito importante para o desenvolvimento da nossa pesquisa.

.....

QUESTÃO 20

() Homem () Mulher

Qual a sua faixa de idade?

- () Menos de 25 anos
 () 25 - 35 anos
 () 35 - 45 anos
 () 45 - 55 anos
 () 55 - 65 anos
 () 65 anos ou mais

QUESTÃO 21

Qual o seu local de nascimento?

QUESTÃO 22

Há quanto tempo o Sr.(a) mora nessa cidade?

O Sr. (a) sempre morou no mesmo local da cidade? () Sim () Não

QUESTÃO 23

Quais os serviços públicos que Sr.(a) tem no seu bairro?

- () Abastecimento de água
 () Esgotamento sanitário
 () Coleta de lixo
 () Limpeza urbana

QUESTÃO 24

O seu imóvel é: () próprio () alugado

Quantas pessoas moram no imóvel?

No seu imóvel, existem pessoas que poderiam ser mais vulneráveis em caso de catástrofes naturais como:

() crianças () idosos () deficientes (físicos, visuais etc) () outro (qual?)

QUESTÃO 25

Qual a sua profissão?

Sua renda familiar mensal é de aproximadamente:

- () Menos de R\$ 1.000,00
() Entre R\$ 1.000 - R\$ 2.000,00
() De R\$ 2.000,00 ou mais

Observação: Se o Sr.(a) possui fotos ou documentos de arquivo sobre as cheias e inundações da sua cidade, gostaríamos de saber se seria possível disponibilizar esse material para a nossa pesquisa.

Nós lhe agradecemos pela atenção e disponibilidade em aceitar responder esse questionário.
MUITO OBRIGADO!!!

RESPONSÁVEIS PELA PESQUISA:

Profa. Msc. **Alexsandra de Oliveira Magalhães**

Departamento de Geociências - Curso de Geografia

Universidade Regional do Cariri - URCA

Endereço: Rua Coronel Antônio Luiz, 1161

63.100 - 000, Pimenta Crato/CE

Fone: (88) 3102.1212/3102.1211

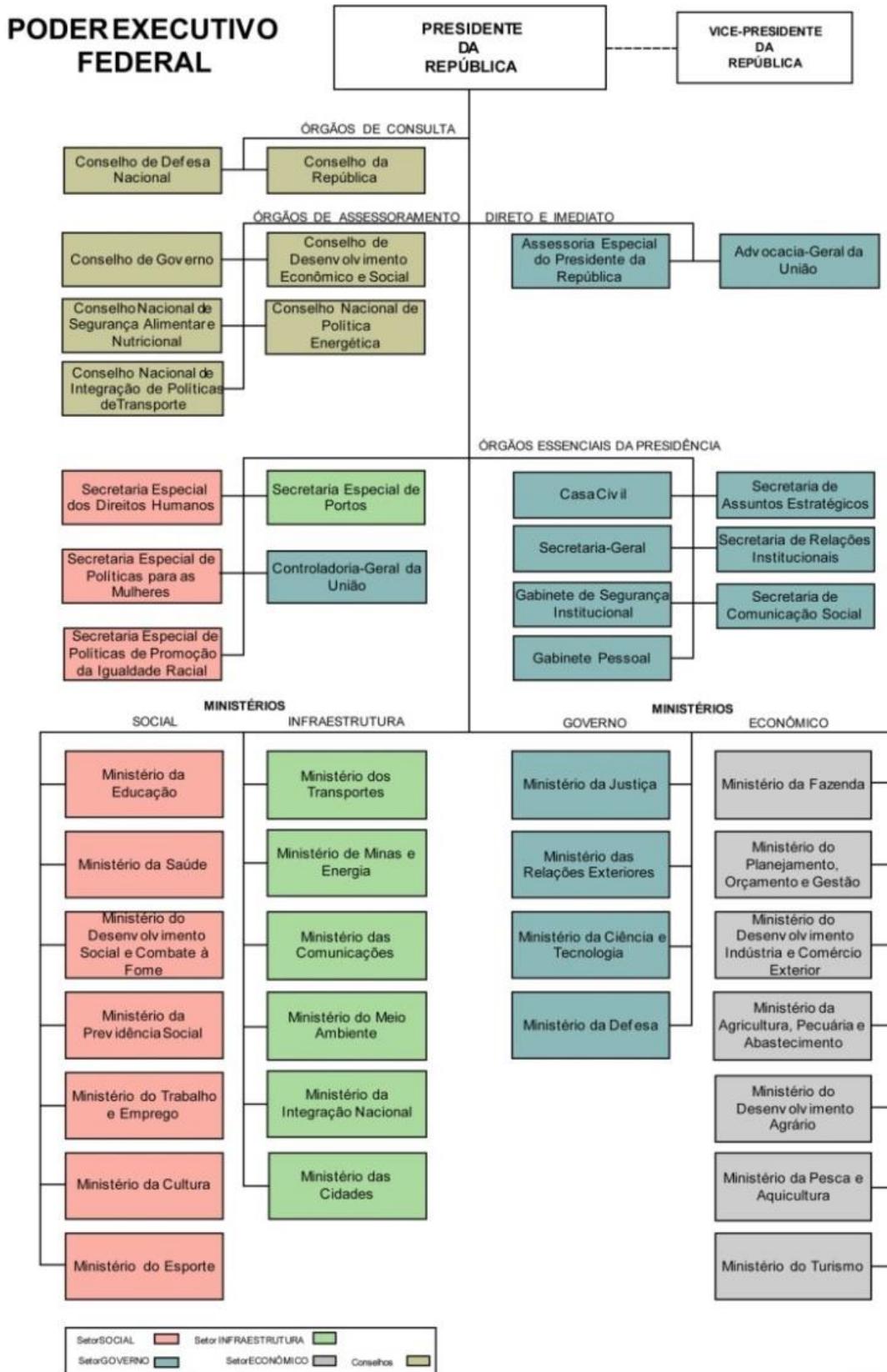
Profs. Orientadores:

Profa. PhD Monique **FORT** (Université Denis-Diderot Paris 7, França)

Prof. Dr. François **BÉTARD** (Université Denis-Diderot Paris 7, França)

Prof. PhD Jean-Pierre **PEULVAST** (Université Paris 4 - Sorbonne, França)

Annexe 2. Organigramme du pouvoir exécutif fédéral brésilien.



Siorg² agosto 2009

Secretaria de Gestão | Ministério do Planejamento
GOVERNO FEDERAL

Annexe 3. Loi n° 12.608, du 10 avril 2012 (extrait, traduction)**Article 6° Compétences de l'Union :**

I – définir les normes d'institution et d'exécution de la Politique Nationale de Protection et de Défense Civile (PNPDEC) ;

II – coordonner le Système National de Protection et de Défense Civile (SINDEP), en articulation avec les Etats, le District Fédéral et les communes ;

III – promouvoir les études sur les causes et les possibilités d'occurrence de catastrophes de toutes origines, leur incidence, leur extension et leurs conséquences ;

IV – fournir un appui aux Etats, au District Fédéral et aux Communes pour la cartographie des zones de risque, pour les études visant à identifier les aléas, susceptibilités, vulnérabilités et risques de catastrophes, et pour les actions de prévention, modération, préparation, réponse et récupération ;

V – instituer et entretenir un système d'information et de surveillance des catastrophes ;

VI – instituer et entretenir un registre national des communes comportant des aires de risques de glissements de grande ampleur, d'inondations brusques et des phénomènes géologiques ou hydrologiques associés;

VII – instituer et entretenir un système de déclaration et reconnaissance de situations d'urgence ou d'état de calamité publique;

VIII – instituer un Plan National de Protection et de Défense Civile;

IX – réaliser la surveillance météorologique, hydrologique et géologique des aires de risque, ainsi que des risques biologiques, nucléaires et chimiques, et générer les alertes de possibilité d'occurrence de catastrophes, en articulation avec les Etats, le District fédéral et les Communes;

X – établir les critères et conditions de déclaration et de reconnaissance de situations d'urgence et d'état de calamité publique;

XI – encourager l'installation de centres universitaires d'enseignement et de recherche sur les catastrophes, et de pôles multidisciplinaires d'enseignement permanent et à distance, destinés à la recherche, au recrutement et à la formation de personnels, en vue de la gestion et de l'exécution d'activités de protection et de défense civile;

XII – encourager la recherche sur les événements catastrophiques;

XIII – aider la communauté scientifique au développement de matériel didactico-pédagogique destiné à générer une culture de prévention des catastrophes.

Article 7° - Compétences des Etats :

I – exécuter le Plan National de protection et de Défense Civile (PNPDEC) dans leur cadre territorial;

II - coordonner les actions du Système National de Protection et de Défense Civile (SINDEP), en articulation avec l'Union et les Communes ;

III – instituer un Plan d'Etat de Protection et de Défense Civile ;

IV – identifier et cartographier les aires de risque et réaliser des études d'identification d'aléas, susceptibilité et vulnérabilité, en articulation avec l'Union et les Communes ;

V – réaliser la surveillance météorologique, hydrologique et géologique des aires de risque, en articulation avec l'Union et les Communes ;

VI – appuyer l'Union, en cas de sollicitation pour la reconnaissance de situations d'urgence et d'état de calamité publique ;

VII – déclarer, quand c'est le cas, l'état de calamité publique ou de situation d'urgence ;

VIII – appuyer, chaque fois que nécessaire, les Communes pour le levé des aires de risque en vue de l'élaboration des Plans de Contingence de protection et de Défense Civile et dans la diffusion des protocoles de prévention, d'alerte et d'interventions d'urgence.

Paragraphe unique. Le Plan d'Etat de Protection et de Défense Civile comportera, au minimum :

I – l'identification des bassins-versants exposés aux risques de catastrophes ;

II – les directives d'action gouvernementale de protection et de défense civile dans le territoire de l'Etat, en particulier en ce qui concerne l'implantation de réseaux de surveillance météorologique, hydrologique et géologique des bassins-versants exposés aux risques de catastrophes.

Art. 8^o **Compétences des Communes:**

I - exécuter le Plan National de Protection et de Défense Civile (PNPDEC) dans leur cadre territorial;

II - coordonner les actions du Système National de Protection et de Défense Civile (SINDEPen articulation avec l'Union et les Etats ;

III - incorporer les actions de protection et de défense Civile dans la planification municipale ;

IV – identifier et cartographier les aires de risques et de catastrophes ;

V – organiser l'inspection des zones à risque de catastrophe et interdire les implantations nouvelles dans ces zones ;

VI – déclarer les situations d'urgence et d'état de calamité publique ;

VII – contrôler les constructions dans les zones de risques et organiser, si nécessaire, les interventions préventives et l'évacuation de la population des zones à risques élevés ou des installations vulnérables;

VIII – organiser et administrer des abris provisoires pour l'assistance à la population en situation de catastrophe, dans des conditions adéquates d'hygiène et de sécurité ;

IX – maintenir la population informée sur les zones de risque et l'occurrence d'événements extrêmes, ainsi que sur les protocoles de prévention et d'alerte, et sur les actions d'urgence en situation de catastrophe ;

X - mobiliser et former les radio-amateurs pour intervenir lors des catastrophes ;

XI – réaliser périodiquement des exercices de simulation, conformément au Plan de Contingence de protection et de Défense Civile ;

XII – promouvoir la collecte, la distribution et le contrôle de denrées et fournitures en situation de catastrophes ;

XIII – procéder à l'évaluation des dommages et préjudices dans les aires atteintes par les catastrophes ;

XIV – tenir l'Union et l'Etat informés de l'occurrence de catastrophes et des activités de Protection Civile dans la commune ;

XV – stimuler la participation d'organismes privés, associations de bénévoles, clubs service, organisations non gouvernementales et associations et promouvoir l'entraînement des associations de bénévoles aux interventions conjointement avec les communautés concernées ;

XVI – fournir des solutions de relogement temporaire aux familles atteintes par les catastrophes.

On remarquera aussi que dans le cadre municipal, la législation concernant l'usage et l'occupation du sol comme moyen d'éviter les catastrophes naturelles doit être retravaillée au sein d'un Plan Directeur Municipal.

Art. 9^o Compétences conjointes de l'Union, des Etats et des Communes:

I – développer une culture nationale de prévention des catastrophes, destinée au développement d'une conscience nationale des risques ;

II - stimuler les comportements de prévention permettant d'éviter ou de minimiser l'occurrence de catastrophes ;

III - stimuler la réorganisation du secteur productif et restructurer l'économie des zones atteintes par les catastrophes ;

IV – établir les mesures préventives de sécurité contre les catastrophes dans les écoles et les hôpitaux situés à l'intérieur des zones de risques ;

V – offrir la formation des ressources humaines pour les actions de protection et de défense civile ;

VI – alimenter en données et informations le système national d'information et de surveillance des catastrophes.

