

# Cartographie des zones inondables et gestion des risques d'inondation dans l'agglomération de Belém

## *Flood mapping and flood risk management in the Belém agglomeration*

Jean-François FAURE

Doctorant, Université d'Orléans, Département de Géographie

Jean-Marie FOTSING

Professeur, Université d'Orléans, Département de Géographie

Edna CASTRO

NAEA-Université Fédérale du Pará

**Mots clés :** risque, inondation, MNT, urbanisation, prévention, Belém.

**Keywords:** risk, flooding, DEM, urbanization, prevention, Belém.

**Résumé :** Cette contribution répond à un double objectif : d'une part définir la distribution du risque d'inondation dans l'espace urbain de Belém et en proposer une typologie simple ; d'autre part déterminer les formes de gestion de ce risque développées localement pour prévenir les inondations et/ou en amoindrir les conséquences. Trois axes de travail sont dégagés. Le premier consiste à cerner les principaux déterminants naturels et humains à l'origine du phénomène. Le deuxième fixe les méthodes employées dans le processus d'élaboration d'une typologie des zones inondables et dans la construction des documents cartographiques. Enfin, le dernier propose une analyse des acteurs impliqués dans la lutte contre les inondations et des stratégies qu'ils mettent en place. L'eau, omniprésente à Belém, est plus qu'une barrière naturelle à l'urbanisation ; lorsqu'elle se fait envahissante, elle constitue l'un des principaux éléments déterminant une ségrégation socio-spatiale particulièrement marquée des habitants, qui pèse significativement sur la structuration, la composition et la recomposition des espaces urbains.

**Abstract:** This article contemplates two main objectives : firstly assess and characterize flooding risks in Belém's urban territory, and secondly determinate forms of risk management aiming at preventing catastrophic floods. Belém's natural environment is essentially constituted of amazonian waters. The city suffers chronicle flooding during wet seasons, organizing spatial and social segregation within the urban perimeter. In Belém, flood limits represent, more than a disaster's impact range, a clear limit between two separate kinds of urbanization dynamics. Our contribution lists and organizes natural and anthropological parameters impacting on flooding amplitudes. It presents the method used to assess flooding areas and map risk intensity. The discussion analyzes local strategies elaborated by state agencies, city services, and urban community groups in order to minimize flooding damages.

## Introduction

« Águas de março » (Eaux de mars) : c'est par cette expression, popularisée par une chanson du célèbre compositeur Tom Jobim, que les Brésiliens désignent les fortes précipitations qui s'abattent en fin de saison humide, en général au mois de mars, sur la ceinture intertropicale du Pays. À Belém, capitale du Pará et centre politique et administratif de l'Amazonie brésilienne (fig. 1), la position équatoriale, la proximité à l'océan Atlantique et les particularités du relief se conjuguent pour déterminer un cycle annuel d'inondations rapides et de courte durée.

Déclenchées lorsque les événements pluvieux et les hautes marées d'équinoxe entrent en phase, les inondations ont une amplitude faible mais leur extension spatiale est particulièrement significative : jusqu'à près de 40 % du périmètre urbain peut être couvert par les eaux. Les zones basses et les pourtours de nombreuses rivières urbaines, plus spécifiquement exposés au phénomène, sont occupés essentiellement par les segments les plus défavorisés de la population bélémoise.

Figure 1 – Situation du Pará et de la ville de Belém



Cet article a pour objectif d'une part de déterminer l'extension et la distribution des inondations dans l'espace urbain de Belém et d'en proposer une typologie simple ; d'autre part de présenter les formes de gestion développées localement pour prévenir le risque d'inondation et/ou en amoindrir les conséquences. Dans cette perspective, trois axes de travail sont dégagés. Le premier consiste à cerner les principaux déterminants naturels et humains à l'origine du phénomène : situation géographique, pluviométrique et topographique de la région, analysés au regard des grandes dynamiques à l'origine des paysages urbains actuels. Le deuxième propose une méthode d'élaboration d'une typologie des zones inondables, au cours des phases de construction des documents cartographiques. Enfin, le dernier propose un aperçu des acteurs impliqués dans la lutte contre les inondations et des stratégies mises en place. À Belém la gestion participative de la ville, institutionnalisée en 1996, a ouvert des espaces politiques formels aux revendications collectives et aux représentants des mal-lotés. Il en résulte un jeu politique local complexe, où se mêlent revendications communautaires, initiatives non-gouvernementales et grands projets d'aménagement urbain, souvent réalisés avec l'appui de fonds internationaux. Omniprésente, l'eau est plus qu'une barrière naturelle à l'urbanisation : elle constitue l'un des principaux facteurs d'une ségrégation socio-spatiale particulièrement marquée des populations, distribuées dans l'agglomération en fonction des risques d'inondation pesant sur tel ou tel secteur. Cette ségrégation influe significativement sur la structuration, la composition et la recomposition des espaces urbains belémois.



du trait de côte urbain n'est pas aménagé et appartient à de petites et moyennes entreprises qui disposent de débarcadères particuliers voués au transport fluvial de marchandises.

Au nord, un chapelet insulaire et la baie de Marajó marquent les limites du périmètre urbain (fig. 2). L'agglomération s'étend donc selon un axe nord-nord-est, occupant un bas plateau modelé au cours du Quaternaire récent, typique de la basse plaine amazonienne, où se mêlent sols ferrallitiques (latérites), gleys et formations alluviales dans un contexte topographique de très faible amplitude. Au cours des siècles, les milieux naturels environnant l'agglomération ont été profondément transformés par l'homme. Peu aménagées, les franges côtières et les berges des cours d'eau sont occupées par une mosaïque de formations végétales hydromorphes : *várzeas*, *igapós*<sup>3</sup> et bosquets de mangroves résiduels ; sur les terres non inondables (*terra firme*) s'étendent des reliquats de forêt dense, des forêts secondaires et des *capoeiras*<sup>4</sup>. Les activités agricoles et l'élevage sont présents autant sur le continent que sur les îles les plus vastes.

La baie de Marajó reçoit les eaux de trois cours d'eau importants : le bras sud de l'Amazone, appelé Rio Pará, le Rio Tocantins et le Rio Guamá (fig. 2). Les eaux de cette baie, qui peut être considérée comme un énorme estuaire, subissent les influences quotidiennes de la marée. Au port de Belém, la cote moyenne des hautes eaux varie entre 2,80 m et 3,20 m au-dessus du zéro hydrographique. En situation de marée montante, le sens d'écoulement des eaux de la Baie et du fleuve Guamá s'inversent, ainsi que celui des rivières urbaines qui parsèment l'agglomération (Igarapés Una, Val-de-Cães, Tucunduba, Paracuri, Mata Fome, et Bacuri). Lors de l'étalement de pleine mer, les masses d'eau stagnent et envahissent temporairement l'ensemble des terrains, urbanisés ou non, situés sous la cote de marée. Au printemps 1920, une cote record de hautes eaux de 4,20 m fût enregistrée à Belém ; les services municipaux estiment le temps de récurrence de ce type de phénomène à environ 80 ans (PMB, 2000). En mars 1980 les autorités du Port de Belém ont signalé une cote de hautes eaux de 4,21 m (CDP, 2003). En moyenne les marées exceptionnelles qui ont lieu aux mois de mars et septembre en situation équinoxiale atteignent des cotes de hautes eaux de l'ordre de 3,60 m (mesure maréographique).

Belém reçoit de fortes précipitations tout au long de l'année. La position quasi-équatoriale de la métropole la soumet à un cycle saisonnier alternant une période humide et une période semi-humide. En saison humide (décembre à juin), les événements pluvieux sont essentiellement de type convectif ; quelques pluies stratiformes peuvent parfois concerner la région. Au cours de la saison semi-humide, les précipitations sont moins régulières et exclusivement convectives. Plusieurs jours consécutifs peuvent s'enchaîner sans que ne soient enregistrées de précipitations. De façon générale, les orages de forte intensité ont lieu en milieu ou fin de journée ; sur la base de données pluviométriques collectées entre 1967 et 1996, les valeurs extrêmes de maxima pluviométriques probables ont été estimés varier de 116 à 142 mm/24h (Da Silva *et al.*, 2000).

Le total pluviométrique annuel moyen est de l'ordre de 3 000 mm à Belém (tab. 1). Les seuls mois de janvier à avril représentent 55 % du total annuel moyen calculé entre 1960 et 1990, soit 1 582 mm, avec un pic au mois de mars correspondant à 15 %.

<sup>2</sup> À l'époque, la RMB se composait des *municípios* de Belém et Ananindeua.

<sup>3</sup> Le complexe *várzea-igapó*, caractéristique de l'ensemble de la plaine alluviale amazonienne, est une forêt basse inondable. La *várzea* correspond aux parties du lit majeur qui sont recouvertes par les hautes eaux et découvertes au moment des basses eaux. L'*igapó* correspond aux marécages où l'eau demeure en permanence.

<sup>4</sup> *Capoeira* : recrues forestières et friches.

**Tableau 1 - Valeurs mensuelles moyennes des précipitations, Belém 1961-1990**

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
1961-1990	366,5	417,5	436,2	360,0	304,4	140,2	152,1	131,1	140,8	116,1	111,8	216,4	2893,1

Source : NHM/SECTAM 2003

Les mesures pluviométriques des dernières années indiquent pour le même mois de mars 438,5 mm en 1999 ; 346,2 mm en 2002 ; 403,3 mm en 2003.

## II - Prévention des risques d'inondation dans le contexte urbain belémois

Partant des éléments précédemment exposés, les mécanismes déclencheurs des inondations à Belém s'expliquent au regard de la combinaison de trois variables naturelles : la montée des eaux sous l'effet du flux de marée, l'occurrence d'événements pluvieux de forte intensité, et la topographie particulière du site. La conjonction temporelle des deux premiers facteurs cités ordonne des risques élevés d'inondation au cours du mois de mars, où les plus forts coefficients de marée s'additionnent aux valeurs moyennes de précipitations les plus aigües. Le relief du bas plateau belémois détermine spatialement la distribution et l'extension des aires inondables de la commune.

La configuration topographique induit de plus fortes probabilités d'inondations sur telle ou telle portion du territoire communal, et c'est en zone urbaine qu'intervient la notion de risque : ce dernier existe parce qu'un individu ou une collectivité s'expose ou est exposé à l'aléa. À Belém, la population ou les équipements menacés ou frappés par la montée des eaux ne subissent généralement pas des dégâts importants. C'est dans l'extension et la distribution réelles des inondations, objets de cette étude, que réside le préjudice subit par l'agglomération, paralysée quelques heures durant par la brusque montée des eaux. En effet, le bas plateau belémois culmine à environ 15 m d'altitude, mais sa partie haute est restreinte ; ses flancs, parcourus de petites rivières jusqu'aux berges de la Baie de Guajará et du fleuve Guamá, sont densément urbanisés. Les modelés sont extrêmement doux, pour la plupart presque imperceptibles à l'œil nu. L'essentiel de l'agglomération occupe des terrains dont l'altitude s'échelonne entre 1 et 10 m d'altitude. Dans l'espace de la ville proprement dite, tous les terrains sont occupés, y compris les lits des drains, leurs berges, ou les micro-cuvettes naturelles des zones basses.

Le contexte singulier que nous venons d'évoquer confère aux inondations de Belém une typicité particulière. Étant donné la nature subite et le caractère cyclique des facteurs déclencheurs, la montée des eaux comme leur descente sont rapides et relativement prévisibles. La période d'inondation est de l'ordre de quelques heures, le temps que le reflux de la marée permette le drainage et l'évacuation des eaux de pluie. Il est également important de souligner que les inondations ne sont pas exclusivement liées à l'association « marée + orage » du mois de mars. Lors d'événements pluvieux particulièrement violents, des inondations pluviales localisées et de moindre amplitude peuvent avoir lieu à n'importe quel moment de l'année, quand le niveau des hautes eaux est élevé et/ou que les dispositifs de drainage ne sont pas entretenus ou correctement dimensionnés.

Des travaux menés au sein du NAEA<sup>5</sup> indiquent que 25 % environ des terres émergées du *município* de Belém sont occupées en 2002 par des zones plus ou moins densément urba-

<sup>5</sup> NAEA : Centre des Hautes Études Amazoniennes, Université Fédérale du Pará, Brésil.

nisées ; sur le continent la proportion atteint 60 % (Faure *et al.*, 2003). Les calculs réalisés à partir des données du recensement de 2000 montrent que 96 % de l'ensemble des habitants de la commune étaient installés sur le territoire continental. Or les dynamiques d'urbanisation, particulièrement intenses dans cette partie du *município* au cours des trois dernières décennies, ont certes concerné les zones « nobles » de la ville, c'est à dire les hauteurs du bas plateau à l'abri de la montée des eaux, mais surtout les zones les plus basses, comprenant les lits des rivières urbaines et la zone intertidale du rivage.

C'est pour cette raison qu'à Belém les quartiers défavorisés, désignés au Brésil par le terme générique *lavelas*, sont appelés les *baixadas* : les plaines inondables. L'habitat qui s'y développe, parfois qualifié de « spontané », résulte typiquement d'efforts individuels déployés face à la pénurie de terrains aménagés susceptibles d'accueillir les populations démunies. Les migrants s'installent sur les terrains inoccupés et de faible valeur commerciale, y compris dans les zones inondables, le plus souvent via des réseaux informels d'accès au foncier.

En zone périphérique, il est peu courant que les habitats improvisés dans les années quatre-vingt ou quatre-vingt-dix soient équipés de réseaux d'assainissement, l'adduction d'eau potable est encore plus rare ; les services et équipements urbains de proximité, tels les centres sanitaires ou les écoles, sont également très insuffisants. La photographie ci-dessous (fig. 3) représente un habitat typique des zones inondables de la périphérie de Belém. Il se distingue des habitats inondables situés en couronne péri-centrale par une densité de bâti plus faible. Le cliché est pris en situation de hautes eaux. On note l'absence totale de dispositifs ou d'aménagements pour assurer la sécurité des riverains.

**Figure 3 - Habitat précaire de la périphérie de Belém (C. Prost 2003 - Paracuri)**



Les services techniques de la ville ou de l'État du Pará ne disposent pas actuellement d'un plan directeur d'urbanisme, si ce n'est d'un Plan directeur des transports urbains élaboré en 1993 avec la collaboration de la JICA (Office d'aide au développement du Japon). Actualisé en 2002, faute de moyens financiers, ce plan n'a pu être appliqué au cours de la décennie 1990-2000. La COHAB —Compagnie d'Habitation du Pará— conduit des opérations immobilières ponctuelles destinées aux couches moyennes de la population, et la municipalité propose des lots aménagés aux segments les plus défavorisés. Mais ces opérations ne sont pas

coordonnées et revêtent un caractère très ponctuel. L'agglomération bélémoise se développe donc depuis une quinzaine d'années sans projet urbain clairement défini, et sans politiques d'équipement en infrastructures à la hauteur des besoins créés par l'explosion de la précarité des habitats (Lima, 2003). Cependant, des aménagements lourds de calibration et d'équipement de certaines rivières urbaines de la ville ont été entrepris récemment par les autorités gestionnaires de la ville et de l'État.

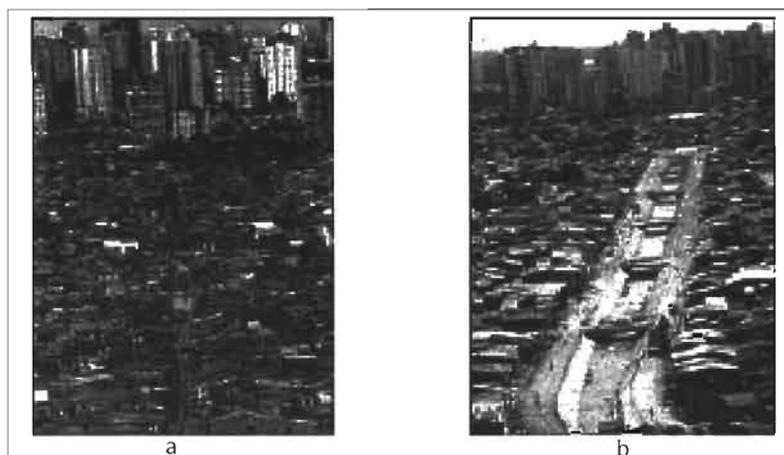
Face aux risques, deux grands types d'aménagements prévenant les inondations sont réalisés à Belém : l'un individuel concerne le bâti et l'autre institutionnel se rapporte aux infrastructures.

Le premier type est illustré par la photographie (fig. 3) : le bâti et les voies de circulation construites par les habitants dans les bas fonds sont surélevés. L'altitude moyenne des planchers des habitations localisées dans les lits des cours d'eau correspond à la cote 3,30 m des marégraphes. Cette valeur a été mesurée par les services techniques de la mairie lors de travaux d'aménagement de la rivière Tucunduba (PMB, 2000). Consciente du risque d'inondation auquel elle s'expose, la population la plus menacée se met donc à l'abri des niveaux moyens des hautes eaux de marées mais pas des hauteurs exceptionnelles équinoxiales, qui rappelons-le peuvent être gonflées par de fortes précipitations. En revanche, cette précaution la protège le reste de l'année d'inondations ponctuelles liées à la répétition d'orages exceptionnels. En saison des pluies, il peut donc se produire dans certaines zones basses de la ville une accumulation d'eau stagnante qui n'affecte pas les résidences, mais inonde les voies de circulation. Celles-ci peuvent demeurer impraticables entre les événements pluvieux à l'origine de la montée d'eau.

Dans la zone centrale de la ville, certaines rivières urbaines ainsi que les berges de la baie de Guajará ont fait l'objet de travaux de canalisation et de contention au cours des années cinquante et soixante. Depuis de la fin des années quatre-vingt-dix, aussi bien du côté de l'État (projet Macrodrenagem – Una) que de celui de la municipalité (projet Tucunduba), les organismes institutionnels en charge de la prévention des inondations ont entrepris de lourds travaux d'aménagement de quelques cours d'eau urbains. Les projets en cours sont financés dans les deux cas en partie par l'aide internationale : l'État du Pará et sa société de gestion de l'eau (Cosanpa), maître d'œuvre de l'opération, a obtenu le soutien de la BID - Banque inter-américaine de développement ; le projet de la ville est labélisé projet *Rios Urbanos*, qui est une opération du programme HABITAT des Nations Unies. Ces aménagements ont pour objectif le remaniement complet du lit des rivières concernées : expropriation des habitants occupant les lits majeurs ; rectification de ceux-ci et aménagement en canaux ; réhaussement et aménagement des berges ; construction de voies de circulation le long des canaux ; construction d'ouvrages de franchissement ; création de réseaux d'adduction d'eau potable et de collecte des eaux usées ; réhabilitation des habitats localisés dans le périmètre direct de la rivière, avec dans le cas du projet municipal, la création d'espaces publics à vocation récréative. La figure 4 montre une photo de la ville avant et après la réalisation du projet Macrodrenagem (prévision d'achèvement : fin 2003). Une fois les opérations terminées, l'exploitation des ouvrages et réseaux créés sera transférée aux services techniques de la ville.

Bien que ces projets n'aient pas encore été achevés, leur capacité à contenir les inondations ne semble pas totalement convaincante. Les données fournies par les rapports des services techniques de la ville indiquent que le rehaussement maximal des berges a été fixé à 3,92 m (cote marégraphe), soit environ 30 cm au-dessus des niveaux moyens des marées équinoxiales mais 30 cm sous les hauteurs d'eau exceptionnelles enregistrées au XX<sup>e</sup> siècle. La possibilité d'événements pluvieux particulièrement intenses et synchrones à un étal de haute marée équinoxiale exceptionnelle n'est donc pas pris en considération dans le gabarit des ouvrages.

**Figure 4 - Projet Macrodrenagem. (4a) : avant ; (4b) : après (Governo do Pará 2001)**



La littérature locale relative aux questions de l'extension spatiale des inondations est assez pauvre. Des estimations quantitatives des surfaces inondables de la zone continentale de Belém (+/- 40 % selon Trindade, 1998) et des cartes simples du périmètre inondable sont proposées. Il n'existe cependant pas de données détaillées basées sur des relevés topographiques actualisés caractérisant la distribution des zones inondables, leur extension, et la nature des paysages urbains affectés par ces inondations. Nos travaux apportent une contribution dans ce sens, à partir de l'emploi de relevés topographiques récemment acquis par les services techniques de la municipalité et de documents issus de l'analyse et du traitement de données télédéteectées.

### III - Données et méthodes

#### A - Production d'un MNT

Le service du cadastre de Belém (CODEM) a financé en 1998 un effort considérable de cartographie détaillée de la ville, comprenant l'acquisition d'une couverture aérienne complète et l'actualisation des relevés topographiques. Son objectif était d'améliorer la levée de la taxe d'habitation.

Les données utilisées par notre étude sont présentées dans le tableau 2. La topographie au format vectoriel a été rendue disponible au format *.dxf* pour chacun des quartiers de la ville et comprend une couverture de courbes de niveaux et des couvertures de points cotés. Étant donné que seule la portion continentale de la commune est intégralement morcelée en quartiers, nous avons ciblé nos travaux sur cette zone du município. Dans les îles, la proportion d'espace couvert par les quartiers est faible, d'où une discontinuité spatiale des données topographiques, rendant difficile la restitution d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les photographies aériennes ont été cédées à l'échelle du *município* entier, sous la forme d'une mosaïque dont le pixel a été dégradé à 3,3 m.

**Tableau 2 - Données utilisées**

	Format	Année	Extension	Source
Topographie	vectorel	1998	Quartiers du <i>município</i>	CODEM
Photographies aériennes	numérique	1998	Município	CODEM

Les couvertures de points cotés sont au nombre de deux : une couverture de plus de 130 000 points et une autre d'environ 15 000 points. C'est cette seconde qui a été retenue car sa table d'attributs est quasiment complète ; en effet, seule une aire très homogène et de faible dimension contient des points non informés dans le champ altimétrique de la table des attributs. Les traitements sont réalisés à l'aide du logiciel Erdas Imagine, qui permet d'intervenir sur un MNT existant et de calculer artificiellement à partir de pixels adjacents correctement informés la ou les zone(s) non informée(s).

Le nombre significatif de points cotés et leur bonne répartition relative dans l'espace considéré permet au final la création d'une image de résolution haute, en l'occurrence de 10 m. Le MNT permet de sectionner la zone d'étude en fonction de l'altitude et donc de délimiter des espaces d'iso-élévation. Il rend également possible le calcul de perspectives tridimensionnelles du relief. Toutefois son exploitation pour l'analyse des risques d'inondation nécessite quelques précautions. Il existe en effet un différentiel altimétrique entre les mesures de cotes par le marégraphe et les données altimétriques fournies par la CODEM. Les documents relatifs à l'aménagement de la rivière Tucunduba indiquent que ce différentiel est de 0,52 m (PMB, 2000). Une marée exceptionnelle, dont la cote de hautes eaux atteint la valeur de 4,20 m correspond donc à une valeur CODEM de 3,70 m environ. Le risque d'inondation étant intimement lié au rapport entre l'élévation des terrains et les valeurs des cotes de hautes eaux, il convient d'intégrer ce différentiel dans l'élaboration de typologies.

La cartographie des zones inondables est obtenue par seuillage spatial de l'image MNT résultat ; la montée des eaux se produit en effet uniformément dans l'espace à partir des lits des rivières lorsque les marées équinoxiales les débordent ou empêchent les eaux pluviales de s'écouler normalement.

### **B - Typologie des aléas**

Nous avons détaillé (partie I) les caractéristiques propres aux différents types de montée des eaux. L'analyse de ces caractéristiques détermine une typologie des aléas présentée dans le tableau 3. Quatre types d'aléas sont proposés. Les valeurs d'altitude ne sont pas des hauteurs d'eau mais des altitudes absolues potentiellement atteintes par les eaux.

La probabilité d'occurrence de l'aléa est élevée dans les aires les plus basses de la commune, exposées aux inondations de toute nature (pluviale, crue) ; elle est dégressive au fur et à mesure que l'exposition des terrains aux inondations strictement pluviales diminue.

Les types 1 et 2 sont les plus fréquents même s'ils sont aussi ceux de plus faible amplitude : ils correspondent à des inondations essentiellement d'origine pluviale. La valeur 2,7 m est un seuil maximal correspondant aux altitudes supérieures moyennes atteintes par les étales de hautes eaux. De même, le seuil de 3,1 m correspond à l'altitude atteinte par les étales de hautes eaux de marées équinoxiales moyennes. Les inondations de types 3 sont celles qui provoquent les situations les plus à risque : fréquence relativement élevée, hauteur des eaux significatives. La valeur 3,7 m correspond à l'altitude de la montée des eaux constatée lors d'une marée équinoxiale hors-norme. Le type 4 est plus hypothétique que réel du fait de très faibles probabilités d'occurrence.

La valeur de 4 m est une altitude limite théorique que nous avons retenue pour les hautes eaux équinoxiales exceptionnelles. Cette amplitude n'a jamais été mesurée à Belém. Elle correspondrait à une cote de 4,5 m au marégraphe.

La cartographie des types d'aléas à partir du seuillage d'un MNT n'est pas représentative des risques réels d'inondation et de dommages encourus par les populations et les biens. En effet, la submersion du bâti situé dans les zones soumises aux aléas dépend également du degré de protection apporté par les dispositifs spécifiques de prévention décrits précédemment.

Interviennent alors les notions d'exposition à l'aléa et d'exposition aux dommages en cas d'inondation effective.

**Tableau 3 - Types d'inondation**

	Fréquence	Facteur déclenchant	Hauteur* en m	Submersion du bâti
Type 1	Plusieurs fois par an	Orage ou succession d'orages en période d'étales de hautes eaux	[0 à 2,7]	Locale Limitée à la voirie Ordre de la durée : minutes
Type 2	Annuelle	Hautes eaux d'équinoxe	[2,7 à 3,1]	Étendue Dépasse légèrement la voirie Ordre de la durée : heures
Type 3	Pluri- annuelle	Orage ou succession d'orages en période d'étales de hautes eaux d'équinoxe	[3,1 à 3,7]	Étendue Ordre de la durée : heures
Type 4	Pluri- décennale	Ceux du type 4 avec intensi- tés et coefficients exception- nels	[3,7 à 4]	Étendue Ordre de la durée : heures

\* altitude atteinte par l'eau. Valeurs de marégraphes converties en cote CODEM.

### **C - Exposition à l'aléa et aux dommages en cas d'inondation**

Nous avons précisé que les ouvrages de prévention revêtaient deux formes : l'une est individuelle (rehaussement du bâti), la seconde institutionnelle (contention des eaux). Chacune d'elle a une distribution spatiale spécifique. Les aménagements préventifs individuels sont présents partout où aucun aménagement institutionnel n'a été entrepris. Les aménagements institutionnels des années cinquante à quatre-vingt ne sont achevés que dans un périmètre central très restreint. Ce dernier a été délimité par photo-interprétation et reporté sur les documents images utilisés. À l'intérieur de ce périmètre, l'exposition aux aléas est réduite mais l'exposition aux dommages en cas d'inondation est accrue du fait de l'absence de dispositifs individuels de prévention. Ces caractères sont intégrés dans l'élaboration de cartes d'exposition aux aléas et aux dommages.

Le bas-plateau bélémois ne comporte presque pas de terrains situés sous l'altitude de 2 m, sauf à proximité immédiate de berges non-aménagées. Ces zones, lorsque occupées, sont aménagées sur pilotis par les habitants. Les aléas de faible amplitude correspondant au type 1, très fréquent, ne représentent donc pas un risque important de dommages.

Étant donné les gabarits des aménagements préventifs et l'amplitude moyenne des marées (tableau 3), une montée des eaux entre 2,7 et 3,1 m d'altitude représente un risque de dommage important. La fréquence des aléas de type 2 est relativement élevée, et les limites des dispositifs de prévention sont atteintes. Dans le périmètre central de la ville, les berges des canaux sont inondées presque à chaque printemps, pendant l'étales de hautes eaux de la marée d'équinoxe. L'amplitude de l'inondation dépend du coefficient de marée et du déclenchement d'un événement pluvieux intense synchrone. Le cas d'un aléa de type 4 est celui qui provoquerait le plus de dommages dans l'agglomération, mais c'est aussi l'aléa dont l'occurrence est la moins probable. Le tableau 4 propose une synthèse de ces éléments et la définition de classes d'expositions à l'aléa et aux dommages en cas d'inondation.

Les classes ont été définies en fonction des hauteurs atteintes par les différents types d'aléas. La distinction entre les classes d'exposition à l'aléa et les classes d'exposition aux dommages

**Tableau 4 - Classes d'exposition à l'aléa et aux dommages**

Aléa	Hauteur* en m.	Classes d'exposition à l'aléa		Classes d'exposition aux dommages en cas d'inondation	
		Périmètre central	Autre	Périmètre central	Autre
Type 1	0 à 2,7	Moyenne	Forte	Forte	Faible
Type 2	2,7 à 3,1	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne
Type 3	3,1 à 3,7	Faible	Faible	Forte	Forte
Type 4	3,7 à 4	Très faible	Très faible		

\* altitude des terrains envahis par l'eau, cote CODEM.

découle de la prise en compte des stratégies de prévention des inondations. Cette prise en compte implique un découpage spatial distinguant le périmètre central de l'agglomération des zones péricentrales et périphériques : seuls les quartiers centraux sont équipés d'ouvrages institutionnels de contention. Les zones inondables situées à l'extérieur de ce périmètre sont occupées par des habitats sur pilotis.

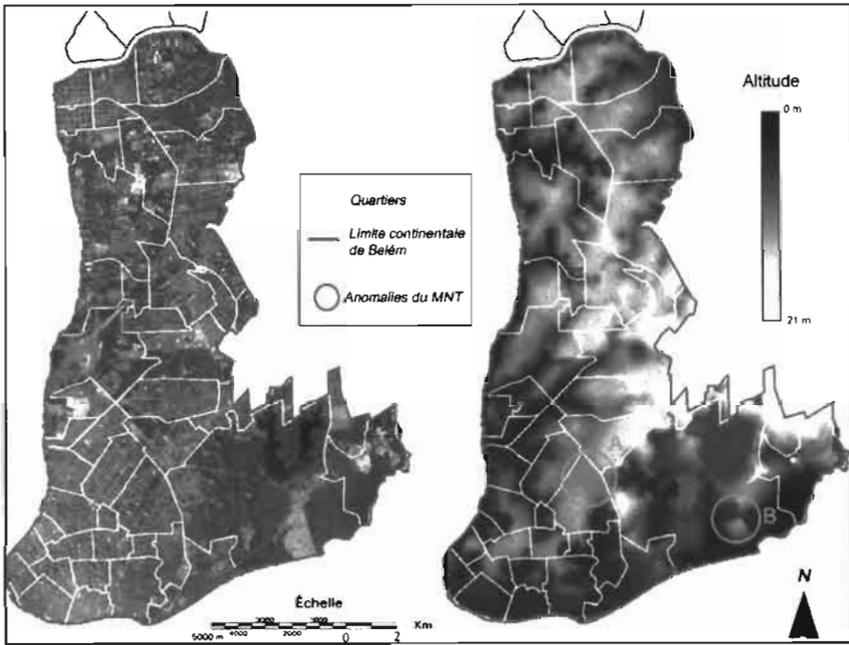
De ce fait, le périmètre central est moins exposé à la montée des eaux en cas d'aléa de type 1. À partir des aléas de type 2, le rôle protecteur des ouvrages de contention situés dans le périmètre central n'est plus caractérisé. En effet, un effet de seuil est observé, lié au gabarit des ouvrages. Nous fixons arbitrairement ce seuil à 3 m, hauteur correspondant à un état de hautes eaux équinoxial exceptionnel, c'est à dire à la limite des types 2 et 3. Nous avons observé *in situ* une inondation provoquée dans le périmètre central par un aléa de ce type (en 2002). L'exposition aux aléas de type 3 et 4 est faible quelle que soit la localisation des espaces urbains considérés, étant donnée la faible récurrence temporelle de ces événements.

En ce qui concerne l'exposition aux dommages, tout débordement d'eau dans le périmètre central est considéré comme potentiellement générateur de dommages car le bâti n'est pas surélevé. Dans les espaces situés en dehors du périmètre central, ce risque est progressif des types 1 à 4. Les inondations fréquentes (type 1) ne représentent pas de risques de dommages pour le bâti qui est correctement protégé. À partir du type 2 la montée sur pilotis de l'habitat ne constitue plus une protection fiable ; le risque de dommage est considéré moyen. Les types 3 et 4 représentent un risque potentiel de dommages importants du fait du sous dimensionnement des méthodes de protection en cas d'aléa.

#### IV - Résultats

La figure 5 est une juxtaposition des photographies aériennes et du MNT obtenu pour la zone continentale de Belém. Elle permet de localiser les principaux caractères du relief. De nombreuses zones de basse altitude sont densément urbanisées. Les altitudes varient dans la commune de Belém de 0 à 25 m ; elles sont représentées dans le MNT par un dégradé de gris où les teintes sombres correspondent aux basses altitudes et les teintes claires aux altitudes élevées. La valeur maximale enregistrée dans la partie continentale de la commune est de 21 m. Réalisée en fonction des points cotés initiaux, l'analyse de la qualité du MNT, montre une distribution satisfaisante des altitudes. Cependant quelques anomalies peuvent être décelées. L'anomalie A que la figure 5 indique par un cercle est liée à une absence de données de références. Dans cette zone, il a été nécessaire d'opérer une interpolation à partir des valeurs des

Figure 5 - Photographies aériennes et MNT de Belém (zone continentale)



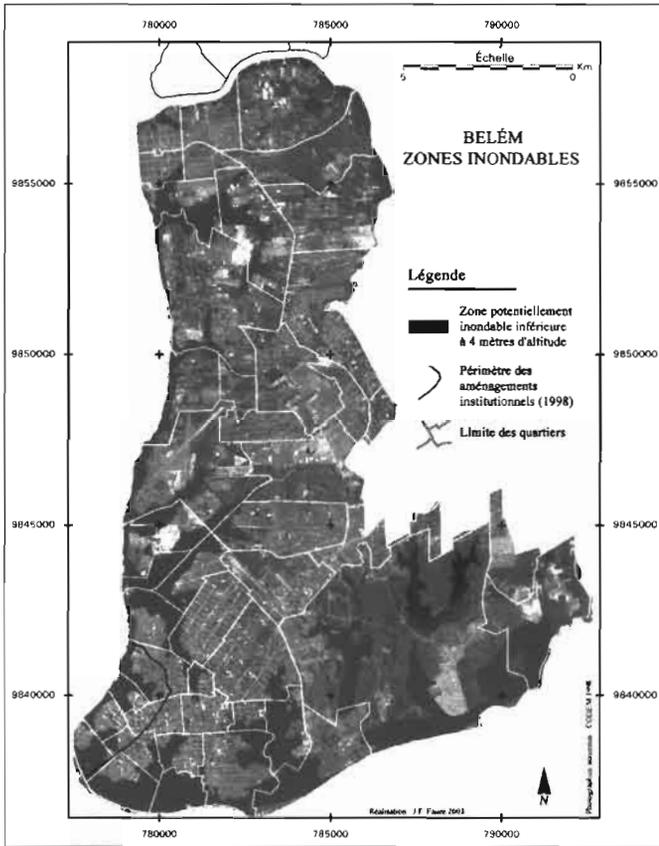
pixels voisins, obtenues après calcul initial du modèle. Le résultat ne montre aucune rupture significative de la continuité des valeurs initiales. L'anomalie B montre un relief au modelé quelque peu abrupt, en discontinuité avec l'ensemble du modèle. Les données de référence de cette zone ne sont pas aussi bien distribuées dans l'espace que dans les zones plus urbanisées ; c'est une source possible d'interpolation peu fiable et de relief peu conforme au reste du modelé. Dans les deux cas, ces anomalies n'interfèrent pas dans la problématique des inondations à Belém. L'anomalie A concerne une zone haute du bas plateau à l'abri de tout type de montée des eaux. L'anomalie B est localisée en zone non urbanisée, donc sans risque pour la population.

La figure 6 propose une spatio-carte des zones inondables de Belém. Ces zones correspondent aux terrains potentiellement inondables, situés sous la cote des 4 m d'altitude, qui est la limite théorique de la montée des eaux. La superficie inondable est de 34 km<sup>2</sup> environ soit 19,5 % de la surface totale de la partie continentale de la commune de Belém. En reportant la limite des zones inondables de Belém sur l'image des espaces urbanisés en 2002 (Faure, 2002) et en croisant les informations, il apparaît que 18 km<sup>2</sup> d'espaces urbanisés sont localisés dans le périmètre inondable défini par la figure 6. Cette superficie représente un peu plus de 10 % de l'espace total du Belem continental et 17,3 % de l'espace du Belém continental urbanisé.

La carte (fig. 6) comporte les limites des quartiers et la limite du périmètre contenant les principaux ouvrages de contention des eaux réalisés au cours des dernières décennies. Ces ouvrages concernent quatre cours d'eau, dont trois sont totalement canalisés. Quelques autres travaux ont été réalisés hors de ce périmètre, consistant essentiellement en l'aménagement sommaire de certains cours d'eau, sans canalisation complète ni réhaussement des berges.

La figure 7 propose une spatio-carte d'exposition à l'aléa. Elle classe les zones inondables présentées par la figure 6 selon les critères contenus dans le tableau 4. Le facteur principal est la

Figure 6 - Zones inondables de Belém

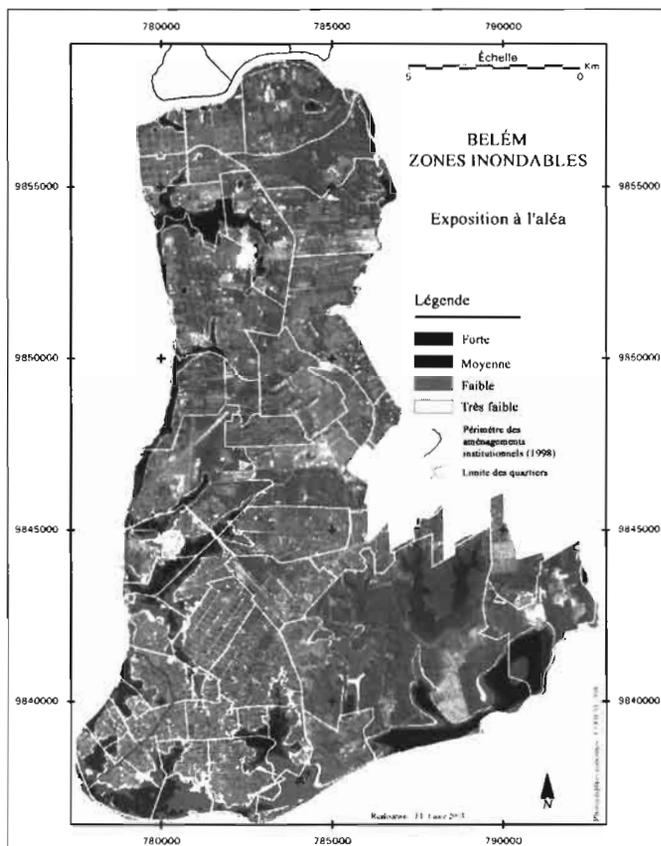


fréquence de chaque type d'aléa, qui détermine la probabilité d'occurrence d'inondations de différentes amplitudes ; ce facteur est modulé à l'intérieur du périmètre des aménagements institutionnels, où l'exposition à la montée des eaux est réduite par les ouvrages de contention.

Comme précédemment, du fait de ces ouvrages, le centre ville n'est pas inondé avec la même fréquence que le reste de l'agglomération. Les deux principales rivières de Belém sont le Tucunduba au sud-ouest de la ville, et l'Una au nord (respectivement localisées par les lettres A et B sur la figure 7). Leurs bassins versants se situent en zone périurbaine et marquent les limites entre la ville et la périphérie. Ils comportent la plupart des surfaces fortement exposées aux aléas. Notons que ce sont ces deux cours d'eau qui, depuis 1999, sont en travaux. Financé par l'État, l'aménagement de l'Una est en phase terminale. Réalisés par la Mairie, les travaux sur le Tucunduba sont également en cours d'achèvement. Leurs bassins versants sont occupés par une forte proportion d'habitat urbain élevé sur pilotis. Plus à l'ouest encore, hors du périmètre urbain, s'étendent de vastes zones inondables classées comme fortement exposées aux aléas. Ces zones ne sont pas urbanisées et le risque d'inondation n'est donc pas caractérisé : il s'agit de plaines inondables utilisées par l'université fédérale rurale d'Amazonie (UFRA, ex FICAp).

Entre le périmètre des aménagements institutionnels et le bassin du Tucunduba précédemment décrit, s'étend une zone exposée aux inondations comprenant des niveaux d'exposition

Figure 7 - Exposition à l'aléa

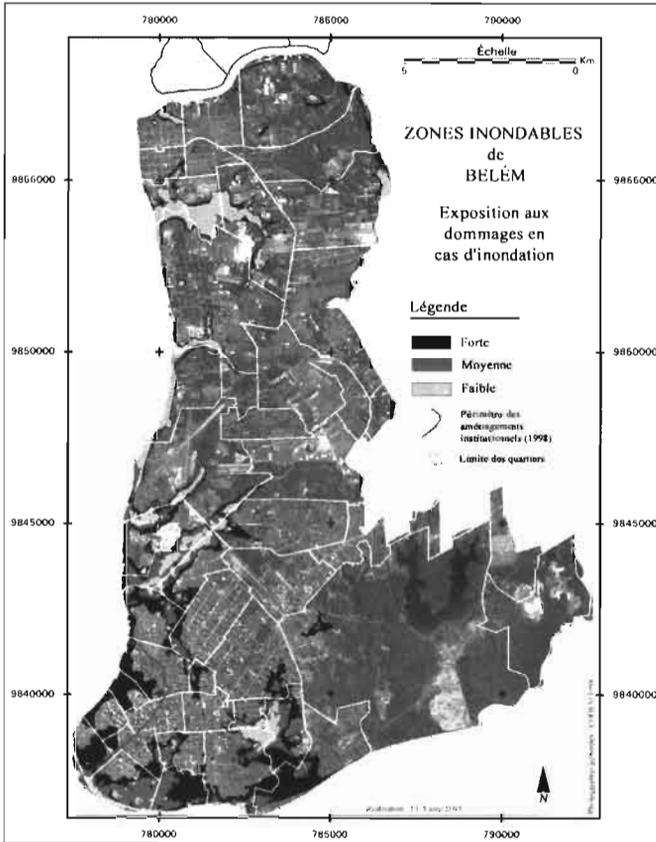


allant de fort à faible, avec une zone classée « moyenne » de grandes dimensions. Il s'agit de quartiers traversés par des cours d'eau semi-canalisés dont les berges n'ont pas été aménagées. Elles sont occupées par des maisons sur pilotis et les zones environnantes sont régulièrement submergées par les eaux.

La figure 8 propose une spatio-carte d'exposition aux dommages en cas d'inondation.

De même que pour la spatio-carte de la figure 7, la définition des classes d'exposition est fonction des paramètres qu'expose le tableau 4. Là encore, le périmètre des aménagements institutionnels de contention des eaux est reporté (en bleu) car en son sein, le bâti est particulièrement exposé aux dommages lorsque l'aléa se produit. En effet, il s'agit de zones basses du centre de la ville, sur les berges de la baie de Guajará ou de rivières canalisées. Ces zones sont hautement imperméabilisées et disposent d'infrastructures urbaines modernes. Le bâti y est continu et relativement homogène : il n'existe pas dans ces zones d'habitat populaire monté sur pilotis. Cependant, les inondations y sont assez régulières, des lors que la capacité de contention des ouvrages est dépassée. Les inondations de grande amplitude se produisent au mois de mars, lorsqu'un orage violent se déclenche pendant l'étal de hautes eaux de marées d'équinoxe. De telles inondations n'ont pas lieu tous les ans, mais provoquent systématiquement de très nombreux dégâts des eaux et l'envahissement du bâti pendant plusieurs heures. C'est donc une zone classée comme fortement exposée aux dommages.

Figure 8 - Exposition aux dommages en cas d'inondation



Les autres espaces appartenant à cette classe sont situés dans les zones régulièrement inondées par des aléas correspondant aux inondations de type 3 : fréquence relativement faible mais amplitude élevée. Les espaces dont l'exposition est classée « moyenne » correspondent à des aléas de fréquence plus élevée mais d'amplitude plus faible. Enfin, les espaces dont l'exposition aux dommages est classée « faible » sont ceux où les inondations sont très fréquentes mais dont l'amplitude est réduite : les habitats urbains de ces quartiers sont protégés par les dispositifs de prévention mis en place par la population, et les dommages se limitent aux voies de circulation.

Notons que les zones inondables fortement exposées aux aléas et situées à l'ouest de l'agglomération, évoquées précédemment, ne figurent pas sur cette carte du fait de la nullité des dommages potentiels que pourrait engendrer leur inondation.

### Conclusion

La cartographie précise des zones inondables à Belém est possible depuis que l'État et la Municipalité ont engagé de lourds travaux d'aménagement des principales rivières urbaines de la ville encore non-canalisées (Tucunduba, Una). Des données topographiques de qualité couvrant l'ensemble de la commune sont aujourd'hui disponibles dans le cadre de conven-

tions liant les services techniques de la ville aux institutions de recherche et d'enseignement supérieur.

Les traitements présentés et les résultats obtenus au cours de notre étude concernent le territoire continental de la commune de Belém. Les terres situées sous la cote des 4 m totalisent 34 km<sup>2</sup>, soit 19,5 % de sa superficie totale. Le couplage des résultats obtenus et d'estimations préalablement calculées (Faure, 2003) nous permettent de déterminer la proportion d'espaces urbanisés inondables. Ils totalisent 18 km<sup>2</sup>, soit 10,2 % du territoire continental et 17,3 % des espaces urbains de ce même territoire.

Nous avons montré qu'un même aléa affecte différemment les espaces urbains, selon que le bâti est protégé par des aménagements institutionnels ou par des techniques de surélévation d'initiative individuelle. Nous avons également indiqué que la distribution spatiale des ouvrages les plus efficaces face aux aléas les plus fréquents se concentrait dans les quartiers centraux de l'agglomération, qui sont aussi les plus développés et les plus riches.

Nous sommes donc confrontés à Belém à une problématique de la gestion du risque d'inondation caractérisée par une inégalité socio-spatiale de la protection aux aléas les plus fréquents. Les segments défavorisés de la population doivent supporter presque quotidiennement, en saison des pluies, la submersion partielle des voies de circulation et des espaces inter-bâties. En revanche, dans le cas moins fréquent d'aléas de forte amplitude, les résultats obtenus montrent que les dommages subis par les populations sont répartis de manière plus homogène dans l'espace.

Cette situation constitue un véritable défi pour les gestionnaires de la ville. La croissance urbaine est particulièrement significative depuis plus de deux décennies et les zones humides périphériques sont régulièrement défrichées et urbanisées sans être aménagées contre le risque d'inondation. La mise en compétition politique des instances municipales et de celles de l'État du Pará, en 1996, a entraîné l'émergence de projets de gestion concurrents. D'importants chantiers d'assainissement et d'aménagement des quartiers non-centraux, installés en zone inondable et subissant très régulièrement la montée des eaux, sont en cours d'achèvement. Reste à savoir si les ouvrages de contention réalisés auront un gabarit et une conception adaptés aux différents types d'aléas susceptibles de frapper les quartiers concernés.

## Bibliographie

- BAENINGER R. « A nova configuração urbana no Brasil: desaceleração metropolitana e redistribuição da população ». In : ABEP. *XI<sup>o</sup> Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, sept. 1998, Caxambú, Brésil. Caxambú, Brésil : ABEP Ed., 1998, p. 729-772.
- BECKER B. K. « Undoing Myths: The Amazon - An Urbanized forest ». In : CLÜSENER G. M., SACHS I. Coord. *Brazilian Perspectives on sustainable development of the Amazon region*. Paris : UNESCO et Parthenon Publish Group Ltd, 1995, p. 53-89. (Man and Biosphere Series).
- BROWDER J. D., GODFREY B. J. Metropolitan centers in Amazonia: Regional cities and urban primacy. In : *Rainforest cities. Urbanization, Development and Globalization. The Brazilian Amazon*. New-York, USA : Columbia University Press, 1997, p. 122-159.
- COMPANHIA DAS DOCAS DO PARÁ. *Bulletin statistique portuaire* [en ligne]. Disponible sur : <[http://www.cdp.com.br/estatistica\\_portuaria.htm](http://www.cdp.com.br/estatistica_portuaria.htm)> (consulté le 20.10.2003).
- DA SILVA M. et al. *Distribuição de probabilidade de valores extremos da precipitação máxima de 24 horas de Belém do Pará*. XI<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de meteorologia, 16-20 oct. 2000, Rio de Janeiro, Brésil.
- FAURE J.F. *Dinâmicas de urbanização em meio tropical úmido*. RT-DCR-301281/00-9. Brasília, Brésil : CNPq, 2002, 67 p.

- FAURE, J.F., TRAN A., GARDEL A., POLIDORI L. Élaboration d'un indice de densité de population et analyse de sa distribution spatiale à Belém (Brésil) et Cayenne (Guyane française). In : Société française de photogrammétrie et télédétection. *Colloque pixels et cités*, 26 au 28 nov. 2003, ENSG, Marne-la-Vallée.
- FUNDAÇÃO J. PINHEIRO. *Deficit habitacional no Brasil 2000*. RT-PNUD-BRA-00/019. Belo Horizonte, Brésil : Centro de Estatísticas e Informações, UFMG, 2001, 195 p.
- GRANCHAMP-FLORENTINO L. *Urbanisation, stratégies familiales et multipolarité rurale urbaine : la Transamazonienne à l'ouest d'Altamira (Pará, Brésil)*. Thèse de doctorat. Paris : ENHSS, 2001.
- IBGE. *Recensement démographique*. Rio de Janeiro, Brésil : IBGE, 1970.
- IBGE. *Recensement démographique*. Rio de Janeiro, Brésil : IBGE, 1980.
- IBGE. *Recensement démographique*. Rio de Janeiro, Brésil : IBGE, 1991.
- IBGE. *Recensement démographique*. Rio de Janeiro, Brésil : IBGE, 2000.
- LIMA J. *Política habitacional e saneamento na Região Metropolitana de Belém*. RT-FINEP/Habitare. Rio de Janeiro, Brésil : IPPUR/UFRJ, 2003, 18 p.
- MACHADO, L.O. *Urbanização e Mercado de trabalho na Amazônia Brasileira*. Cadernos IPPUR, 1999, vol. 1, p. 109-138.
- MITSCHEIN T., MIRANDA H.R., PARAENSE M. *A urbanização selvagem e a proletarização passiva*. Belém, Brésil : CEJUP-NAEA Ed., 1989, 236 p.
- MOREIRA M.M. *Região Norte: evolução populacional recente*. In : Santos Tais de Freitas Org. *Dinâmica populacional das regiões Norte e Nordeste: questões atuais e emergentes*. Recife, Brésil : Massangana Ed, 2000, p. 45-81.
- PREFEITURA DE BELÉM. *Descritivo técnico e justificativo do projeto Tucunduba*. RT-SESA. Belém, Brésil : Serviço Municipal de Saneamento, 2000, 10 p.
- RAMOS N. *Política habitacional na região metropolitana de Belém*. *Novos Cadernos do NAEA*, 1999, vol.2, no 1, p. 163-184.
- TRINDADE Jr S. *A cidade dispersa: Os novos espaços de assentamentos em Belém e a reestruturação urbana*. Thèse de doctorat. São Paulo, Brésil : USP, 1998, São Paulo.

Faure J.F., Fotsing Jean-Marie, Castro E.

Cartographie des zones inondables et gestion des risques d'inondation dans l'agglomération de Belém = Flood mapping and flood risk management in the Belem agglomeration.

In : David Gilbert (dir.). Espaces tropicaux et risques : du local au global : actes des 10èmes journées de géographie tropicale des 24, 25 et 26 septembre 2003. Orléans (FRA), Orléans : Presses Universitaires d'Orléans, IRD, 2004, p. 379-395.

(Collection du CEDETE). ISBN 2-913454-23-2 Espaces Tropicaux et Risques : Du Local au Global : Journées de Géographie Tropicale du Comité National Français de Géographie : Commission Géographie des Espaces Tropicaux et de leur Développement