

INRS – Eau, Terre et Environnement

Université du Québec

Méthodologie pour l'implantation de  
micro-centrales hydro-électriques en  
Amazonie dans une perspective  
de développement durable

Par

Claudio José Cavalcante Blanco

Thèse présentée pour l'obtention du grade de  
Philosophiae doctor (Ph. D.)  
en Sciences de l'eau

Jury

Examineur externe et président du jury

**Dr Louis Guay**

Université Laval

Examineur externe

**Dr Jin-Xing Huang**

RNCan – Ressources Naturelles Canada

Examineur interne

**Dr Anne-Catherine Favre**

INRS-ETE (Québec)

Directeur de thèse

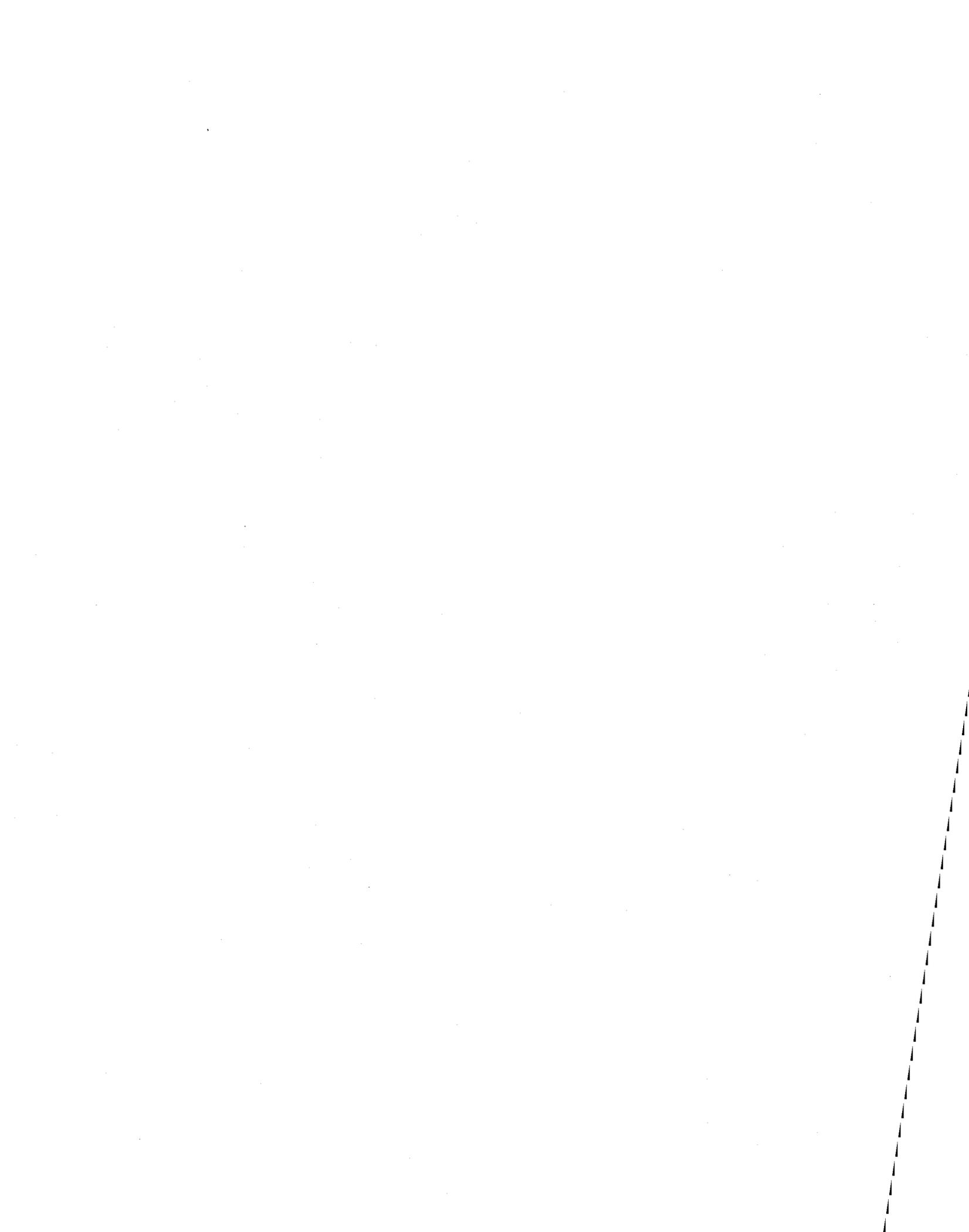
**Dr Yves Secretan**

INRS-ETE (Québec)

Codirecteur de thèse

**Dr André Luiz Amarante Mesquita**

Université Fédérale du Pará (Brésil)



## RÉSUMÉ

Un des principaux problèmes pour le développement socio-économique de l'Amazonie est le manque d'énergie électrique pour les nombreuses petites communautés isolées de la région, ce qui empêche l'ajout de valeur à leur production agricole, la croissance de revenus et la création d'emplois. Cette lacune peut motiver, voire forcer la migration des populations de ces communautés vers les grandes villes, causant ainsi de graves problèmes sociaux dans celles-ci.

La fourniture d'énergie par de grosses centrales hydro-électriques n'est pas envisageable du point de vue économique à cause des coûts de construction des lignes de transmission et du changement de tension pour la fourniture à petite échelle. Une façon de régler ce problème est l'implantation de systèmes de génération isolés, comme les micro-centrales hydro-électriques, en profitant du réseau de petites rivières qui forment les bassins amazoniens.

L'objectif de ce doctorat est de proposer une méthodologie pour l'implantation de micro-centrales hydro-électriques qui sont une source d'énergie renouvelable. Cette méthodologie tient compte des caractéristiques hydrologiques et topographiques des petits bassins versants de la région. De plus, elle tient compte de l'économie et de la culture des petites communautés qui peuplent ces petits bassins dans une perspective de développement durable.

La méthodologie est axée sur un arbre décisionnel qui part de la demande d'énergie des petites communautés. Cette énergie est nécessaire pour générer des emplois et des revenus, ce qui encourage la sédentarisation de la population, diminuant ainsi l'exode rural. En outre, l'énergie générée par les micro-centrales pourra améliorer la qualité de vie de ces petites communautés.

L'arbre décisionnel est composé principalement des études hydrologiques, topographiques, énergétiques, économiques, géotechniques et environnementales. Il tient aussi compte d'aspects sociaux qui font partie de la base du développement durable, tels que la demande d'énergie et la participation de la communauté ; et des évaluations préliminaires sur le terrain. Cependant, l'arbre analyse plus à fond les facteurs sociaux, les études hydrologiques, topographiques, énergétiques et économiques, ainsi que les évaluations préliminaires sur le terrain. Dans cette approche, les études environnementales sont laissées de côté, car les micro-centrales sont de basse chute et à fil

de l'eau, ce qui ne favorise pas la formation de lacs à l'amont des petites rivières. De plus, les études géotechniques sont aussi laissées de côté, mais grâce à la petite taille des micro-centrales.

Les études hydrologiques sont très pertinentes pour le dimensionnement des micro-centrales, surtout parce que les sites sont non jaugés. Ce dimensionnement est guidé par les courbes des débits classés des sites qui sont simulées à l'aide d'un modèle pluie-débit ou à partir de sa transférabilité. Le modèle pluie-débit est utilisé, car les pluies sont souvent les seules données disponibles sur les petits bassins de la région.

Les études énergétiques indiquent que la période de pointe de la demande d'énergie, qui est représentée par la pointe de la production agricole, et la période de pointe de la production d'énergie, qui est représentée par les crues de la région, coïncident entre les mois de janvier et juin. Cette heureuse coïncidence aide à planifier la production d'énergie et à minimiser les impacts environnementaux, car pour répondre à la pointe de la demande d'énergie, le régime hydrologique de la région assure les plus grands débits. Ce fait justifie le choix des aménagements au fil de l'eau, qui sont les moins dommageables parmi les possibles aménagements hydro-électriques; ceux-ci sont planifiés avec 1 ou 2 turbines pour répondre à la demande d'énergie.

Les études économiques sont axées sur une comparaison entre les estimations des coûts des micro-centrales, des génératrices à diesel et le prix de l'énergie provenant du réseau rural. Cette comparaison montre que les micro-centrales sont économiquement plus viables que les génératrices à diesel qui sont souvent utilisées dans les régions isolées. Par contre, cette comparaison révèle que l'énergie du réseau est moins coûteuse que l'énergie des micro-centrales.

L'usage des ressources hydro-électriques des petits bassins versants de l'Amazonie avec la minimisation des impacts environnementaux pour répondre à la demande d'énergie des petites communautés de la région, d'une façon viable économiquement, en objectivant la génération d'emploi et de revenus, soutient la perspective de développement durable de cette méthodologie.

---

L'étudiant

---

Les directeurs de thèse

## ABSTRACT

One of the main problems of the socio-economic development of Amazonia is the lack of electrical energy for the numerous small isolated communities of the region, which impedes the value addition in their agricultural production, the growth of revenues and the job creation. This constraint can motivate, maybe to impel, the migration of the populations of these communities towards large cities, which results in grave social problems in these.

Energy supply by large hydropower is not possible from the economic point of view; because of the construction costs of transmission lines and the voltage change for small-scale supply. A way to solve this problem is the setting up of isolated generation systems, such as the micro-hydro power, by taking advantage of Amazonia's small rivers network.

The purpose of this thesis is to propose a methodology for the setting up of micro-hydro power plants that are a renewable source of energy. This methodology has to take into account hydrological and topographic characteristics of the small catchments of the region. Moreover, it has to take into account the economy and culture of the small isolated communities that live in the small catchments and this in a perspective of sustainable development.

The methodology is based on the decision support system that starts in the energy demand of the small communities. This energy is necessary to generate jobs and revenues; therefore, encouraging the settlement of the local population and decreasing its migration. Additionally, the energy generated by micro-hydro power plants will help to improve the life-style of the population of these small communities.

The decision support system consists mainly of the hydrological, topography, energy, economic, geotechnical and environmental aspects. Nevertheless, this system takes into account social aspects, which make part of the base of the sustainable development, such as energy demand and community commitment; and preliminary evaluations on the field. The social, hydrological, topography, energy and economic aspects as well as preliminary evaluations on the field are focused on details. The environmental aspects are not developed because micro-hydro powers are low-head and run-of-river, this scheme does not favour the formation of large accumulation lakes

upstream of the small rivers. Furthermore, the geotechnical aspects are not considered because of the size of the micro-hydro powers.

Hydrological aspects of small catchments are very important for the design of the micro-hydro powers, in particular because the sites are ungauged. This design is determined for the flow-duration curves that are simulated with a hydrological rainfall-runoff model or its transferability. The rainfall-runoff model is used because the rainfalls are the only available data in the small catchments of the region.

Energy aspects indicate that the peak period of the energy demand, represented by the peak of the agricultural production, and the peak period of the energy production, represented by the floods of the region occur simultaneous in time, between January and June. This serendipity helps planning the energy production and minimizing the environmental impacts, because the highest stream flow of the region's hydrological regimen is able to supply the peak of energy demand. The serendipity justifying also the choice of run-of-river schemes, which are the least harmful to the environment among the possible hydroelectric power plants, these schemes are designed with 1 or 2 turbines to supply the energy demand.

Economics aspects are based on the comparison of the estimations of hydro-micro power's costs, diesel generators and price of the rural grid energy. These comparison shows that the hydro-micro powers are a viable economic option compared to the diesel generators that are often used in isolated regions. Nevertheless, this comparison indicates that the energy of rural grid is cheaper than hydro-micro powers energy.

The use of the hydro-powers resources of the small catchments of Amazonia combined with the minimization of the environmental impacts to the energy supply of energy demand of the small communities of region, of an economically viable way, along with jobs and revenues generation, supports the perspective of sustainable development of the thesis methodology.

## AVANT-PROPOS

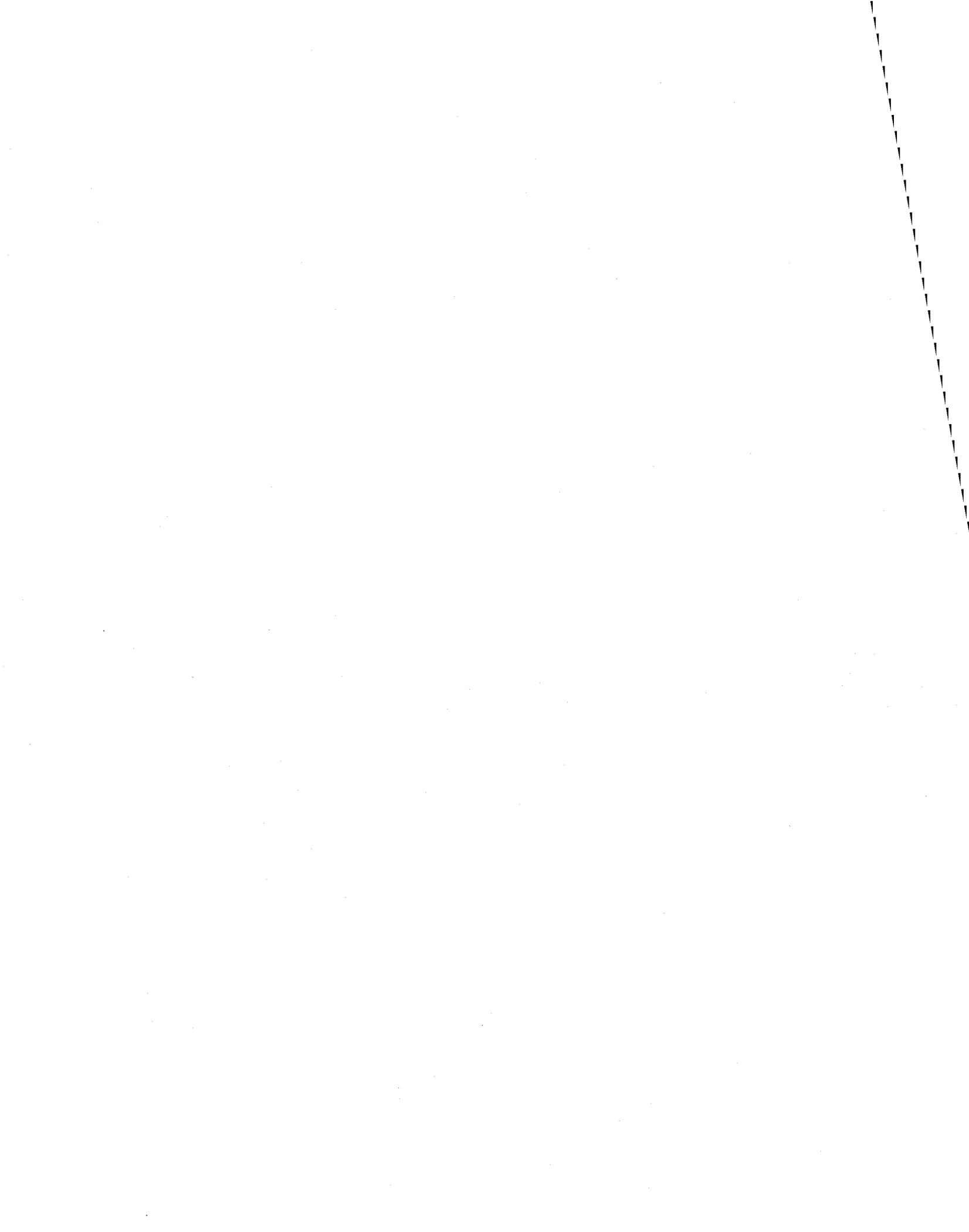
Ce doctorat est né de la disposition du GTDEM (Groupe de Turbomachines du département de Génie Mécanique) de l'UFPA (Université Fédéral du Pará) pour développer des projets d'implantation de micro-centrales hydro-électriques dans les régions isolées de l'Amazonie. Le leader de ce groupe est le professeur André Luiz Amarante Mesquita (*Ph. D.*). Comme son nom le suggère, le GTDEM possède de l'expertise dans la connaissance des turbines qui vont équiper les micro-centrales et aussi dans la planification de celles-ci. Par contre, dans ce groupe de recherche manquait l'expertise de la recherche dans le domaine de l'eau, surtout en ce qui a trait aux processus hydrologiques des petits bassins versants amazoniens qui s'adaptent à l'implantation des micro-centrales. Ainsi, on a choisi l'INRS-Eau, Terre et Environnement de l'Université du Québec et le professeur Yves Secretan (*Ph. D.*) comme directeur de thèse pour diriger ce doctorat.

Cette disposition, ainsi que la perspective de développement durable des petites communautés qui peuplent les petits bassins amazoniens forment la base de cette thèse. Elle se présente sous la forme d'articles et inclut une synthèse présentant le contexte, la problématique, la méthodologie et la conclusion de l'étude. La méthodologie, elle-même est présentée sous la forme d'un article (article 1) qui discute et intègre les résultats, en faisant référence à deux articles de fond qui l'appuient :

Article 1 - Blanco, C. J. C., Secretan, Y. and Mesquita, A. L. A. 2005. Decision support system for setting up of the micro-hydro power plants in Amazonia under a sustainable development perspective. *Renewable Energy* (en préparation).

Article 2 - Blanco, C. J. C., Secretan, Y., Favre, A. C. et Slivitzky, M. 2005. Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie. *Revue Canadienne de Génie Civil* (accepté).

Article 3 - Blanco, C. J. C., Secretan, Y. et Favre, A. C. 2005. Transférabilité d'un modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie. *Journal des Sciences Hydrologiques* (soumis).



## REMERCIEMENTS

À Dieu le père, le fils et le Saint-Esprit.

Aux contribuables brésiliens qui ont financé cette recherche par le biais du CNPq (conseil national de développement scientifique et technologique du Brésil) - Dossier 200360/2000-0.

À mon directeur, M. Yves Secretan, qui m'a toujours appuyé depuis qu'en 1999 j'ai décidé de venir à Québec pour développer ce doctorat. Entre autres, M. Secretan, je vous remercie pour avoir accepté de guider, avec maestria, ce doctorat multidisciplinaire (un défi). Les discussions avec vous sur la recherche et son avancement ont été fondamentales pour la solidification de cet ouvrage. J'ai appris avec vous comment être critique dans le but d'améliorer un ouvrage scientifique et d'autres éléments essentiels relatifs au succès d'un doctorat. **Merci beaucoup!**

À mon codirecteur, M. André Mesquita, vous qui m'avez proposé ce projet de recherche et ma venue à Québec. Si vous n'aviez pas eu cette idée et ne m'aviez pas encouragé à la concrétiser, ce moment n'existerait pas. Merci aussi pour m'avoir lancé, en 1995, dans le monde de la recherche. **Merci beaucoup!**

À la professeure Claire Deschênes pour la direction de mon premier travail dirigé. Merci aussi à M. Jean-Pierre Fau de L'Université Laval.

Aux professeurs Anne-Catherine Favre et Michel Slivitzky pour les analyses et discussions sur l'approche hydrologique.

À tous mes collègues de l'INRS-ETE, surtout à Edgar Herrera pour les discussions philosophiques, culturelles, socio-économiques et bêtes pendant les dîners.

À tout le personnel de l'INRS-ETE, surtout à Suzanne Dussault, Johanne Desrosiers, Lise Raymond, Jean-Daniel Bourgault et à l'équipe de la Bibliothèque.

À mes frères (Conceição, Lilian, Mauro et Marco) et à la famille d'Elizângela. *Eu amo vocês.*

Finalement à **ELIZÂNGELA**, mon amour, tout simplement, **JE T'AIME** mon cœur.

Ce travail est dédié à mes parents, Maria de Fátima Cavalcante Blanco et José Maria Blanco.



## TABLE des MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT.....	iii
AVANT-PROPOS .....	v
REMERCIEMENTS .....	vii
LISTE des FIGURES.....	xi
Chapitre 1 - Introduction .....	1
1.1.    Amazonie, géographie, eau et environnement .....	1
1.2.    Problématique.....	11
1.3.    Objectifs .....	13
1.4.    Organisation de l'ouvrage .....	14
Chapitre 2 - Développement durable et Amazonie .....	17
2.1.    Définition du développement durable.....	17
2.2.    Exemples de développement durable en Amazonie.....	20
2.3.    Micro-centrales hydro-électriques et développement durable .....	23
2.4.    Application proposée pour l'Amazonie .....	24
Chapitre 3 - Méthodologie – Article 1 .....	27
Chapitre 4 - Article 2.....	65
Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie.....	65
Chapitre 5 - Article 3.....	105
Transférabilité d'un modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie.....	105
Chapitre 6 - Conclusions et Recherches futures.....	145
6.1.    Conclusions .....	145
6.2.    Recherches futures .....	148
Chapitre 7 - Bibliographie.....	151



## LISTE des FIGURES

Figure 1.1 – Amazonie .....	2
Figure 1.2 – Localisation du petit bassin versant de l' <i>igarapé Jatuarana</i> .....	3



# Chapitre 1

## Introduction

---

### 1.1. Amazonie, géographie, eau et environnement

#### Géographie

L'Amazonie est localisée au centre oriental de l'Amérique du Sud, à l'est de la chaîne des Andes. Elle s'étend du plateau des Guyanes au nord jusqu'au plateau Central au sud. À l'est, elle est limitée par l'océan Atlantique et par d'autres régions du Brésil. Son altitude varie de 4 000 m du côté de la chaîne des Andes jusqu'au niveau de la mer. Elle couvre plus de 7,8 millions de km<sup>2</sup> et couvre 44% du territoire sud-américain distribué entre la Bolivie, le Brésil, la Colombie, l'Équateur, la Guyane, le Pérou, le Suriname, le Venezuela et la Guyane française. On estime la population totale de la région amazonienne à environ 22 millions d'habitants en 1992, les tribus indiennes étant incluses dans ce chiffre (OEA, 2001).

Le Brésil compte 5 271 423 km<sup>2</sup> de l'aire totale de la région, appelée Amazonie Légale (Rodrigues, 2000; Giroux et Soumis, 2000), mais dans ce texte, elle sera identifiée seulement par le terme « Amazonie ». La forêt amazonienne couvre environ 61% du territoire brésilien. Elle englobe les états de la région Nord : Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima et Tocantins, et celui du Mato Grosso (région Centre-ouest) et une partie de l'état du Maranhão (région Nord-est). La Figure 1.1 présente la région.

#### Hydrographie

L'hydrographie amazonienne comprend le fleuve Amazone et des rivières d'eaux blanches qui sont nées aux Andes et qui transportent des sédiments de haute fertilité et de haute productivité biologique, ainsi que des rivières d'eaux claires qui drainent les régions du plateau Central et des





Environ 50% (3 millions de km<sup>2</sup>) du bassin de l'Amazonie est formé par une vaste plaine. Cette plaine est caractérisée pour une altitude ne dépassant pas 200 m et le fleuve est navigable jusqu'à 5 000 km à l'amont (McClain, 2002).

Les bassins de l'Amazonie sont formés par un grand réseau de rivières et d'*igarapés* (petites rivières). Ces petites rivières se rapportent parfois à des petits bassins versants dont les superficies sont inférieures à 200 km<sup>2</sup>. La figure 1.2 est un fragment d'une carte à l'échelle de 1:100 000 publiée par l'IBGE (1988). Elle présente le petit bassin de l'*igarapé Jatuarana* (134 km<sup>2</sup>), localisé rive Nord de l'Amazonie dans l'état du Pará. Cette figure présente aussi la communauté du *Jatuarana*<sup>1</sup>. Cette communauté fait partie de la ville de *Prainha*, qui ne paraît pas à la Figure 1.2, mais la direction pour s'y rendre est indiquée. C'est une caractéristique des villes amazoniennes : elles ont parfois un grand territoire où se retrouvent des villages éloignés des sièges municipaux. Quelquefois, ces villages sont isolés des sièges municipaux du point de vue routier, mais ce n'est pas le cas de la communauté du *Jatuarana* qui est liée à *Prainha* par la route (Figure 1.2). Par contre, cette communauté est isolée du réseau électrique.

### Climat

Les caractéristiques climatiques des régions tropicales humides présentent un haut taux de rayonnement solaire, une forte humidité relative de l'air et une pluviométrie élevée. Les températures moyennes mensuelles varient peu, c'est à dire approximativement de 2 à 3 degrés Celsius durant l'année (entre 24° et 26° C) et le gradient journalier peut atteindre 15° C.

Les précipitations annuelles varient entre 1 500 et 3 250 mm. On y retrouve deux saisons : une sèche (moins de 100 mm/mois) (Kitamura, 1994), en général entre les mois de juillet et décembre, et l'autre pluvieuse, où les précipitations mensuelles peuvent dépasser 400 mm (Fisch *et al.*, 1996), en général entre les mois de janvier et juin. L'humidité relative de l'air varie entre 75 et 100% durant l'année. Le taux de rayonnement solaire dans cette région est approximativement de 194 W/m<sup>2</sup> (Salati, 1990).

---

<sup>1</sup> Remarquons, au passage, qu'il est normal, en Amazonie, que les petites communautés reçoivent les mêmes noms que leurs *Igarapés*.

## Végétation

L'idée d'une Amazonie dense et humide ne se réalise pas, car il y a une mosaïque de types de végétation : forêts de *terra firme*, de *várzeas* et d'*igapós*, mangroves et savanes. Chacun présente ses propres espèces et habitats et ses interactions (Schubart, 1990; MPEG, 2004).

**Forêts de *terra firme*** – Ce type de végétation caractérise les régions qui ne souffrent pas des inondations. Elles présentent une grande variété de forêts : denses, semi-ouvertes, palmiers, etc. Dans cette végétation, en général, la hauteur prédominante des arbres dépasse les 25 m, les cimes sont fermées et la biomasse est élevée. L'ensemble des forêts de *terra firme* représente environ 80% de la végétation de la région.

**Forêts de régions inondées : *várzeas* et *igapós*** – Environ 15% de la forêt est occupée par des fleuves et des rivières et est inondée de façon permanente ou saisonnière durant les crues entre janvier et juin. La dénomination de *várzea* ou *igapó* met en valeur la fertilité des fleuves et des rivières. La majorité des botanistes dénomment les régions inondées par les fleuves et les rivières d'eau blanche par *várzea* et les régions inondées par les fleuves et les rivières d'eau claire et noire par *igapó*. La forêt de *várzea* est caractérisée par sa richesse en nutriments et l'*igapó* dépend du type d'eau, claire (moyenne charge de nutriments) et noire (pauvre en nutriments).

**Mangroves** – Ceux-ci sont des forêts côtières adaptées à un haut teneur de salinité provenant de la mer. Ils se présentent dans la côte atlantique de la région (Figure 1.1) et existent également dans la région de l'estuaire des fleuves Amazone et Tocantins.

**Savanes et Champs-** Cette végétation existe parfois entre les forêts. Elle peut être classée, en général, en champs de *terra firme* et inondables. Un exemple est l'île du Marajó (Figure 1.1) dont la végétation prédominante est la savane.

## Biodiversité

Une des caractéristiques les plus marquantes de la forêt amazonienne est sa biodiversité. Celle-ci est représentée par la diversité des espèces et des écosystèmes. En termes de diversité des espèces végétales, même si les estimations varient beaucoup, Schubart (2000) et Myers (1986) accordent que la région abrite environ 30 mille espèces de plantes vasculaires. Toutefois, à cause de la

grande surface de la région, certains auteurs préfèrent quantifier la biodiversité en termes d'échantillons. Prance (1986) illustre que dans un hectare de forêt proche de Manaus, capitale de l'état de l'Amazonie, il y a 235 espèces d'arbres au-dessus de 5 cm de diamètre et 179 espèces au-dessus de 15 cm de diamètre.

Quoique l'Amazonie soit la plus grande région de biodiversité de la planète, une fraction seulement de cette biodiversité est connue, surtout en ce qui concerne la biodiversité animale. Par exemple, la quantité totale d'arthropodes (insectes, araignées, scorpions, etc.) n'est pas encore connue. Cependant, les chercheurs du MPEG (Museu Paraense Emílio Goeldi) estiment qu'il y a 1 800 espèces de papillons, entre 2 500 et 3 000 espèces d'abeilles et plus de 3 000 espèces de fourmis (MPEG, 2004). Par exemple, Wilson (1988) a retrouvé 48 espèces de fourmis sur un arbre au Pérou. Ce nombre est comparable à toutes les espèces de fourmis de la Grande-Bretagne.

Pour ce qui est des espèces de poissons, les chiffres sont bien connus et leur estimation consensuelle. Selon McClain (2002), le bassin de l'Amazonie compte 3 000 espèces et Goulding (1980) estime ce nombre entre 2 500 et 3 000. On ne dispose pas de données pour le bassin du Tocantins (McClain, 2002).

De plus, un total de 163 espèces d'amphibiens sont actuellement cataloguées dans la région. On chiffre à 240 le nombre de reptiles identifiés, à plus de 100 espèces pour les oiseaux et à 311 pour les mammifères (MPEG, 2004). Une des hypothèses pour expliquer cette biodiversité si riche est peut-être la présence des grandes rivières qui subdivisent la forêt (Figure 1.1) en diverses régions isolées, permettant ainsi l'apparition d'écosystèmes différents.

## Culture

Les sociétés avancées apparaissent dans la région entre les V<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> siècles. À titre de comparaison, elles étaient avancées, mais pas autant que les Incas et les Mayas. Les sociétés se sont respectivement fixées dans l'embouchure de l'Amazonie, plus spécifiquement sur l'île du Marajó et dans l'embouchure de la rivière Tapajós, dans la région de la ville de Santarém (Figure 1.1). La première s'appelle *marajoara* et son histoire se situe entre 400 et 1300 (Schaan, 2004). La deuxième s'appelle *tapajônica* et se situe entre 400 et 1500 (Noelli, 2003). Ces sociétés proviennent des cultures portant les mêmes noms. Elles exploitaient d'une manière extensive les ressour-

ces aquatiques et l'agriculture dans les sols fertiles de la *várzea*. Leurs populations ont développé aussi de complexes institutions sociopolitiques et une riche culture céramique basée sur la production, surtout de statuettes et d'urnes funéraires sous la forme de poterie. L'importance des urnes variait selon l'importance des morts, révélant une organisation hiérarchique dans les sociétés. Celles-ci et leurs cultures ont disparu après l'arrivée des colonisateurs européens.

La grande diversité culturelle actuelle de la région est représentée par les peuples indigènes, les communautés extractivistes et agricoles, les *caboclos* (natifs après-colonisation) et les immigrants d'autres régions brésiliennes. Cette diversité forme l'actuelle population de la région, c'est-à-dire 21 056 532 habitants (ADA, 2004). Cette population possède des technologies, des moyens de production, des connaissances et des valeurs propres qui sont importants pour le développement durable de la région.

Les populations natives se sont adaptées à l'environnement de la région et aux forces externes des colonisateurs (Moran, 1990). Celles-ci se sont montrées habiles dans l'utilisation et la conservation de l'environnement. Elles ont développé des systèmes agro-forestiers, de l'artisanat, des plantes médicinales, des produits médicinaux, etc. (Bennett, 1992).

De cette façon, les populations natives sont reconnues par les spécialistes comme des facteurs favorisant la conservation des ressources naturelles et de leurs habitats. Ainsi, des études d'ethnobiologie, d'ethnobotanique et autres domaines connexes ont démontré que le rôle de ces populations dans la conservation des écosystèmes communément considérés intouchables est plus important que celui qu'on lui attribue actuellement. Ces populations survivent à long terme grâce aux ressources naturelles de la forêt, mais sans leur causer des dommages (Kitamura, 1994; Bennett, 1992).

Dans ce cadre, les systèmes de gestion et d'usage des ressources naturelles des peuples de la forêt ont été expérimentés au fil du temps et ils se sont adaptés à l'environnement amazonien. Ainsi, cette approche tient compte des connaissances développées par ces peuples et les inclut dans la méthodologie lorsque celle-ci prend en compte la participation des petites communautés pour les implantations des micro-centrales hydro-électriques.

## Économie

L'intégration économique de l'Amazonie au reste de l'économie brésilienne et mondiale a traditionnellement été basée sur le modèle extractif, à cause de son étendue et de sa richesse (Bunker, 1985). Ce modèle est principalement basé sur la pêche, la récolte végétale et sur les systèmes d'agriculture et d'élevage traditionnels. Parmi ceux-ci, on met en relief les agricultures migratoire et de *várzeas* ainsi que l'élevage bovin (bœuf et buffle) pratiqués sur les champs naturels et sur la plaine inondable de l'Amazone. Ces systèmes traditionnels d'extraction, d'agriculture et d'élevage gardent l'équilibre de l'environnement amazonien qui n'est menacé qu'à long terme par l'accroissement naturel de la population régionale.

Cependant, l'agriculture et l'élevage locaux furent changés à partir de la décennie 70 et ils remplacent des grandes aires de forêt plutôt que d'occuper les *várzeas* et les champs naturels (Kitamura, 1994). Ce changement d'un modèle adapté à la région vers un modèle qui est basé sur le remplacement de la forêt représente la cause du niveau actuel de déforestation. En 2004, la portion défrichée de l'Amazonie brésilienne représentait 652 908 km<sup>2</sup> (MMA, 2004), soit environ 13% de sa superficie totale, en assumant qu'elle occupe un territoire de 5 217 423 km<sup>2</sup>.

L'industrie forestière augmente aussi les chiffres de la déforestation; cependant, il existe déjà à ce jour des technologies de gestion qui permettent l'abattage de bois nobles tropicaux sans compromettre les arbres jeunes, ni la couverture végétale. Ces technologies peuvent constituer une base importante au développement durable de l'industrie forestière, car celle-ci est un atout important de l'économie. En 1998, elle a généré 2,5 millions de USD (IBGE, 2004), représentant 7% du PIB de la région.

En parallèle à ce scénario, d'importants projets de pénétration et d'intégration économique sont observés dans la région. Ils sont connus comme des pôles de développement (Eletronorte, 2001) :

- Industries d'électroménagers et de produits électroniques de Manaus, capitale de l'état de l'Amazonas. Il est formé par un ensemble d'usines d'importateurs et de producteurs de biens finaux de haute technologie. Dans l'ensemble, ce sont des filiales d'entreprises nationales et transnationales situées au centre-sud du Brésil; celles-ci tournent aussi leur production vers le marché national de véhicules à deux roues et assimilés (tricycles) et pe-

tits moteurs nautiques. Ce pôle génère un PIB<sup>2</sup> de 10,2 milliards de CAD pour la métropole de Manaus.

- Triangle de *Carajás*, avec les sommets aux villes de Belém, capitale de l'état du Pará; São Luís, capitale de l'état du Maranhão; et *Carajás* (Figure 1.1) – il est constitué par le plus important complexe minéral, sidérurgique et portuaire de l'Amazonie. Dans la région de ce triangle, existent des industries telles que Albras (aluminerie) et Alunorte (production d'alumina) qui sont situées dans la région métropolitaine de Belém; Alumar qui se localise à São Luís. Cette compagnie est un consortium formé par les entreprises Alcoa, Alcan, Bhpbilliton et Abalco pour la production d'aluminium et d'alumina; et la CVRD (compagnie *vale do rio doce*) qui exploite le minerai de fer de la mine de *Carajás*. Ce minerai ainsi que la production d'Aluminium et d'Alumina de l'Alumar sont exportés par le port de São Luís. La production d'Aluminium de l'Albras et d'Alumina de l'Alunorte est écoulée par le port de Vila do Conde dans la ville de Barcarena (région métropolitaine de Belém). Ce complexe industriel contribue indirectement au PIB<sup>2</sup> de Belém qui est de 3,3 milliards de CAD. Dans le cas de São Luis, le complexe contribue directement au PIB qui est de 2,3 milliards de CAD. Ces villes sont aussi des métropoles de la région. Ces industries ont besoin d'une grande quantité d'énergie qui est fournie par la centrale hydro-électrique de Tucuruí située dans le fleuve Tocantins (région du triangle). Cette centrale peut actuellement rendre une puissance de 4 245 MW, mais son projet d'agrandissement prévoit une puissance finale de 7 960 MW à partir de fin 2006.
- Axe agricole et de l'élevage bovin du sud-est amazonien – il tire son origine de l'implantation de grandes entreprises d'agriculture et d'élevage dans les états du Mato Grosso, Tocantins et dans le sud du Pará et du Maranhão. Elles ont été établies d'après les motivations fiscales et financières promues pour le gouvernement fédéral.
- Pôle agricole de Rondônia – il est implanté surtout pour servir comme source d'approvisionnement complémentaire de grains pour le centre-sud du pays.

---

<sup>2</sup> Base statistique 2002 de l'IBGE, [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

À ces pôles, on ajoute aussi l'industrie pétrolifère qui a été implantée pour exploiter les champs de gaz naturel et de pétrole d'Urucu et de Juruá, situés au Haut-Amazone, dans l'état de l'Amazonas. La production de gaz naturel sera acheminée par un gazoduc jusqu'aux villes de Manaus et Porto Velho, capitale de l'état de Rondônia, pour la production de 930 MW d'énergie thermo-électrique (Petrobras, 2005).

Parmi les résultats actuels de la mise en marche des pôles de développement, on met en relief l'accroissement de la production minérale et sidérurgique du triangle de *Carajás*. Par exemple, la CVRD est la troisième entreprise d'exploitation minière au monde. L'Alumar est un des plus grands complexes de production d'alumina et d'aluminium, et l'Alunorte sera le plus grand producteur d'alumina au monde, après l'expansion de son parc industriel. Le développement de l'industrie minière est irradié à d'autres régions de l'Amazonie. En bref, l'Alcoa exploitera une mine de bauxite (Alcoa, 2005) à Juruti, ville de l'état du Pará située dans le Bas-Amazone. Dans cette même région, la MRN (*mineração rio do norte*) exploite déjà une mine de bauxite dans la ville d'Oriximiná - Pará.

Le changement de modèle et les grands projets de développement économique n'évitent pas que le niveau actuel de pauvreté dans la région est à 42,3 % de sa population, par rapport à la moyenne brésilienne qui est à 30,2% et que l'indice de développement humain (IDH) est à 0,727, par rapport à la moyenne brésilienne qui est à 0,830 (PNUD/IPEA/Fundação João Pinheiro/IBGE, 1998).

Par contre, il faut ajouter que le nouveau modèle, plus intensif, fut développé durant les décennies 70 et 80 conjointement avec l'implantation des pôles de développement locaux. À cette époque la conception de développement durable n'existait pas (décennie 70) ou venait d'être conçue (fin des années 80). Ainsi, la réduction de la déforestation et l'amélioration de la qualité de vie du peuple amazonien peuvent être réussis par la mise en marche de modèles économiquement durables, tant pour l'extraction forestière que pour l'agriculture. Ces modèles sont la base des moyens de production traditionnels de la majorité de la population locale.

Ainsi, Eletronorte (2001) projette le scénario suivant entre 2000 et 2020 en vue d'un développement durable. La région sera fortement intégrée, possédant un échange intense avec le reste du pays et du monde. Sa structure productive sera basée sur des industries légères, l'exploitation

durable des ressources naturelles, la bio-industrie, l'éco-tourisme, la vente de services environnementaux et l'exportation d'énergie. Son développement sera intériorisé, en soutenant des indices de pauvreté moindres et de hauts indices de développement humain. Cette intériorisation inclut le développement socio-économique des petites communautés isolées.

## 1.2. Problématique

Malgré l'existence de la centrale hydro-électrique de Tucuruí qui est la plus grande centrale totalement brésilienne (la centrale d'Itaipu étant un consortium entre le Brésil et le Paraguay), un des problèmes qui doit être résolu pour la réalisation du scénario de développement durable de l'Amazonie est le manque d'énergie électrique pour les innombrables petites communautés isolées de son intérieur, ce qui empêche l'ajout de valeurs (transformation, etc.) à leur production agricole traditionnelle (Mesquita *et al.*, 1999; Bennett, 1992) et, par conséquent, la génération d'emplois et de revenus. Ceux-ci sont nécessaires pour servir comme source au développement socio-économique qui fait partie de la base du développement durable, ce qui n'est pas différent pour les petites communautés amazoniennes.

La production agricole de ces communautés est principalement basée sur la plantation de riz, de haricot, de maïs et du manioc pour la production de farine. D'autres plantations sont aussi développées, principalement celles des arbres fruitiers : *l'açaí*, *l'acerola*, la banane, le cacao, la noix du Brésil, le *cupuaçu*, l'orange, la papaye, la *pupunha*, etc. (Caviglia et Kahn, 2001; Bennett, 1992). Ces plantations ne suffisent pas à éliminer la récolte de ces mêmes fruits en forêt (Caviglia et Kahn, 2001; Boot et Gullison, 1995).

En général, les aires rurales et les régions riveraines amazoniennes dépendent de l'énergie électrique produite à partir de génératrices à diesel (Blanco *et al.*, 2000; Barbara, 1995). Cependant, elles ne sont pas une source d'énergie renouvelable, ce qui ne favorise pas la perspective de développement durable. De plus, le coût du combustible est élevé et son acheminement est parfois plus cher que le combustible lui-même. Ces difficultés s'accroissent dans les régions les plus lointaines (Dos Reis et Silveira, 2000), causant parfois la panne des génératrices à cause du manque de combustible. Ainsi, ce type de production d'énergie n'est toutefois pas très fiable dans la région.

Une option serait d'établir des lignes de transmission reliant les petites communautés aux grands barrages, mais le gouvernement s'oppose à ce type de projets, puisque les coûts seraient trop élevés par rapport à la demande (Fearnside, 1999; Barbara, 1995).

Ainsi, ce doctorat propose une méthodologie visant à contribuer pour la solution du problème de génération d'énergie pour les régions isolées de l'Amazonie et, par conséquent, au manque d'ajout de valeur à leur production agricole, qui favoriserait le développement durable de ces régions. Cette contribution est envisagée à partir des micro-centrales hydro-électriques qui sont une source d'énergie renouvelable, ce qui renforce la perspective de développement durable. D'autre part, celles-ci sont une source fiable qui répond à des besoins énergétiques spécifiques aux petites communautés locales. En outre, l'approvisionnement de la région par les micro-centrales répond déjà à l'estimation de l'accroissement de la demande mondiale d'énergie de 60% d'ici à 2030 (IEA, 2004).

Devant ces faits et grâce au grand réseau de rivières et d'*igarapés* (petites rivières) formant les bassins des fleuves amazoniens, le choix des micro-centrales hydro-électriques (MCH) vient du faible impact de celles-ci sur l'environnement et du prix relativement acceptable de cette technologie (Paish, 2002; Voršič *et al.*, 2000). Au Brésil, exception faite de l'Amazonie, la technologie des micros et petites centrales hydro-électriques (PCH) est tout à fait mature, tant au niveau commercial qu'au niveau fiabilité. En janvier 2002, il y avait 304 aménagements hydro-électriques de petite puissance – micros, minis et petites centrales hydro-électriques (ANEEL, 2002). Cette technologie serait donc très pertinente pour l'étude visée ici.

Dans ce cas, la majorité des petits bassins qui sont formés par les petites rivières sont non jaugés et ainsi la présente méthodologie propose une approche hydrologique pour combler ce manque de données (*c.f.*, articles 2 et 3).

En outre, les méthodologies pour l'implantation de micro-centrales (Penche, 1998; Harvey *et al.*, 1993; DNAEE/Eletrabras, 1985; Monition *et al.*, 1981; Noyes, 1980) sont basées sur la détermination de la chute et du débit qui vont équiper la centrale, ce qui est une étape fondamentale dans les projets d'aménagements hydro-électriques. Dans le cas des micro-centrales qui sont au fil de l'eau, la chute détermine le type d'aménagement pris en compte : avec un déversoir dont la fonction n'est que de détourner l'eau à travers d'une conduite forcée ou d'un canal découvert vers

les centrales de hautes et moyennes chutes ( $> 15$  m); et avec un déversoir qui en plus de détourner l'eau, augmente la chute des micro-centrales de basse chute ( $< 15$  m).

Cependant, ces méthodologies ne sont pas adéquates aux basses chutes visées ici ( $\leq 4$  m); et aux caractéristiques hydrologiques, en particulier la remarquable variation saisonnière de débit (Mesquita *et al.*, 1999) qui assure une disponibilité de l'eau suffisante, surtout durant les crues de la région. De plus, elles n'évaluent pas l'aspect développement durable des petites communautés comme variable de décision.

Fort de ces constatations, la présente méthodologie analyse les micro-centrales hydro-électriques de basse chute avec des aménagements à fil de l'eau dans une perspective de développement durable.

### **1.3. Objectifs**

Ainsi, l'objectif général de ce doctorat est de proposer une méthodologie pour l'implantation de micro-centrales hydro-électriques en Amazonie en tenant compte des caractéristiques hydrologiques et topographiques de la région. Cette méthodologie met en valeur les ressources hydro-électriques et économiques de l'important réseau de petits bassins versants amazoniens et la minimisation des impacts environnementaux dans l'usage de telles ressources et ceci dans une perspective de développement durable.

De ce fait, les objectifs plus spécifiques de ce doctorat sont :

- d'élaborer un arbre décisionnel pour l'implantation des micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable en respectant la culture de la population régionale. Cet arbre supportera la méthodologie en question et analysera, entre autres, les évaluations sur le terrain, les études hydrologiques, topographiques, énergétiques, économiques, géotechniques et environnementales. Il définira la viabilité économique des micro-centrales et l'aménagement le plus adapté pour répondre à la demande d'énergie des petites communautés. La réponse à cette demande se fait en accord avec les ressources hydro-électriques des petits bassins;

- d'élaborer un modèle hydrologique pour les petits bassins capable d'estimer les débits classés, surtout les débits moyens et d'étiages qui serviront au dimensionnement des micro-centrales;
- d'élaborer la transférabilité de ce modèle aux petits bassins non jaugés, ce qui assurerait conjointement avec le modèle l'application de la méthodologie dans toute la région.

## 1.4. Organisation de l'ouvrage

L'ouvrage est organisé en sept chapitres.

- Dans le chapitre 1, on présente la partie introductive de la recherche, comme on l'a démontré dans les sections précédentes.
- Le chapitre 2 présente la mise en situation du développement durable par rapport à la région cible de la méthodologie et comment ce développement peut être atteint par le biais des micro-centrales hydro-électriques.
- Le chapitre 3 présente la méthodologie de la recherche (article 1) qui est basée sur un arbre décisionnel pour l'implantation des micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable. Cet arbre explique comment les micro-centrales hydro-électriques s'imposent pour la promotion du développement durable des petites communautés locales. En outre, cet arbre rassemble les études nécessaires à la planification des micro-centrales, telles que : évaluations sur le terrain, évaluations hydrologiques, évaluations topographiques, évaluations énergétiques, évaluations économiques, évaluations géotechniques et évaluations environnementales. Ces études sont analysées par l'arbre, sauf les études géotechniques qui sont laissées de côté à cause de la dimension des micro-centrales et les études environnementales qui sont laissées de côté pour la même raison et à cause du choix des aménagements au fil de l'eau. Par contre, les études hydrologiques sont analysées plus à fond, comme témoignent les articles 2 et 3 (chapitres 6 et 7). Les résultats de l'application de cet arbre aux petits bassins amazoniens sont positifs dès que dans le voisinage n'existe pas de réseau électrique, c'est-à-dire quand la région est isolée.

- Les chapitres 4 et 5 présentent respectivement les articles 2 et 3.
- Le chapitre 6 présente les conclusions et suggestions des recherches futures et le chapitre 7 propose la bibliographie de ce document synthèse.



## Chapitre 2

### Développement durable et Amazonie

---

#### 2.1. Définition du développement durable

Le cadre économique local et la problématique de ce doctorat imposent, préalablement, de bien définir ce qu'est le développement durable.

Il existe de nombreuses définitions du concept de développement durable. Cette expression a commencé à être utilisée dès 1987, suite à la publication du rapport « Our Common Future » (Notre futur commun), aussi connu sous le nom de « Rapport Brundtland », du nom de la présidente de la « The World Commission on Environment and Development of the ONU ». Cette expression fut rapidement adoptée par les institutions internationales, gouvernements et organisations sociales partout dans le monde (Schwartzman, 1999).

Le rapport Brundtland définit le développement durable comme étant le développement qui permet de subvenir aux besoins présents sans compromettre pour autant la disponibilité des ressources pour les générations futures (WCED, 1987). Cette définition se fonde sur une perspective fortement anthropocentrique qui exprime une préoccupation uniquement pour l'avenir des êtres humains, sans se préoccuper des ressources elles-mêmes. Elle sous-entend toutefois que la nature a des limites et que le progrès technologique ne peut pas croître indéfiniment et de façon incontrôlable. En conséquence, il faut qu'il y ait responsabilité collective quant à l'utilisation des ressources naturelles (Schwartzman, 1999).

Il existe cependant plusieurs autres définitions du développement durable, lesquelles sont toutefois toujours en relation avec la première. Par exemple:

Gallopín et *al.* (1989) ont défini le développement durable comme un processus de changement dans lequel l'exploitation des ressources, la direction des investissements, l'orientation du déve-

veloppement technologique et les organisations de la société civile sont toutes en harmonie, mettant ainsi en valeur le potentiel courant et futur qui satisferont les besoins humains.

Rees (1990) conçoit le développement durable comme une politique globale d'identification de la détérioration de l'environnement, de l'injustice économique et des limites à la croissance de la production de biens. Cela représente une opportunité pour l'humanité de corriger une erreur historique - l'utilisation intensive des ressources naturelles, sans se préoccuper de leur durabilité – permettant ainsi un rapport plus respectueux, plus équilibré et plus stable entre l'humanité et la nature.

Rees (1990) a encore suggéré une nouvelle définition de développement durable à partir d'une interprétation thermodynamique qui contraste radicalement avec les définitions mises en pratique présentement: le développement durable est le développement qui minimise l'utilisation des ressources et l'augmentation de l'entropie globale. Depuis longtemps l'humanité profite intensivement des ressources naturelles, ce qui a eu comme résultat l'augmentation à la fois des résidus industriels, de la déforestation, de la pollution des cours d'eau et de la production de gaz toxiques, en déterminant une augmentation de l'entropie globale. Le développement durable permettrait de diminuer, dans ce cadre, l'exploitation intensive des ressources naturelles et, conséquemment, la dégradation de l'environnement.

Boot et Gullison (1995) ont défini le développement durable dans le cas du maintien d'une forêt par l'évaluation de deux questions: premièrement, l'utilisation de la forêt est-elle durable? En d'autres termes, est-elle maintenue en état de produire des biens de façon indéfinie? Deuxièmement, quel est l'impact de l'utilisation de la forêt? Son utilisation ne doit pas provoquer l'impossibilité d'avoir recours aux autres services dont la société a besoin. Ces services peuvent être, par exemple, le maintien de la biodiversité et/ou la protection des bassins versants.

Afgan *et al.* (1998) présentent la définition selon laquelle, le développement durable est une gestion prudente, à l'aide de la science, de l'environnement pour la survivance et l'avenir de l'humanité.

Silva (1998) l'a défini comme le maintien de l'environnement sans sacrifier le développement socio-économique. Cet auteur présente ainsi les quatre facteurs influençant ce développement. Le

premier facteur concerne les moyens de production d'une économie salubre, lesquels doivent être basés sur les technologies qui minimisent les dommages à l'environnement pour favoriser le développement durable. Ceci signifie que le développement d'un pays ne doit pas être obtenu aux dépens de la dégradation de la nature (ni cacher une tentative d'inhiber le développement des pays du tiers monde); par contre, ce développement doit servir à motiver les accords entre les pays développés et sous-développés pour le transfert de nouvelles technologies qui dégradent moins et produisent plus. Le deuxième facteur établit une corrélation entre pauvreté et dégradation de l'environnement, car les personnes pauvres sont forcées d'exploiter les ressources naturelles afin de survivre, principalement dans les pays sous-développés. Ceci conduit au troisième facteur pour le développement durable: les générations actuelles doivent profiter de l'environnement sans menacer sa qualité pour les générations futures. Enfin, le dernier facteur est l'importance de la participation de la société civile dans la prise de décisions reliées à l'implantation de politiques conduisant au développement durable.

Gutberlet (1999) et O'Riordan (1989) ont lié le développement durable à la redistribution des revenus et du pouvoir, car généralement le développement durable protège l'accès aux ressources naturelles et la juste distribution des richesses qui en découlent parce que les ressources naturelles représentent les sources de richesses d'une société.

Récemment, la déclaration de Johannesburg 2002 sur le développement durable a jugé que la protection de l'environnement, le développement social et le développement économique constituent les trois piliers inséparables pour un développement durable qui assure la dignité humaine pour tous.

À partir des définitions antérieures, on peut dire que le développement durable correspond à un mode de production des biens à partir des ressources naturelles en respectant leurs limites, c'est-à-dire sans compromettre leur pérennité, tout en profitant de cette richesse pour diminuer les inégalités sociales en cherchant à les exploiter de façon juste et équitable, principalement dans les pays du tiers monde.

Dans plusieurs régions du monde, les populations sont obligées de corrompre l'environnement pour satisfaire leurs besoins vitaux à court terme, même si cela met en péril leur survie à long terme. Ce processus correspond à un échange entre la pérennité des ressources naturelles par la

satisfaction des besoins présents. Toutefois, cet échange impose un cycle qui mènera éventuellement à l'appauvrissement des ressources naturelles et donc des populations elles-mêmes (puisqu'elles ne pourront plus en profiter).

En Amazonie, ce cycle néfaste est en évidence lorsque les agriculteurs des innombrables communautés isolées ne sont pas capables d'ajouter de la valeur à leur production primaire (transformation, etc.). Dans cette optique, un des objectifs de la réalisation du développement est de créer de nouvelles technologies capables d'utiliser les ressources naturelles pour générer des produits et services qui aideront les populations à sortir du cycle de pauvreté et de dégradation de l'environnement.

## **2.2. Exemples de développement durable en Amazonie**

Depuis 1987, avec la création de l'expression « développement durable », plusieurs façons de l'appliquer ont été adoptées et étudiées, entre autres dans les universités et centres de recherches partout dans le monde. L'Amazonie, étant la plus grande forêt tropicale du monde (IBA-MA, 2004), est, de ce fait, une des principales régions où le développement durable devrait être appliqué.

Henderson (1990) a mis en relief l'importance du maintien des *igapós*, car ceux-ci sont un atout économique important pour la promotion du développement durable, la population locale se nourrissant des poissons des *igapós* et les commercialisant. Cet exemple est durable, car la pêche est artisanale plutôt que commerciale. Les poissons sont donc une source de nourriture et de revenus pour les riverains. En outre, Barbara (1995) affirme que les ressources fluviales de l'Amazonie ont fourni, au fil du temps, nourriture et moyen de transport aux populations régionales.

Browder (1992) affirme qu'une attention internationale considérable a été donnée à la recherche d'alternatives durables à la déforestation tropicale. On remarque, entre ces alternatives, l'établissement de réserves extractives, qui sont les aires de forêt tropicale naturelle disponibles pour l'extraction de produits renouvelables avec un potentiel commercial. Ces produits peuvent être, par exemple, le latex, les fruits, la noix du Brésil, les fibres et le bois.

Bennett (1992) a mis en évidence que l'ethnobotanique a aidé à développer d'importants produits, incluant la noix du Brésil, le cacao (pour la production du chocolat), le curare (une résine noire utilisée en médecine comme relaxant musculaire), le manioc, la *quinine* (une substance utilisée pour traiter différentes formes de malaria) et le latex qui est extrait des hévéas. L'ethnobotanique est identifiée comme un processus de développement durable fondé sur l'extraction des ressources de la forêt. Cette extraction est pratiquée depuis l'Antiquité par les indigènes amazoniens sans qu'aucun dommage ne soit fait à l'environnement. La récolte de noix du Brésil est également un système traditionnel de maintien de la durabilité de la forêt utilisé par les peuples de la région (Boot et Gullison, 1995).

Silveira et Thorbjarnarson (1999) ont montré la différence existante entre la chasse aux crocodiles avant et après 1996, quand la région de *Mamirauá* (dans l'état de l'Amazonas) n'était pas encore une réserve de développement durable. Avant 1996, les crocodiles étaient principalement chassés pour leur peau, ce qui les a presque fait entièrement disparaître de cette région. À partir de 1996, le gouvernement brésilien, par le biais du CNPq (conseil national de développement scientifique et technologique du Brésil), a transformé la région de *Mamirauá* en première réserve de développement durable du pays dans le but de conserver sa biodiversité et de promouvoir la durabilité de ses ressources naturelles. Suite à cette décision, les niveaux de population de crocodiles se sont améliorés et les habitants de la région de *Mamirauá* ont pu profiter de cette ressource naturelle d'une façon légale et rationnelle.

Dowd et Tlusty (2000) ont discuté des études développées dans le cadre du projet *Piaba* (petit poisson) pour promouvoir la durabilité commerciale de la récolte de poissons ornementaux. Ce projet sert à maintenir l'équilibre entre l'environnement et l'homme, car il assure des emplois à la population riveraine de la région du moyen *Rio Negro* (un des principaux affluents de la rive Nord de l'Amazonie) et assure également le maintien des habitats des poissons.

Une évaluation socio-économique a été faite par Glaser et *al.* (1997) dans la région de l'estuaire de *Caeté*, à environ 200 km au nord-est de Belém, la capitale de l'état du Pará. Cette évaluation a montré que 75 % des habitants des villages de cette région dépendent économiquement des ressources de la mangrove. Ainsi, ils retirent de la mangrove des crabes, des poissons, des crevettes, des étrilles et du bois pour construire leurs maisons et les pièges à poisson. Cette étude a constaté

que la population de l'estuaire *Caeté* dépend vraiment de la durabilité des ressources naturelles de la mangrove.

Eve et *al.* (2000) ont analysé le cas du projet d'extraction durable du bois d'*Itapiranga* qui est une ferme située près de Manaus. Cette activité gagne de plus en plus d'espace économique au Brésil ces dernières années. Elle consiste à déterminer des zones à l'intérieur de la forêt où l'abattage des arbres sera effectué d'une façon durable, en assurant des emplois et des salaires à la population locale. Dans le cas de la ferme *Itapiranga*, le nombre d'emplois a diminué lorsque la licence d'extraction du bois a été accordée par le gouvernement suite à l'EIE (l'Étude de l'impact sur l'environnement). Les décideurs brésiliens doivent donc faire plus attention à cette problématique.

Perz (2001) a décrit la « *productive conservation* » appliquée dans les fermes familiales des régions tropicales. Il a constaté que ce type de propriété peut générer une augmentation des revenus lorsque la forêt est exploitée correctement. Une analyse à partir de plusieurs variables a été effectuée pour *Uruara*, une ville située à proximité de l'autoroute Transamazonienne (Ouest de l'état du Pará). Cette analyse a démontré que les systèmes de production associés à la conservation de la forêt, adoptés par les fermiers, sont capables d'augmenter leurs revenus et la valeur de vente des fermes de la région.

Une autre façon de mettre en place le développement durable est de favoriser l'agriculture durable, définie par Caviglia et Kahn (2001) comme étant l'utilisation de techniques de plantation de grains dans les petits espaces défrichés de la forêt native. Comme la coupe est réalisée sur une petite surface, ceci maintient le cycle de nutriments et permet la couverture rapide de l'aire défrichée de la forêt. L'agriculture durable inclut les plantations de noix de cajou et du Brésil et de fruits tels que, la banane, l'orange, le *cupuaçu*, la *pupunha*, l'*acerola*, et l'*açaí*. Elle permet de fournir des revenus aux petits fermiers tout en assurant la pérennité des ressources. Ce type d'activité économique a été appliqué à la ville d'*Ouro Preto do Oeste*, état de Rondônia.

L'agriculture durable est aussi caractérisée par la plantation de riz, de haricot, de maïs et du manioc pour la production de farine. La plantation de ces végétaux, en plus de s'accorder avec la définition d'agriculture durable, est appelée « agriculture de subsistance », car la production sert directement à l'alimentation des familles des petits agriculteurs (Perz, 2001; Gutberlet, 1999;

Kitamura, 1994; Benett, 1992), le surplus étant vendu au marché local et représentant par conséquent une source de revenus pour les familles de la région.

En outre, on peut mettre en place l'extraction durable caractérisée principalement par la récolte de fruits natifs, tels que *l'açaí*, *l'acerola*, la banane, le cacao, la noix du Brésil, le *cupuaçu*, l'orange, la papaye, la *pupunha*, etc. (Caviglia et Kahn, 2001; Benett, 1992), mais elle peut également être réalisée à partir de l'extraction du bois (Boot et Gullison, 1995).

Dans la présente recherche, aucun exemple a été trouvé pour les micro-centrales de basse chute dans une perspective de développement durable. Par contre, dans ce cadre l'ITDG (*Intermediate Technology Development Group*) développe des projets de micro-centrales hydro-électriques avec des communautés au Népal, au Pérou, au Sri Lanka et au Kenya, mais ces projets sont adaptés à de régions montagneuses (Khennas et Barnett, 2000). De plus, les populations de ces régions sont de culture et de mœurs différentes de la population de l'Amazonie.

### **2.3. Micro-centrales hydro-électriques et développement durable**

Les micro-centrales offrent une solution à la problématique de cette recherche tout en favorisant le développement durable des régions isolées. Le choix des micro-centrales est basé sur les raisons suivantes :

Leurs coûts sont relativement acceptables, si comparés aux coûts de technologies renouvelables plus récentes telles que : biocombustible, biomasse, énergie solaire, etc. (Walter, 2000). Un autre avantage provient de la grande quantité concentrée d'énergie qui peut être apportée par les micro-centrales par rapport à d'autres technologies (énergie éolienne et solaire photovoltaïque) (Paish, 2002). D'autre part, les micro-centrales répondent à des besoins énergétiques bien spécifiques, en fonction notamment des gisements disponibles et des puissances à installer (Armand, 1998).

Leurs impacts environnementaux et écologiques comprennent : la réduction de l'oxygénation des eaux, la sédimentation à l'amont du déversoir, l'érosion immédiatement à l'aval de l'aspirateur de la turbine, le bruit des machines, etc. Cependant, étant donné la petite taille de la centrale envisagée, les impacts sont moindres et peuvent être atténués avec des techniques de planification adé-

quates (Paish, 2002). En outre, les aménagements au fil de l'eau considérés ici, sont les plus recommandés pour les basses chutes, car ils ne favorisent pas la formation de grands lacs d'accumulation en amont (Eletrobras, 2000; DNAEE/Eletrobras, 1985; Monition *et al.*, 1981), ce qui minimise aussi les impacts environnementaux. Ainsi, le produit final est une source d'énergie renouvelable potentiellement économique et avec des impacts environnementaux plus petits que les impacts de la technologie concurrente qui, dans ce cas, sont les génératrices à diesel. Celles-ci émettent de façon prédominante du CO<sub>2</sub> qui contribue à augmenter l'effet de serre, favorisant ainsi le réchauffement global. Comme le CO<sub>2</sub> est soluble à l'eau, sa présence dans l'atmosphère peut provoquer de pluies acides à base de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (acide carbonique). Son surplus peut aussi causer des difficultés respiratoires, principalement chez les aînés et les nouveau-nés.

En général, l'implantation de micro-centrales hydro-électriques dans des régions rurales des pays en voie de développement peut offrir de considérables bénéfices aux communautés desservies, particulièrement si elles présentent des demandes d'énergie destinées à la génération de revenus. Celle-ci peut activer le développement socio-économique de ces régions (Paish, 2002; Fulford *et al.*, 2000; Walter, 2000).

Les deux dernières raisons représentent les trois piliers (protection de l'environnement, développement social et développement économique) inséparables pour un développement durable qui assure la dignité humaine pour tous (The Johannesburg Declaration on Sustainable Development, 2002). C'est dans cette perspective que la présente méthodologie est proposée aux petites communautés isolées de l'Amazonie.

## **2.4. Application proposée pour l'Amazonie**

L'énergie produite par les micro-centrales servirait à la transformation de la production agricole des communautés. Par exemple, celles-ci peuvent cueillir des fruits, mais, en général, il n'y a pas d'énergie pour approvisionner une petite usine qui ferait la séparation entre les semences et la pulpe des fruits. Cette pulpe pourrait être vendue et utilisée pour la production de jus, de yogourt, de confiture, etc. De plus, les graines produites localement (riz, haricot et maïs) peuvent être industrialisées ainsi que la production de la farine de manioc (Gutberlet, 1999). De cette façon, la production pourrait être vendue directement aux consommateurs. Une autre conséquence de la

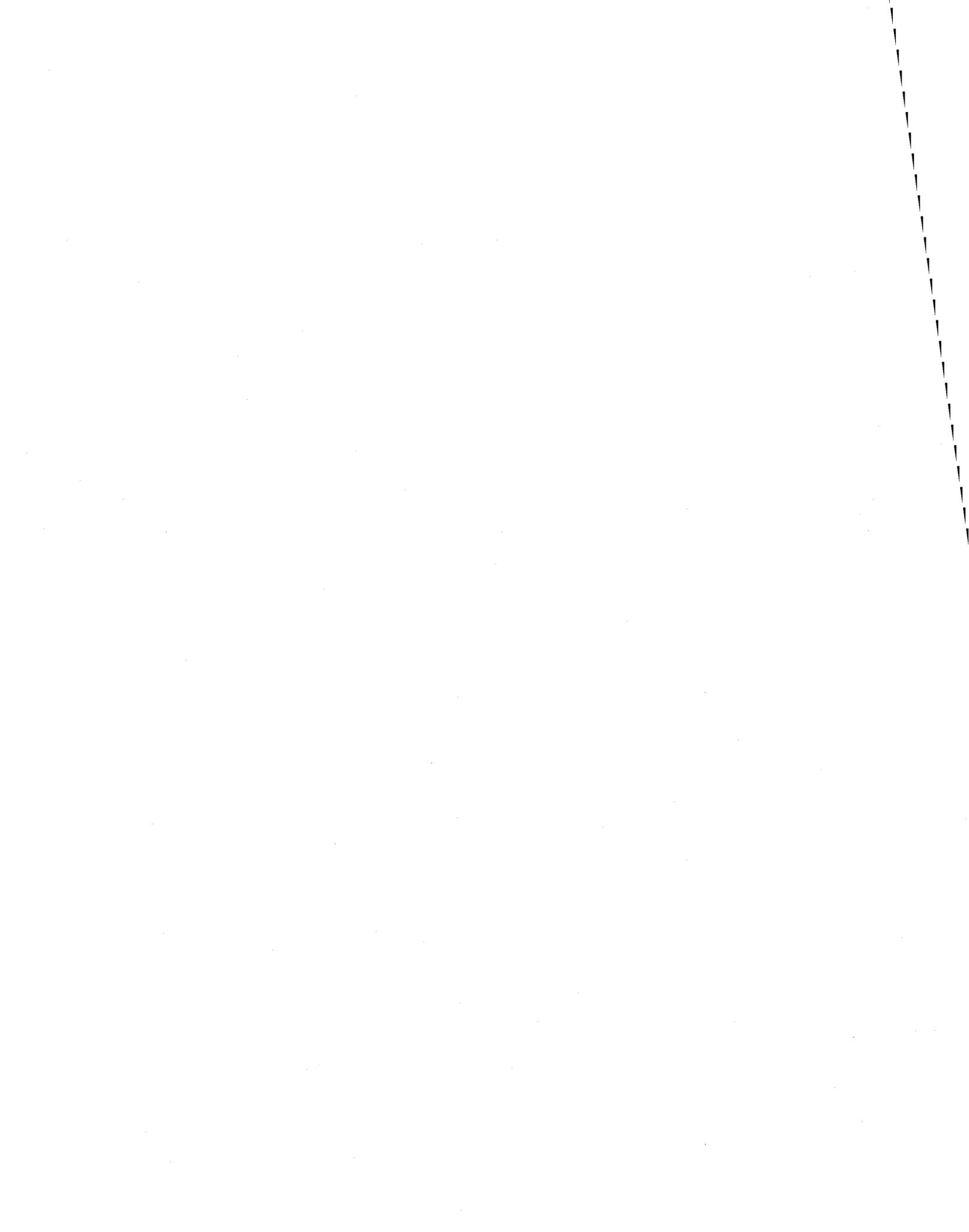
disponibilité d'énergie se traduirait dans la possibilité d'emmagasiner la production pour l'approvisionnement du marché entre les périodes de récolte.

Les exemples de transformation de la récolte agricole ne sont qu'une façon d'illustrer comment l'ajout de valeur à la production des communautés, en générant emplois et revenus, répondrait aux exigences de l'augmentation de la population et motiverait la sédentarisation des populations locales, ce qui éviterait l'exode rural vers les autres régions de la forêt encore intacte, provoquant encore plus de déforestation. De plus, l'exode rural vers les grandes villes de la région, qui augmente les problèmes sociaux déjà vécus par les populations de ces villes, serait ainsi réduit (Caviglia et Kahn, 2001; Kitamura, 1994).

Ces exemples doivent être discutés avec les communautés, assurant la participation de la société locale dans le processus de prise de décision du développement durable. Cet aspect est démontré dans ce doctorat à travers l'engagement des petites communautés de la région dans l'implantation des micro-centrales. L'engagement dépend plutôt de la dynamique des acteurs régionaux (leaders communautaires, municipalité, églises, universités, etc.) que des communautés elles-mêmes.

L'énergie nécessaire pour l'ajout de valeur doit être générée à l'aide d'une source renouvelable avec des impacts environnementaux moindres, ce qui implique les micro-centrales hydro-électriques de basse chute au fil de l'eau. Cela doit servir à motiver les accords entre les pays développés et sous-développés pour le transfert de nouvelles technologies qui soient économiquement viable, dégradant moins et produisant plus.

Donc, la proposition contenue dans cette recherche est conforme aux aspects de participation de la société et de minimisation de la dégradation de la nature à travers la discussion avec les communautés des projets d'implantation des micro-centrales visées ici, lesquelles dégradent moins. Ces aspects formant la base pour le développement économique et social dans une perspective durable des régions isolées de l'Amazonie.



## Chapitre 3

### Méthodologie – Article 1

---

#### **Decision Support System for Setting up of Micro-hydro Power Plants in Amazonia under a Sustainable Development Perspective.**

Claudio J. C. Blanco<sup>1\*</sup>, Yves Secretan<sup>1</sup> and André L. A. Mesquita<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>INRS-ETE, 490, rue de la Couronne, Québec - QC, G1K 9A9, Canada.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Federal University of Pará, rua Augusto Côrrea, 01, Belém – Pará, 66075-110, Brazil.

To submit to Renewable Energy (in preparation).

\*Corresponding author:

Tel.: +55-91-3201-7328; fax: +55-91-3201-8063.

E-mail address: [blancocjc@yahoo.com.br](mailto:blancocjc@yahoo.com.br).

**Abstract**

One of the main obstacles to the socio-economic development of the Brazilian Amazonia is the lack of electric energy in the numerous small isolated communities of the region that hampers value-added agricultural production, revenue growth and creation of jobs. One way to solve this problem is setting up micro-hydro power plants under a sustainable development perspective. This paper presents a decision support system that analyses this solution. The system considers mainly the hydrological, topographical, geotechnical, environmental, energetic, economic and social aspects of the target site. Furthermore, it takes into account factors such as power demand, community commitment, preliminary evaluations and fieldwork (potential and location of the site), and the energy production planning by micro-hydro power plants dedicated to the small catchments of the region. The hydrological aspects of small catchments and energy aspects indicate that the peak of energy demand, represented by the peak of the agricultural production of the small communities and the peak of energy production represented by the floods, are simultaneous in time (January-June). This coincidence helps to plan the energy production and minimize the environmental impacts because the floods justify the choice of run-of-river schemes that are least harmful to the environment. The economic aspects show that the energy costs generated by micro-hydro power plants are lower than the energy costs generated by diesel generators, often used in this area. The latter in addition to the energy use for value-added agricultural production aimed at the socio-economic development of Amazonia support the perspective of sustainable development presented in this paper.

Keywords: Amazonia, sustainable development, small isolated communities, micro-hydro power plant, decision support system.

## **1. Introduction**

The main objective of the present study is to propose a decision support system for setting up micro-hydro power (MHP) plants in Amazonia under a sustainable development perspective. The 2002 Johannesburg declaration on sustainable development considered that social and economic development and environmental protection make up the three inseparable pillars of sustainable development in order to ensure human dignity for every one.

This work proposes a methodology to analyze MHP projects for the small isolated communities of the Brazilian Amazonia, for which the lack of electric power is often an obstacle to socio-economic development (Mesquita *et al.*, 1999, Bennett, 1992). This energy can be used for value-added primary production, generating jobs and revenues. It will motivate settlement, therefore reducing rural migration towards the region's bigger cities, increasing the social problems already faced by the populations of those cities. Those small communities have their agricultural production based primarily on rice, beans, corn and manioc to produce flour (Caviglia and Kahn, 2001). They also develop different kinds of fruit crops: *açaí*, *acerola*, banana, cocoa, Pará nuts, *cupuaçu*, orange, papaya, *pupunha*, etc. (Caviglia and Kahn, 2001; Bennett, 1992). These crops are not sufficient to eliminate harvest of those same fruits in the forest (Boot and Gullison, 1995; Bennett, 1992).

Generally, Amazonia's rural areas and waterside regions depend on the electric power produced by diesel generators (Blanco *et al.*, 2000; Barbara, 1995), which is not a renewable source. Fuel is expensive and transporting it is sometimes more expensive than the fuel itself (Dos Reis and Silveira, 2000).

The existing problem of power generation and the lack of value-added primary production in the isolated regions of Amazonia can be solved through renewable energy projects. In this case, sources such as biofuel, biomass, wind energy, solar energy and micro-hydro power (MHP)

plants are often used (Fig. 1). The energy produced by these sources is environment-friendly and favors the perspective for sustainable development.

Substitution of diesel generators by MHP might be unlikely to start a competition between these sources. However for remote and isolated regions of Amazonia, it is difficult to analyze the small market dynamics of energy sources.

## **2. The micro-hydro power and sustainable development in Amazonia**

Among the renewable energy sources mentioned before, the MHP is the most desirable to meet the purposes of this paper for the following reasons:

They are a less expensive option if compared to the new technologies such as biofuel, biomass and solar energy. MHP is a mature technology; moreover, it is a much more concentrated energy resource than solar photovoltaic and wind energy.

Generally, setting up micro-hydro plants in rural areas of developing countries can offer considerable benefits to the communities served, particularly where careful planning identifies income-generating uses for the power. The income generated can be used for the economic and social development of those areas (Paish, 2002; Fulford *et al.*, 2000; Walter, 2000).

The environmental impact related to area flooding, reduction of water oxygenation, sedimentation upstream of the weir, erosion immediately downstream of the turbine draft tubes, electrical machinery noise and so on, will be minimized because of the size of the plant and appropriate design techniques (Paish, 2002). Thus, the end product is a potentially economic renewable energy source having smaller environmental impacts than the impacts of the competing technology, in this case the diesel generators. The main polluting gas emitted by the diesel generators is the CO<sub>2</sub> that contributes to the greenhouse effect and therefore to global warming. As CO<sub>2</sub> is soluble in water, its presence in the atmosphere can cause acid rain,

containing H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (carbonic acid). Its excess can also cause respiratory disorders, mainly to the elderly and the newborn.

The last two reasons represent the three inseparable pillars of sustainable development of the Johannesburg Declaration and confirm that hydroelectric power can act as an energy source for sustainable development.

In the case of the small communities of Amazonia, the energy generated by the MHP can be used to add value to the primary production, thus generating jobs and revenue that can help these communities achieve economic and social development in a sustainable perspective.

In this context, MHP addresses the needs of specific energy for areas where small rivers forming the small catchments have a strong seasonal varying flow (*e.g.*, article 2, figures 3 and 5; article 3, figures 3(a) and 4(a); Mesquita *et al.*, 1999). Furthermore, low-head installations with run-of-river schemes are the most suitable for those regions due to their flat topography.

Fig. 1 presents a high perspective of the Decision Support System (DSS) for setting up micro-hydro power plants that considers sustainable development aspects. This approach limits itself to certain branches (in grey – Fig. 1) of the DSS: energy demand and community commitment that summarize the social aspects; **preliminary evaluations, fieldwork and topography aspects; hydrological, energy and economic aspects**. The last three branches are presented in a low perspective, which allows for a more detailed analysis of their necessary decision-making tasks.

### **3. Energy demand**

In the mountainous and isolated regions of Nepal and Sri Lanka, the first express energy demand is usually for domestic lighting and TV/radio connection (Paish, 2002; Fulford *et al.*, 2000). Such demand is barely enough to justify setting up a MHP due to a load factor that rarely exceeds 10%. Increasing commercial and/or industrial end uses, besides raising local productivity, is the way to justify implementation of those plants in isolated regions (Paish, 2002; Fulford *et al.*,

2000). In Amazonia, the way to justify that is the energy demand for the value-added primary production (corn, beans, rice, manioc, fruit, etc.) of small communities (Walter, 2000) and the need to improve the quality of life of these people. An example of this demand and of this necessity has been found in the small communities in northern Amazon River in the State of Pará (Mesquita *et al.*, 1999). In this context, the isolated indigenous tribes of Northern Amazonia also demand energy. For example, the Wai-Wai (State of Pará, Brazil) tribe is actually supplied by diesel generators. In this case, the fuel is air-carried.

Moreover, the local grains, fruits and manioc flour production can be industrialized and directly sold to consumers. Also, the energy available allows for production storage for business supply between harvests. These last examples illustrate how power supply can generate jobs and revenue.

Additionally, if production activities are interrupted at night, power can be used for village electrification (lighting of schools and hospitals, TV, radio, etc.). Nepal uses that kind of power management (Paish, 2002) and Fulford *et al.* (2000) suggest it. Thus, the power supply for Amazonia's small communities supports the socio-economic development process and consequently improves the lifestyle of regional populations.

#### **4. Community commitment**

The follow-up of power generation-related projects, through renewable sources for isolated regions, can only be ensured with the commitment of the community (Ramachandra *et al.*, 2004; Alawaji, 2001; Rocha *et al.*, 2000; Walter, 2000; Carmody and Sarkar, 1997). In this work, the community must play a central role in the decision-making process of the projects, especially because they are developed around of the community for the sustainable development of the region. Moreover, the central role of the community also helps to ensure the control of the project for the population after set-up phase.

Community commitment starts with power demand from the communities; they can help with their local knowledge to guide the choice for the most feasible power supply project. Thus, the community is necessary throughout the project's feasibility phases. It also takes part in other phases: construction, operation and maintenance (Fulford *et al.*, 2000; Khennas and Barnett, 2000; Harvey *et al.*, 1993). During the feasibility phase, the community defines the end uses of electricity, participates in choosing the sites to be exploited and helps to determine the most adequate way for the extension of transmission lines. The community can contribute by hiring local workers for the civil constructions and hydraulic structures of the plants (powerhouse, weir-dam, etc.) to lower the cost (Fulford *et al.*, 2000; Khennas and Barnett, 2000; Harvey *et al.*, 1993; Monition *et al.*, 1981), thus reducing transport and logging expenses.

Because of all the community skills used throughout the project, it is necessary to organize, for example, a small catchment committee. It will be responsible for reaching all the players of the community: municipalities, local churches, farmers, small business people, and finally, the community in general. The indigenous populations of the community must also be represented (if present). This representative character of the committee is critical to ensure that the cultural variety and patterns of the Amazonian population is respected. It must explain to the community that the project will generate profits, as it should provide jobs and revenue. This information is used to motivate the local population to participate in all of the project's phases (Fulford *et al.*, 2000). The committee also has to form the teams to work on the construction of the MHP.

The committee is responsible for determining the water uses of the community that lives on the small catchment. If possible conflicts occur in the feasibility phase of the project, and then its task is to conciliate the water uses of the local population. This conciliation must ensure the preservation of every water use.

In Amazonia, the constraints between small and big landowners are a question to be regulated. Therefore, the committee must ensure that the legal title of the land where the micro-hydro power plant will be installed belongs to the community. Otherwise, the municipality must provide the legal appropriation of the land. Moreover, once the micro-hydro power plant is installed, the committee must pay attention to the end use of the power production.

The technology employed in the design of low-head micro-turbines is very complex. Thus, the committees must request financing from the government to purchase micro-turbines from one of the rural electrification programs. In Brazil, the main program is *Luz para Todos* (Light to Everybody) (MME, 2003). It will also have to qualify the staff on how to operate and maintain the plants after the demonstration phase because too many projects started out as a demonstration, but failed once that phase was completed (Fulford *et al.*, 2000). The lack of trained employees is sometimes the reason for failure of the system for a certain period of time. This failure can take several days because of the large distances between Amazonia's villages and cities where qualified labor force can be found.

Thus, the participation of the community is fundamental to the success of the project, especially because power demand is the reason for the project, which was required from the same small communities.

#### **5. Preliminary evaluations, fieldwork and topography aspects**

The preliminary evaluation and fieldwork determine whether a site must be considered for the MHP project or not. In order to be analyzed, the site needs to have the required physiographic, topographic and hydrological characteristics that support installation of a micro-hydro power plant. Location is another important characteristic. The site has to be located as close to the small community (consumer market) as possible, so that the cost of the transmission lines does not exceed the project's total cost, or it would be considered unfeasible. We must also consider

whether there are sand, clay and stone deposits around the sites. The availability of these materials to build the weir or the small dam (< 3 m) reduces the project's total cost. Those deposits are available around the majority of the sites investigated in Amazonia by Mesquita *et al.*, 1999. Another necessary material is cement, which must be brought in from the city closest to the site.

In the region, the sites below bridges (Fig. 2(a)) already meet the criteria corresponding to the required physiographic characteristics for the MHP. Narrow valleys are formed by grounds that already have undergone the earthwork, thus reducing the construction costs. If those sites are not available near the small community, earthwork necessarily increases slightly the construction costs.

Topographic and hydrological characteristics must be jointly analyzed, because they define, *a priori*, the installed power  $P$  (kW) that is proportional to the flow  $Q$  ( $m^3/s$ ) of the site, which is determined by its hydrological characteristics, and its gross head  $H$  (m), which is determined by the topographic characteristics. Eq. (1) summarizes the calculation of  $P$ . Where  $\eta$  is the total power plant efficiency,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) is the density of water and  $g$  is the acceleration due to gravity ( $m/s^2$ ).

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

Fig. 2(b) presents the flows needed to determine powers respectively of 50 and 100 kW with regard to low heads. With  $\eta = 0.75$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  and  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ . Then, a site with 5 m of gross head and a flow of 1.4  $m^3/s$  can produce a power of 50 kW, which seems small, but is sufficient to address the energy demand. It is necessary to remember for the preliminary evaluation that the flow must be measured at low-flow conditions that occur between September and December (*c.f.*, article 3, figure 4). It allows considering the power at an unfavorable period

for the production of hydroelectric power. This consideration does not consider the analysis of the site's flow duration curve for the determination of the flow design. It is necessary because of the wide range of variability that can occur in stream flow. In this methodology the determination of the site's flow duration curve is preceded by a hydrological investigation of the small catchments of Amazonia (*c.f.*, articles 2 and 3).

The topography is employed to determining of the gross head of the site and to define the feasibility of the civil works. The region's sites generally have gross heads smaller or equal to 4 m (Mesquita *et al.*, 1999). Fig. 3 presents in details the branch of the DSS (Fig. 1) in relation to the preliminary evaluations, fieldwork and topography aspects.

#### **6. Hydrological aspects of small catchments**

In Amazonia, hydroelectric power production has been developed mainly in large basins that are the only ones gauged and that have long stream flows records. These data are used to estimate floods in terms of the risk and of the recurrence time for flood frequency analysis. This information is used to project the hydraulics structures (dams, weirs, spillways, etc.). The stream flows are also used to plot the flow duration curve (FDC) that determines design flow for the hydroelectric power plants. However, the cost of hydrological data measurement is expensive because of the region's dimensions. Road access is rare and fieldwork is often difficult. For those reasons, countless small catchments in the region are ungauged, thus hampering the analysis of its power supply potential for small isolated communities (Mesquita *et al.*, 1999).

In literature, there is a significant number of studies that recommend the transferability of hydrological data of gauged sites towards ungauged. We can mention the techniques of regional flows that are applied to catchments of variable sizes (Ouarda *et al.*, 2001; Birikundavyi *et al.*, 1997; Durrans and Tomić, 1996; Tucci *et al.*, 1995). Other methods are based on regression models between the flows and the physiographic and climatological characteristics of a region

(Gan *et al.*, 1991; Mimikou, 1984; Hirsch, 1982). Another method often used is the regionalization of parameters of rainfall-runoff models or of conceptual models (Nash and Sutcliffe, 1970). Among the authors who present this method, we can mention: Littlewood (2003), Seibert (1999), and Servat and Dezetter (1993) (*c.f.*, article 3, section “introduction”). Those methods need a good database to be applied. On the other hand, the lack of physiographic and climatological data prevents the application of those methods on the region’s small catchments.

Given that rainfall is the only available data, the hydrological aspects are based on the application of a hydrological rainfall-runoff model designed for the ungauged small catchments of Amazonia (Blanco *et al.*, 2005a – article 2) or on the transferability of that model (Blanco *et al.*, 2005b – article 3). The application of the rainfall-runoff model needs 18 months of rainfall and runoff records to simulate the runoffs (*c.f.*, article 2, section “conclusion”). The transferability requires 1 year of stream flow measurements that are used for the calibration of the runoff (*c.f.*, article 3, section “conclusion”).

Because small catchments are considered in this study, rainfall records were considered from a single rain gauge closest to the considered stream flow gauge. (*e.g.*, article 2, section “bassin versant test”; article 3, section “bassins versants test”; Labat *et al.*, 2000). If there is no rain gauge close to the site studied, then it is necessary to apply the regional rain to determine data rainfall. St-Hilaire *et al.* (2003) have presented a recent bibliographical review of that subject.

The simulated flows are used to plot the flow duration curve (FDC) of the studied sites (*e.g.*, article 2, figure 11; article 3, figure 10). Those curves are used to determine the design flows of micro-hydro power plants, for example  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{75\%}$ , and  $Q_{95\%}$ , which are used to calculate the installed power of the site (Eq. (1)).

The analysis of the hydrological aspects also has to estimate the floods of the ungauged sites. Despite flow data are necessary for model application or its transferability, those are estimated from a rating curve ( $Q = f(H)$ ) that is a relationship between the level ( $H$ ) and the discharge ( $Q$ ) at a cross-section of a river. Thus, it is used to overestimate the maximum  $H$  in order to estimate the maximum flow of small rivers (Penche, 1998; DNAEE/Eletrabras, 1985; Noyes, 1980).

The main role of hydrological aspects is to determine the FDC of the sites studied. That curve is used to guide the analysis of the energy aspects that, in this approach, along with the economic aspects, support the project of the run-of-river schemes of MHP. Fig. 4 presents in details the branch of the DSS (Fig. 1) that analyses the hydrological aspects of small catchments.

## 7. Energy aspects

Low heads are typical in Amazonia, except in its bordering regions: in the West, the Andes; in the North, the Guyana plateau, and in the South, the Central plateau. The North is isolated and has a very low demographic density, the indigenous tribes are the exceptions and they can be supplied by medium-head micro-hydro power plants. For Amazonia's other isolated regions, the only plant adapted is low-head micro-hydro power plants. Indeed, the greatest scope to expand the use of small hydropower is with low head sites, because high heads are rare or already exploited (Paish, 2002). In that case, the MHP is typically "run-of-river" built in river valleys. Kaplan and propeller turbines are generally used for those low-head schemes (Eletrabras, 2000; Penche, 1998; Noyes, 1980).

Micro-hydro power plants generate power lower than  $100\text{ kW}$  (Johansson *et al.*, 1993), which seems little, but *a priori*, it is sufficient to meet the energy demand of the small communities. For example, the Amazonian small catchments with a surface smaller than  $200\text{ km}^2$  (*c.f.*, article 3, section "bassins versants test") have a power generation potential of about  $50\text{ kW}$  which is sufficient to supply a small industry (Mesquita *et al.*, 1999). Furthermore, to address this demand,

schemes with one or two turbines can be projected. The number of turbines is limited due to the width of the rivers and the costs to equip plants with more than two turbines.

### *7.1 Run-of-River schemes*

These schemes generate electricity from discharges larger than the minimum required to operate the turbine. They have a weir (Fig. 5(a)) built on the streambed to divert the required flow, while the rest of the water continues to overflow through it.

In this work, the run-of-river schemes are projected with 1 or 2 turbines; as a first resource, both turbines run during floods, producing more power. Then, the most powerful turbine runs during the period between flood end and low-flow start, and the least powerful one runs during low-flow, if the discharge of small rivers allows it.

The distribution of power demand is determined by energy requirement during the grain, manioc and fruit harvest time. Generally, the harvest of beans, corn, rice and manioc takes place between January and June (Embrapa, 2003). It coincides with the period of floods, because the pluviometric regime of the region has a more characteristic rainy period, ranging from late December to late June (*e.g.*, article 3, figure 2; Fritsch *et al.*, 1987). This coincidence between the peak of power demand (grain harvest) and the peak of power production (floods) favors the power production planning of MHP in the region. Furthermore, it prevents environmental impacts, which would happen if the peak of power demand coincided with low-flows, because dams would be needed to address this demand. However, if the height established by the weir (plus the gross head of the site) is not sufficient to generate the required power, a small dam can be built, but its height must not exceed 3 m (DNAEE/Eletrabras, 1985). That height ensures that the MHP is of the run-off-river type, that is, without a significant capacity of water stock, thus preventing flooding of large areas. In addition, the consideration of small dams provides project simplicity at low cost.

The floods are simulated with a rating curve and the small reservoir formed, upstream to small dams, must not exceed  $3 \text{ km}^2$ . This value is set by ANEEL (Brazilian Electric Power Agency) Resolution 394, which is applied to small hydropower (SHP) projects. Nevertheless, that research assumes such a value because there is no resolution yet for MHP in Brazil. Resolution 394 considers that a reservoir surface bigger than  $3 \text{ km}^2$  generates a significant environmental impact on the site. Thus, it is necessary to study the plant's socio-economic impacts before making the decision to carry on with the project.

Considering the structural design of the MHP in relation to the number of turbines, a first suggestion is made for a scheme equipped with one turbine (lower cost) having a design flow  $Q_I$  equal to  $Q_{95\%}$  (DNAEE/Eletrabras, 1985), which is characterized for low-flows of the sites. In the small rivers of Amazonia, low-flows generate low power (Fig. 6(b)), which is not sufficient to meet the demand, and in that case, it is necessary to assume a  $Q_I$  with a value bigger than  $Q_{95\%}$ .

However, schemes can be designed to have two turbines in parallel with the design flows  $Q_I$  and  $Q_2$ , where  $Q_2$  is equal to the difference between  $Q_T$  (total design flow) and  $Q_I$ ,

$$Q_2 = Q_T - Q_I \quad (2)$$

Thus, the scheme equipped with two turbines ( $Q_I$  and  $Q_2$ ) ensures a power similar to the power of one turbine with a design flow equal to  $Q_T$  while the river's discharge is sufficient. Besides that, the MHP continues its production with the turbine having a design flow equal to  $Q_I$  that is bigger than  $Q_2$ . When the small river's discharge becomes lower than  $Q_I$ , the scheme runs only with the second turbine having a design flow equal to  $Q_2$ . In a real case, it is necessary to observe the operation limits of the turbines in relation to  $Q_I$  and  $Q_2$ . If those ones are very close to the operation limits, then they must be recalculated in order for the turbines to run at optimal efficiency levels.

The choice for  $Q_T$  and  $Q_I$  depends on the detailed analysis of the flow duration curves (FDC) along with the power demand defined for the community and with the scheme's economic aspects and sustainability. If the economic aspects show that the scheme costs with one turbine or two turbines are similar, then the option for two turbines is more attractive since power supply is guaranteed for a longer period of time. It is with those preoccupations in mind that the following examples were undertaken.

### *7.2 Examples of run-of-river schemes with two turbines*

To exemplify the project of the schemes with two turbines in parallel, it is assumed that  $Q_T$  is equal to  $Q_{50\%}$ , which corresponds to the period of demand peak that occurs during the region's floods (January – June) (*c.f.*, article 3, figure 4); and  $Q_I$  is equal to  $Q_{75\%}$ . Thus, the method based on Eq. (2) is applied to only two gauged small catchments (Fig. 5(b)) in Amazonia. The surfaces and lengths of stream flow records of these small catchments ( $SC_1$  and  $SC_2$ ) are presented in Table 1 (ANA, 2003).

To apply Eq. (2) to  $SC_1$ , it is required to determine the FDC (Fig. 6(a)) using its stream flow records. Thus, the design flow  $Q_{50\%}$  is equal to  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{75\%}$  is equal to  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q_2$  is equal to  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , which means the turbine can run all the time with granted flow (Fig. 6(a)). To quantify power with design flows  $Q_{75\%}$  and  $Q_2$ , Eq. (1) is applied with  $H = 7 \text{ m}$  (gross head),  $\eta = 0.65$  (turbine-generator-speed regulator),  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  and  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ . Thus,  $P_{Q_{75\%}}$  is equal to  $31.2 \text{ kW}$  and  $P_{Q_2}$  is equal to  $8.9 \text{ kW}$ . Fig. 6(b) presents the annual power distribution of the MHP that can be set up on  $SC_1$ . It shows that for the first six months (0-50%), the plant runs with the two turbines. For the next three months (50-75%), the power is lower and produced by the turbine with a design flow equal to  $Q_{75\%}$ . In the last three months of the year (75-100%), the plant

power is at its lowest because the stream flows of the small river only run the turbine equipped with  $Q_2$ .

The same application is repeated to SC<sub>2</sub>, its FDC (Fig. 7(a)) shows that design flow  $Q_{50\%}$  is equal to  $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q_{75\%}$  is equal to  $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Then, applying Eq. (2),  $Q_2$  is equal to  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  and it is exceeded 100% of the time (Fig. 7(a)). To quantify powers with design flows  $Q_{75\%}$  and  $Q_2$ , Eq. (2) is applied with the same values as the first example. Thus,  $P_{Q_{75\%}}$  is equal to  $58.0 \text{ kW}$  and  $P_{Q_2}$  is equal to  $22.3 \text{ kW}$ . Fig. 7(b) shows the annual power distribution of the micro-hydro plant that can be set up in SC<sub>2</sub>. The same analysis performed for Fig. 6(b) can be performed for Fig. 7(b).

The maximum powers of the MHP, which are  $40.1 \text{ kW}$  for SC<sub>1</sub> and  $80.3 \text{ kW}$  for SC<sub>2</sub>, are produced during the six peak months. If other harvests (*e.g.* fruit) occur after the demand peak, then, firstly, the turbine equipped with  $Q_{75\%}$  can supply the demand, and then the turbine equipped with  $Q_2$  will supply the remaining needs. If the latter is not sufficient to meet power demands, its power can be used for domestic ends. Due to the period of weak stream flows that exist during low-flows, the option to stop the energy production must also be taken into account. It is considered normal in projects of isolated hydroelectric generation (DNAEE/Eletrabras, 1985; Penche, 1998) and it is not dramatic because during low-flows farmers are still preparing the soil for sowing.

In this study, the sustainable development perspective is fundamental for decision-making regarding installation of the MHP; however, it can be associated with an economic viability analysis of the schemes. This analysis is presented in the economic aspects. In that case, the schemes have 1 or 2 turbines and its costs are compared with those of the rural grid and diesel generators. The diesel generators are the alternative that is mostly used in isolated regions.

## 8. Economic aspects

After the analysis of the energy aspects and of the run-of-river schemes, which can be installed in the small catchments for the sustainable development of the area, we can establish the costs of electricity produced by schemes with 1 or 2 turbines and compare them with the production costs with diesel generators and, if there is a rural grid, with the costs of the local supplier. The objective of the economic aspects of the low-scale hydroelectric power supply project is to compare the possible alternatives in order to allow the most advantageous choice for the community and also the possibility of abandoning the project, if it does not turn out profitable. However, this methodology considers that the most profitable project can not be the best project for the sustainable development of the community.

From an economic point of view, a hydroelectric power plant differs from diesel generators because its installation cost per *kW* is much higher, but the operating costs are extremely low (Table 3) since there is no need to pay for fuel. In Amazonia, the cost of the hydroelectric projects, in the case of a small hydroelectric power plant, is estimated at *US\$ 4,000.00/kW* (Cruz, 2000). In Brazil, the cost per *kW* installed of MHP is between *US\$ 510.00* and *US\$ 2,074.00* (Balarim *et al.*, 1998). However, those costs cannot be applied in this study, because the turbines analyzed are Francis-type (medium head). At the international level, Khennas and Barnett (2000) analyzed projects in Nepal, Sri Lanka, Zimbabwe and Peru and they noticed a variation in the costs of the *kW* installed from *US\$ 1,136.00* to *US\$ 5,630.00*.

The cost of installation  $C_i$  per *kW* produced is estimated by

$$C_i = \frac{\text{Estimated cost projet (\$US)}}{\text{Installed Power(kW)}} \quad (3)$$

Its calculation is based on the method presented by the *manual de micro-centrais hidrelétricas (Micro-Hydro Power Plants Manual)* (DNAEE/Eletrabras, 1985) according to the installed

power and the design head of the site. The Brazilian textbook is followed because it contains the project costs of MHP built in Brazil that can be transferred to the projects in Amazonia with some corrections due to regional aspects. On the other hand, it is necessary to adapt this method to the low head technology, because this one takes into account the costs of turbines adapted to the medium head (Banki-Mitchell and Francis). Since turbines adapted to the low-head and to the low-flow are not yet available in the Brazilian market, the costs of the turbine-generator-speed regulator set (Table 2) were provided by the manufacturer LTCC of Montreal, Quebec, Canada (LTCC, 1995).

Within the framework of a comparative economic analysis between micro-hydro power plants, diesel generators and rural grids, it is necessary to determine the operational costs of the schemes that are showed in the following case study. Thus, it is possible to quantify the unit energy price (\$US/kWh) per scheme and to compare them in Fig. 8, which summarizes the branches of DSS (Fig. 1) for the analysis of the energy and economic aspects, and planning of run-of-river schemes.

### *8.1 Case study*

The following example shows the application of the economic aspects on the site of SC<sub>1</sub>. The design head (7 m) is the same used to determine the powers in the energy aspects, considering 1 or 2 turbines with the design flows ( $Q_{50\%}$ ,  $Q_{75\%}$ ,  $Q_2$ ).

Table 2 presents the breakdown costs of the schemes. Analysis of this table shows that between 62% and 65% of the costs is due to the imported turbine-generator-speed regulator set. If this technology is developed in Brazil, the costs will be reduced significantly. Moreover, in this breakdown the connection cost is left aside because it is assumed that the plants are not connected to the grid. However, the civil work costs are quantified, but in a feasible project, they

can be left aside, if the community supplies them. Thus, the total costs would be decreased, decreasing also the cost of the power generated.

By using the total costs and powers (Table 2), to which the Eq. (3) is applied, the costs of installation are calculated for the schemes with 1 and 2 turbines (Table 3). They are comparable to the costs of installation presented by Khennas and Barnett (2000) (world level) and by Cruz (2000) (Amazonia).

In order to complete this analysis, it is necessary to consider the depreciation of the scheme's investment costs for the calculation of the operational costs. A missing item in this analysis is the cost of *O&M* (operation and maintenance) services. This item is very difficult to be estimated because it is necessary to know the prices of those services for diesel generators and MHP in the isolated regions of Amazonia. On the other hand, for the MHP, this approach is favorable since local population training is foreseen to perform those services. The prices of fuel and diesel generators were considered for the Brazilian market (September, 2004).

The annualized capital cost  $C$  (Eq. (4)) can be determined by considering the present value (depreciation) of an annuity calculated on the costs of the investment (total costs – Table 2) of every scheme.

$$C = \frac{\text{cost of the investment}}{a_n} \quad (4)$$

Where  $a_n$  is the discount factor for annuities of  $C$  and  $n$  is the year number for which the present value of  $C$  is calculated. In this analysis, where the discount rate is equal to 10% and  $n$  is equal to 30 years (lifetime of the project),  $a_{30}$  is equal to 9.4269 (Penche, 1998). So, the unit energy cost *UEC* (\$US/kWh) of every scheme can be calculated according to periods of operation presented in Table 3. For MHP only the installation costs are considered, with the hypothesis of a charge factor equal to 100%, otherwise the *UEC* for MHP would be increased. For diesel generators, it is

necessary to add to the installation costs the annual fuel costs, with the generators working 24 hours per day. This table also shows that the cost of the *kWh* produced by micro-hydro power plants is lower than diesel generators without considering fuel transport costs. If they had been quantified, the *kWh* costs for diesel generators would be increased.

Thus, if it is necessary to produce 40 *kW* in the long term, the choice is to buy energy from the rural grid (\$US 0.06/kWh) (ANEEL, 2004). If the grid does not exist and it is necessary to meet demand of 40 *kW* during the peak (January-June), the choice is to produce this power from a scheme with 2 turbines (\$US 0.06/kWh) because it continues its production after the peak until the end of the year, but in a smaller scale, while the plant with 1 turbine (\$US 0.09/kWh) operates for 6 months only (Table 3).

The analysis of the energy and economic aspects supports the perspective of sustainable development of the proposed approach. It can be applied to Amazonia's ungauged small catchments by using the hydrological aspects also presented in this thesis (*c.f.*, articles 2 et 3).

## 9. Conclusion

This study has developed a Decision Support System for the installation of micro-hydro power plants in the Brazilian Amazonia under a sustainable development perspective. This system takes into account the electric power demand of the region's small communities, their commitment to the projects, preliminary evaluations and fieldwork, and the topography, hydrological, energy and economic aspects, which could be used as a basis for the construction demands and the installation of micro-hydro power plants in the region. The energy demand of communities is generally for projects that generate jobs and revenue. The projects take advantage of the natural resources of the Amazonian forest in a sustainable way and run as instruments to promote the region's socio-economic development.

The success of the setting up of MHP depends on the commitment level of the local population. It begins with the energy demand and continues with feasibility, construction, operation and maintenance that are necessary throughout the project's phases.

For example, the preliminary evaluations of the sites depend on the knowledge of the region, which relies on the local population. The labor force needed for the construction of the plants is less expensive if workers are hired from within the community. Plant maintenance by local workers is very important to prevent them from depending on technicians from other cities, which increases the costs (higher salaries and/or travel costs) and the waiting time. In order to avoid that and failure of the MHP, the local staff must be trained.

Hydrological aspects are very relevant, especially because the sites are located in ungauged small catchments. Thus, the stream flows are simulated with a rainfall-runoff model or its transferability. Those stream flows are used to plot flow duration curves that are necessary to establish the design flows of the turbines that equip the plants. The rainfall-runoff model was used because rain is the only available data on the small catchments of the region.

The analysis of the energy aspects has revealed that the peak of power demand coincides with the peak of production. In fact, the agricultural production (grains and manioc) of small communities takes place at the same time as the floods of the region, from January to June. This coincidence helps to plan the energy production that is illustrated by the planning examples of run-of-river schemes. Furthermore, the coincidence between peaks helps to minimize the environmental impacts; otherwise, run-of-river schemes would need to be equipped with higher weirs (small dams) that could form lakes, upstream to the site.

The case study used for the analysis of the economic aspects has showed that the micro-hydro power is a viable economic option for the isolated areas of Amazonia. Those plants have a cost per *kWh* lower than diesel generators, which are a frequent choice in the region. Furthermore, it is

necessary to add the social benefits generated from the installation of the MHP, which are the socio-economic development of the communities and environmental protection; and to reduce the environmental impacts of the benefits generated by the diesel generators. If this balance is evaluated, it will increase the positive difference between the unit energy costs of both the MHP and diesel generators.

The production of electric energy by MHP is an example of sustainable development, for it is a renewable source of energy with viable costs to meet the demand for value-added primary production, and it generates jobs and revenue, which can be used for the economic and social development of the isolated regions. Thus, the DSS developed in this approach can be used as a basis of analysis for installation of micro-hydro power plants in Amazonia's small communities under a sustainable development perspective.

### **Acknowledgements**

The authors wish to thank CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, of the Brazilian Department for Science and Technology (reference number -- 200360/00-0) for the financial support.

## References

Alawaji, S. H. Evaluation of solar energy research and its applications in Saudi Arabia – 20 years of experience. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2001; 5: 59-77.

ANA. Agência Nacional de Águas. Hidroweb – Sistema de informações hidrológicas. [cited 10 December 2003]. Available from World Wide Web :<<http://hidroweb.ana.gov.br/>>.

ANNEE. Tarifas Médias por Classe de Consumo Regional e Brasil 2004; [cited 10 December 2004]. Available from World Wide Web :<<http://www.aneel.gov.br/98.htm>>.

Balarim, C. R., Targa, L. A. and Sant'ana, R. F. Estimativa de custo de implantação de micro centrais hidrelétricas com potências de 20, 30, 50, 75 e 100 kW. *Energia na agricultura* 1998; Vol. 13(3) : 45-54.

Barbara, J. Dam the Rivers; Dam the people: Hydroelectric Development and Resistance in Amazonian Brazil. *Geo Journal* 1995; 35(2): 151-160.

Bennett, B. C. Plants and People of the Amazonian Rainforests-The role of ethnobotany in sustainable development. *BioScience* 1992; 42(8):599-607.

Birikundavyi, S., Rousselle, J., and Nguyen, V. T. V. Estimation régionale de quantiles de crues par l'analyse des correspondances. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1997; 24: 438-447.

Blanco, C. J. C., M. S. A. V. Gouveia and A. L. Amarante. Analisis Hidrodinamico de Rotores Axiales para Uso de la Energia Cinetica de Rios. *Informacion Tecnologica* 2000; 11(2): 73-78.

Blanco, C. J. C., Secretan, Y., Favre, A. C. and Slivitzky, M. Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie. Accepted for publication in the *Canadian Journal of Civil Engineering* 2005a.

Blanco, C. J. C., Secretan, Y. and Favre, A. C. Transférabilité d'un modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie. To be submitted 2005b.

Boot, R. G. A., and Gullison, R. E. Approaches to Developing Sustainable Extraction Systems for Tropical Forest Products. *Ecological Applications* 1995; 5(4): 896-903.

Carmody, E. R. and Sarkar, A. U. Solar box cookers: towards a decentralized sustainable energy strategy for Sub-Saharan Africa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1997; 1(4): 291-301.

Caviglia, J. L. and Kahn, J. R. Diffusion of Sustainable Agriculture in the Brazilian Tropical Rain Forest: A Discrete Choice Analysis. *Economic Development and Cultural Change* 2001; 49(2): 311-332.

Cruz, R. W. A. d. Geração de eletricidade com turbina hidrocínética na Amazônia: o caso da comunidade de São Sebastião. In: *Anais do 3. Encontro de Energia no Meio Rural* [Anais online]; 2000 Set 12-15; Campinas, SP, Brasil. 2003 [cited 2004 Set 23]. Available from World Wide Web :<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022000000200040&lng=pt&nrm=van](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200040&lng=pt&nrm=van)>.

DNAEE / Eletrobras, *Manual de Microcentrais Hidrelétricas*. Brasília; 1985.

Dos Reis, L. B. and Silveira, S. *Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo; 2000.

Durrans, S. R., and Tomić, S. Regionalization of low-flow frequency estimates: An Alabama case study. *Water Resources Bulletin* 1996; 32(1): 23-37.

Eletrobras. *Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas*. Rio de Janeiro; 2000.

Embrapa, Calendário agrícola e florestal para o estado do Amazonas; 2003. [cited 28 April 2004]. Available from World Wide Web :<<http://www.cpa.embrapa.br/novidades/Calend%Elrio/calendario.htm>>.

Fritsch, J. M., Dubreuil, P. L., et Sarrailh, J. M. De la parcelle au petit bassin-versant: effet d'échelle dans l'écosystème forestier amazonien. *Forest Hydrology and Watershed Management* (IAHS-AISH, 1987, Publication, 167, pp: 131-142).

Fulford, D. J., Mosley, P. et Gill, A. Recommendations on the use of micro-hydro power in rural development. *Journal of International Development* 2000; 12: 975-983.

Gan, K. C., McMahon, T. A., and O'Neill, I. C. Transposition of Monthly Streamflow Data to Ungauged Catchments. *Nordic Hydrology* 1991; 22 : 109-122.

Harvey, A., Brown, A., Hettiarachi, P. and Inversin, A. *Micro-hydro Design Manual – A guide to small-scale waterpower schemes*. London: Intermediate Technology Publications; 1993.

Hirsch, R. M.. A Comparison of Four Streamflow Record Extension Techniques. *Water Resources Research* 1982; 18(4) : 1081-1088.

Johansson, T. B., Kelly, H. and Reddy, A. K. N. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington (D.C.): Island Press; 1993.

Khennas, S. and Barnett, A. *Best Practices for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Developing Countries*. Final Synthesis Report, contract R7215, 2000, 105p.

Labat, D., Ababou, R., and Mangin, A., Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: Convolution and spectral analyses. *Journal of Hydrology* 2000; 238: 123-148.

Littlewood, I. G. Improved unit hydrograph identification for seven Welsh rivers: implication for estimating continuous streamflow at ungauged sites. *Hydrological Sciences Journal* 2003; 48(5) : 743-762.

LTCC, Développement énergétique intégré; 1995. [cited 30 September 2004]. Available from World Wide Web :<<http://www.ltcchydro.com/indexang.htm>>.

Mesquita, A. L. A., Blanco, C. J. C. and Lobato, R. V., Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, estado do Pará. Relatório Final do projeto FUNTEC 115-00/97, 1999, 55p.

Mimikou, M. Regional relationships between basin size and runoff characteristics. Hydrological Sciences Journal 1984; 29: 63-73.

MME. Programa luz para todos; 2003. [cited 30 September 2004]. Available from World Wide Web :<[www.mme.gov.br/luzparatodos](http://www.mme.gov.br/luzparatodos)>.

Monition, L., Le Nir, M., Roux, J. Les micro-centrales hydroélectriques. Paris, New York: Masson; 1981.

Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. Journal of Hydrology 1970; 10: 282-290.

Noyes, R. Small and Micro Hydroelectric power plants - Technology and Feasibility. Park Ridge, New Jersey, U.S.A.: Noyes Data Corporation; 1980.

Ouarda, T. B. M. J., Girard, C., Cavadias, G. S., and Bobée, B. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. Journal of Hydrology 2001; 254: 157-173.

Paish, O. Small hydro power: technology and current status. Renewable & Sustainable Energy Reviews 2002; 6: 537-556.

Penche, C. Layman's Handbook on How to Develop a Small Hydro Site. Commission of the European Communities; 1998.

Ramachandra, T. V., Kamakshi, G. and Shruthi, B. V. Bioresource status in Karnataka. Renewable & Sustainable Energy Reviews 2004; 8: 1-47.

Rocha, B. R. P. da, Silva, I. M. O. da, Pinheiro, E. de C. L., Rocha, A. O. F. da, Moraes, S. B., Monteiro, C. and Lopes, J. P. Mapeamento de alternativas energéticas na Ilha do Marajó. In *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2003 [cited 15 June 2004]. Available from World Wide Web: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022000000200037&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200037&lng=en&nrm=iso)>.

Seibert, J. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology* 1999; 98-99: 279-293.

Servat, E., and Dezetter, A. Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 1993; 148: 231-248.

St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Lachance, M., Bobée, B., Barbet, M. and Bruneau, P. Regional precipitation frequency analysis: a literature review of recent developments. *Journal of water science* 2003; 16: 27-54.

The Johannesburg Declaration on Sustainable Development, 2002. [cited 03 September 2004]. Available from World Wide Web : <[http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit\\_docs/1009wssd\\_pol\\_declaration.htm](http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit_docs/1009wssd_pol_declaration.htm)>.

Tucci, C., Silveira, A., and Sanchez, J. Flow regionalization in the upper Paraguay basin, Brazil. *Hydrological Sciences Journal* 1995, 40 : 485-497.

Walter, A. Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas. In *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2003 [cited 10 June 2004]. Available from World Wide Web : <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022000000100028&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000100028&lng=en&nrm=iso)>.

**Table 1 – Small catchments data (surface and length the stream flow record)**

SC	1	2
Surface (km <sup>2</sup> )	82	162
Stream flow records (years)	7	2

**Table 2 - Cost breakdown of a micro-hydro power plant in relation with the number of turbines**

	Quantity	1 turbine – 40 kW Cost (\$US)	2 turbines ( 30 and 10 kW) Cost (\$US)	
<u>Power house</u>				
civil works	global	9,152.67	9,152.67	6,189.58
turbine-generator-speed regulator	global	96,682.78	72,512.09	24,170.70
transport	24% of price	23,203.87	17,402.90	5,800.97
<u>Penstock</u>				
purchase and assembly	10 m	2,054.40	1,698.80	750.70
transport	8% of price	164.35	135.90	60.06
civil works (water intake and supports)	20% of price	410.88	339.76	150.14
<u>Weir-dam</u>				
on rock and cement	10 m	2,831.40		2,831.40
<u>Total</u>		134,500.40		141,195.67
unforeseen expenses	10% of total	13,450.04		14,119.57
<b>Total cost</b>		<b>147,950.00</b>		<b>155,315.00</b>

**Table 3 – Investment, installation and unit energy costs of the schemes, and depreciation parameters**

	Micro-hydro power		Diesel generator
	1	2	1
Number of machines			
Cost of the investment (\$US)	147,950.00	155,315.00	11,374.00
Cost of installation (\$US/kW)	3,699.00	3,883.00	284.00
Unit energy cost (\$US/kWh)	0.09	0.06	0.12
Period of operation (months)	6	12	12
Specific consumption (l/kWh)	-	-	0.22
Diesel price (\$US/l)	-	-	0.55
Power (kW)	40		
Discount rate (% year)	10		
Lifetime of the project (years)	30		

**Figures captions**

Fig. 1 - Decision support system for installation of micro-hydro power plants.

Fig. 2 - Site below a bridge and flows and heads for powers of 50 and 100 kW.

Fig. 3 - Preliminary evaluations, fieldwork and topography aspects.

Fig. 4 - Hydrological aspects of small catchments.

Fig. 5 - Weir of run-of-river schemes (Penche, 1998) and Amazonian small catchments.

Fig. 6 – Flow duration curve and power generated histogram of the SC<sub>1</sub>.

Fig. 7 – Flow duration curve and power generated histogram of the SC<sub>2</sub>.

Fig. 8 - Energy and economic aspects and planning of run-of-river schemes.

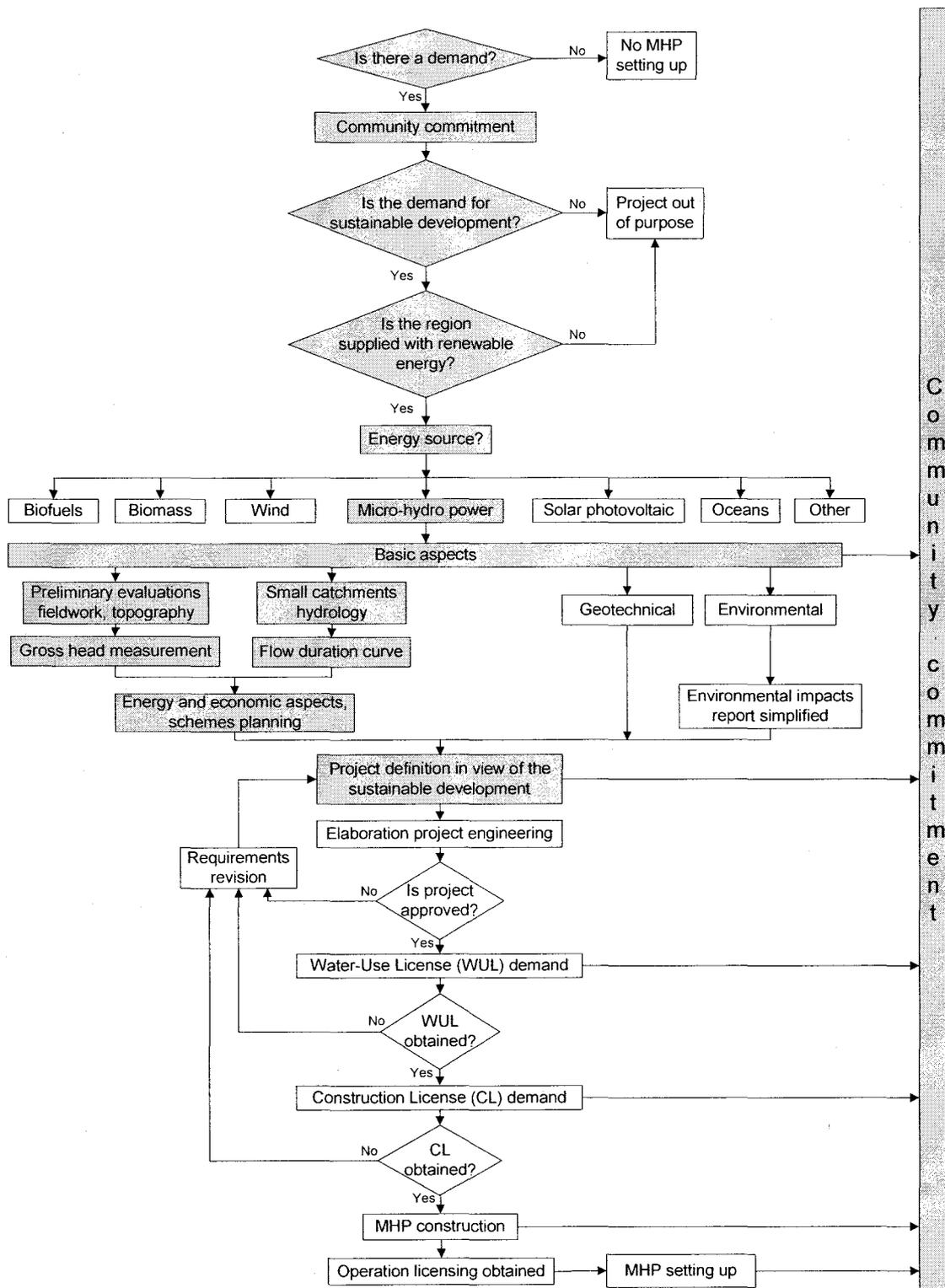
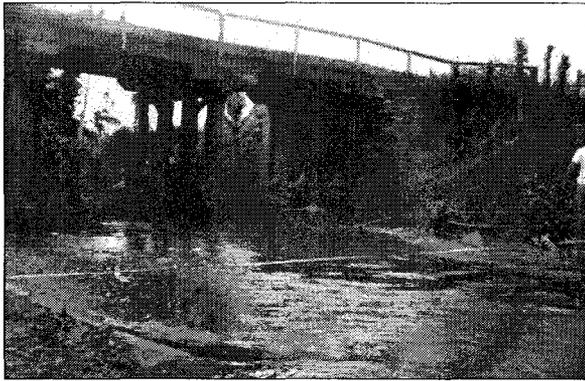
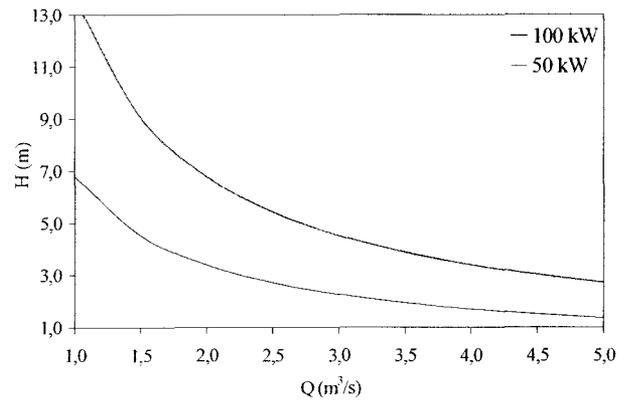


Fig. 1 - Decision support system for the setting up of micro-hydro power.



(a)



(b)

Fig. 2 - Site below a bridge and flows and heads for powers of 50 and 100 kW.

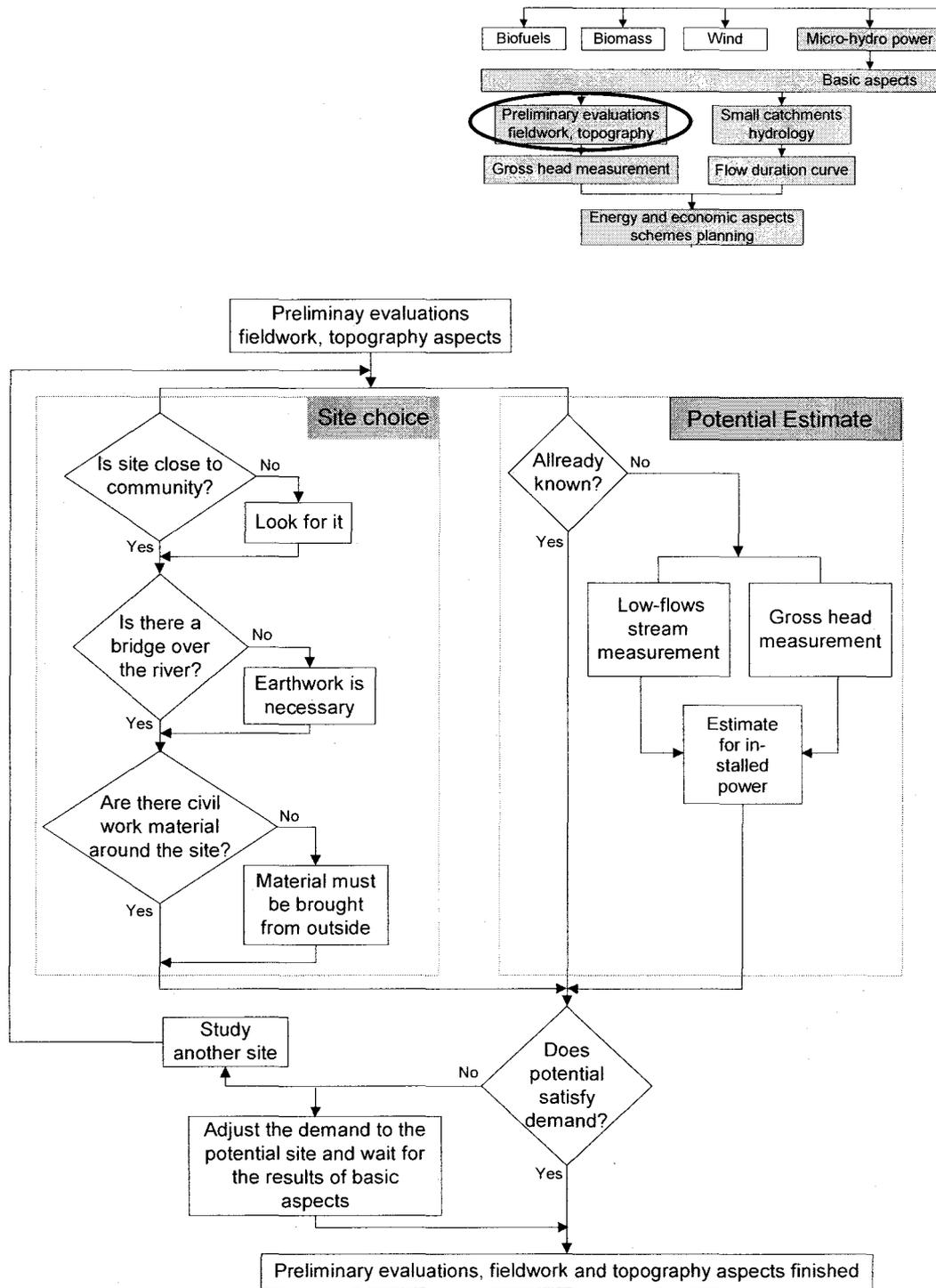


Fig. 3 - Preliminary evaluations, fieldwork and topography aspects.

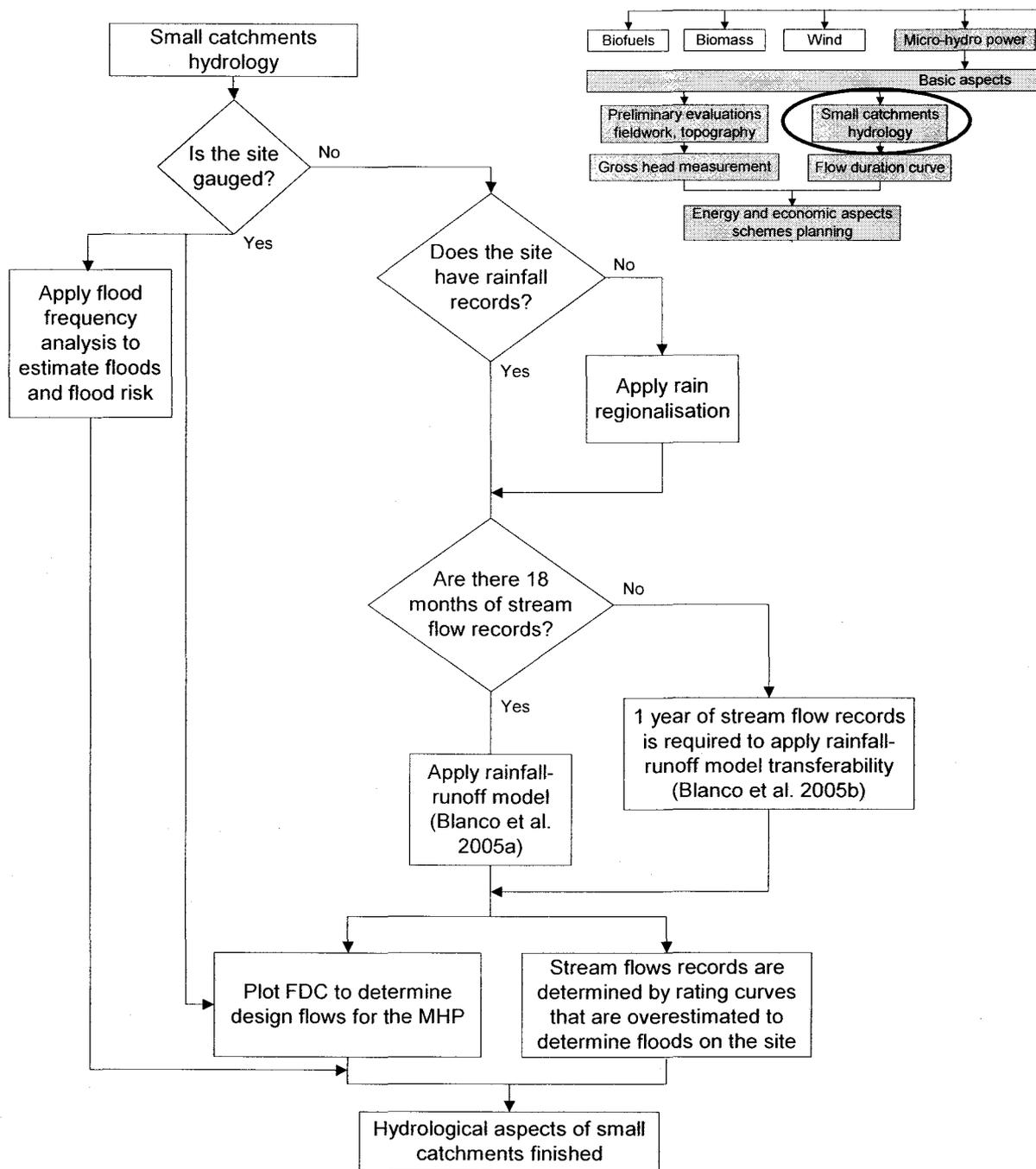
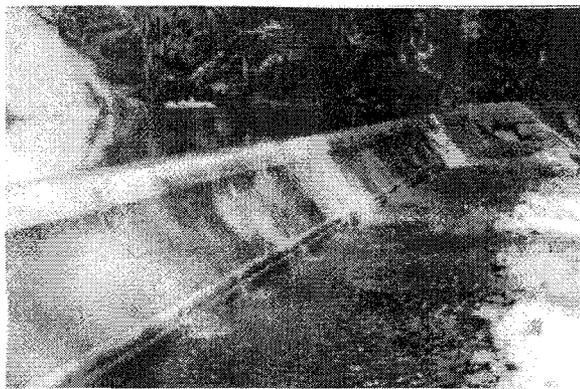
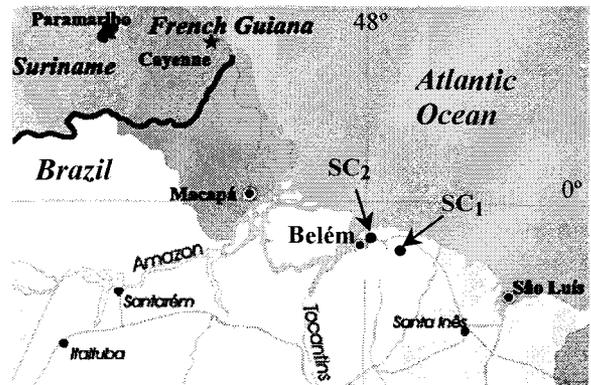


Fig. 4 - Hydrological aspects of small catchments.



(a)



(b)

**Fig. 5 - Weir of run-of-river schemes (Penche, 1998) and Amazonian small catchments.**

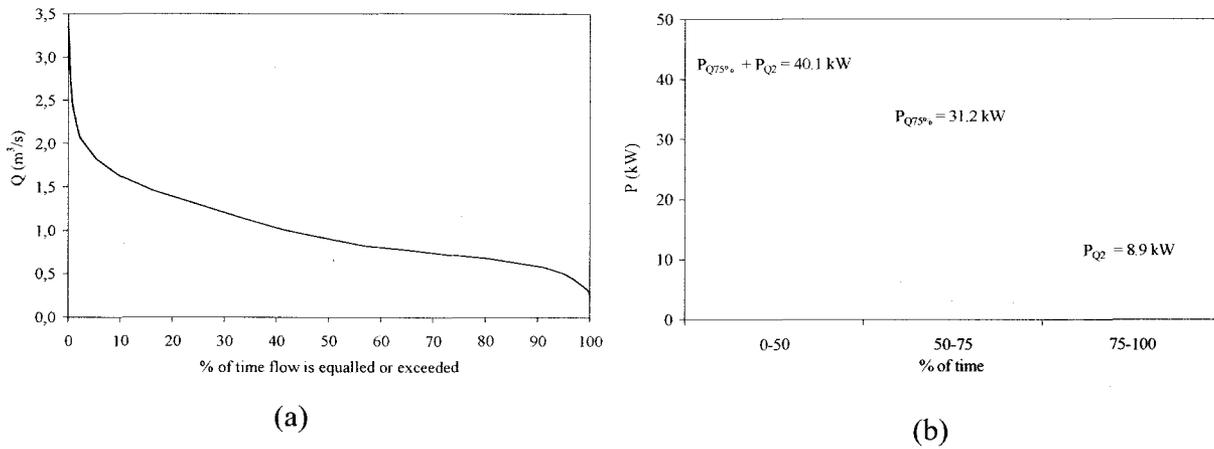
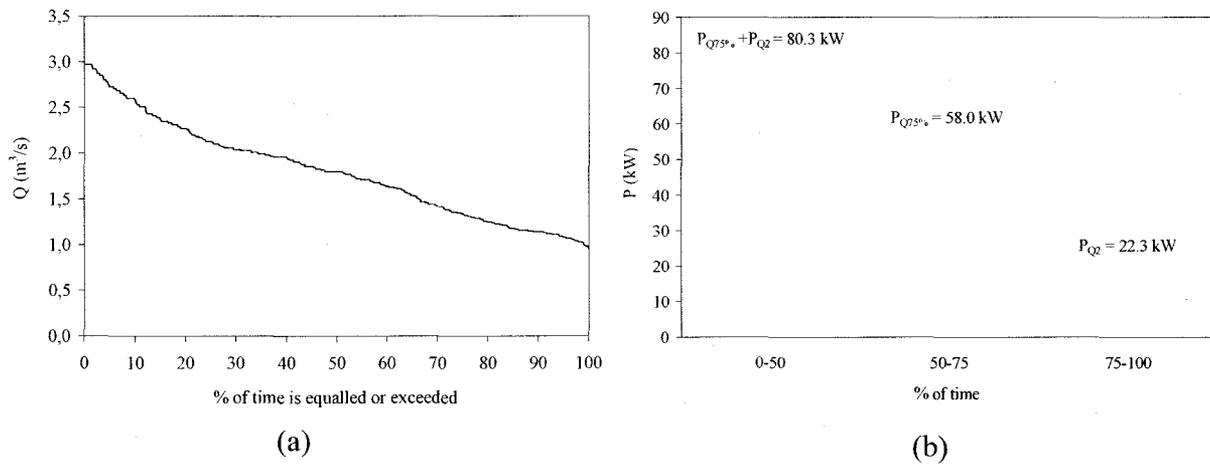


Fig. 6 – Flow duration curve and power generated histogram of the SC1.



**Fig. 7 – Flow duration curve and power generated histogram of the SC<sub>2</sub>.**

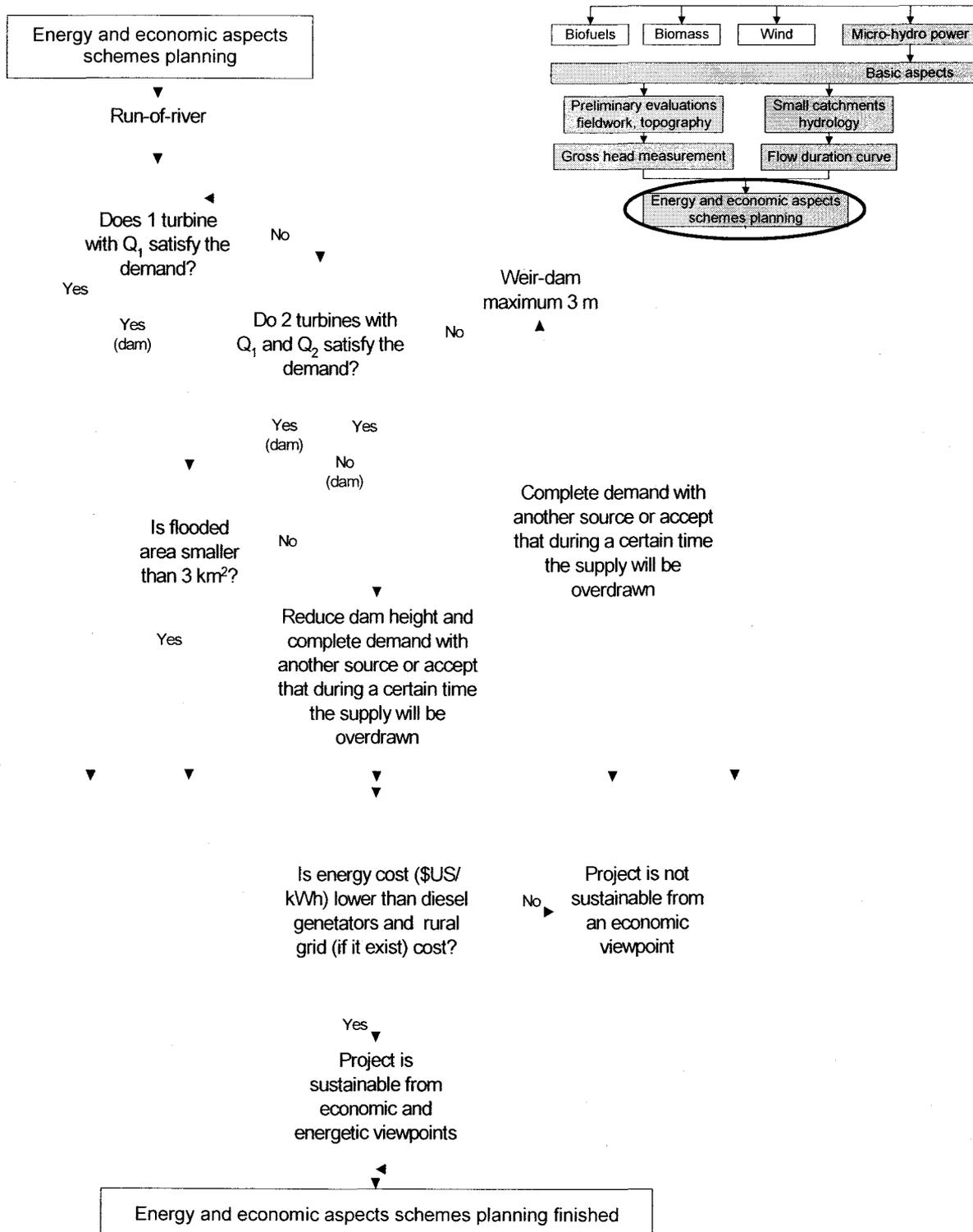


Fig. 8 - Energy and economic aspects and planning of run-of-river schemes.

## **Chapitre 4**

### **Article 2**

---

#### **Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie.**

Claudio J. C. Blanco, Yves Secretan, Anne-Catherine Favre et Michel Slivitzky.

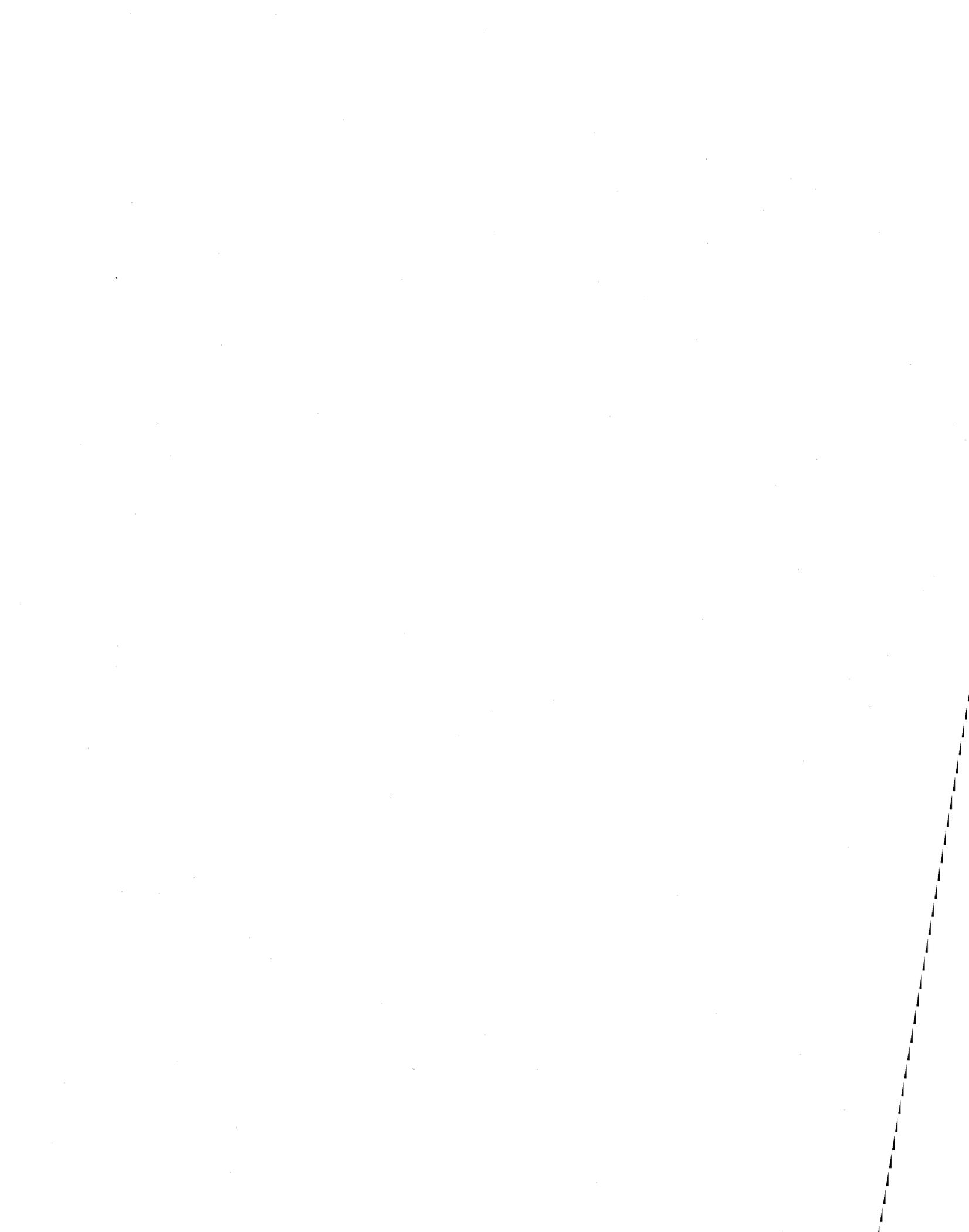
Institut National de la Recherche Scientifique – Eau, Terre et Environnement, 490, rue de la Couronne, Québec (Québec), G1K 9A9, Canada.

Accepté pour publication dans la Revue Canadienne de Génie Civil.

Claudio J. C. Blanco, INRS-ETE, 490, rue de la Couronne, Québec (Québec), G1K 9A9, Canada.

Téléphone : (418) 654-2530, poste : 4466. Fax : (418) 654-2600.

Courriel : [claudio\\_blanco@ete.inrs.ca](mailto:claudio_blanco@ete.inrs.ca).



**Résumé :** En Amazonie l'énergie hydro-électrique n'est actuellement produite que sur des grands bassins versants qui sont les seuls jaugés. Ceci laisse de côté les petits bassins versants pour lesquels on ne dispose que de données de pluies. Ainsi, l'objectif de ce travail est de mettre au point un modèle hydrologique pluie-débit pour simuler les débits classés en vue d'une planification de la production hydro-électrique. Le modèle est basé sur un système (entrée-sortie) linéaire et invariant dans le temps dont la réponse impulsionnelle est déterminée à partir de l'analyse spectrale croisée entre les séries de pluie et de débit. Cette dernière est optimisée par approximations successives, la fonction objectif étant la moyenne quadratique. Sur le bassin versant test, on dispose de 7 ans de données de pluie et de débit; 4 ans sont considérés dans l'étalonnage et 3 ans dans la validation du modèle. L'analyse de sensibilité détermine la période de données la plus courte qui assure encore des résultats comparables à ceux de la validation du modèle.

**Mots clés :** Modèle pluie-débit, petit bassin versant, Amazonie, réponse impulsionnelle, analyse de sensibilité.

**Abstract** : In Amazonia, hydroelectric power production has only been developed on large basins that are the only gauged. It excludes innumerable small catchments on which only data about rainfall is available. Therefore, the objective of this paper is to develop a hydrological rainfall-runoff model to simulate flow duration curves for the hydro power production. The model is based on a linear and time-invariant system (input-output). The impulse response of the system is calculated from the cross-spectral analysis between the rainfall and runoff series. This response is optimized by minimizing the root mean square of the error. The test catchment has 7 years of rainfall and runoff data; 4 years are considered in the calibration and 3 years in the validation of the model. A sensitivity analysis of the model to the sample size is carried out to determine the shortest data period that produces results comparable to those of the model validation.

Key words: Model rainfall-runoff, small catchments, Amazonia, impulse response, sensitivity analysis.

## **Introduction**

En Amazonie l'énergie hydro-électrique n'est actuellement produite que sur des grands bassins versants qui sont les seuls jaugés. Ceci laisse de côté les innombrables petits et micro-bassins non jaugés qui pourraient être exploités par les petites communautés isolées avec l'implantation de micro-centrales hydro-électriques (Mesquita *et al.* 1999). Celles-ci ont une puissance installée inférieure à 100 kW (Johansson *et al.* 1993), ce qui semble peu, mais qui est suffisant pour répondre aux besoins de ces petites communautés.

Pour les petits bassins versants amazoniens, les pluies sont les seules données disponibles. Ainsi, l'objectif principal de ce travail est de mettre au point un modèle hydrologique pluie-débit pour restituer les courbes des débits classés dans une perspective de production d'énergie hydro-électrique. Ces courbes sont essentielles au dimensionnement des aménagements hydro-électriques, quelle que soit leur taille. Il s'agit également d'analyser la sensibilité du modèle à la taille de l'échantillon et ainsi déterminer l'effort de mesures nécessaire à l'application sur un site non jaugé.

Le modèle hydrologique proposé établit une relation linéaire de cause-effet (pluie-débit) entre les chroniques de données relatives à la pluie et au débit. Des modèles qui suivent ce type de relation sont présentés dans la littérature depuis que Sherman (1932) a introduit le concept d'hydrogramme unitaire. Ils sont également utilisés par Rodriguez (1967), Papazafiriou (1976), Spolia *et al.* (1980), Goring (1984), Kachroo (1992a), et Labat *et al.* (2000).

Les hypothèses du modèle sont la linéarité et l'invariabilité dans le temps de la relation entre la pluie et le débit. Elles sont adoptées en raison de la faible taille des bassins versants visés et du climat de la région. Ainsi, les débits  $y(t)$  sont représentés par le produit de convolution entre la pluie  $x(t)$  sur le bassin versant et la fonction de transfert ou la fonction de la réponse impulsion-

nelle dénotée par  $h(u)$  (Éq. 1). Dans cette approche la fonction de la réponse impulsionnelle est appelée simplement réponse impulsionnelle.

$$[1] \quad y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u) x(t-u) du$$

Il est bien connu que les processus pluie-débit sont non linéaires (Rodriguez 1967; Kachroo et Liang 1992b) et variants dans le temps. La principale source des non-linéarités est l'infiltration, l'autre source est constituée des variations spatiales d'un bassin versant. La variabilité dans le temps est expliquée par la saisonnalité des séries chronologiques qui caractérisent les systèmes hydrologiques (pluie et débit). La raison pour laquelle une approche basée sur des systèmes linéaires est envisageable, s'appuie sur le principe de la parcimonie d'Occum (Ahsan et O'Connor 1994) : s'il est possible d'expliquer le comportement dynamique des petits bassins à partir d'une approche plus simple, alors, celle-ci sera préférée par rapport à une approche plus complexe.

### **Détermination de la réponse impulsionnelle**

Les séries de pluie et de débit étant connues, la première étape consiste à déterminer la réponse impulsionnelle du système linéaire. Papazafiriou (1976) a présenté une méthode basée sur l'expansion de la réponse impulsionnelle dans une séquence de polynômes orthogonaux unitaires pondérés. Spolia *et al.* (1980) ont représenté la réponse impulsionnelle par une distribution Gamma à deux paramètres. La méthode de déconvolution a été utilisée par Dreiss (1982) et plus récemment par Padilla et Pulido-Bosch (1995). Le principe de cette méthode est de partir de l'équation de la convolution pour déterminer la réponse impulsionnelle en utilisant l'entrée et la sortie du système. La méthode de l'analyse harmonique a été utilisée par Goring (1984). Elle est basée sur la dualité de la convolution, laquelle établit que l'intégrale de convolution dans le domaine temporel est représentée par une simple multiplication dans le domaine fréquentiel. À partir de cela la réponse impulsionnelle est déterminée pour toute paire de données entrée-sortie.

Afin de récupérer les réponses impulsionnelles dans le domaine temporel, il faut leur appliquer la transformée inverse de Fourier. Kachroo (1992a) et Kachroo et Liang (1992b) ont utilisé la méthode des moindres carrés pour déterminer les valeurs optimums de la réponse impulsionnelle. Kachroo *et al.* (1992c) ont estimé la réponse impulsionnelle pour le modèle linéaire simple, soit par la méthode des moindres carrés, soit en utilisant la fonction Gamma. Labat *et al.* (1999) ont utilisé la méthode statistique de Wiener-Hopf (Eagleson 1966), la méthode de la substitution directe, la méthode des moindres carrés et la méthode de projection polynomiale. Labat *et al.* (2000) se basent sur les mêmes méthodes que Labat *et al.* (1999), à l'exception de la projection polynomiale.

L'approche proposée dans ce travail est basée sur l'analyse spectrale croisée (Rodriguez 1967) appliquée sur les séries de données hydrologiques pour déterminer les réponses impulsionnelles du système linéaire qui représente la relation entre ces séries. La méthode d'analyse spectrale croisée est aussi présentée, entre autres, dans les ouvrages de référence d'analyse de séries chronologiques, tels que Box et Jenkins (1976) et Chatfield (1980); et de traitement du signal, Max *et al.* (1972).

### **Analyse spectrale croisée pour les systèmes linéaires**

Il faut encore ajouter aux hypothèses admises pour le système représenté par l'équation 1, l'hypothèse que les systèmes hydrologiques sont physiquement réalisables, c'est-à-dire  $h(u) = 0$  si  $u < 0$ . L'équation 1 devient donc :

$$[2] \quad y(t) = \int_0^x h(u) x(t - u) du$$

L'entrée  $x(t)$  et la sortie  $y(t)$  sont considérées comme deux processus aléatoires et stationnaires. En multipliant l'équation 2 par  $x(t - \tau)$  et en prenant l'espérance mathématique, on obtient

$$[3] \quad E[y(t)x(t-\tau)] = \int_0^{\infty} h(u) E[x(t-u)x(t-\tau)] du$$

qui s'écrit également :

$$[4] \quad \gamma_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} h(u) \gamma_x(\tau-u) du$$

expression dans laquelle  $\gamma_{xy}$  est la covariance croisée entre  $x(t)$  et  $y(t)$  et  $\gamma_x$  est l'autocovariance de  $x(t)$ . L'équation 4 est l'intégrale de Wiener-Hopf (Chatfield 1980), à partir de laquelle on peut déterminer les réponses impulsionnelles  $h(u)$  dans le domaine temporel. Dans ce travail par simplicité, l'équation 4 est considérée dans le domaine fréquentiel. Cependant, il faut considérer la forme discrète de cette équation :

$$[5] \quad \gamma_{xy}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k \gamma_x(\tau-k)$$

En appliquant la transformée de Fourier à l'équation 5, en multipliant par  $\frac{e^{-i\omega\tau}}{\pi}$  et en sommant  $\tau$  de  $-\infty$  à  $\infty$ , l'équation 5 s'exprime dans le domaine fréquentiel comme :

$$\begin{aligned} f_{xy}(\omega) &= \frac{\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} h_k e^{-i\omega k} \gamma_x(\tau-k) e^{-i\omega(\tau-k)}}{\pi} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} h_k e^{-i\omega k} f_x(\omega) \\ &= H(\omega) f_x(\omega) \end{aligned}$$

d'où

$$[6] \quad H(\omega) = \frac{f_{xy}(\omega)}{f_x(\omega)}$$

où  $f_{xy}$  est le spectre de variance croisé entre l'entrée et la sortie,  $f_x$  est le spectre de variance de l'entrée et  $\omega = 2\pi f$ , avec  $f$  la fréquence. L'équation 6 est une preuve que la convolution dans le domaine temporel correspond à une multiplication dans le domaine fréquentiel.

Il est possible d'estimer  $f_x$  et  $f_{xy}$  à partir d'une troncature  $m$  appliquée aux transformées de Fourier de  $\gamma_x$  et de  $\gamma_{xy}$ , lesquels sont représentés respectivement par  $C_x$  (Éq. 7) et par  $C_{xy}$  et  $C_{yx}$  (Éqs. 8 et 9) (Padilla et Pulido-Bosch 1995) :

$$[7] \quad C_x(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{n}$$

$$[8] \quad C_{xy}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{n}$$

$$[9] \quad C_{yx}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x})}{n}$$

où  $k$  varie de 0 à  $m$  et représente le décalage temporel et  $i$  est le pas dans le domaine temporel.

Une fonction de pondération  $D_k$  (Chatfield 1980; Mangin 1984; Padilla et Pulido-Bosch 1995; Larocque *et al.* 1998), aussi appelée filtre de Tukey, est nécessaire pour que les valeurs estimées soient non biaisées. Les spectres ainsi estimés deviennent :

$$[10] \quad f_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \left[ D_0 C_x(0) + 2 \sum_{k=1}^m D_k C_x(k) \cos \omega k \right]$$

$$[11] \quad f_{xy}(\omega) = c(\omega) - iq(\omega)$$

où

$$[12] \quad c(\omega) = \frac{1}{\pi} \left\{ D_0 C_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m D_k [C_{xy}(k) + C_{yx}(k)] \cos \omega k \right\}$$

$$[13] \quad q(\omega) = \frac{1}{\pi} \left\{ \sum_{k=1}^m D_k [C_{xy}(k) - C_{yx}(k)] \sin \omega k \right\}$$

Les équations 10 et 11 représentent, respectivement, les transformées de Fourier des fonctions de  $\gamma_x$  et de  $\gamma_{xy}$ , avec

$$[14] \quad D_k = \frac{(1 + \cos \frac{\pi k}{m})}{2}$$

Dans ce travail, l'analyse spectrale croisée est utilisée pour déterminer la réponse impulsionnelle entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire à partir de l'application de l'équation 6, celle-ci étant plus simple à utiliser que l'équation 4 dû à son caractère multiplicatif. Cette méthode est une variante par rapport, par exemple, à la méthode de substitution dont l'application aux données d'entrée et de sortie résulte en un ensemble d'équations algébriques mal conditionné. Cette caractéristique est connue depuis plus de 30 ans (Labat *et al.* 2000).

Cette approche quoique simple nécessite la détermination de la transformée inverse de Fourier, laquelle doit être appliquée sur les réponses impulsionnelles afin qu'elles soient représentées dans le domaine temporel. Ceci permet l'application de la convolution sur les données d'entrée et les réponses impulsionnelles et, par conséquent, la reconstitution des données de sortie.

### Transformée de Fourier inverse discrète

La théorie concernant la transformée de Fourier inverse discrète est développée par exemple dans l'ouvrage de Smith (1997). Cette étude vise les systèmes physiquement réalisables, pour lesquels l'expression de la transformée de Fourier inverse discrète donnée par l'équation 15 est définie à partir de  $k = 0$ .

$$[15] \quad H(i) = \sum_{k=0}^{m/2} \text{Re} \overline{H}(k) \cos(2\pi k i / m) + \sum_{k=0}^{m/2} \text{Im} \overline{H}(k) \sin(2\pi k i / m)$$

expression dans laquelle  $H(i)$  est la réponse impulsionnelle calculée dans le domaine temporel, où  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ .  $Re\bar{H}(k)$  et  $Im\bar{H}(k)$  sont, respectivement, les parties réelle et imaginaire normalisées de la réponse impulsionnelle, où  $k = 0, 1, 2, \dots, m/2$ . Les équations 16 représentent la normalisation de  $ReH(k)$  et  $ImH(k)$ .

$$[16] \quad Re\bar{H}(k) = \frac{ReH(k)}{m/2} \quad \text{et} \quad Im\bar{H}(k) = \frac{ImH(k)}{m/2}, \quad k = 1, 2, \dots, (m/2)-1$$

sauf pour les deux cas limites,

$$Re\bar{H}(0) = \frac{ReH(0)}{m} \quad \text{et} \quad Re\bar{H}(m/2) = \frac{ReH(m/2)}{m}$$

Cette normalisation est effectuée afin d'éviter des problèmes numériques durant l'exécution des programmes qui calculent la transformée inverse de Fourier.

### **Convolution discrète pour les systèmes à mémoire finie**

Après la détermination de la réponse impulsionnelle dans le domaine temporel, il faut appliquer la convolution sur les données d'entrée  $x(t)$  et la réponse impulsionnelle du système  $h(t)$  pour récupérer les données de sortie  $y(t)$ . Dans l'application qui suit l'entrée est constituée des pluies  $P(mm)$  et la sortie des débits  $Q(m^3/s)$ .

Le mécanisme qui conduit les pluies sur un bassin versant jusqu'à la rivière est très complexe. Il dépend des conditions d'évapotranspiration, d'interception, d'humidité du sol et des écoulements souterrains, lesquels dépendent des événements passés de pluie. Ces paramètres contrôlent le stockage et les écoulements de surface des bassins versants. Cette dépendance de l'état des bassins versants par rapport aux événements passés de pluie est traduite par la mémoire des systèmes hydrologiques. Ces systèmes sont représentés mathématiquement par la forme discrète de l'intégrale de convolution donnée par :

$$[17] \quad Q_i = \sum_{j=1}^m h_j p_{i-j+1} \quad \text{avec} \quad i = 1, 2, \dots, n+m-1$$

où  $m$  est la longueur de la mémoire du système qui modélise l'effet d'une pluie continue qui s'étend sur  $m$  intervalles de durée  $T$ . Cette durée dépend de la fréquence des données : journalières, horaires, etc.; et  $n$  est le nombre d'observations. Dans ce travail, on fait l'hypothèse que la longueur de la mémoire du système,  $m$  (Papazafiriou 1976) définit aussi le point de troncature utilisé pour les calculs des réponses impulsionnelles.

Lorsque le premier débit est nul, les modèles hydrologiques basés sur la convolution discrète (Éq. 17) estiment un débit également nul. Toutefois, sur le bassin versant test, le premier débit n'est pas nul (Fig. 5). Nous procédons alors à la minimisation de l'erreur résiduelle par les moindres carrés pour échapper à cette limitation et améliorer les résultats du modèle.

### Algorithme

En résumé, l'algorithme global appliqué comprend les étapes suivantes :

- L'analyse spectrale croisée est utilisée pour déterminer les réponses impulsionnelles entre les entrées (pluies) et les sorties (débits) d'un système linéaire à partir de l'application de l'équation 6 avec la troncature  $m$ .
- La transformée inverse de Fourier (Éq. 15) est appliquée sur ces réponses afin qu'elles soient représentées dans le domaine temporel.
- La convolution discrète (Éq. 17) est appliquée sur les données d'entrée (pluies) et les réponses impulsionnelles ( $h_j$ ) permettant la reconstitution des données de sortie (débits) dans le domaine temporel.
- La minimisation de l'erreur résiduelle par les moindres carrés est appliquée sur les débits pour éviter que le premier débit soit nul et pour améliorer les résultats du modèle.

### Critères de performance

L'erreur quadratique moyenne,  $MSE$  est un critère utile pour mesurer la performance d'un modèle simulant les débits d'un cours d'eau sur une certaine période de temps. Ce critère s'exprime comme :

$$[18] \quad MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}$$

Cependant pour obtenir des valeurs en  $m^3/s$ , la valeur optimale de  $m$  s'obtient en minimisant la racine carrée de  $MSE$  entre les débits observés et simulés. Ce coefficient est connu sous le nom de  $RMS$  (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) et il est donné par :

$$[19] \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}}$$

où  $Q_{oi}$  et  $Q_{si}$  sont respectivement, les débits observés et simulés au temps  $i$  et  $n$  est le nombre total d'observations.

Un autre critère de performance appliqué sur les résultats de ce modèle est le rapport volumétrique ou l'indice volumétrique d'ajustement. Ces deux coefficients sont identiques et calculés de la manière suivante :

$$[20] \quad RV = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{si}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}}$$

Ce critère est utilisé pour évaluer la concordance entre le volume d'écoulement total observé et le volume d'écoulement total simulé. Un coefficient proche de 1 implique que le modèle simule adéquatement le volume total d'écoulement sur le bassin versant. Si la valeur de  $RV$  est plus petite que 1, le modèle sous-estime le volume total d'écoulement, par contre si la valeur de  $RV$  est

plus grande que 1, le modèle surestime le volume total d'écoulement. En effet, il est possible que le modèle sous-estime les débits sur certaines périodes et les surestime sur d'autres périodes et que le rapport volumétrique obtenu soit proche de 1, bien que la simulation des débits sur tout l'hydrogramme ne soit pas satisfaisante. À cause de cela, l'erreur quadratique moyenne est utilisée pour évaluer l'ajustement du modèle par rapport aux débits observés.

Étant intéressé à la production d'énergie hydro-électrique pour des petits bassins versants de l'Amazonie, il nous faut aussi des critères de performance pour évaluer l'ajustement des courbes de débits classés. Dans ce cas, les critères choisis sont : le biais en pourcentage (erreur absolue relative) et le *RMS*, calculés entre les débits classés observés et simulés, donnés respectivement par :

$$[21] \quad BIAIS = \frac{|Q_{oc} - Q_{sc}|}{Q_{oc}} 100$$

$$[22] \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oc} - Q_{sc})^2}{n}}$$

où  $Q_{oc}$  et  $Q_{sc}$  sont, respectivement, les débits observés et simulés classés et  $n$  est le nombre total d'observations.

### **Bassin versant test**

Le petit bassin versant test est localisé 160 km à l'est de la ville de Belém, région Nord du Brésil (Fig. 1). Il a une superficie de 82 km<sup>2</sup> et son relief est caractéristique de la plaine amazonienne. Le régime pluviométrique est du type équatorial de transition, avec une période pluvieuse plus marquée qui dure de fin décembre à fin juin et une saison sèche qui dure de mi-septembre à mi-décembre (Fig. 2). Il est le seul petit bassin dans la région possédant de bonnes séries de débit nécessaires à la détermination de la réponse impulsionnelle, mais il ne dispose pas directement de

données de pluie. Ainsi, on retient les données de pluie de la station météorologique la plus proche de la station hydrométrique (tableau 1), distante de 15 km environ. La seconde station météorologique la plus proche est à 31,5 km. Cette faible densité de stations météorologiques et la distance relativement faible entre la station météorologique et le bassin test, ne justifient pas dans ce cas, l'utilisation d'une pluie moyenne. La corrélation entre les séries de ces deux stations est égale à 0,73 pour une pluie moyenne de 10 jours sur les 5 ans de données communs disponibles. Les régimes pluviométriques sont donc similaires, ce qui valide la série de pluies du bassin versant test.

Les séries de pluie et de débit ont été mesurées au pas de temps journalier et pour cette étude une période d'enregistrement de 7 ans a été retenue (1993 à 1999). La figure 2 présente le pluviogramme et l'hydrogramme journalier moyen et la figure 3 les courbes des débits classés brutes et lissés pour cette période. La courbe lissée est utilisée par la suite dans l'étalonnage et dans la validation du modèle.

La pluie, présentée sous forme de moyenne mobile de 7 jours sur les 7 ans, fait bien ressortir la saisonnalité des pluies dans la région, saisonnalité qui se retrouve également dans les débits. Un décalage d'à peu près 2 mois existe entre les pluies et les débits, soulignant l'effet tampon du bassin versant. Hors de la période sèche, le bassin est presque toujours saturé dû au climat pluvieux de la région.

Les valeurs moyennes présentées à la figure 2 et la superficie  $S$  ( $\text{km}^2$ ) permettent de déterminer à partir du bilan hydrologique [ $E_m = P_m - 86,4(Q_m/S)$ ], que l'évapotranspiration moyenne journalière sur le bassin test est égale à 4,82 mm/j. Cette valeur est voisine de  $E_m = 4,60$  mm/j qui correspond à l'évapotranspiration moyenne de la région (Costa et Foley 1999), ce qui valide, à l'échelle moyenne journalière, les données utilisées dans l'étude.

En outre, dans cette approche les pertes journalières dues à l'évapotranspiration ne sont pas prises en compte, car seules les données brutes de pluie sont disponibles. Ainsi, le modèle considère que toute la pluie mesurée est convertie en débit. Papazafiriou (1976), Kachroo *et al.* (1992c), Ahsan et O'Connor (1994) et Labat *et al.* (2000) prônent cette simplification et indiquent qu'elle n'altère pas les résultats du modèle de manière significative.

### Étalonnage

L'étalonnage du modèle est effectué sur les 4 premières années de données, de 1993 à 1996. Il comprend l'optimisation de la longueur de la réponse impulsionnelle,  $m$ , laquelle dépend du décalage,  $k$ , la fonction objectif étant représentée par la moyenne quadratique (Éq. 19). Ce processus d'optimisation est basé sur la méthode des approximations successives.

Ainsi le modèle proposé est appliqué sur les données de pluie et de débit du petit bassin versant test pour la période considérée. Les valeurs de  $RMS$  sont déterminées en fonction de  $m$  pour une certaine valeur de  $k$ , la procédure est répétée en supposant une autre valeur de  $k$ .

La figure 4 présente les courbes obtenues en fonction de  $m$  et  $k$ , la valeur de  $RMS$  minimum est égale à 0,3112 pour  $k = 3$ , avec  $m = 295$  jours. L'analyse de cette figure détermine que la longueur de la réponse impulsionnelle optimale entre la pluie (cause) et le débit (effet) est de 295 jours quelle que soit la valeur de  $k$ , à l'exception de  $k = 1$ , dans ce cas  $m = 270$ . Cela signifie qu'on a besoin d'un échantillon (*lag*) de 295 jours sur les 4 années de données pour établir les corrélations croisées entre les pluies et les débits et les autocorrélations entre les pluies, ce qui détermine la réponse impulsionnelle optimale du système. La figure fait aussi ressortir une plage entre 270 jours et 365 jours à l'intérieur de laquelle on obtient la meilleure relation entre les signaux de pluie et de débit.

La figure 5 présente les hydrogrammes observé et simulé avec  $m = 295$  jours et  $k = 3$  jours, ainsi que les pluies journalières pour la période. Elle fait ressortir la bonne réaction du modèle aux

données d'entrée et souligne l'effet tampon du bassin versant déjà noté à la figure 2. D'autre part, on peut remarquer que le modèle estime mieux les étiages que les crues, car celles-ci sont sous-estimées pour les années 1994 et 1995. Pour les étiages, qui se retrouvent entre les mois de septembre et décembre, la longueur de la réponse impulsionnelle optimale,  $m = 295$  jours, indique que le modèle a besoin des 6 mois de pluies passées pour simuler ces basses eaux. L'origine de ces 6 mois coïncide avec le maximum des pluies de mars (Fig. 2), donc avec la fin du remplissage du bassin qui a pour source l'infiltration de la pluie. Ce remplissage est suivi d'une vidange où une part du débit provient du volume emmagasiné. L'infiltration affecte un peu l'hypothèse de linéarité, ce qui explique conjointement avec l'hypothèse d'invariabilité dans le temps entre les pluies et les débits, la sous-estimation des crues. Cela est aussi remarqué par Papazafiriou (1976), Kachroo *et al.* (1992c), et Labat *et al.* (2000). Par contre, la simulation d'un évènement de crue isolée d'avril 1995 (Fig. 6), où l'hypothèse de linéarité est respectée, démontre que le modèle réagit bien et  $m = 7$  est de l'ordre de quelques jours, comme on peut s'y attendre sur des petits bassins.

Cependant la sous-estimation des crues n'est pas cruciale pour l'approche proposée qui, rappelons-la, vise à la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins amazoniens en vue de la production d'énergie hydro-électrique.

L'autre critère utilisé pour analyser la performance du modèle est le rapport volumétrique (Éq. 20). Le résultat de son application sur les volumes totaux des débits simulés avec les paramètres optimaux ( $m = 295$  et  $k = 3$ ) est égal à 1. Ce résultat montre que le modèle simule adéquatement le volume total d'écoulement sur le petit bassin versant test. Il montre aussi que la pluie rentrant dans le système est totalement transformée en débit, respectant les hypothèses du modèle.

Comme on est intéressé à la production hydro-électrique, il faut comparer les courbes des débits classés simulés aux courbes des débits classés observés. Ces courbes et la courbe des biais correspondant sont présentées à la figure 7.

En analysant cette figure, il est possible de remarquer que les biais entre les débits classés observés lissés ( $Q_{col}$ ) et les débits classés simulés à  $m = 295$  et  $k = 3$  ( $Q_{cs295}$ ,  $k = 3$ ) ne dépassent pas 11% pour la plage des débits entre  $Q_{5\%}$  et  $Q_{89\%}$ . Si on considère la plage allant de  $Q_{72\%}$  à  $Q_{85\%}$ , les biais ne dépassent pas 5%. Cette plage de débits est suffisante pour la planification de la production d'énergie de systèmes isolés qui ne fonctionnent pas à l'année longue, tels que les micro-centrales envisagées ici (Penche 1998). Pour les débits ayant une fréquence de dépassement inférieure à 5%, on remarque que les biais sont supérieurs à 11% et que la courbe des débits classés simulés est au-dessous de la courbe des débits classés observés. Ceci confirme que le modèle sous-estime les débits de crues.

### Validation

Les trois dernières années de données sont utilisées pour valider le modèle. Ainsi, on applique à ces données les valeurs optimales de  $m = 295$  et  $k = 3$  jours déterminées dans l'étalonnage du modèle. La figure 8 présente les hydrogrammes observé et simulé pour les années 1997 à 1999, ainsi que les pluies journalières pour la période.

En analysant cette figure, il est à remarquer que le modèle estime mieux les étiages que les crues, comme il était remarqué dans l'étalonnage du modèle. Dans ce cas, les crues sont légèrement sous-estimées pour les années 1997 et 1999 et surestimées pour l'année 1998.

En analysant la figure des débits classés (Fig. 9), il est possible de remarquer que les biais entre les débits classés observés lissés ( $Q_{col}$ ) et les débits classés simulés à  $m = 295$  et  $k = 3$  ( $Q_{cs295}$ ,  $k = 3$ ) ne dépassent pas 7% pour la plage des débits entre  $Q_{5\%}$  et  $Q_{94\%}$ . Ce résultat est plus performant que celui de l'étalonnage, ce qui favorise la validation du modèle pour l'application pro-

posée dans cette étude. Pour les débits ayant une fréquence de dépassement inférieure à 5%, on remarque que les biais sont supérieurs à 7% et que la courbe des débits classés simulés est au-dessous de la courbe des débits classés observés.

### **Analyse de sensibilité**

Dans ce travail on effectue une analyse de sensibilité du modèle à la taille des échantillons de pluie et de débit en estimant le dommage causé lorsque les échantillons sont tronqués. Les courbes des débits classés simulés avec les échantillons tronqués devraient être pareilles à celle obtenue dans la validation du modèle. Cette analyse permet d'estimer le temps nécessaire à l'évaluation des débits des petits bassins envisagés ici, ce qui est important dans la phase d'avant projet d'exploitation de l'énergie hydro-électrique.

Les données utilisées dans l'étalonnage du modèle servent également pour cette analyse. La taille de l'échantillon est réduite progressivement. À chaque étape l'étalonnage du modèle est effectué suivant l'optimisation de la réponse impulsionnelle. La convolution est appliquée sur les 3 ans (97-99) de données de pluie utilisées dans la validation du modèle et sur la réponse impulsionnelle optimale calculée à partir de la réduction de l'échantillon.

Le tableau 2 indique que le *RMS* appliqué aux séries de débits n'est pas sensible à la troncature des données, car il est autour de 0,4 quel que soit l'échantillon. Pour les débits classés, l'analyse montre qu'un échantillon de pluies et de débits de 1,5 an ( $RMS = 0,0755$ ) est suffisant pour appliquer le modèle sur le bassin versant test. Cette analyse détermine également que les courbes des débits classés sont comparables quel que soit le mois de janvier entre 1993 et 1995 pris comme origine. La position de cette origine révèle que le modèle a besoin de deux périodes de crues pour placer les étiages et ainsi établir l'échantillon qui sert à simuler tout l'hydrogramme. Les résultats présentés concernent la période de janvier 1993 à juin 1994.

La figure 10 présente l'hydrogramme observé pour la validation du modèle et les hydrogrammes simulés avec les paramètres optimaux déterminés dans l'étalonnage ( $Q_{s295}$ ,  $k = 3$ ) et dans l'analyse de sensibilité avec l'échantillon de 1,5 an ( $Q_{s261}$ ,  $k = 3$ ). Cette figure indique que les hydrogrammes simulés sont comparables à l'hydrogramme observé.

La figure 11 compare la courbe des débits classés simulés avec l'échantillon de 1,5 an aux courbes des débits classés observés lissés et simulés dans la validation du modèle. Les biais entre ces courbes ne dépassent pas 12% pour les débits ayant une fréquence entre  $Q_{3\%}$  et  $Q_{95\%}$ . Cette comparaison montre que le modèle simule raisonnablement les courbes des débits classés pour la période de validation, soit avec les paramètres optimaux déterminés dans l'étalonnage ou avec ceux déterminés dans l'analyse de sensibilité du modèle.

Ce résultat est important, car il détermine la taille minimale des séries de débit et de pluie nécessaires à l'application du modèle, et permettent donc de déterminer l'effort de relevé de données.

### **Conclusion**

Cette étude a permis de mettre au point un modèle hydrologique pluie-débit linéaire, lequel est appliqué sur un petit bassin versant de l'Amazonie afin de restituer la courbe des débits classés pour la production d'énergie hydro-électrique, et d'analyser sa sensibilité à la taille de l'échantillon. Ce modèle à mémoire finie est représenté par l'intégrale de convolution de la pluie et de la réponse impulsionnelle du système. Celle-ci est optimisée et utilisée dans l'étalonnage du modèle. Les hypothèses simplificatrices admises sont la linéarité et l'invariabilité dans le temps du processus pluie-débit. Ces hypothèses ont été adoptées en raison de la faible taille des bassins versants visés et du climat de la région. En effet ces bassins sont petits et les processus dynamiques sont moins complexes que ceux des grands bassins, au moins à l'échelle spatiale. De plus, les données d'évapotranspiration ne sont pas disponibles et le modèle considère que toute la pluie mesurée est convertie en débit.

Les hydrogrammes et les courbes des débits classés simulés montrent que le modèle estime raisonnablement bien les débits d'étiages. Il sous-estime par contre les débits de crues, ce qui est attribuable aux hypothèses simplificatrices qui ne sont pas toujours respectées dans les périodes d'étiages. Pour les courbes de débits classés, la validation du modèle montre une bonne estimation des débits ayant une fréquence au dépassement entre  $Q_{5\%}$  et  $Q_{94\%}$ . Les biais pour cette plage ne dépassent pas 7%, confirmant que le modèle estime raisonnablement les débits moyens et les débits d'étiages.

L'analyse de sensibilité indique qu'un échantillon de pluies et de débits de 18 mois est suffisant pour obtenir des résultats comparables aux résultats de validation du modèle. Cette taille de 18 mois est importante, car elle permet de limiter les campagnes de mesure de débit en vue d'un étalonnage du modèle sur un bassin non jaugé.

Malgré les hypothèses simplificatrices, le modèle répond à l'objectif principal qui est la simulation de courbes de débits classés de sites non jaugés, en vue de la production d'énergie hydroélectrique pour les innombrables petites communautés de l'Amazonie. Cependant, le modèle ne peut pas être recommandé pour la simulation d'hydrogrammes.

### **Remerciements**

Nos remerciements s'adressent au CNPq - conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil (conseil national de développement scientifique et technologique du Brésil) pour son soutien financier.

## **Bibliographie**

- Ahsan, M., et O'Connor, K. M. 1994. A simple non-linear rainfall-runoff with a variable gain factor. *Journal of Hydrology*, **155** : 151-183.
- Box, G. E. P., et Jenkins, G. M. 1976. *Time series and analysis forecasting and control*. Holden-Day, San Francisco, CA.
- Chatfield, C. 1980. *The analysis of time Series: an introduction*. 2nd ed. Chapman and Hall, London, England.
- Costa, M. H., et Foley, J. A. 1999. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, **104(D12)** : 14,189-14,198.
- Dreiss, S. J. 1982. Linear kernels for karst aquifers. *Water Resources Research*, **18(4)** : 865-876.
- Eagleson, P. S., Mejia-R, R., et March F. 1966. The computation of optimum realizable unit hydrograph. *Water Resources Research*, **2(4)** : 755-764.
- Goring, D. G. 1984. Flood routing by a linear systems analysis technique. *Journal of Hydrology*, **69** : 59-76.
- Johansson, T. B., Kelly, H., et Reddy, A. K. N. 1993. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Island Press, Washington (D.C.).
- Kachroo, R. K. 1992a. River flow forecasting. Part 1. A discussion of the principles. *Journal of Hydrology*, **133** : 1-15.
- Kachroo, R. K., et Liang, G. C. 1992b. River flow forecasting. Part 2. Algebraic development of linear modelling techniques. *Journal of Hydrology*, **133**: 17-40.
- Kachroo, R. K., Sea, C. H., Warsi, M. S., Jemenez, H., et Saxena, R. P. 1992c. River flow forecasting. Part 3. Applications of linear techniques in modelling rainfall-runoff transformations. *Journal of Hydrology*, **133** : 41-97.
- Labat, D., Ababou, R., et Mangin, A. 1999. Linear and nonlinear input/output models for karstic

- springflow and flood prediction at different time scales. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **13** : 337-364.
- Labat, D., Ababou, R., et Mangin, A. 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: Convolution and spectral analyses. *Journal of Hydrology*, **238** : 123-148.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., et Banton, O. 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large Karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, **205** : 217-231.
- Mangin, A. 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, **67** : 25-43.
- Max, J. et collaborateurs. 1972. Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. 4 th ed. Masson, Paris, France.
- Mesquita, A. L. A., Blanco, C. J. C., et Lobato, R. V. 1999. Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, estado do Pará, Brasil, rapport FUNTEC 115-00/97.
- Padilla, A., et Pulido-Bosch, A. 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, **168** : 73-89.
- Papazafiriou, Z. G. 1976. Linear and nonlinear approaches for short-term runoff estimations in time-invariant open hydrologic systems. *Journal of Hydrology*, **30** : 63-80.
- Penche, C. 1998. Layman's handbook on how to develop a small hydro site. 2nd ed. Commission of the European Communities.
- Rodriguez, I. 1967. The application of cross-spectral analysis to hydrologic time series. *Hydrology Papers*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 24.
- Sherman, L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News-Record*, **108** : 501-505.

Smith, S. W. 1997. The scientist and engineer's guide to digital signal processing. 2nd ed. Technical Publishing, San Diego, CA.

Spolia, S. K., Chander S., et O'Connor, K. M. 1980. An autocorrelation approach for parameter estimation of fractional order equal-root autoregressive models using hypergeometric functions. *Journal of Hydrology*, **47** : 1-17.

## Liste des Symboles

*BIAIS* erreur absolue relative en pourcentage

$c$  partie réelle de  $f_{xy}$

$C_x$  autocovariance discrète de  $x(t)$

$C_{xy}$  covariance croisée discrète entre  $x(t)$  et  $y(t)$

$C_{yx}$  covariance croisée discrète entre  $y(t)$  et  $x(t)$

$D_k$  filtre de Tukey

$E[...]$  espérance mathématique

$E_m$  évapotranspiration moyenne

$f$  fréquence

$f_x$  spectre de variance de  $x(t)$

$f_{xy}$  spectre de variance croisé entre  $x(t)$  et  $y(t)$

$H(i)$  réponse impulsionnelle discrète calculée dans le domaine temporel

$h(u)$  réponse impulsionnelle du système

$H(\omega)$  réponse impulsionnelle calculée dans le domaine fréquentiel

$i$  pas dans le domaine temporel ou imaginaire

$ImH(k)$  partie imaginaire de la réponse impulsionnelle

$Im\bar{H}(k)$  partie imaginaire normalisée de la réponse impulsionnelle

$k$  décalage temporel

$m$  longueur de la mémoire du système ou point de troncature pour les calculs des réponses impulsionnelles

*MSE* erreur quadratique moyenne

$n$  nombre d'observations

$P$	pluie
$P_m$	pluie moyenne
$q$	partie imaginaire de $f_{xy}$
$Q$	débit
$Q_m$	débit moyenne
$Q_{oc}$	débit observé classé
$Q_{oi}$	débit observé au temps $i$
$Q_{sc}$	débit simulé classé
$Q_{si}$	débit simulé au temps $i$
$ReH(k)$	partie réelle de la réponse impulsionnelle
$\overline{ReH}(k)$	partie réelle normalisée de la réponse impulsionnelle
$RMS$	moyenne quadratique
$RV$	rapport volumétrique
$S$	superficie
$x(t)$	données d'entrée
$y(t)$	données de sortie
$\gamma_{xy}$	covariance croisée continue entre $x(t)$ et $y(t)$
$\gamma_x$	autocovariance continue de $x(t)$
$\tau$	lag d'un processus stationnaire
$\omega$	fréquence angulaire

**Tableau 1.** Stations hydrologiques.

Type de station	Latitude	Longitude
Hydrométrique	-1°39'06''	-47°07'03''
Pluviométrique	-1°33'02''	-47°07'01''

**Tableau 2.** RMS pour les échantillons tronqués.

Échantillon (ans)		4	3	2	1,5	1
RMS (m <sup>3</sup> /s)	Série de débits	0,3799	0,3986	0,3791	0,3815	0,4307
	Débits classés	0,0968	0,1660	0,0937	0,0755	0,3166

## Liste des figures

Fig. 1. Petit bassin versant test.

Fig. 2. Pluviogramme et hydrogramme journalier moyen sur les 7 ans de données.

Fig. 3. Courbes des débits classés brutes et lissés.

Fig. 4. Optimisation de la longueur de la réponse impulsionnelle  $m$ .

Fig. 5. Hydrogrammes et pluviogramme journaliers - Étalonnage.

Fig. 6. Hydrogramme d'une crue isolée d'avril 1995 - Simulation.

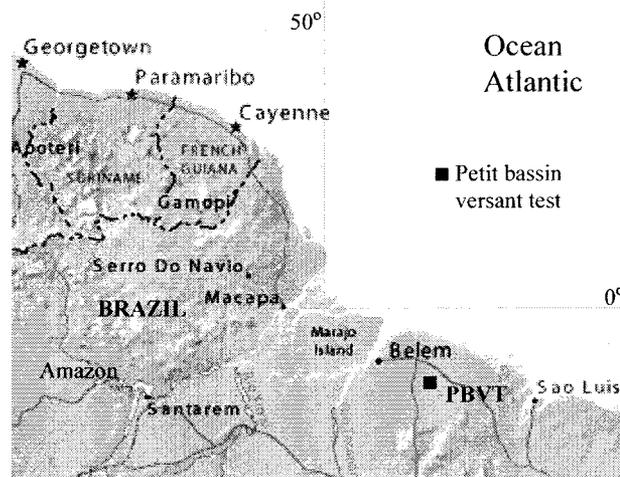
Fig. 7. Courbes des débits classés - Étalonnage.

Fig. 8. Hydrogrammes et pluviogramme journaliers - Validation.

Fig. 9. Courbes des débits classés - Validation.

Fig. 10. Hydrogrammes journaliers - Analyse de sensibilité.

Fig. 11. Courbes des débits classés - Analyse de sensibilité.



**Fig. 1. Petit bassin versant test.**

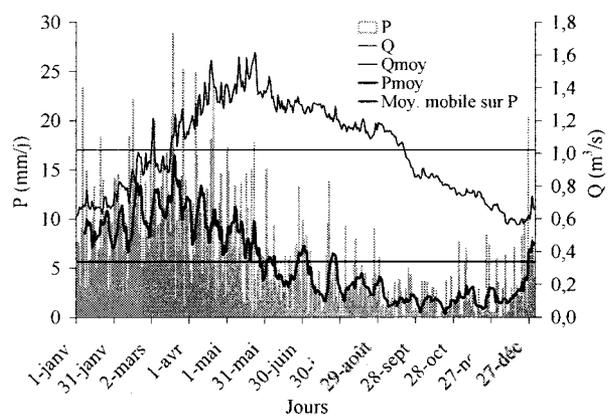
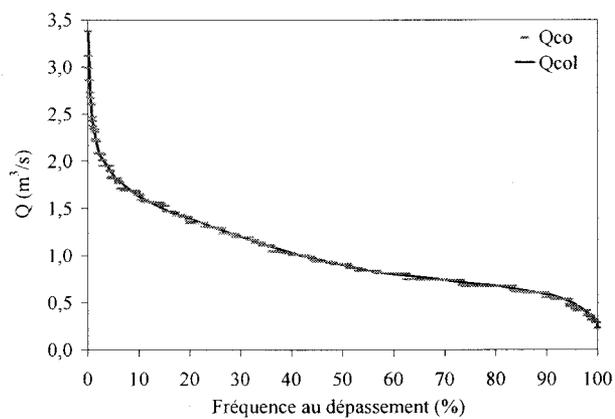
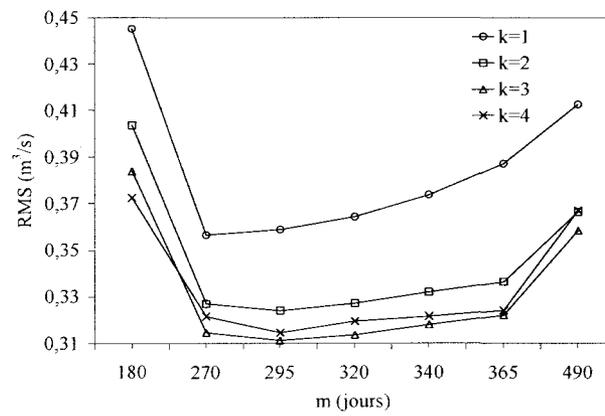


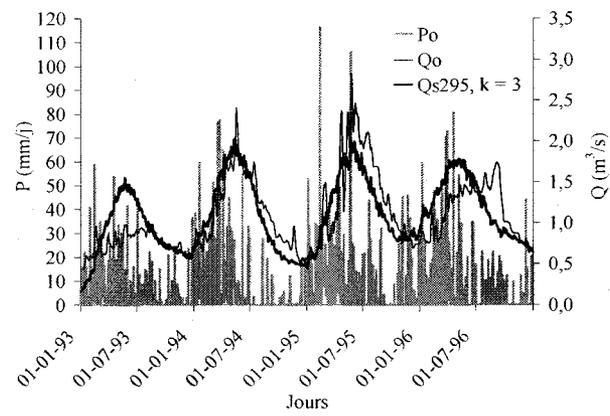
Fig. 2. Pluviogramme et hydrogramme journalier moyen sur les 7 ans de données.



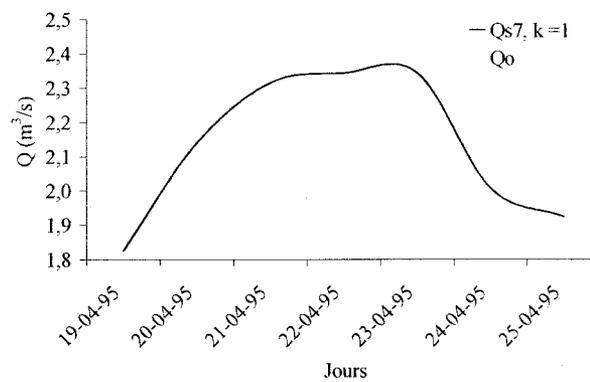
**Fig. 3. Courbes des débits classés brutes et lissés.**



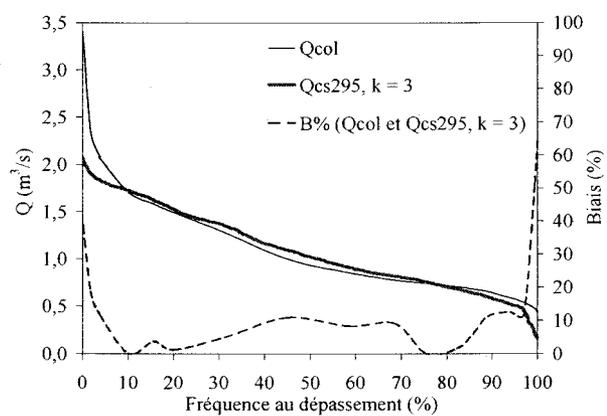
**Fig. 4. Optimisation de la longueur de la réponse impulsionnelle  $m$ .**



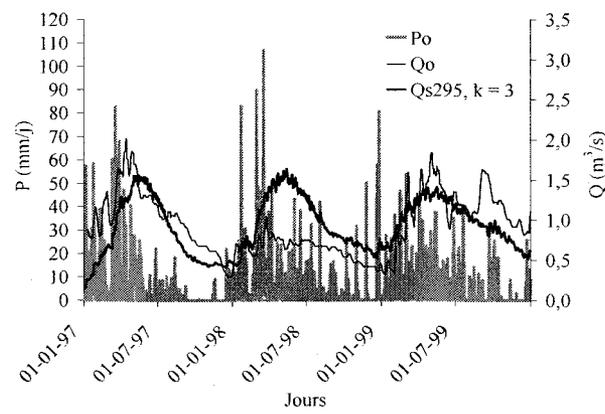
**Fig. 5. Hydrogrammes et pluviogramme journaliers - Étalonnage.**



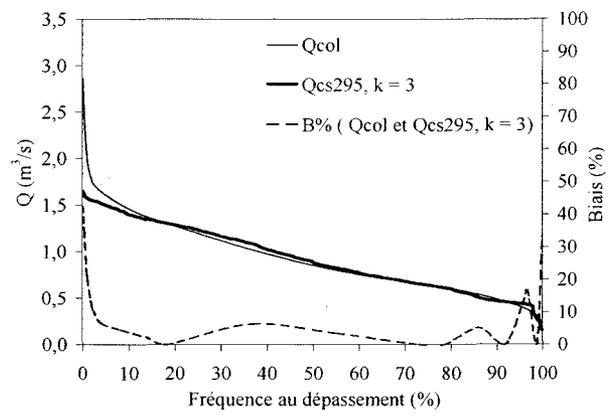
**Fig. 6. Hydrogramme d'une crue isolée d'avril 1995 - Simulation.**



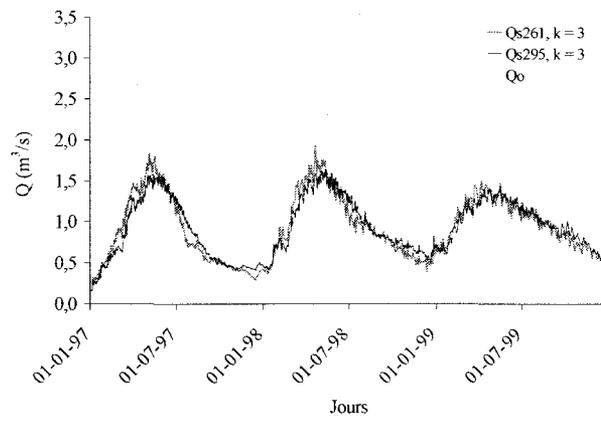
**Fig. 7. Courbes des débits classés - Étalonnage.**



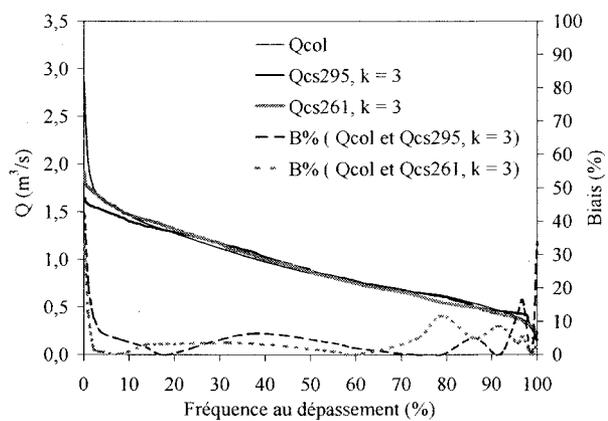
**Fig. 8. Hydrogrammes et pluviogramme journaliers - Validation.**



**Fig. 9. Courbes des débits classés - Validation.**



**Fig. 10. Hydrogrammes journaliers - Analyse de sensibilité.**



**Fig. 11. Courbes des débits classés - Analyse de sensibilité.**

## Chapitre 5

### Article 3

---

#### **Transférabilité d'un modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie.**

Claudio J. C. Blanco, Yves Secretan et Anne-Catherine Favre.

Institut National de la Recherche Scientifique – Eau, Terre et Environnement, 490, rue de la Couronne, Québec - QC, G1K 9A9, Canada.

Soumis au Journal des Sciences Hydrologiques.

Claudio J. C. Blanco, INRS-ETE, 490, rue de la Couronne, Québec - QC, G1K 9A9, Canada.

Téléphone : (418) 654-2530, poste : 4466. Fax : (418) 654-2600.

Courriel : [blancocjc@yahoo.com.br](mailto:blancocjc@yahoo.com.br).



**Résumé :** En Amazonie l'énergie hydro-électrique n'est actuellement produite que sur des grands bassins versants qui sont les seuls jaugés. Ceci laisse de côté les petits bassins versants pour lesquels on ne dispose que des données de pluie. Ainsi, l'objectif de ce travail est d'étudier la transférabilité d'un modèle pluie-débit pour simuler les débits classés en vue d'une planification de la production hydro-électrique. L'approche est basée sur le transfert de la réponse impulsionnelle calculée et étalonnée sur deux bassins jaugés permettant l'évaluation de la permutation de l'approche. Sur ces bassins test, on dispose respectivement de 7 ans et de 2 ans et 2 mois de données de pluie et de débit. L'analyse de sensibilité de l'étalonnage de la transférabilité détermine la taille minimale de la série de débits mesurés sur le bassin cible qui assure encore des résultats comparables à ceux étalonnés avec les échantillons de taille maximale de débits. Celle-ci évalue l'effort de mesures sur des sites non jaugés de la région en vue d'une production d'énergie hydro-électrique.

**Mots clés :** Transférabilité d'un modèle pluie-débit, petit bassin versant, Amazonie, courbe de débit classé.

**Abstract :** In Amazonia, hydroelectric power production has only been developed on large basins; they are the only gauged. It excludes innumerable small catchments on which only data about rainfall is available. Therefore, the objective of this paper is to study the transferability of rainfall-runoff model to simulate flow duration curves for the hydro power production. The approach is based on the transfer of the impulse response calculated and calibrated on two gauged catchments allowing the evaluation approach permutation between these two catchments. They have respectively 7 years and 2 years and 2 months of rainfall and runoff data. A sensitivity analysis of the transferability calibration to the sample size is carried out to determine the shortest flow period gauged on the receptor catchment, which produces results comparable to those calibrated with the maximum samples size. This analysis evaluates fieldwork on the ungauged sites of the region for the hydro power production.

Key words: Transferability of rainfall-runoff model, small catchment, Amazonia, flow duration curve.

## **Introduction**

En Amazonie, l'énergie hydro-électrique n'est actuellement produite que sur des grands bassins versants qui sont les seuls jaugés. En effet, le coût de la collecte des données hydrologiques est élevé en raison de la grande taille de la région, du fait que les voies d'accès sont rares et que le terrain est souvent non exploré. Ceci laisse de côté les innombrables petits bassins non jaugés qui pourraient être exploités par les petites communautés isolées avec l'implantation de micro-centrales hydro-électriques (Mesquita *et al.* 1999). Celles-ci ont une puissance inférieure à 100 kW (Johansson *et al.* 1993), ce qui semble peu, mais qui est suffisant pour répondre aux besoins des petites communautés.

Pour les petits bassins versants amazoniens, les pluies sont les seules données disponibles. Ainsi, l'objectif principal de cette approche est d'étudier la transférabilité d'un modèle hydrologique pluie-débit pour la simulation des courbes des débits classés dans une perspective de production d'énergie hydro-électrique. Ces courbes sont essentielles au dimensionnement des aménagements hydro-électriques, quelle que soit leur taille. Il s'agit également d'analyser la sensibilité de la transférabilité à la taille de l'échantillon de débits mesurés pour l'étalonnage et ainsi déterminer l'effort de mesures nécessaire à l'application sur un site non jaugé.

Il existe dans la littérature un nombre significatif d'ouvrages qui préconisent la transférabilité de données hydrologiques des sites jaugés vers les sites non jaugés. On peut mettre en relief les techniques de régionalisation de débits qui sont appliquées aux bassins de tailles variables (Tucci *et al.* 1995, Birikundavyi *et al.* 1997, Ouarda *et al.* 2001). D'autres méthodes basées sur des modèles de régression entre le débit et les caractéristiques physiographiques et climatologiques d'une région (Hirsch 1982, Mimikou 1984, Gan *et al.* 1991) sont appliquées aux petits bassins versants. Une méthode alternative souvent utilisée sur ces bassins préconise la régionalisation des paramètres de modèles pluie-débit ou de modèles conceptuels (Nash et Sutcliffe 1970). Parmi les

auteurs qui présentent cette méthode, on peut mentionner Servat et Dezetter (1993), Seibert (1999) et Littlewood (2003).

La régionalisation de débits, la régression et la régionalisation des paramètres de modèles pluie-débit sont des méthodes qui ont besoin d'une bonne base de données pour être mises au point. Ainsi, ces méthodes ne peuvent pas être appliquées aux petits bassins étudiés ici, car on ne dispose que des données de pluie, ainsi que déjà mentionné plus haut.

La présente étude explore une alternative de transférabilité d'un modèle pluie-débit similaire à celle présentée par Camarasa et Tilford (2002). Ces auteurs explorent le transfert spatial de la fonction de la réponse impulsionnelle ou simplement de la réponse impulsionnelle calculée par le biais d'une fonction *single-input-single-output* (SISO) établie entre les pluies et les débits. Cette réponse est étalonnée sur un petit bassin jaugé et transférée vers un autre bassin qui est jaugé pour l'évaluation de la méthode. La méthode est appliquée à la simulation de crues sur deux petits bassins versants de Valence dans l'Est de l'Espagne.

Les principales différences entre la transférabilité présentée par Camarasa et Tilford et l'approche développée ici sont la méthode de calcul de la réponse impulsionnelle, la région d'application et les événements de débit simulés. Dans notre approche, la détermination de la réponse impulsionnelle est basée sur l'analyse spectrale croisée (Rodriguez 1967; Blanco *et al.* 2005) appliquée sur les séries de données de pluie et de débit. De plus, cette approche s'intéresse plus spécifiquement à la reconstitution des courbes des débits classés de deux petits bassins versants amazoniens en vue de la planification de la production d'énergie hydro-électrique.

### **Modèle hydrologique pluie-débit**

Cette approche utilise le modèle hydrologique développé par Blanco *et al.* (2005) qui est basé sur la relation de cause-effet entre les pluies et les débits. Ceux-ci sont considérés comme deux processus aléatoires et stationnaires. Des modèles pluie-débit sont présentés dans la littérature depuis

que Sherman (1932) a introduit le concept d'hydrogramme unitaire. Ils sont également utilisés par Rodriguez (1967), Papazafiriou (1976), Goring (1984), Kachroo (1992a), Camarasa et Tilford (2002).

Il est bien évident que la relation pluie-débit est non linéaire (Rodriguez 1967; Kachroo et Liang 1992b) et variante dans le temps. La principale source des non-linéarités est l'infiltration; l'autre source est due aux variations spatiales des bassins versants. La variabilité dans le temps est expliquée par la saisonnalité des séries chronologiques relatives à la pluie et au débit. Malgré cela, l'approche est basée sur des systèmes linéaires et invariants dans le temps, ce qui s'appuie sur le principe de la parcimonie d'Occum (Ahsan et O'Connor 1994) : s'il est possible d'expliquer le comportement dynamique des petits bassins à partir d'une approche plus simple, alors celle-ci sera préférée par rapport à une approche plus complexe.

Les hypothèses du modèle sont donc la linéarité et l'invariabilité dans le temps de la relation entre la pluie et le débit. Elles sont appuyées par la petite taille des bassins versants visés et par le climat de la région. Ainsi, les débits  $y(t)$  sont représentés par le produit de convolution entre la pluie  $x(t)$  et la réponse impulsionnelle dénotée par  $h(u)$  (Éq. 1).

$$[1] \quad y(t) = \int_0^t h(u)x(t-u)du$$

En appliquant l'analyse spectrale croisée à l'équation 1 (Rodriguez 1967), on peut démontrer que la réponse impulsionnelle s'exprime comme :

$$[2] \quad H(\omega) = \frac{f_{xy}(\omega)}{f_x(\omega)}$$

où  $f_{xy}$  est le spectre de variance croisé entre l'entrée et la sortie,  $f_x$  est le spectre de variance de l'entrée et  $\omega = 2\pi f$  et  $f$  la fréquence.

Les spectres  $f_{xy}$  et  $f_x$  sont estimés à partir d'une troncature  $m$  qui est appliquée aux transformées de Fourier de  $\gamma_x$  et de  $\gamma_{xy}$  (Blanco *et al.* 2005). Ces équations, récupérées après la troncature, sont représentées respectivement par  $C_x$  (Éq. 3) et par  $C_{xy}$  et  $C_{yx}$  (Éqs. 4 et 5) :

$$[3] \quad C_x(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{n}$$

$$[4] \quad C_{xy}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{n}$$

$$[5] \quad C_{yx}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x})}{n}$$

où  $C_x$  est l'autocovariance discrète de  $x(t)$ ,  $C_{xy}$  est la covariance croisée discrète entre  $x(t)$  et  $y(t)$ ,  $C_{yx}$  est la covariance croisée discrète entre  $y(t)$  et  $x(t)$ ,  $k$  varie de 0 à  $m$  et représente le décalage temporel entre les données  $x$  et  $y$  et  $i$  est le pas dans le domaine temporel.

La méthode d'analyse spectrale croisée est présentée dans les ouvrages de référence d'analyse de séries chronologiques (Box et Jenkins 1976; Chatfield 1980) et dans les ouvrages de traitement du signal, comme par exemple Max *et al.* 1972.

La détermination des réponses impulsionnelles dans le domaine fréquentiel implique qu'il faut appliquer la transformée inverse de Fourier (Smith 1997, Blanco *et al.* 2005) sur ces réponses pour les récupérer dans le domaine temporel. Cela permet l'application de la convolution entre les données d'entrée et les réponses impulsionnelles, en reconstituant les données de sortie. Dans cette étude l'entrée est la pluie et la sortie est le débit.

La dynamique hydrique d'un bassin versant est très complexe. Elle dépend de paramètres, tels que l'évapotranspiration, l'interception, l'infiltration et l'humidité du sol; et des écoulements sou-

terrains, qui dépendent des événements passés de pluie. Ces paramètres déterminent le stockage et les débits des bassins versants. Cette dépendance des systèmes hydrologiques par rapport aux événements passés de pluie est représentée mathématiquement par la forme discrète de l'intégrale de convolution donnée par :

$$[6] \quad Q_i = \sum_{j=1}^m h_j P_{i-j+1} \quad \text{avec} \quad i = 1, 2, \dots, n+m-1$$

où  $Q$  ( $m^3/s$ ) est le débit,  $h_j$  ( $m^2/s$ ) est la réponse impulsionnelle,  $P$  ( $mm$ ) est la pluie,  $m$  est la longueur de la mémoire du système (Papazafiriou 1976). Celle-ci modélise l'effet d'une pluie continue qui s'étend sur  $m$  intervalles de durée  $T$  qui dépend de la fréquence des données : journalières, horaires, etc.; et  $n$  est le nombre d'observations. Dans cette approche, on fait l'hypothèse que  $m$  définit aussi la troncature qui a été prise en compte dans les calculs des réponses impulsionnelles. Ainsi,  $m$  est la longueur de la réponse impulsionnelle du système linéaire et invariant dans le temps considéré entre les pluies et les débits.

Lorsque le premier débit est nul, les modèles basés sur l'équation 6 estiment un débit également nul. Toutefois, sur les petits bassins versants analysés ici, le premier débit n'est pas nul (Fig. 4). Nous procédons alors à la minimisation de l'erreur résiduelle par les moindres carrés pour échapper à cette limitation.

### **Critères de performance**

Pour étalonner le modèle sur les bassins test et optimiser les paramètres  $m$  et  $k$ , le critère utilisé est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne,  $RMS$ , lequel s'exprime comme :

$$[7] \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}}$$

Cependant pour étalonner la transférabilité du modèle, il faut un critère qui soit sans dimension et, par conséquent, indépendant de l'échelle des débits observés sur les bassins cibles. Ainsi, on utilise la racine carrée de l'erreur relative quadratique moyenne,  $RMSE$  qui est donnée par :

$$[8] \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{oi} - Q_{si}}{Q_{oi}} \right)^2}{n}}$$

Dans les équations 7 et 8,  $Q_{oi}$  et  $Q_{si}$  sont respectivement les débits observés et simulés au temps  $i$  et  $n$  est le nombre total d'observations.

Étant intéressé par la production d'énergie hydro-électrique sur des petits bassins versants de l'Amazonie, il nous faut des critères de performance pour évaluer l'ajustement des courbes des débits classés. Dans ce cas, les critères choisis sont : l'écart en pourcentage (erreur absolue relative) et le  $RMSE$ , calculés entre les débits classés observés et simulés, donnés respectivement par :

$$[9] \quad \text{ÉCART} = \frac{|Q_{oc} - Q_{sc}|}{Q_{oc}} 100$$

$$[10] \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{oc} - Q_{sc}}{Q_{oc}} \right)^2}{n}}$$

où  $Q_{oc}$  et  $Q_{sc}$  sont respectivement les débits classés observés et simulés et  $n$  est le nombre total d'observations.

### **Bassins versants test**

Le petit bassin versant test 1 a une superficie de 82 km<sup>2</sup> et il est localisé 160 km à l'est de la ville de Belém, région Nord du Brésil. Le petit bassin versant test 2 a une superficie de 162 km<sup>2</sup> et il

est localisé à 40 km au nord-est de la ville de Belém. La proximité relative de ces bassins (Fig. 1) implique qu'ils se rapportent à une même géomorphologie et climatologie, ce qui favorise la transférabilité du modèle, car les sols et le climat contrôlent le processus de conversion pluie-débit. En effet, cette région de l'Amazonie est formée par des terrains cénozoïques (Sampaio *et al.* 2002). Le régime pluviométrique est du type équatorial de transition, avec une période pluvieuse plus marquée qui dure de fin décembre à fin juin et une saison sèche qui dure de mi-septembre à mi-décembre (Fig. 2). De plus, le relief des deux bassins est caractéristique de la plaine amazonienne.

Le tableau 1 présente les coordonnées des stations pluviométriques et hydrométriques considérées dans ce travail et leurs périodes d'enregistrement. La pluie est enregistrée comme pluie totale journalière et le débit est la moyenne entre le débit mesuré à 7 h et à 17 h (ANEEL 1999). La figure 2 présente respectivement les pluviogrammes et les hydrogrammes journaliers moyens pour les deux bassins test.

Les pluies des deux bassins sont présentées sous forme de moyenne mobile de 7 jours (Fig. 2). Ces moyennes font bien ressortir la saisonnalité des pluies dans la région, saisonnalité qui se retrouve également dans les débits. Un déphasage d'à peu près 2 et 3 mois existe respectivement entre les pluies et les débits des bassins 1 et 2, soulignant l'effet tampon de ceux-ci. Hors de la période sèche, les bassins sont presque toujours saturés dû au climat pluvieux de la région.

Le bassin test 1 est le seul dans la région possédant de bonnes séries de débit (7 ans) nécessaires à l'étalonnage et à la validation du modèle pluie-débit (Blanco *et al.* 2005), mais il ne dispose pas directement de données de pluie. Ainsi, on retient les données de pluie de la station météorologique la plus proche de la station hydrométrique (tableau 1), distante de 15 km environ. La seconde station météorologique la plus proche est à 31,5 km. Cette faible densité de stations météorologi-

ques et la distance relativement petite entre la station météorologique et le bassin test 1 ne justifient pas, dans ce cas, l'utilisation d'une pluie moyenne.

Blanco *et al.* (2005) présentent deux façons de valider les pluies du bassin versant test 1. La première est par la détermination de la corrélation entre les séries des deux stations météorologiques les plus proches de la station hydrométrique. Elle est égale à 0,73 pour une pluie moyenne de 10 jours sur les 5 ans (1995-1999) communs de données disponibles, ce qui démontre que les régimes pluviométriques sont similaires. La deuxième façon est par l'application d'un bilan hydrologique moyen sur les données présentées à la figure 2(a) et qui permettent de calculer les pertes de pluie qui sont égales à 4,82 mm/j. Cette valeur est proche de l'évapotranspiration moyenne de la région qui est égale à 4,60 mm/j (Costa et Foley 1999). On peut donc supposer que toute la pluie infiltrée s'écoule par la rivière.

Les stations du bassin test 2 ont été désactivées et, par conséquent, la période d'enregistrement de données (2 ans et 2 mois) n'est pas récente. Par contre, ce bassin dispose directement des données de pluie. La corrélation entre les séries de pluie de ce bassin et celles de la ville de Belém à 40 km (Fig. 1), est égale à 0,74 pour une pluie moyenne de 10 jours sur la période d'enregistrement du 01/01/1967 au 15/05/1968 disponible et commune aux deux séries de pluie. Ce résultat démontre que les régimes pluviométriques observés sont similaires, validant la série de pluies du bassin 2. D'autre part, le même bilan hydrologique est appliqué sur les données moyennes de la figure 2(b). Dans ce cas, les pertes de pluie sont égales à 7,05 mm/j; elles sont plus grandes que celles du bassin 1 et que l'évapotranspiration moyenne de la région. Ce résultat doit être expliqué par la pluie infiltrée qui s'écoule vers les bassins adjacents.

Dans l'approche proposée, les pertes journalières dues à l'évapotranspiration ne sont pas prises en compte, car seules les données brutes de pluie sont disponibles. Ainsi, le modèle considère que toute la pluie mesurée est convertie en débit. Papazafiriou (1976), Kachroo *et al.* (1992c), Ahsan

et O'Connor (1994) et Labat *et al.* (2000) prônent cette simplification et indiquent qu'elle n'altère pas les résultats du modèle de manière significative. De plus, en Amazonie l'évapotranspiration est pratiquement constante (Zeng 1999) et pour le modèle proposé, la soustraction d'une constante aux valeurs de pluie ne change pas la réponse impulsionnelle (Éqs. 3, 4 et 5).

La figure 3 présente respectivement les courbes des débits classés brute et lissée pour le bassin test 1 et la courbe des débits classés brutes pour le bassin test 2. La courbe lissée est utilisée par la suite dans la comparaison des débits classés simulés et observés sur le bassin test 1 et la courbe brute est utilisée dans le même but sur le bassin test 2. Cette courbe se présente déjà suffisamment lisse et elle est donc utilisée directement pour la comparaison entre les débits classés simulés et observés.

### **Étalonnage du modèle sur chacun des bassins versants test**

L'étalonnage du modèle sur le bassin test 1 est appliqué sur les 4 premières années de données (1993-1996) (Blanco *et al.* 2005). Il comprend l'optimisation de la longueur de la réponse impulsionnelle,  $m$ , laquelle dépend du décalage temporel entre les données de pluie et de débit,  $k$ . Les paramètres  $m$  et  $k$  sont nécessaires pour calculer l'autocovariance entre les données de pluie (Éq. 3) et la covariance croisée entre les données de pluie et de débit (Éqs. 4 et 5), qui elles-mêmes sont nécessaires pour calculer  $f_{xy}$  et  $f_x$  et, par conséquent, la réponse impulsionnelle du système (Éq. 2). La fonction objectif de l'optimisation est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*RMS*). Ce processus d'optimisation est basé sur la méthode des approximations successives. Les valeurs de *RMS* sont calculées en fonction de  $m$  pour un  $k$  donné, le processus est répété pour une certaine plage de  $k$ . Pour le bassin test 1, les valeurs obtenues sont  $m = 295$  jours et  $k = 3$  jours (Blanco *et al.* 2005).

L'optimisation est également appliquée sur le bassin test 2, cependant l'échantillon de données est petit et l'étalonnage suit la procédure standard connue comme « off-line » ou non adaptative (Kachroo 1992a); elle utilise toutes les données disponibles pour étalonner le modèle.

Le tableau 2 présente les valeurs des paramètres  $RMS$ ,  $m$  et  $k$  déterminées lors de l'étalonnage du modèle par rapport aux séries de débits ( $sd$ ) et par rapport aux débits classés ( $dc$ ). L'étalonnage par rapport au  $dc$  sur le bassin 1 détermine une réponse impulsionnelle ( $m = 142$  jours) et un décalage ( $k = 1$  jour) plus courts que ceux déterminés par rapport aux  $sd$ . En effet, le paramètre  $m$  plus long est nécessaire pour placer les forts étiages du bassin 1 (Fig. 4(a)) dans le temps et, par conséquent, ces étiages établissent un décalage  $k$  plus long entre les données de pluie et de débit. D'autre part, dans l'optimisation par rapport aux  $dc$ , il ne faut plus placer les étiages dans le temps et les paramètres  $m$  et  $k$  déterminés sont plus courts. Dans l'étalonnage sur le bassin 2, les paramètres  $m$  et  $k$  sont les mêmes que ce soit pour les séries de débits ou pour les débits classés. Une explication plausible à la réaction différente du modèle sur les deux bassins versants, est la différence de variabilité des débits observés. En effet, la figure 4 montre que les débits sont moins variables sur le bassin 2, peut-être à cause de la petite taille de l'échantillon.

La figure 4(a) présente les hydrogrammes journaliers observé et simulé avec les paramètres optimaux déterminés par rapport aux  $sd$  ( $m = 295$ ,  $k = 3$  - tableau 2) et appliqués sur les 7 ans de données du bassin test 1. Tout l'échantillon est retenu ici car, pour l'objectif principal envisagé qui est la simulation de courbes de débits classés, les séries de débits doivent être les plus longues possibles.

On peut remarquer que le modèle estime mieux les étiages que les crues, car celles-ci sont sous-estimées, sauf pour les années 1993, 1996 et 1998. Dans le cas des étiages qui se retrouvent entre les mois de septembre et décembre, la longueur de la réponse impulsionnelle optimale,  $m = 295$  jours, indique que le modèle a besoin des 6 mois de pluies passées pour simuler ces basses eaux.

L'origine de ces 6 mois coïncide avec le maximum des pluies de mars (Fig. 2(a)), donc avec la fin du remplissage du bassin qui a pour source l'infiltration de la pluie. Ce remplissage est suivi d'une vidange où une part du débit provient du volume emmagasiné. L'infiltration affecte un peu l'hypothèse de linéarité, ce qui explique conjointement avec l'hypothèse d'invariabilité dans le temps entre les pluies et les débits, la sous-estimation des crues. Ce fait est aussi remarqué par Papazafiriou (1976), Kachroo *et al.* (1992c), et Labat *et al.* (2000). Par contre, le modèle simule bien les évènements de crues isolées (Blanco *et al.* 2005), où l'hypothèse de linéarité est respectée.

Cependant, la sous-estimation des crues n'est pas cruciale pour l'approche proposée qui, rappelons-la, vise à la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins amazoniens dans une perspective de production d'énergie hydro-électrique.

La figure 4(b) présente les hydrogrammes journaliers observé et simulé sur le petit bassin test 2. Les débits sont simulés suivant les paramètres optimaux ( $m = 205$ ,  $k = 3$  - tableau 2). On observe que le modèle simule bien l'hydrogramme sur le bassin 2, à l'exception de la période du 16-03 au 16-05-1966 où les débits sont sous-estimés. Cela est dû à la limitation des modèles basés sur la convolution discrète (Éq. 6), malgré la minimisation de l'erreur résiduelle par les moindres carrés qui en limite l'effet.

Comme on est intéressé à la production hydro-électrique, il faut comparer les courbes des débits classés simulés aux courbes des débits classés observés. Ces courbes et la courbe des écarts correspondante sont respectivement présentées pour les bassins 1 et 2 à la figure 5.

En analysant la figure 5(a), il est possible de remarquer que les écarts entre les débits classés observés lissés ( $Q_{col}$ ) et les débits classés simulés avec  $m = 295$  et  $k = 3$  ( $Q_{cs295}$ ,  $k = 3$ ) ne dépassent pas 9% pour la plage des débits entre  $Q_{5\%}$  et  $Q_{98\%}$ . Si on considère la plage allant de  $Q_{70\%}$  à  $Q_{96\%}$ , les écarts ne dépassent pas 5%.

La figure 5(b) révèle que les écarts entre les débits classés observés ( $Q_{co}$ ) et les débits classés simulés avec  $m = 205$  et  $k = 3$  ( $Q_{cs205, k = 3}$ ) ne dépassent pas 10% pour la plage des débits entre  $Q_{1\%}$  et  $Q_{98\%}$ . Si on considère la plage de  $Q_{73\%}$  à  $Q_{93\%}$ , les écarts ne dépassent pas 5%. La performance des débits de haute fréquence montrée dans cette figure est suffisante pour la planification de la production d'énergie de systèmes hydro-électriques isolés qui ne fonctionnent pas à l'année longue (Penche 1998), tels que les micro-centrales envisagées ici.

### Transférabilité

Les résultats de l'étalonnage du modèle, surtout en ce qui concerne la bonne simulation des débits classés, suggèrent l'étude de sa transférabilité qui s'appuie sur la similitude du climat, du sol et du relief des deux bassins versants test. Ainsi, il est possible de permuter les réponses impulsionnelles et d'évaluer l'approche indépendamment des bassins sources et cibles en vue de l'appliquer sur des sites non jaugés.

La figure 6 résume l'algorithme de transférabilité de la réponse impulsionnelle du bassin 1 vers le bassin 2 et vice versa. Il part des données d'entrée (pluies et débits) auxquelles on applique l'analyse spectrale croisée pour déterminer la réponse impulsionnelle du bassin source. Ensuite, on applique la convolution entre cette réponse et les pluies du bassin cible pour simuler les débits de ce dernier. Dans ce cas,  $Q_s$  ( $m^3/s km^2$ ) est le débit spécifique,  $P$  ( $mm$ ) est la pluie,  $H_s$  ( $m^2/s km^2$ ) est la réponse impulsionnelle spécifique,  $S_{BV}$  ( $km^2$ ) est la superficie du bassin versant,  $f_e$  est le facteur d'étalonnage de la transférabilité,  $Q$  ( $m^3/s$ ) est le débit, 1 et 2 sont les indices des bassins versants.

L'étalonnage de la transférabilité des réponses impulsionnelles est appliqué sur les échantillons de taille maximale de données des bassins test. Il comprend la détermination du facteur  $f_e$  (Fig. 6) à partir de la minimisation de  $RMSE$  (Éq. 8), qui tient compte des débits simulés et des débits observés sur le bassin cible. Ainsi, si la réponse impulsionnelle est transférée du bassin 1 vers le

bassin 2, on utilise les paramètres de l'étalonnage du bassin 1 (tableau 2), et pour étalonner la transférabilité, les débits observés du bassin 2. Inversement, on utilise les paramètres du bassin 2 et les débits observés du bassin 1. Le tableau 3 présente les valeurs des paramètres  $RMSE$  et  $fe$  déterminés lors de l'étalonnage de la transférabilité par rapport aux séries de débits (sd) et par rapport aux débits classés (dc).

La figure 7(a) montre les hydrogrammes journaliers observés et simulés sur le bassin 1, avec sa réponse impulsionnelle ( $Q_{s295}$ ,  $k = 3$ ) et avec la réponse impulsionnelle du bassin 2 ( $Q_{s205}$ ,  $k = 3$ ,  $fe = 1,25$ ) étalonnée par rapport aux séries de débits. La figure 7(b) présente les hydrogrammes journaliers observés et simulés sur le bassin 2, avec sa réponse impulsionnelle ( $Q_{s205}$ ,  $k = 3$ ) et avec la réponse impulsionnelle du bassin 1 ( $Q_{s295}$ ,  $k = 3$ ,  $fe = 0,49$ ) étalonnée aussi par rapport aux séries de débits. Cette figure révèle que les hydrogrammes simulés par la transférabilité sont similaires à ceux simulés par l'application directe du modèle, confirmant que le transfert des réponses impulsionnelles d'un bassin à l'autre ne détériore pas la performance du modèle. Elle est même maintenue dans l'application du bassin 2 vers le bassin 1 où les séries de pluie et débit du bassin source sont moindres et ne couvrent que 26 mois d'observations.

La figure 8(a) illustre les courbes des débits classés observés lissée ( $Q_{col}$ ) et simulées sur le bassin 1, avec sa réponse impulsionnelle ( $Q_{cs295}$ ,  $k = 3$ ) et avec la réponse impulsionnelle du bassin 2 ( $Q_{cs205}$ ,  $k = 3$ ,  $fe = 1,25$ ). La figure 8(b) présente les courbes des débits classés observés ( $Q_{co}$ ) et simulées sur le bassin 2, avec sa réponse impulsionnelle ( $Q_{cs205}$ ,  $k = 3$ ) et avec la réponse impulsionnelle du bassin 1 ( $Q_{cs295}$ ,  $k = 3$ ,  $fe = 0,49$ ). Les courbes des écarts correspondant respectivement à  $Q_{co}$  et à  $Q_{col}$  sont également présentées à la figure 8. Cette figure montre la bonne performance des débits classés inférieurs à  $Q_{70\%}$  simulés par la transférabilité étalonnée par rapport aux séries de débits. Cependant, elle se détériore par rapport à celle atteinte par l'application directe du modèle pour les débits classés supérieurs à  $Q_{70\%}$ . Or ces sont les débits qui sont habi-

tuellement utilisés dans le dimensionnement des micro-centrales, il faut donc améliorer la performance de la transférabilité.

Dans ce but, la fonction objectif *RMSE* est minimisée par rapport aux débits classés (Éq. 10), ce qui est compatible avec les atteintes de ce travail. Les valeurs des paramètres sont présentées au tableau 3. La figure 9 illustre la meilleure performance obtenue pour les débits supérieurs à  $Q_{70\%}$  dans ce cas.

La figure 9(a) révèle que les écarts entre  $Q_{col}$  et la courbe des débits classés simulés ( $Q_{cs205}$ ,  $k = 3$ ,  $fe = 1,74$ ) ne dépassent pas 8% pour la plage des débits entre  $Q_{5\%}$  et  $Q_{98\%}$ . On peut observer à la figure 9(b) que les écarts entre  $Q_{co}$  et la courbe des débits classés simulés ( $Q_{cs142}$ ,  $k = 1$ ,  $fe = 0,50$ ) ne dépassent pas 10% pour la plage des débits entre  $Q_{1\%}$  et  $Q_{98\%}$ . Si on considère la plage allant de  $Q_{73\%}$  à  $Q_{93\%}$ , les écarts ne dépassent pas 5%.

La comparaison des résultats du nouvel étalonnage de la transférabilité aux résultats de l'étalonnage du modèle confirme que la transférabilité simule de façon raisonnable les débits classés. En outre, l'indépendance de l'étude par rapport aux bassins sources et cibles démontre la viabilité de son application sur des sites non jaugés.

### **Analyse de sensibilité de l'étalonnage de la transférabilité**

Après les résultats positifs de la transférabilité du modèle, on effectue une analyse de sensibilité à la taille de l'échantillon de débits nécessaire pour l'étalonnage sur des sites non jaugés, ce qui permet de déterminer l'effort de mesures.

Comme on est intéressé à la simulation de courbes de débits classés à partir des séries de débits les plus longues possibles pour bien capter les fréquences, le bassin test 1 est utilisé comme le bassin cible et le bassin test 2 est utilisé comme le bassin source. Leurs données (tableau 1) et les paramètres optimaux  $m$  et  $k$  calculés par rapport aux débits classés ( $m = 205$ ,  $k = 3$  - tableau 2) servent également pour cette analyse.

Nous rappelons que la transférabilité vers le bassin 2 a été étalonnée avec l'échantillon de taille maximale de débits (26 mois). Ainsi, l'échantillon du bassin 1 est réduit respectivement à 1,5 an et à 1 an, les valeurs optimales de  $f_e$  sont déterminées en minimisant le *RMSE* par rapport aux débits classés (dc). Les résultats déterminés avec les échantillons tronqués de 1,5 an ne sont pas présentés ici car, l'objectif de l'analyse est de déterminer la taille minimale de l'échantillon de débits. On présente donc uniquement les résultats déterminés avec les 7 échantillons de 1 an (1993–1999). Pour ces échantillons, les valeurs de  $f_e$  (tableau 4) présentent une grande variabilité à cause de la variabilité annuelle des débits du bassin 1 (Fig. 4(a)), qui ne représentent pas le patron de la courbe des débits classés déterminée sur les 7 ans de données. Les valeurs de  $f_e$  très différentes de 1,74 empêchent une simulation raisonnable des débits classés, car cette valeur est observée lors de l'étalonnage de la transférabilité avec l'échantillon maximal (tableau 4). Fort de cette constatation, les valeurs de  $f_e$  sont déterminées par rapport aux séries de débits (sd) observées qui sont raisonnablement simulées sur certaines périodes de toute année (Fig. 4(a)). La longueur minimale des séries de débits est égale à 1 mois et celui-ci varie selon l'année (tableau 4). Dans ce cas, les valeurs de  $f_e$  se rapprochent de 1,74, en assurant la simulation raisonnable de la courbe des débits classés sur le bassin test 1.

La figure 10 présente les courbes des débits classés observés et simulés sur le bassin 1 avec la réponse impulsionnelle du bassin 2. Les courbes simulées sont étalonnées par rapport aux séries de débits de 1 mois pour toute année ( $Q_{cs93}$ – $Q_{cs99}$ ) et par rapport aux débits classés des 7 ans ( $Q_{cs93-99}$ ). Elle présente aussi les courbes des écarts entre les débits classés observés et simulés qui ne dépassent pas 9% pour la plage des débits entre  $Q_{10\%}$  et  $Q_{95\%}$ , ce qui est comparable à la performance de l'étalonnage de la transférabilité avec l'échantillon de taille maximale. Donc, un échantillon de 1 an sur lequel on cherche 1 mois de faible variabilité entre les débits observés et simulés, est suffisant pour étalonner la transférabilité du modèle.

## Conclusion

Cette approche est axée sur la transférabilité d'un modèle hydrologique pluie-débit, laquelle est appliquée sur deux petits bassins versants de l'Amazonie afin de restituer les courbes des débits classés pour la production d'énergie hydro-électrique, et sur l'analyse de sa sensibilité à la taille de l'échantillon de débits nécessaire pour l'étalonnage.

Les réponses impulsionnelles des deux bassins test sont optimisées par rapport aux séries de débits et par rapport aux débits classés; elles sont utilisées dans l'étalonnage du modèle et de sa transférabilité. Les hydrogrammes simulés à partir de la transférabilité optimisée par rapport aux séries de débits sont comparables aux hydrogrammes simulés dans l'étalonnage du modèle sur chaque petit bassin. Malgré cela, les débits classés simulés supérieurs à  $Q_{70\%}$  se détériorent par rapport à ceux déterminés dans l'étalonnage du modèle, ce qui n'est pas souhaitable pour l'approche.

La simulation des courbes des débits classés améliore sensiblement lorsqu'on utilise les réponses impulsionnelles optimisées par rapport aux débits classés. Si on considère la transférabilité vers le bassin 1, les écarts ne dépassent pas 8% pour la plage des débits entre  $Q_{5\%}$  et  $Q_{98\%}$ . Si on considère la transférabilité vers le bassin 2, les écarts ne dépassent pas 10% pour les débits ayant une fréquence au dépassement entre  $Q_{1\%}$  et  $Q_{98\%}$ . De plus, les écarts ne dépassent pas 5% pour la plage de  $Q_{73\%}$  à  $Q_{93\%}$ , celle-ci est habituellement suffisante pour le dimensionnement des micro-centrales hydro-électriques.

En outre, l'indépendance de l'étude par rapport aux bassins sources et cibles démontre la viabilité de son application sur des sites non jaugés, ce qui est confirmé par l'analyse de sensibilité de son étalonnage. Celle-ci indique qu'un échantillon de 1 an sur lequel on cherche 1 mois de faible variabilité entre les débits observés et simulés, est suffisant pour obtenir des résultats comparables à ceux étalonnés avec l'échantillon de taille maximale de débits sur le bassin versant test 1. Cette

taille de 1 an estime l'effort maximal de mesures en vue d'une application de la transférabilité sur des sites non jaugés qui disposent des séries de pluies suffisamment longues pour la simulation des courbes des débits classés.

L'estimation des débits classés dans un temps raisonnable est importante pour la planification de la production d'énergie hydro-électrique par les petits bassins versants non jaugés de l'Amazonie. Ceux-ci représentant un potentiel considérable pour les ressources hydro-électriques de la région et pouvant être exploités par les innombrables petites communautés isolées de son intérieur.

### **Remerciements**

Nos remerciements s'adressent au CNPq - conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil (conseil national de développement scientifique et technologique du Brésil) pour son soutien financier.

## **Bibliographie**

- Ahsan, M., et O'Connor, K. M. 1994. A simple non-linear rainfall-runoff with a variable gain factor. *Journal of Hydrology*, **155** : 151-183.
- ANEEL. 1999. O Estado das águas no Brasil: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos no Brasil. Brasília.
- Birikundavyi, S., Rousselle, J., et Nguyen, V. T. V. 1997. Estimation régionale de quantiles de crues par l'analyse des correspondances. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **24** : 438-447.
- Blanco, C. J. C., Secretan, Y., Favre, A. C., et Slivitzky, M. 2005. Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie, accepté pour publication dans la *Revue Canadienne de Génie Civil*.
- Box, G. E. P., et Jenkins, G. M. 1976. *Time series and analysis forecasting and control*. Holden-Day, San Francisco, CA.
- Camarasa, A. M., et Tilford, K. A. 2002. Rainfall-runoff modelling of ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). *Hydrological Processes*, **16** : 3329-3344.
- Chatfield, C. 1980. *The analysis of time series: An Introduction*. 2nd ed. Chapman and Hall, London, England.
- Costa, M. H., et Foley, J. A. 1999. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, **104(D12)** : 14,189-14,198.
- Gan, K. C., McMahon, T. A., et O'Neill, I. C. 1991. Transposition of monthly streamflow data to ungauged catchments. *Nordic Hydrology*, **22** : 109-122.
- Goring, D. G. 1984. Flood routing by a linear systems analysis technique. *Journal of Hydrology*, **69** : 59-76.
- Hirsch, R. M. 1982. A Comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, **18(4)** : 1081-1088.

- Johansson, T. B., Kelly, H., et Reddy, A. K. N. 1993. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Island Press, Washington (D.C.).
- Kachroo, R. K. 1992a. River flow forecasting. Part 1. A discussion of the principles. *Journal of Hydrology*, **133** : 1-15.
- Kachroo, R. K., et Liang, G. C. 1992b. River flow forecasting. Part 2. Algebraic development of linear modelling techniques. *Journal of Hydrology*, **133**: 17-40.
- Kachroo, R. K., Sea, C. H., Warsi, M. S., Jemenez, H., et Saxena, R. P. 1992c. River flow forecasting. Part 3. Applications of linear techniques in modelling rainfall-runoff transformations. *Journal of Hydrology*, **133** : 41-97.
- Labat, D., Ababou, R., et Mangin, A. 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: Convolution and spectral analyses. *Journal of Hydrology*, **238** : 123-148.
- Littlewood, I. G. 2003. Improved unit hydrograph identification for seven Welsh rivers: implication for estimating continuous streamflow at ungauged sites. *Hydrological Sciences Journal*, **48(5)** : 743-762.
- Max, J. et collaborateurs. 1972. Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. 4 th ed. Masson, Paris, France.
- Mesquita, A. L. A., Blanco, C. J. C., et Lobato, R. V. 1999. Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, estado do Pará, Brasil, rapport FUNTEC 115-00/97.
- Mimikou, M. 1984. Regional relationships between basin size and runoff characteristics. *Hydrological Sciences Journal*, **29** : 63-73.
- Nash, J. E., et Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10** : 282-290.
- Ouarda, T. B. M. J., Girard, C., Cavadias, G. S., et Bobée, B. 2001. Regional flood frequency

- estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, **254** : 157-173.
- Papazafiriou, Z. G. 1976. Linear and nonlinear approaches for short-term runoff estimations in time-invariant open hydrologic systems. *Journal of Hydrology*, **30** : 63-80.
- Penche, C. 1998. Layman's handbook on how to develop a small hydro site. 2nd ed. Commission of the European Communities.
- Rodriguez, I. 1967. The application of cross-spectral analysis to hydrologic time series. *Hydrology Papers*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 24.
- Sampaio, T. Q., Da Silva, C. R., et collaborateurs 2002. *Perspectivas do Meio Ambiente para o Brasil – uso do subsolo*. Serviço geológico do Brasil – CPRM, Brasília – DF, Brasil.
- Seibert, J. 1999. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology*, **98-99** : 279-293.
- Servat, E., et Dezetter, A. 1993. Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, **148** : 231-248.
- Sherman, L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News-Record*, **108** : 501-505.
- Smith, S. W. 1997. *The Scientist and Engineer's guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed. Technical Publishing, San Diego, CA.
- Tucci, C., Silveira, A., et Sanchez, J. 1995. Flow regionalization in the upper Paraguay basin, Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, **40** : 485-497.
- Zeng, N. 1999. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, **104(D8)** : 9097-9106.

### Liste des Symboles

$C_x$  autocovariance discrète de  $x(t)$

$C_{xy}$  covariance croisée discrète entre  $x(t)$  et  $y(t)$

$C_{yx}$  covariance croisée discrète entre  $y(t)$  et  $x(t)$

$dc$  débits classés

$\acute{E}CART$  erreur absolue relative en pourcentage

$f$  fréquence

$f_e$  facteur d'étalonnage

$f_x$  spectre de variance de  $x(t)$

$f_{xy}$  spectre de variance croisé entre  $x(t)$  et  $y(t)$

$H(i)$  réponse impulsionnelle discrète calculée dans le domaine temporel

$H_S$  réponse impulsionnelle spécifique

$h(u)$  réponse impulsionnelle du système

$H(\omega)$  réponse impulsionnelle calculée dans le domaine fréquentiel

$i$  pas dans le domaine temporel

$k$  décalage temporel

$m$  longueur de la mémoire du système ou point de troncature pour les calculs des réponses impulsionnelles

$n$  nombre d'observations

$P$  pluie

$Q$  débit

$Q_{oc}$  débit observé classé

$Q_{oi}$  débit observé au temps  $i$

$Q_s$	débit spécifique
$Q_{sc}$	débit simulé classé
$Q_{si}$	débit simulé au temps $i$
$RMS$	racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
$RMSE$	racine carrée de l'erreur relative quadratique moyenne
$S_{BV}$	superficie du bassin versant
$sd$	séries de débits
$x(t)$	données d'entrée
$y(t)$	données de sortie
$\gamma_{xy}$	covariance croisée continue entre $x(t)$ et $y(t)$
$\gamma_x$	autocovariance continue de $x(t)$
$\omega$	fréquence angulaire

**Tableau 1 – Coordonnées des stations hydrologiques et leurs périodes d'enregistrement**

Bassin test 1	Latitude	Longitude	Période
Hydrométrie	-1°39'06''	-47°07'03''	du 01/01/1993
Pluviométrie	-1°33'02''	-47°07'01''	au 31/12/1999
Bassin test 2			
Hydrométrie	-1°21'00''	-48°08'00''	du 16/03/1966
Pluviométrie	-1°21'00''	-48°08'00''	au 15/05/1968

**Tableau 2 – Valeurs des paramètres d'étalonnage du modèle**

Bassin test		RMS	m (jours)	k (jours)
1	sd	0,3112	295	3
	dc	0,1140	142	1
2	sd	0,3627	205	3
	dc	0,1139	205	3

**Tableau 3 – Valeurs des paramètres d'étalonnage de la transférabilité**

		RMSE	fe
Bassin 1 vers bassin 2	sd (m = 295, k = 3)	0,1950	0,49
	dc (m = 142, k = 1)	0,0431	0,50
Bassin 2 vers bassin 1	sd (m = 205, k = 3)	0,4235	1,25
	dc (m = 205, k = 3)	0,0764	1,74

**Tableau 4 - Valeurs de  $fe$  et de  $RMSE$  pour les échantillons tronqués du bassin 1**

Échantillons	93	94	95	96	97	98	99	93-99
RMSE (dc)	0,1031	0,2205	0,2756	0,2475	0,3602	0,3442	0,2485	0,0764
$fe$ (dc)	1,52	1,06	1,11	0,94	1,68	2,27	1,25	1,74
Échantillons	12/93	05/94	11/95	05/96	03/97	01/98	07/99	
RMSE (sd)	0,1103	0,1657	0,1809	0,0409	0,2766	0,2448	0,0796	
$fe$ (sd)	1,62	1,64	1,64	1,52	1,66	1,52	1,61	

### **Liste des figures**

Fig. 1. Localisation des petits bassins versants test.

Fig. 2. Pluviogrammes et hydrogrammes journaliers moyens - bassins 1 et 2.

Fig. 3. Courbes des débits classés.

(a) Courbe brute et lissée pour le bassin versant 1.

(b) Courbe brute pour le bassin versant 2.

Fig. 4. Hydrogrammes journaliers - Étalonnage du modèle.

Fig. 5. Courbes des débits classés - Étalonnage du modèle.

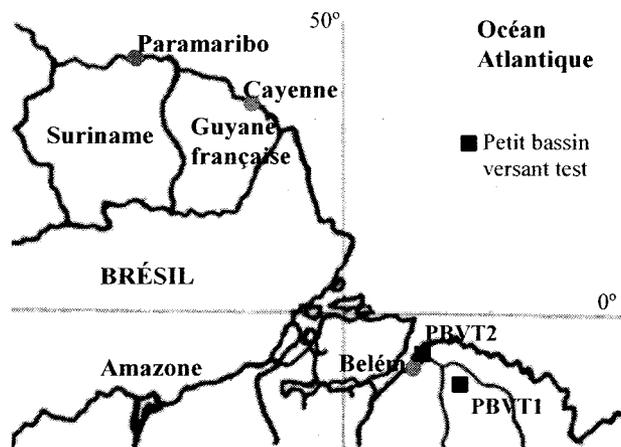
Fig. 6. Algorithme de transférabilité des réponses impulsionnelles.

Fig. 7. Hydrogrammes journaliers – Transférabilité du modèle.

Fig. 8. Courbes des débits classés – Transférabilité du modèle.

Fig. 9. Courbes des débits classés – Transférabilité optimisée pour les débits classés.

Fig. 10. Courbes des débits classés – Analyse de sensibilité de l'étalonnage de la transférabilité.



**Fig. 1. Localisation des petits bassins versants test.**

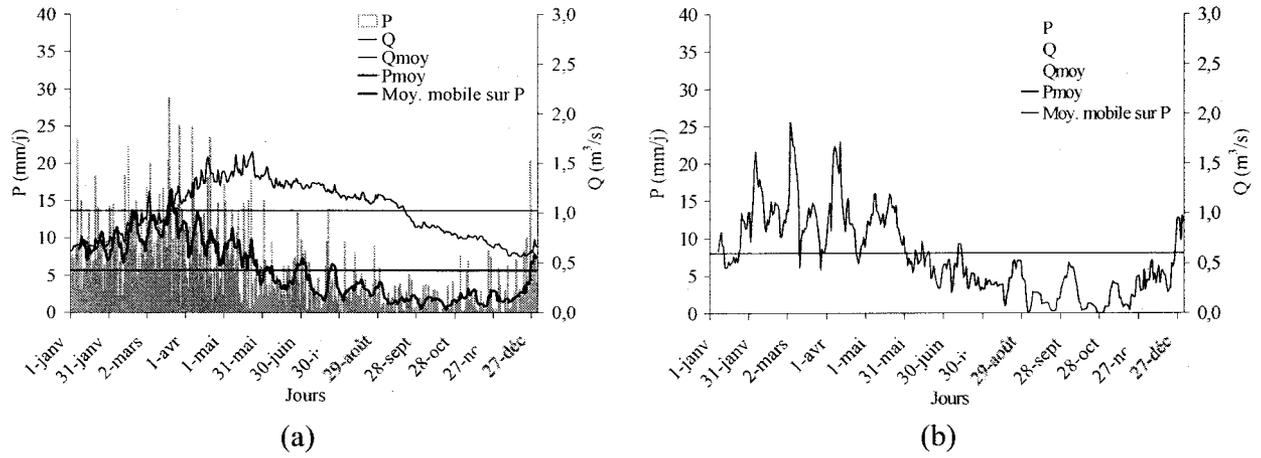
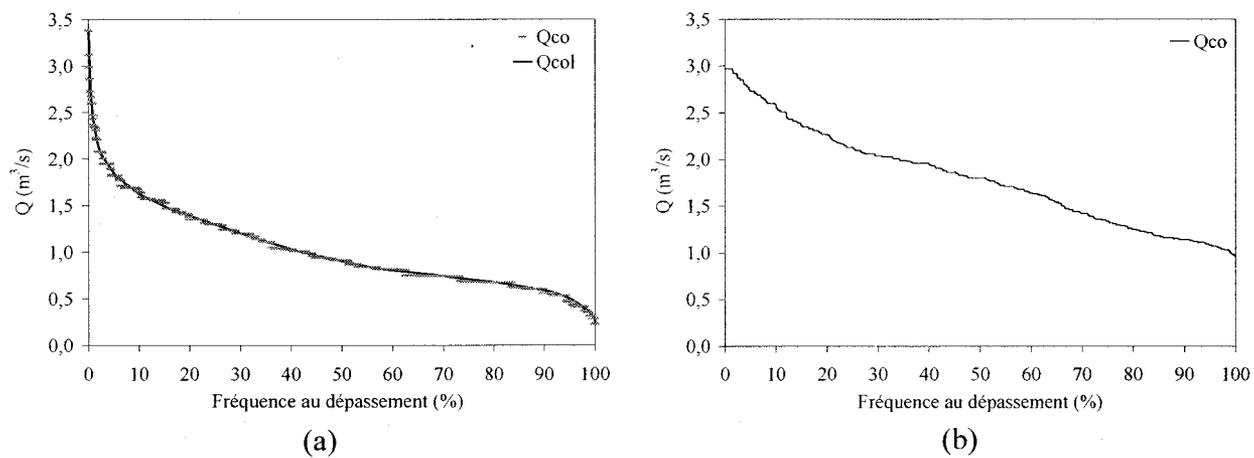


Fig. 2. Pluviogrammes et hydrogrammes journaliers moyens - bassins 1 et 2.



**Fig. 3. Courbes des débits classés.**

**(a) Courbe brute et lissée pour le bassin versant 1.**

**(b) Courbe brute pour le bassin versant 2.**

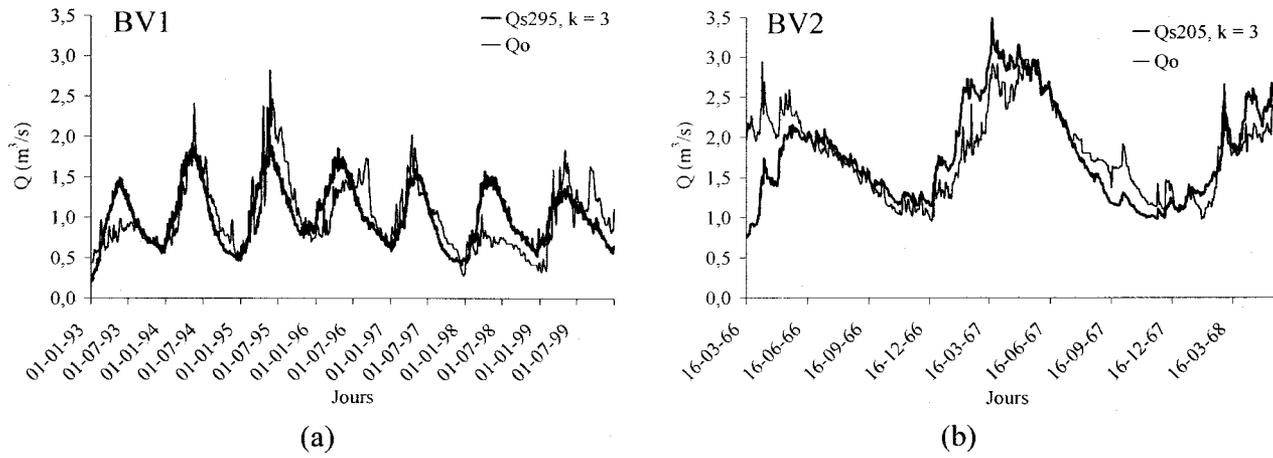
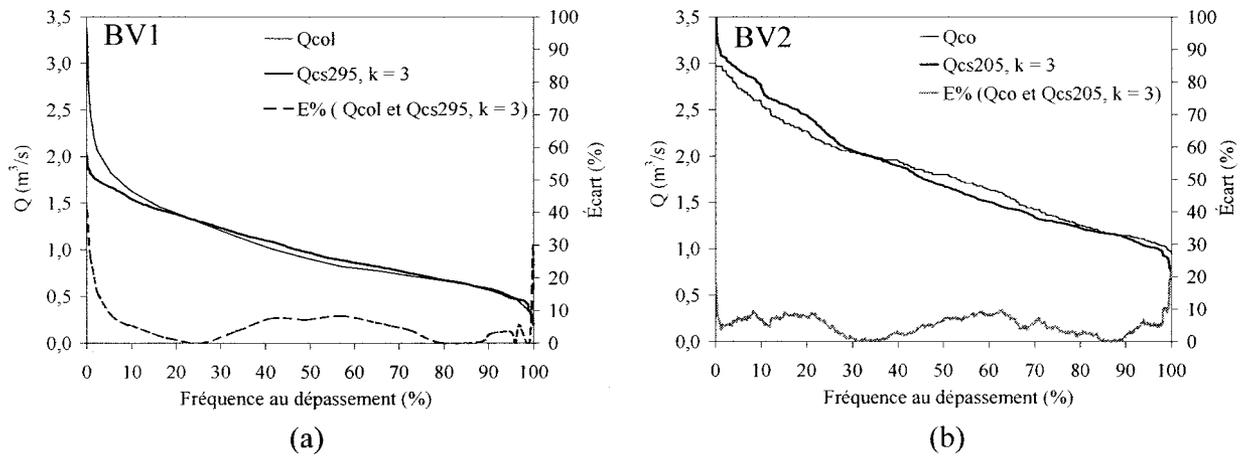
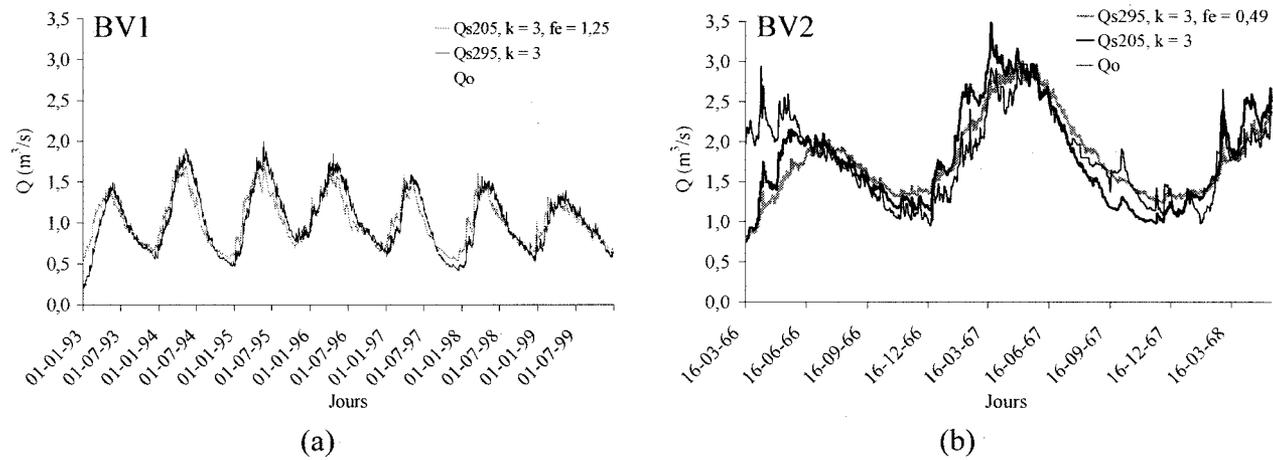


Fig. 4. Hydrogrammes journaliers - Étalonnage du modèle.



**Fig. 5. Courbes des débits classés - Étalonnage du modèle.**





**Fig. 7. Hydrogrammes journaliers – Transférabilité du modèle.**

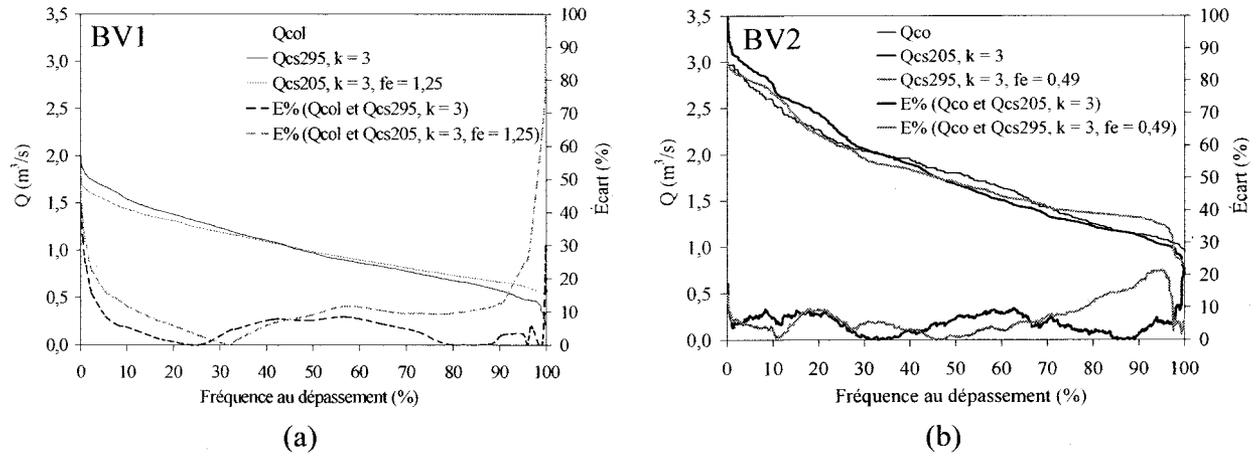
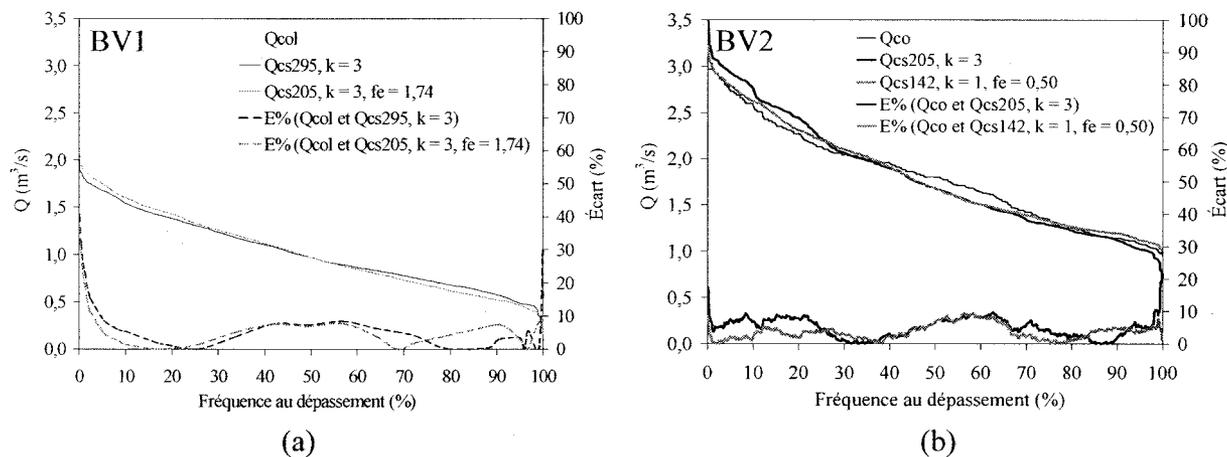


Fig. 8. Courbes des débits classés - Transférabilité du modèle.



**Fig. 9. Courbes des débits classés – Transférabilité optimisée pour les débits classés.**

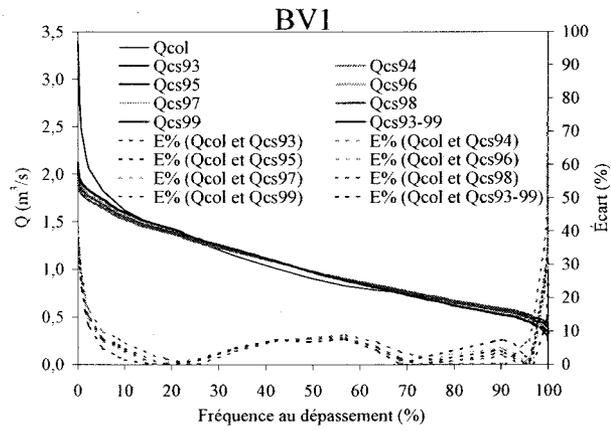


Fig. 10. Courbes des débits classés – Analyse de sensibilité de l'étalonnage de la transférabilité.

## Chapitre 6

### Conclusions et Recherches futures

---

#### 6.1. Conclusions

Ce doctorat a permis de développer une méthodologie pour l'implantation de micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable. Cette méthodologie tient compte de la demande d'énergie des petites communautés locales, de la participation de ces communautés dans les projets, des évaluations préliminaires sur le terrain, des études topographiques, hydrologiques, énergétiques et économiques. Ces études sont à la base du processus de prise de décision pour les projets d'implantation des micro-centrales. De plus, dans le cas de la méthodologie employée ici, on ajoute à ces études l'analyse de la demande énergétique pour le développement socio-économique des petites communautés. Ainsi, avec des résultats positifs des études, associés à l'analyse de la demande énergétique, il est possible d'évaluer si le développement durable est favorisé par l'utilisation des ressources hydro-électriques des petits bassins.

L'analyse de la demande énergétique des petites communautés est la première étape d'une étude d'implantation de micro-centrales. Cette demande est généralement liée à des projets où il y aura une génération d'emploi et de revenus. Ainsi, les micro-centrales fonctionnent comme source d'énergie pour des projets visant la promotion du développement socio-économique de la région.

Le succès de l'implantation de micro-centrales dépend du niveau d'engagement de la population des petites communautés. En d'autres mots, plus la population sera engagée dans ces projets, plus ils auront de chances de se concrétiser avec succès. Cet engagement commence avec la définition de la demande d'énergie et passe par toutes les étapes du projet : avant-projet, construction, opération et entretien. Par exemple, les évaluations préliminaires des sites proches des petites communautés dépendent de la connaissance de la région, ce qui est directement du ressort de la population locale. Ces évaluations servent aussi pour localiser les sites au-dessus des ponts, car

ceux-ci minimisent les coûts de terrassement du terrain. De plus, la main-d'œuvre pour la construction de la micro-centrale est moins coûteuse si on engage les ouvriers de la communauté. En outre, l'opération et l'entretien par une main-d'œuvre locale sont des éléments très importants si l'on veut éviter de dépendre de techniciens venus d'autres villes, ce qui augmente évidemment les coûts (salaires plus élevés, frais de déplacement et de logement). Cette dépendance peut causer l'échec des projets de micro-centrales. Afin d'éviter cela, ces projets doivent prévoir l'entraînement de personnel local.

Les études hydrologiques révèlent que le modèle pluie-débit ou sa transférabilité simulent bien les débits classés moyens et d'étiages qui sont utilisés pour la planification de production d'énergie hydro-électrique. L'application du modèle demande 18 mois de jaugeage de données de pluie et de débit et sa transférabilité exige 1 an de jaugeage de débits pour son étalonnage. Ces délais, 18 mois ou 1 an, sont raisonnables pour l'étape d'avant-projet des micro-centrales.

Les études énergétiques révèlent que la pointe de la demande coïncide avec la pointe de production énergétique dans la région. En effet, la production agricole (grains et manioc) a lieu en même temps que les crues, c'est-à-dire de janvier à juin. Cette heureuse coïncidence aide à planifier la production d'énergie, ce qui est illustré par les exemples de planification des aménagements au fil de l'eau avec 1 ou 2 turbines équipées avec les débits classés  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{75\%}$  et/ou par la différence entre eux. Ces débits soutiennent la production d'énergie qui est utilisée pour répondre à la demande des petites communautés isolées. La détermination de ces débits est assurée par les études hydrologiques.

De plus, la coïncidence entre les pointes de demande et de production d'énergie minimise les impacts environnementaux des micro-centrales, car s'il fallait produire plus d'énergie pendant les étiages, les aménagements au fil de l'eau auraient besoin d'être équipés avec des déversoirs plus hauts (petits barrages), ce qui formerait des lacs en amont de ceux-ci. En effet, la construction de hauts barrages sur les petites rivières n'est pas recommandée à cause des basses chutes de la région, ce qui est confirmé par les études topographiques. Ces études se résument par la détermination des chutes naturelles des sites amazoniens.

Les études économiques estiment que les coûts opérationnels des micro-centrales sont plus bas que les coûts opérationnels des génératrices à diesel, celles-ci étant souvent utilisées dans ces

régions. Cependant, les coûts des micro-centrales sont plus élevés que les coûts d'énergie provenant du réseau rural. Ces études estiment aussi qu'entre 62 et 65 % des coûts d'implantation des micro-centrales se rapportent à l'importation de l'ensemble turbine-génératrice-boîte de vitesse. Donc, la production locale des micro-turbines réduirait sensiblement les coûts des micro-centrales. En outre, cette production pourrait être une source supplémentaire de développement scientifique et économique régional.

Pris dans leur ensemble, la maximisation des ressources naturelles, la minimisation des impacts environnementaux, la génération d'énergie électrique viable du point de vue économique, générant des emplois et des revenus qui peuvent améliorer la qualité de vie des populations des petites communautés isolées de la région, forment un exemple de développement durable.

Ainsi, la méthodologie développée dans ce doctorat sert de base à l'analyse intégrée de projets d'implantation de micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable.

## **6.2. Recherches futures**

Ce doctorat est la base de la recherche axée sur l'implantation de micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable. Ainsi, il existe plusieurs suggestions de recherches qui dérivent de celui-ci, comme il est à remarquer ci-dessous.

### **Hydrologie des petits bassins versants de l'Amazonie**

Il serait intéressant d'étudier un modèle hydrologique pluie-débit qui soit capable d'améliorer la simulation des débits de crues des petits bassins versants de l'Amazonie. Tel modèle doit être capable de prendre en compte la non-linéarité et la variabilité temporelle des débits par rapport aux pluies. Dans ce cas, on pourra même améliorer la simulation de tout l'hydrogramme, et par conséquent, de toute la courbe des débits classés.

De plus, l'utilisation, soit du modèle hydrologique, soit de sa transférabilité, demande des données de pluie. Si ces données ne sont pas disponibles pour un petit bassin, il faut procéder à la régionalisation de la pluie, aspect qui n'a été que cité dans ce doctorat. Donc, une autre suggestion de recherche future est le développement d'une méthode de régionalisation des pluies pour les estimer sur les petits bassins amazoniens.

### **Viabilité économique des projets d'implantation des micro-centrales hydro-électriques avec la main d'œuvre et les matériaux de construction locaux**

Un des points importants concernant la durabilité des projets mentionnés ci-dessus est leur viabilité économique. Ainsi, tels projets doivent être viables économiquement par rapport à d'autres sources d'énergie. Donc, il est important d'analyser un cas réel d'implantation de micro-centrale pour l'évaluation des coûts de celle-ci afin de pouvoir la comparer avec d'autres sources d'énergie viables pour les petites communautés de l'Amazonie, celles-ci étant isolées ou non.

Dans un projet réel, on pourra quantifier les coûts de la main-d'œuvre locale. Cette main-d'œuvre est utilisée pour la construction et l'entretien de la micro-centrale. En outre, les sites au-dessous des ponts (réduisant les coûts de terrassement du terrain) et proches de gisements de sable, d'argile et de pierres (réduisant les coûts de construction des déversoirs-barrages et des prises

d'eau) pourront être évalués. À partir de cette évaluation, on pourra calculer les coûts d'implantation d'une micro-centrale dans le cas plus favorable : main d'œuvre locale, site au-dessous d'un pont et proche de gisements de sable, d'argile et de pierres. Ainsi, les coûts de l'énergie électrique produite par les micro-centrales seront comparés aux coûts du réseau rural et on pourra évaluer si ceux-ci sont encore plus bas que les coûts de l'énergie provenant des micro-centrales.

### **Projets durables de génération d'emplois et de revenus en Amazonie ayant comme source d'énergie renouvelable les micro-centrales hydro-électriques**

L'analyse d'un tel projet est aussi importante pour évaluer son impact socio-économique sur la population locale qui profitera des profits de ce projet. Ainsi, on pourra connaître la quantité d'emplois et de revenus générés et le coût total du projet (production primaire + énergie provenant de la micro-centrale + transformation de la production primaire) qui pourront être utilisés pour le calcul du rapport bénéfice-coût du projet. Un coefficient plus grand que l'unité démontrera que les bénéfices du projet sont plus grands que son coût, ce qui justifiera l'implantation du projet. Dans le cas contraire, rapport bénéfice-coût plus petit que l'unité, les coûts d'implantation du projet ne justifieraient pas son coût, ce qui représenterait un échec du projet.

Un exemple de projet intégré est en voie d'implantation dans la communauté *Sucupira* de la ville de *Anapu* située dans l'Est de l'état du Pará (au bord de la transamazonienne - Figure 1.1). Ce projet utilisera l'énergie générée par une micro-centrale hydro-électrique de 50 kW pour approvisionner une petite usine qui sépare les semences et la pulpe de fruits tels que l'*açaí*, le *cupuaçu*, la *graviola* et le *bacuri*. L'usine produit aussi de la farine de banane. Les fruits sont originaires de la région et sont disponibles en grande quantité. La pulpe pourrait être vendue et utilisée pour la production de jus, de yogourt, de confiture, etc. La conception du projet de la micro-centrale est sous la responsabilité de l'équipe du GTDEM.

Ce projet sera un cas d'étude pour :

- l'analyse des coûts des micro-centrales hydro-électriques construites avec main d'œuvre fournie par les petites communautés de l'Amazonie et avec matériaux de construction sur place. Ainsi, on pourra les comparer aux coûts de l'énergie provenant du réseau rural.

- l'analyse des impacts socio-économiques (génération d'emplois et de revenus) et par conséquent la détermination du rapport bénéfice-coût du projet.

Ainsi, le suivi du projet montrera si la génération d'emplois et de revenus assure l'amélioration de la qualité de vie de la population. Cette amélioration pourra être mesurée par la comparaison des indices de développement humain avant et après le projet. Une bonne qualité de vie est indispensable à un monde durable, car les êtres humains eux-mêmes ont besoin d'être durables.

## Chapitre 7

### Bibliographie

---

ADA. Agence de Développement de l'Amazonie. Disponible à l'URL [www.ada.gov.br](http://www.ada.gov.br). Cité le 01 octobre 2004.

Afgan, N. H., Gobaisi, D. A., Carvalho, M. G. et Cumo, M., 1998. Sustainable energy development. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2(3) : 235-286.

Alcoa. Projeto Juruti. Disponible à l'URL [http://www.alcoa.com/brazil/pt/juruti\\_info\\_page/environment\\_juruti.asp](http://www.alcoa.com/brazil/pt/juruti_info_page/environment_juruti.asp). Cité le 25 mai 2005.

ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2002.

Armand, F., 1998. La petite hydroélectricité dans la politique française des énergies renouvelables (small hydropower in the context of French renewable energy policy). *La Houille Blanche*, 8 : 31-33.

Barbara, J., 1995. Dam the Rivers; Dam the people: Hydroelectric Development and Resistance in Amazonian Brazil. *Geo Journal*, 35(2) : 151-160.

Bennett, B. C., 1992. Plants and People of the Amazonian Rainforests - The role of ethnobotany in sustainable development. *BioScience*, 42(8) : 599-607.

Blanco, C. J. C., Gouveia, M. S. A. V. et Amarante, A. L., 2000. Analisis Hidrodinamico de Rotores Axiales para Uso de la Energia Cinetica de Rios. *Informacion Tecnologica*, 11(2) : 73-78.

Boot, R. G. A. et Gullison, R. E., 1995. Approaches to Developing Sustainable Extraction Systems for Tropical Forest Products. *Ecological Applications*, 5(4) : 896-903.

Browder, J. O., 1992. The Limits of Extractivism-Tropical forest strategies beyond extractive reserves. *BioScience*, 42(3) : 174-182.

Bunker, S. G., 1985. Underdeveloping the Amazon: Extraction, Unequal Exchange, and the Failure of the Modern State, Chicago, III: University of Chicago Press. In: Rodrigues, 2000. Environmental protection issue networks in Amazonia, *Latin American Research Review*, 35(3) : 125-153.

Caviglia, J. L. et Kahn, J. R., 2001. Diffusion of Sustainable Agriculture in the Brazilian Tropical Rain Forest: A Discrete Choice Analysis. *Economic Development and Cultural Change*, 49(2) : 311-332.

DNAEE / Eletrobras, Manual de Microcentrais Hidrelétricas. Brasília, 1985.

Dos Reis, L. B. et Silveira, S. Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

Dowd, S. et Tlusty, M., 2000. Project Piaba: Working Toward a Sustainable Natural Resource in Amazon Freshwater Fisheries. *Conservation Spotlight*, 17(4) : 88-90.

Eletrobras. Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas. Rio de Janeiro, 2000.

Eletronorte. Cenários Socioenergéticos da Amazônia 2000-2020. Brasília, 2001. Disponible à l'URL [www.eletronorte.gov.br/pagina\\_29.htm](http://www.eletronorte.gov.br/pagina_29.htm). Cité le 20 octobre 2004.

Eve, E., Arguelles, F. A. et Fearnside, P. M., 2000. How Well Does Brazil's Environmental Law Work in Practice? Environmental Impact Assessment and the case of the Itaipiranga Private Sustainable Logging Plan. *Environmental Management*, 26(3) : 251-267.

Fearnside, P. M, 1999. Social Impacts of Brazil's Tucuruí Dam. *Environmental Management*, 24(3) : 483-495.

Fisch, G., Marengo, J. A. et Nobre, C. A., 1996. Clima da Amazônia. Climanálise. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Disponible à l'URL [www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/fish.html](http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/fish.html). Cité le 18 octobre 2004.

Fulford, D. J., Mosley, P. et Gill, A., 2000. Recommendations on the use of micro-hydro power in rural development. *Journal of International Development*, 12 : 975-983.

Gallopín, G. C., Gutman, P., et Maletta H., 1989. Global impoverishment, sustainable development and the environment: a conceptual approach\*. *Global impoverishment, development and environment*, 121 : 375-397.

Giroux, D., Soumis, N., 2000. Aspects de la problématique développement et conservation en Amazonie brésilienne. *Vertigo-la revue en sciences de l'environnement sur le WEB*, 1 (1) : 15-21.

Glaser, M., Furtado, L., Nascimento, I. et Santana, G. Economy, Ecosystem and Society: Mangrove and People in the Caeté Bay, North Brazil. Annual Conference, Development Studies Association University of East Anglia, Norwich, U. K., September 1997.

Goulding, M., 1980. The fishes and the Forest: Explorations in Amazonian Natural History. In: Bennett, B. C., 1992. *Plants and People of the Amazonian Rainforests – The role of ethnobotany in sustainable development*. *BioScience*, 42 (8) : 599-607.

Gutberlet, J., 1999. Rural Development and Social Exclusion: a case study of sustainability and distributive issues in Brazil. *Australian Geographer*, 30 (2) : 221-237.

Harvey, A., Brown, A., Hettiarachi, P. et Inversin, A. *Micro-Hydro Design Manual – A guide to small-scale water power schemes*. London: Intermediate Technology Publications, 1993.

Henderson, P. A., 1990. Fish of the Amazonian Igapo: stability and conservation in a high diversity-low biomass system. *Journal of Fish Biology*, 37 (A) : 61-66.

IBAMA. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos recursos renováveis. Disponible à l'URL [www.ibama.gov.br](http://www.ibama.gov.br). Cité le 03 novembre 2004.

IBGE. Carte de la région de Jatuarana, folha SA.22-V-C-IV MI-424. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro –RJ, 1988.

IBGE. Projeto levantamento e Classificação do uso da terra. Rapport technique. Contribuição ao conhecimento das florestas do estado do Amapá: Potencial florestal e características fitossociológicas. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro –RJ, 2004, 44p. Disponible à l'URL [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/potencialflorestal\\_AP.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/potencialflorestal_AP.pdf). Cité le 17 mai 2005.

IEA. World Energy Outlook 2004. Paris: International Energy Agency, 2004.

Junk, J. W., 1983. As Águas da Região Amazônica. In: Kitamura. A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

Khennas, S. et Barnett, A. Best Practices for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Developing Countries. Final Synthesis Report, contract R7215, 2000, 105p.

Kitamura, P. C., A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

McClain, M. E., 2002. The Ecohydrology of South American Rivers and Wetlands. IAHS Special Publications no. 6, pp : 193-209.

Mesquita, A. L. A., Blanco, C. J. C. et Lobato, R. V. Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, estado do Pará. Relatório Final do projeto FUNTEC 115-00/97, 1999, 55p.

MMA. Ministério do meio ambiente, 2004. Disponible à l'URL <http://www.ambiente.gov.br/ascom/ultimas/index.cfm?id=981>. Cité le 16 September 2005.

Monition, L., Le Nir, M. et Roux, J. Les micro-centrales hydroélectriques. Paris, New York : Masson, 1981.

Moran, E. F., 1990. A Ecologia Humana das Populações da Amazônia. In: Kitamura. A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

MPEG, 2004. Amazônia : Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais. Disponible à l'URL [www.museu-goeldi.br/biodiversidade/o\\_amazonia.asp](http://www.museu-goeldi.br/biodiversidade/o_amazonia.asp). Cité le 22 octobre 2004.

Myers, N., 1986. Tropical Deforestation and mega Extinction Spasm. In: Kitamura. A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

Noelli, F. S., 2003. Cerâmica arqueológica da Amazônia: vasilhas da Coleção Tapajônica MAE-USP. *Mana*, 9(2) : 209-211.

Noyes, R. Small and Micro Hydroelectric power plants – Technology and Feasibility. Park Ridge, New Jersey, U.S.A.: Noyes Data Corporation, 1980.

OEA, 2001. Organisation des états américains. Disponible à l'URL [www.oas.org/usde/publications/unit/oea08b/ch13.htm](http://www.oas.org/usde/publications/unit/oea08b/ch13.htm). Cité le 03 novembre 2002.

O'Riordan, T., 1989. The challenge for environmentalism, in Peet, R. et Thrift, N. (eds), *New models in geography*, 1: 77-102, Unwin Hyman, Boston.

Paish, O., 2002. Small hydro power: technology and current status. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 6 : 537-556.

Penche, C. *Layman's Handbook on How to Develop a Small Hydro Site*. 2<sup>nd</sup> ed. Commission of the European Communities, 1998.

Perz, S. G., 2001. From Sustainable Development to "Productive Conservation:" Forest Conservation Options and Agricultural Income and Assets in the Brazilian Amazon. *Rural Sociology*, 66(1) : 93-112.

Petrobras. Pétrole brésilien. Disponible à l'URL [http://www2.petrobras.com.br/saladeaula/petroleo/gas\\_primo2.asp](http://www2.petrobras.com.br/saladeaula/petroleo/gas_primo2.asp). Cité le 17 mai 2005.

PNUD/IPEA/Fundação João Pinheiro/IBGE. *Desenvolvimento Humano e Condições de Vida: Indicadores Brasileiros*, Brasília, 1998.

Prance, G. T., 1986. Introduction to Tropical Rain Forests. In: Kitamura. A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

Rees, W. E., 1990. The Ecology of Sustainable Development. *The Ecologist*, 20(1) : 18-23.

Rodrigues, M. G., 2000. Environmental Protection Issue Networks in Amazonian, Latin American Review, 35(3) : 125-153.

Salati, E., 1990. The Climatology and Hydrology of Amazonia. In: Kitamura. A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

Schaan, D. P., 2004. The Camutins chiefdom: rise and development of social complexity on Marajó island, brazilian Amazon. Ph.D. Thèse. Université de Pittsburgh.

Schubart, H. O. R., 1990. A Terra e os homens da Amazônia. In: Kitamura. A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.

Schubart, H. O. R., 2000. Características biológicas da Amazônia. In: Vieira, I. C. G., Silva, J. M. C. d., Orem, D. C. et D'Inçao, M. A. (eds.). Biological and Cultural Diversity of Amazonia, Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001.

Schwartzman, S. Conferência: Consciência Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, 1999. Disponible à l'URL [www.10minutos.com.br/simon/ambiente.html](http://www.10minutos.com.br/simon/ambiente.html). Cité le 03 novembre 2002.

Silva, E., 1998. The Politics of Environment and Development. *Latin American Research Review*, 33(3) : 230-247.

Silveira, R. D. et Thorbjarnarson, J. B., 1999. Conservation implications of commercial hunting of black and spectacled caiman in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, Brazil. *Biological Conservation*, 88 : 103-109.

The Johannesburg Declaration on Sustainable Development, 2002. Disponible à l'URL [www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit\\_docs/1009wssd\\_pol\\_declaration.htm](http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit_docs/1009wssd_pol_declaration.htm).

Cité le 03 janvier 2003.

Voršič, J., Orgulan, A., Horvat, M. et Koritnik, D., 2000. Very Small Hydroelectric Plants- Their Influence on the Supply Network. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15(3) : 323-327.

Walter, A. Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas. In *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2003 [cited 10 June 2004]. Disponible à l'URL [www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022000000100028&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100028&lng=en&nrm=iso).

WCED, 1987. The world Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press. pp. 383.

Wilson, E. O. 1988. The current state of biological diversity. In: Bennett, B. C., 1992. *Plants and People of the Amazonian Rainforests – The role of ethnobotany in sustainable development*. *BioScience*, 42 (8) : 599-607.