

**MILIEUX EXTRÊMES
et
CRITIQUES
face au
CHANGEMENT
CLIMATIQUE**

**Climat, territoire,
environnement**



Marianne Cohen & Christian Giusti (dir.)



**MILIEUX EXTRÊMES ET CRITIQUES
FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

<p><i>Le Sacre de la nature</i> Bertrand Sajaloli & Étienne Grésillon (dir.)</p>	
<p><i>Îles rêvées. Territoires et identités en crise dans le Pacifique insulaire</i> Dominique Guillaud, Christian Huetz de Lempis & Olivier Sevin (dir.)</p>	<p><i>La Rue à Rome. Entre l'émotion et la norme</i> Brice Gruet, Prix Charles Maunoir de la Société de géographie</p>
<p><i>L'Hiver au Siècle d'or hollandais</i> Alexis Metzger</p>	<p><i>L'Asie-Pacifique des crises et des violences</i> Christian Huetz de Lempis & Olivier Sevin (dir.)</p>
<p><i>Les Campagnes en France et en Europe. Outils, techniques et sociétés, du Moyen Âge au XX^e siècle</i> Jean-René Trochet Prix Antoine Alexandre Bouteau de la Société de géographie</p>	<p><i>Comme un parfum d'îles. Florilège offert à Christian Huetz de Lempis</i> Olivier Sevin (dir.)</p>
	<p><i>Atlas des pays du Golfe</i> Philippe Cadène & Brigitte Dumortier</p>
<p><i>Atlas du Proche-Orient arabe</i> Fabrice Balanche</p>	<p><i>La Privatisation de Chicago. Idéologie de genre et constructions sociales</i> Laurence Gervais</p>
<p><i>Les Forêts de la Grande Guerre. Histoire, mémoire, patrimoine</i> Jean-Paul Amat</p>	<p><i>De l'Empire à la tribu. États, villes, montagnes en Albanie du Nord (VI^e-XV^e siècle)</i> Jean-René Trochet</p>

**Marianne Cohen
& Christian Giusti (dir.)**

**Milieux extrêmes
et critiques face
au changement
climatique**

**Climats, territoires,
environnement**

SORBONNE UNIVERSITÉ PRESSES
Paris

Ouvrage publié avec le concours de l'Institut de la transition environnementale de Sorbonne Université (SU-ITE) et de la faculté des Lettres de Sorbonne Université

Sorbonne Université Presses est un service général
de la faculté des Lettres de Sorbonne Université.

© Sorbonne Université Presses, 2021
PDF complet : 979-10-231-0642-8

Introduction – 979-10-231-1809-4
I Ronchail *et al.* – 979-10-231-1810-0
I Quénot – 979-10-231-1811-7
I Chionne – 979-10-231-1812-4
I Liziard & Voiron – 979-10-231-1813-1
II Sultan *et al.* – 979-10-231-1814-8
II Courault *et al.* – 979-10-231-1815-5
II Vignal & Andrieu – 979-10-231-1816-2
III Beuzen-Waller *et al.* – 979-10-231-1817-9
Conclusion – 979-10-231-1818-6
Appendice – 979-10-231-1819-3

Mise en page Emmanuel Marc DUBOIS/3D2S, Issigeac/Paris
d'après le graphisme de Patrick VAN DIEREN

SUP

Maison de la Recherche
Sorbonne Université
28, rue Serpente
75006 Paris

tél. : (33)(0)1 53 10 57 60

sup@sorbonne-universite.fr

sup.sorbonne-universite.fr

PREMIÈRE PARTIE

**Milieux critiques
et changement climatique**

HYDROLOGIE ET PRODUCTION AGRICOLE DANS LE NORD-OUEST DE L'AMAZONIE

Josyane Ronchail^{fs, ii},
Tatiana Schorⁱⁱⁱ,
Jhan Carlo Espinoza^{iv},
Manon Sabot^v,
Heitor Pinheiroⁱⁱⁱ,
Percy Gomez^{vi},
Guillaume Drapeauⁱ,
Véronique Michot^{vii},
Naziano Filizolaⁱⁱⁱ,
Jean-Loup Guyot^{viii},
Benjamin Sultan^{ii, viii},
Jean-Michel Martinez^{viii}

i Université Sorbonne Paris Cité

ii Laboratoire d'océanographie et du climat (faculté des Sciences et d'Ingénierie, Sorbonne Universités, CNRS, IRD, MNHN), josyane.ronchail@locean-ipsl.upmc.fr

iii Universidade Federal do Amazonas et Núcleo de Estudos e Pesquisas das Cidades na Amazônia Brasileira Manaus, Brésil, tatiana.schor@gmail.com

iv Instituto Geofísico del Perú, Lima, Pérou, jhan-carlo.espinoza@igp.gob.pe

v faculté des Sciences et d'Ingénierie, Sorbonne Université, Paris

vi Agencia Agraria Ramon Castilla, Caballococha, Pérou

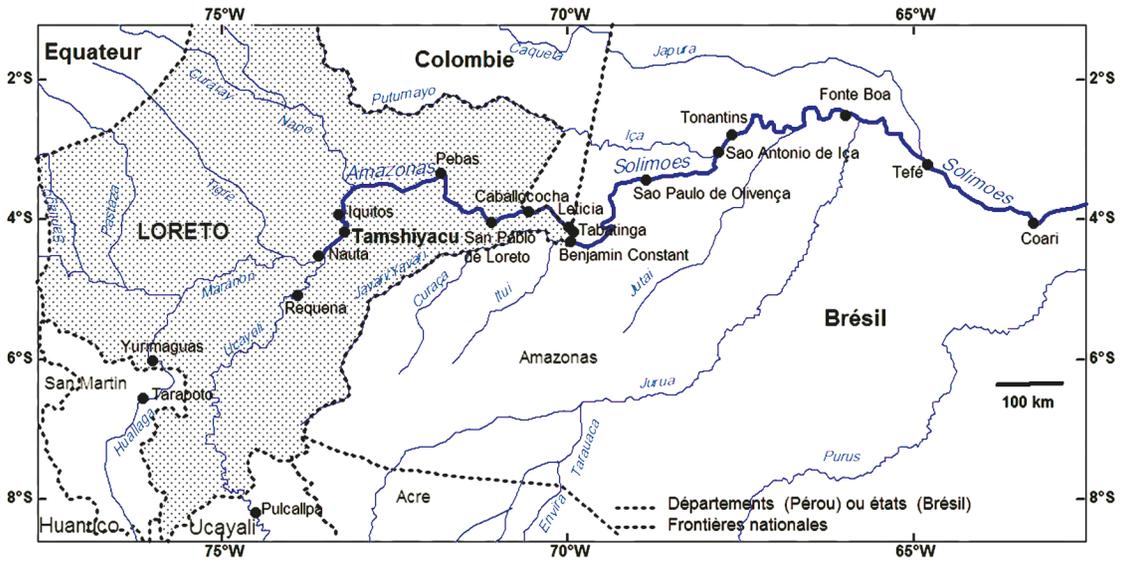
vii Laboratoire Climat et occupation du sol par télédétection, université Rennes 2

viii IRD, Pérou.

Dans les petites villes et les villages du nord-ouest du bassin de l'Amazone (autour de la triple frontière entre le Pérou, la Colombie et le Brésil, **fig. 1**), la sécurité alimentaire est liée à des facteurs tels qu'une production agricole locale abondante, des prix accessibles, un transport fluvial efficace – seul moyen d'approvisionnement dans l'« Amazonie des rivières » –, des sources d'alimentation variées, la possibilité de conserver l'agrobiodiversité et les semences, les déplacements des membres d'une même famille entre différents lieux de production¹. Dans cette région, la diète a été longtemps constituée de produits locaux. La production agricole, la pêche et la chasse restent des activités fondamentales pour approvisionner les familles et les marchés locaux en fruits et légumes, poissons et gibiers (**fig. 2**)². Même si ce régime traditionnel tend à être substitué par une « diète de supermarché³ » depuis l'époque du caoutchouc⁴, des auteurs montrent que le niveau d'autosuffisance alimentaire atteint 63 % dans les régions de *varzea* (plaines d'inondation)⁵.

Tout comme la chasse et la pêche⁶, les pratiques et la production agricoles locales dépendent, entre autres, des conditions hydroclimatiques saisonnières

- 1 Ludivine Eloy & Laure Empereire, « La circulation de l'agrobiodiversité sur les fronts pionniers d'Amazonie (région de Cruzeiro do Sul, État de l'Acre, Brésil) », *L'Espace géographique*, vol. 40, n° 1, 2011, p. 62-74; Sandra do Nascimento Noda, Hiroshi Noda *et al.*, « Etnoconservação e consumo nas várzeas dos rios Solimões e Amazonas », dans Chau Ming Lin, Maria Christina de Mello Amorozo & Carolina Kffuri (dir.), *Agrobiodiversidade no Brasil: experiências e caminhos de pesquisa*, Recife, Nuppea, 2010, p. 97-119.
- 2 Antoinette Winklerprins & Perpetuo S. de Souza, « Surviving the City: Urban Home Gardens and the Economy of Affection in the Brazilian Amazon », *Journal of Latin American Geography*, vol. 4, n° 1, 2005, p. 107-126; Christine Padoch, Eduardo Brondizio, Sandra Costa, Miguel Pinedo-Vasquez *et al.*, « Urban Forest and Rural Cities: Multi-Sited Households, Consumption Patterns, and Forest Resources in Amazonia », *Ecology and Society*, vol. 13, n° 2, 2008, en ligne : <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art2/>; Ayrton Luiz Martins Urizzi, Sandra do Nascimento Noda & Hiroshi Noda, « Agricultura familiar tradicional no Alto Solimões: uma contribuição à discussão sobre indicadores de sustentabilidade », dans Hiroshi Noda, Sandra do Nascimento Noda, Anne-Élisabeth Lacques & Philippe Léna (dir.), *Dinâmicas socioambientais na agricultura familiar na Amazônia*, Manaus, Inpa/Ufam, 2013, p. 33-50; Moisés Augusto Tavares Pinto, *A caça e a pesca na beira de Tabatinga: um estudo do mercado de recursos naturais na tríplice fronteira Brasil-Colômbia-Peru*, mémoire de pós-graduação, Manaus, UFAM, 2015, 198 p.
- 3 Tatiana Schor, Moisés Augusto Tavares Pinto, Francisco Carlos da Costa Avelino & Marina L. Ribeiro, « Do peixe com farinha à macarronada com frango: uma análise das transformações na rede urbana no Alto Solimões pela perspectiva dos padrões alimentares », *Confins*, n° 24, 2015, en ligne : <http://confins.revues.org/10254>
- 4 Ludivine Eloy, François-Michel Le Tourneau & Hervé Théry, « Une ville dans la forêt: São Gabriel da Cachoeira, capitale isolée du haut Rio Negro », *Cybergeo. European Journal of Geography*, rubrique « Espace, Société, Territoire », 2005, document 304, en ligne <http://cybergeo.revues.org/3238>
- 5 Sandra do Nascimento Noda, *Agricultura familiar na Amazônia das águas*, Manaus, Universidade federal do Amazonas, 2007, 208 p.
- 6 Patrícia Fernanda Pinho, José A. Marengo & Mark Stafford Smith, « Complex Socio-ecological Dynamics Driven by Extreme Events in the Amazon », *Regional Environmental Change*, vol. 15, n° 4, 2015, p. 643-655; Javier Tomasella, Patrícia Fernanda Pinho *et al.*, « The Droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: Floodplain Hydrology and its Potential



1. Villes et rivières de la région de la triple frontière Colombie-Brésil-Pérou
 Le département de Loreto en Amazonie péruvienne est représenté en pointillé.
 Le cours principal de l'Amazone (Pérou)-Solimões (Brésil) est en gras

1. Towns and rivers near the triple border Colombia-Brazil-Peru
 The department of Loreto in Amazonian Peru is represented in dotted.
 The main stem of the Amazonas (Peru) – Solimões (Brazil) River is represented with a bold line



2. Bord de rivière et marchés près de la triple frontière

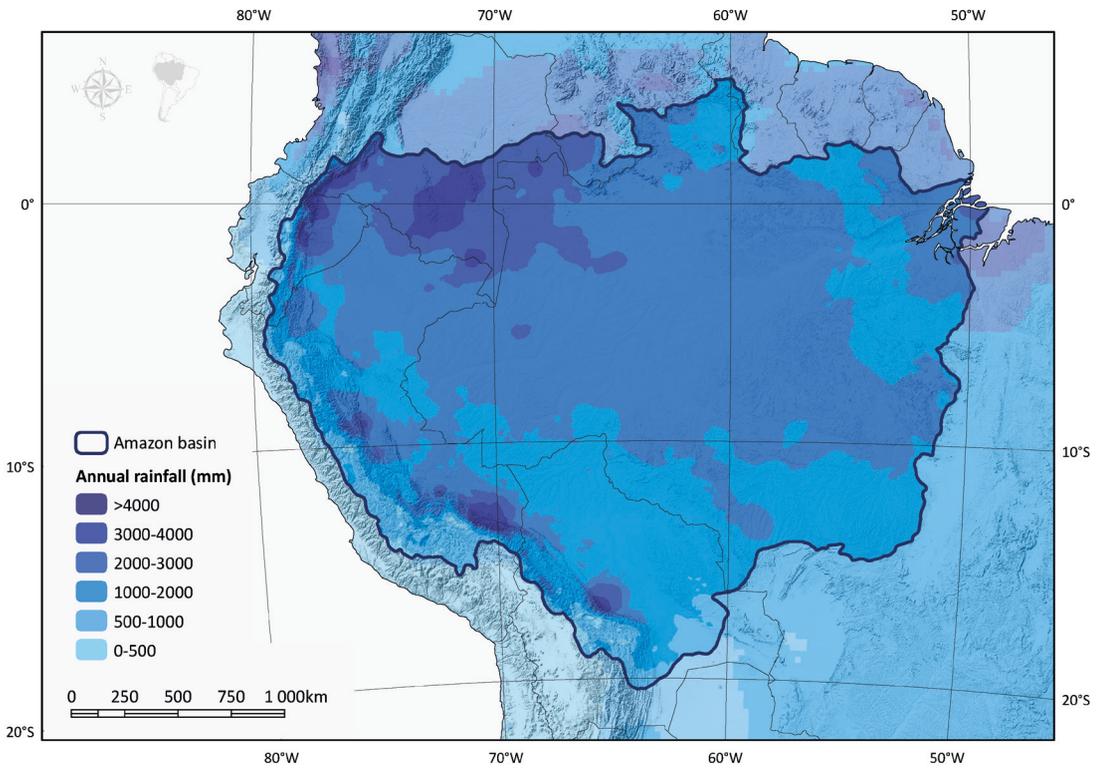
2. River bank and markets near the triple border

photos : NEPECAB-UFAM

moyennes⁷. Les cultures – abondantes en période de décrue et donc à l'origine d'un coût des aliments plus bas qu'en hautes eaux⁸ – sont adaptées à la variation du niveau de l'eau sur les berges des rivières et dans les *varzeas*. Elles dépendent également des variations saisonnières de la pluviométrie. Les pluies, très abondantes dans cette région (fig. 3), dépassent 200 mm/mois en été austral lors de la mise en place de la mousson sud-américaine et sont plus faibles de juin à septembre lors du retrait de la mousson (fig. 4). En conséquence, le cycle hydrologique de décrue (de mai à avril de l'année suivante) de l'Amazonie présente à la station de Tamshiyacu (voir fig. 1) un marnage moyen de 7 m entre les niveaux de crue en avril-mai et d'étiage en septembre (fig. 5)⁹. Or, la variabilité climatique, plus forte dans cette région depuis une vingtaine d'années qu'elle ne l'était dans les années 1970 et 1980¹⁰, engendre des extrêmes hydrologiques susceptibles de réduire les capacités adaptatives des populations, ce d'autant plus que les phénomènes extrêmes sont fréquents et consécutifs. Par exemple, la crue de 2009 suivie par la sécheresse extrême de 2010 a eu des impacts très négatifs sur les cultures de *varzea* et sur celles de terre ferme, ou *restinga*¹¹. S'ajoutent à l'observation des extrêmes celles qui relèvent de la structure du cycle annuel de l'hydrologie, par exemple le retard de la descente des eaux qui a donné lieu à des semis tardifs ces dernières années.

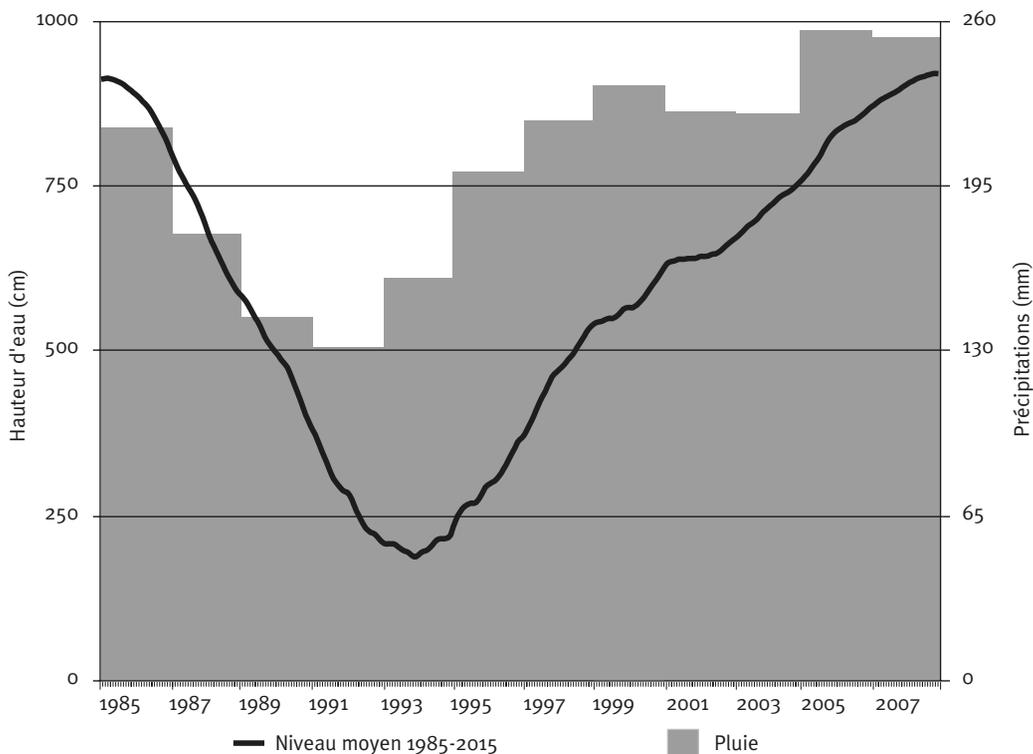
Ecological and Human Impacts », *Climatic Change*, vol. 116, n° 3, 2013, p. 723-746 ; Moisés Augusto Tavares Pinto, *A caça e a pesca na beira de Tabatinga*, op. cit.

- 7 Sylvia Bahri, « Les systèmes agroforestiers de l'île de Careiro », *Amazoniana*, vol. 12, n° 3-4, 1993, p. 551-563.
- 8 André de Oliveira Moraes & Tatiana Schor, « Mercados, tabernas e feiras: custo de vida nas cidades na calha do rio Solimões. Fortaleza », *Mercator*, vol. 9, n° 19, 2010, p. 101-115.
- 9 Jhan Carlo Espinoza et al., « Contrasting Regional Runoff Evolution in the Amazon Basin (1974-2004) », *Journal of Hydrology*, vol. 375, n° 3-4, 2009, p. 297-311.
- 10 Josyane Ronchail, Gérard Cochonneau, Michel Molinier, Jean-Loup Guyot, Adriana Goretti De Miranda Chaves, Valdemar Guimarães & Eurides de Oliveira, « Rainfall Variability in the Amazon Basin and SSTs in the Tropical Pacific and Atlantic Oceans », *International Journal of Climatology*, vol. 22, n° 13, 2002, p. 1663-1686 ; Jhan Carlo Espinoza et al., « The Major Floods in the Amazonas River and Tributaries (Western Amazon basin) During the 1970-2012 Period: A Focus on the 2012 Flood », *J. Hydrometeorol.*, vol. 14, n° 3, 2013, p. 1000-1008, en ligne : <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JHM-D-12-0100.1> ; José A. Marengo & Jhan Carlo Espinoza, « Review Article. Extreme Seasonal Droughts and Floods in Amazonia: Causes, Trends and Impacts », *International Journal of Climatology*, vol. 36, n° 3, 2016, p. 1033-1050, en ligne, doi: 10.1002/joc.4420
- 11 Patrícia Fernanda Pinho, Jose A. Marengo & Mark Stottford Smith, « Complex Socio-ecological Dynamics Driven by Extreme Events in the Amazon », art. cit. ; Javier Tomasella, Patrícia F. Pinho, Laura S. Borma, José A. Marengo, Carlos A. Nobre, Olga R. F. O. Bittencourt, Maria C. R. Prado, Daniel A. Rodríguez & Luz A. Cuartas, « The Droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: Floodplain Hydrology and its Potential Ecological and Human Impacts », *Climate Change*, vol. 116, n° 3, p. 723-746.



3. Pluies annuelles (en mm) dans le bassin de l'Amazone
 La région représentée dans la figure 1 est signalée par un cadre rouge

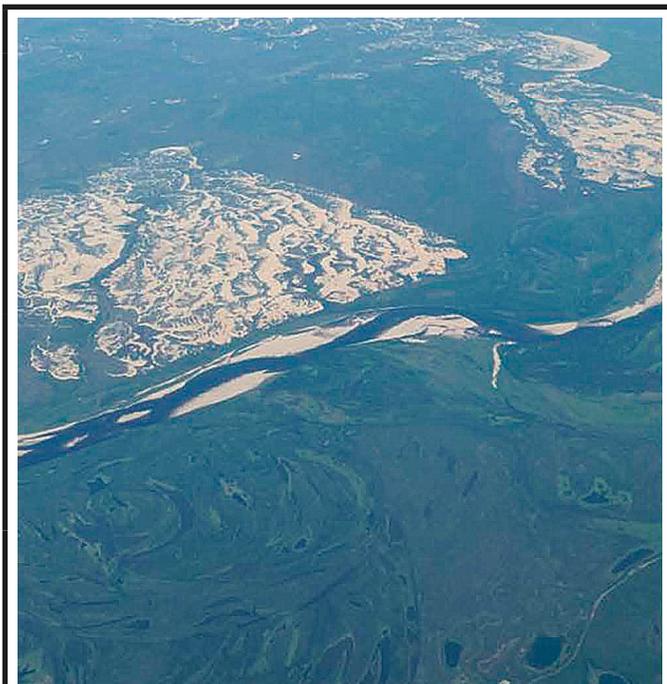
3. Annual rainfall (mm) in the Amazon basin
 The region represented in figure 1 is the area in the red frame



4. Pluie moyennes mensuelles dans le département de Loreto (1985-2009)

4. Average annual rainfall in the department of Loreto (1985-2009)

Source : Matthieu Guimberteau, Guillaume Drapeau *et al.*
 « Discharge Simulation in the Sub-Basins of the Amazon Using ORCHIDEE Forced by New Datasets », art. cit. Hauteurs d'eau quotidiennes de l'Amazone à Tamshiyacu [Mean daily water level of the Amazonas in the station of Tamshiyacu] (1985-2015)
 (Source des données / source of data : SO-Hybam)



5. Rivières et plaines d'inondations dans le bassin de l'Amazone durant l'été (en haut) et la crue (en bas). Pendant l'été de vastes plages liées au retrait de l'eau apparaissent le long de la rivière et dans les plaines d'inondation

Source : NEPECAB-UFAM

5. Rivers and flooding plains in the Amazon basin, during the dry season (top) and during the flooding season (below). During the dry season (top), large beaches related to receding waters appear along the river and in the flooding plains



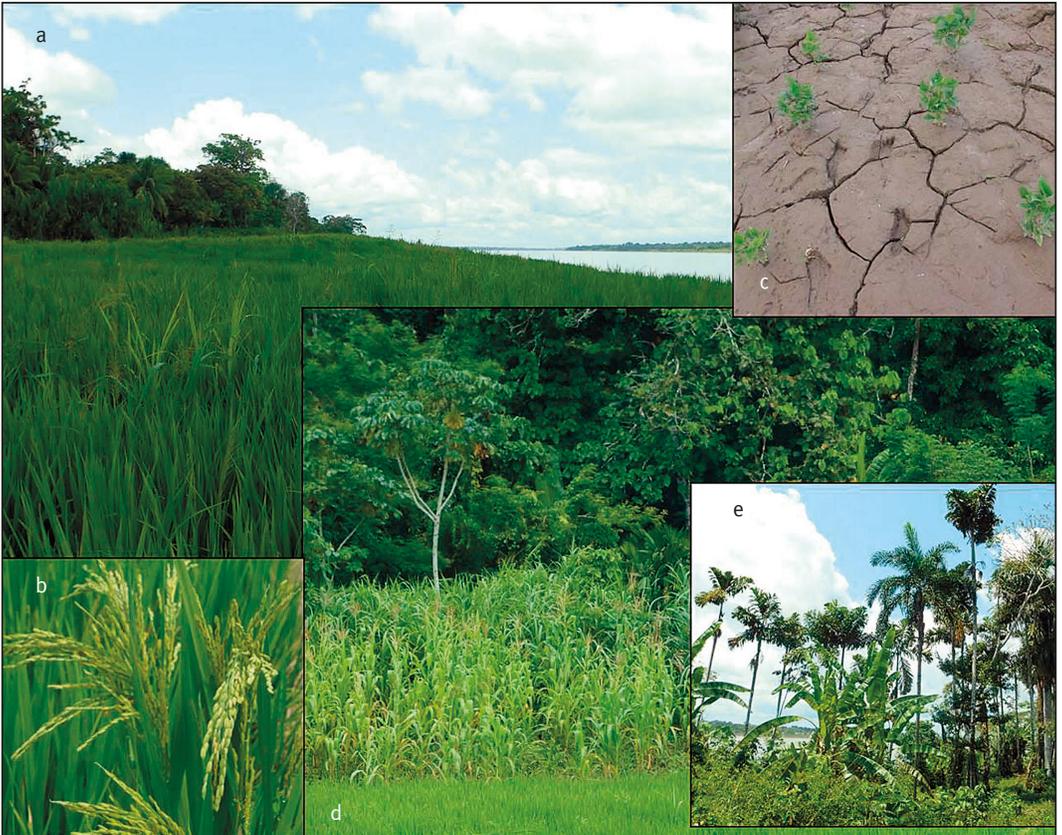
C'est pourquoi ce travail a pour objectif d'examiner les liens entre hydrologie et résultats agricoles en Amazonie du nord-ouest. Nous nous intéresserons d'abord à une culture rentable en Amazonie péruvienne, celle du riz¹². Nous considérerons ensuite les risques hydrologiques qu'encourent les cultures de berge et de *varzea* tels qu'ils sont relatés par la littérature et par nos partenaires sur le terrain. Ensuite, nous nous attacherons à décrire quelques caractéristiques de la saison de décrue pendant la période 1985-2015 et, avant de conclure et d'ouvrir des perspectives, nous tenterons de mettre en relation les statistiques agricoles relatives au riz et les caractéristiques hydrologiques du fleuve Amazone.

LA CULTURE DU RIZ DANS LE DÉPARTEMENT DE LORETO ET SON LIEN AVEC LE CYCLE HYDROLOGIQUE ANNUEL

La mise en culture des berges de rivières et des lacs d'inondation intervient quand la saison sèche est bien établie et quand le niveau de la rivière a suffisamment baissé, dégageant de larges étendues fertilisées par les formations alluviales limono-argileuses apportées par la crue annuelle¹³. Ainsi, les berges et *varzeas* deviennent disponibles pour la culture entre juin et novembre (fig. 4). Sur les berges, du fait d'une exondation plus longue en haut qu'en bas, les cultures sont étagées selon leur vitesse de croissance, la qualité des sols : vers le bas sont plantés le riz, les haricots, les arachides, les pastèques, généralement des plantes annuelles (fig. 6a, 6b & 6c), tandis que vers le haut et dans la *restinga* poussent des plantes à cycles longs ou des plantes pérennes, le manioc, le maïs, ainsi que des arbres fruitiers tels que palmiers à coco, palmiers à *açai*, papayers, bananiers, cacaoyers (fig. 6d & 6e).

La culture du riz dans le département de Loreto, le plus septentrional de l'Amazonie péruvienne (fig. 1), a été retenue dans cette étude car cette céréale représente un des piliers de l'alimentation. Le riz est omniprésent sur les marchés péruviens et, comme il n'est pas produit commercialement en

- 12 Ricardo A. Labarta, Douglas White, Efraín Leguía, Wagner Guzmán & Javier Soto, « La agricultura en la Amazonía Ribereña del Río Ucayali. ¿Una Zona Productiva pero Poco Rentable? », *Acta Amazonica*, vol. 37, n°2, 2007, p. 177-186, en ligne, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672007000200002
- 13 Sylvia Bahri, « Les systèmes agroforestiers de l'île de Careiro », art. cit.; Patrícia Fernanda Pinho *et al.*, « Complex Socio-ecological Dynamics Driven by Extreme Events in the Amazon », art. cit.; Javier Tomasella *et al.*, « The Droughts of 1997 and 2005 in Amazonia », art. cit.; Wolfgang J. Junk, « The Central Amazon River Floodplain: Concepts for the Sustainable Use of its Resources », dans Wolfgang J. Junk, Jörg J Ohly, Maria Teresa Fernandes Piedade & Maria Gercilia Mota Soares (dir.), *The Central Amazon Floodplain: Actual Use and Options for a Sustainable Management*, Leiden, Backhuys Publishers, 2000, p. 75-94; Mya Sherman, James Ford *et al.*, « Indigenous Health Adaptation to Climate Change (IHACC) Research Group. Vulnerability and Adaptive Capacity of Community Food Systems in the Peruvian Amazon: a Case Study From Panaillo », *Natural Hazards*, vol. 77, n° 3, 2015, p. 2049-2079.



6. Étagement de la végétation sur les berges de l'Amazonie à San Pablo de Loreto

- a, b. riz;
 c. arachides en bas de berge ;
 d. maïs et arbres fruitiers en haut de la berge ;
 e. arbres fruitiers sur la terre ferme.

6. Zonation of vegetation on the banks of the Amazonas River in San Pablo de Loreto

- a,b. rice;
 c. peanuts at the bottom of the bank;
 d. maize and fruit trees at the top of the bank;
 e. fruit trees on the main land.

Photos/©NEPECAB-UFAM

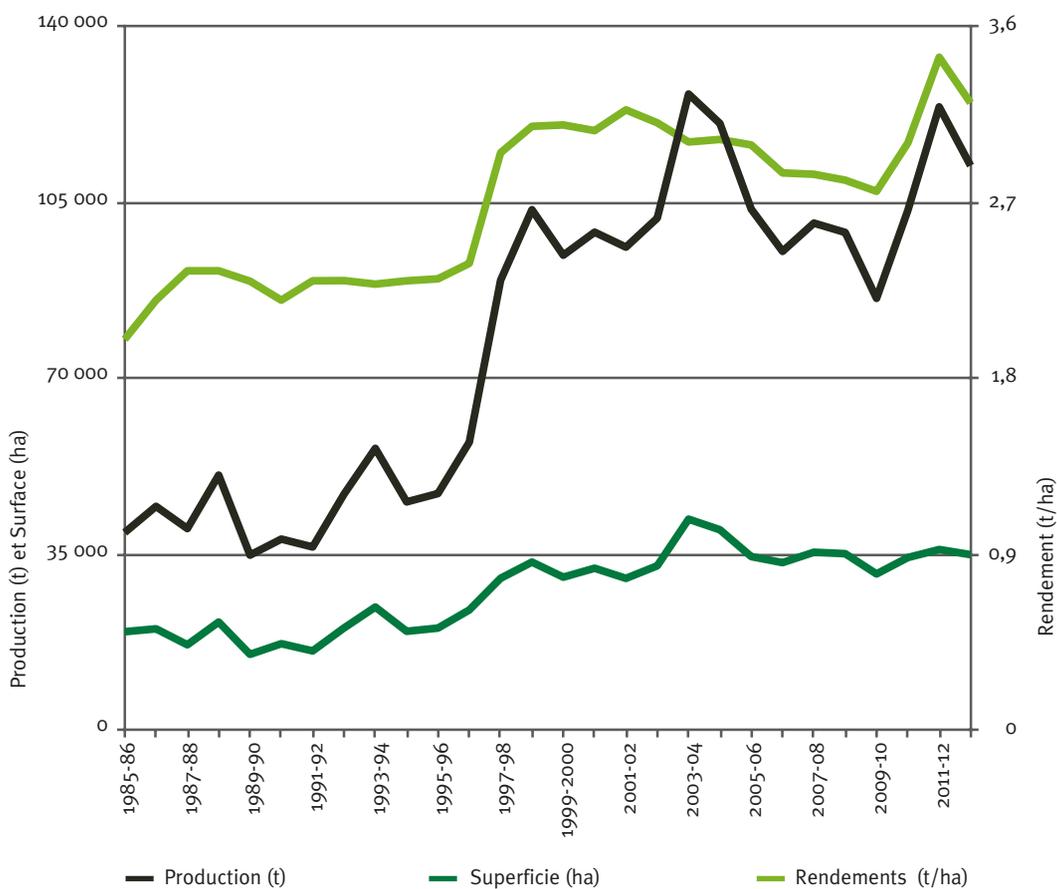
Amazonie colombienne et brésilienne, le riz péruvien est aussi vendu dans les pays voisins. Il est produit en majorité (60 %¹⁴) sur les berges très fertiles des rivières (*barrizales*; **fig. 6a & 6b**) et secondairement dans les zones de terre ferme, qui ne sont pas en principe affectées par les crues et sont donc moins fertiles. Les semis de riz ont lieu en général de juin à août et la récolte d'août à octobre. Les espèces plantées sont souvent « précoces » (cycle de 90 à 105 jours) pour arriver à maturation avant la remontée des eaux. Cependant, des espèces plus tardives (*Capirona*, au cycle de 120 jours), plus goûteuses et aux meilleurs rendements, sont confinées dans les parties hautes de la berge ou sur la *restinga*.

Environ 100 000 tonnes de riz sont produites chaque année dans le département de Loreto (**fig. 7**), ce qui est peu à l'échelle du Pérou (presque 3 millions de tonnes)¹⁵. La figure 7 montre de plus l'augmentation des surfaces, productions et rendements durant la période 1985-2012, très accentuée vers la fin des années 1990 et suivie d'un plateau. Les irrégularités d'une année sur l'autre sont considérables, avec des productions qui oscillent entre 120 000 t en 2003, 2004 et 2011 et moins de 100 000 t en 2009. Les rendements, près de 3 t/ha, sont faibles par rapport à la moyenne nationale (7,3 t/ha) car la culture n'est pas mécanisée, est pratiquée sans irrigation ni intrants, et avec une aide limitée, les techniciens agricoles étant peu nombreux et opérant sur des territoires immenses. Le prix payé est très faible, parmi les plus bas du Pérou, car la qualité du riz est relativement médiocre. En effet, les grains sont brisés par des techniques de battage traditionnelles qui consistent à frapper le riz au sol; par ailleurs le riz « precoz », dont la durée de maturation est courte, a de moindres qualités gustatives que le riz tardif. Néanmoins, la culture du riz sur les berges des rivières est estimée comme l'une des cultures amazoniennes les plus rentables¹⁶, ceci malgré la variabilité interannuelle de la production qui est attribuée à des facteurs économiques comme la chute des prix ou le coût des transports ou encore des aléas naturels.

14 Ricardo A. Labarta *et al.*, « La agricultura en la Amazonia Ribereña del Río Ucayali », art. cit.

15 MINAG, Dirección Regional Agraria – Loreto, *Arroz. Boletín informativo*, Iquitos, 2011, 28 p.

16 Ricardo A. Labarta *et al.*, « La agricultura en la Amazonia Ribereña del Río Ucayali », art. cit.



7. Production (tonnes), superficies (hectares) et rendements (tonnes par hectare) annuelles de riz dans le département de Loreto (Pérou)

La campagne agricole 1985-1986 court d'août 1985 à juillet 1986 et inclut donc les récoltes de la saison de décrue centrée sur la période de juin à octobre 1985

7. Annual rice production (tons), surfaces (hectares) and yields (tons by hectares) in the department of Loreto (Peru)

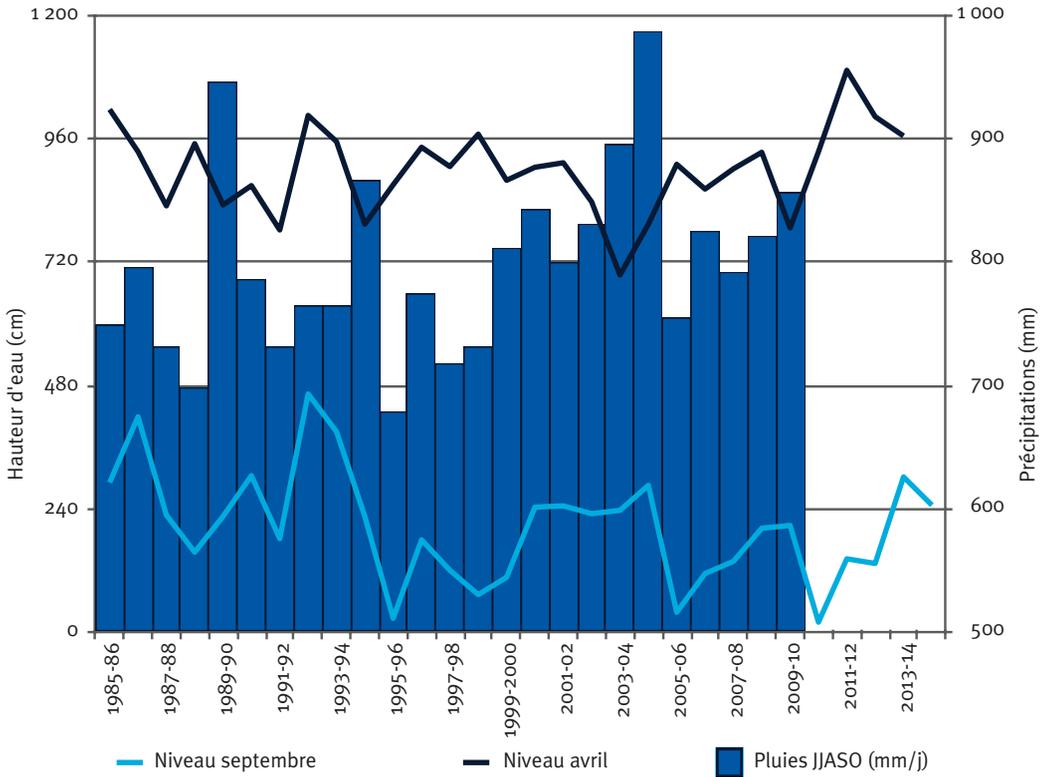
The agricultural campaign 1985-86 is from August 1985 to July 1986 and includes the crops of the June to October 1985 recession season

Source des données / source of data: MINAG

Cultiver sur les berges et dans les *varzeas* fertiles ne présente pas que des avantages compte tenu du voisinage de l'eau. Le risque de submersion des récoltes lié à une fin de saison de décrue précoce est celui qui est le plus souvent évoqué tant dans la littérature technique et scientifique¹⁷ que par les acteurs locaux (agriculteurs, techniciens et ingénieurs agricoles) consultés lors de missions en septembre 2014 et avril 2015. Lorsque l'eau monte tôt, très vite et très haut à la fin de décrue, l'activité est à son comble dans les communautés pour récolter et éventuellement transformer les produits afin de les conserver (transformation du manioc en *farinha*, par exemple). De plus, une crue très forte peut submerger les cultures de *restinga* qui sont habituellement à l'abri de l'eau. La durée de la saison de décrue est un autre facteur important pour les cultures. Si elle est trop courte (en raison d'une descente des eaux tardives et/ou d'une remontée précoce de la rivière), les agriculteurs doivent récolter un riz qui n'est pas arrivé à maturation et qui est donc de mauvaise qualité. Autre aléa redouté : le fait que la rivière baisse peu pendant la saison de décrue, ce qui limite l'extension des surfaces cultivables. Enfin, un « faux départ » de la saison de décrue avec une hausse inattendue des niveaux d'eau en juillet peut également nuire à la saison agricole, si le riz a déjà été semé. Comme les agriculteurs ne disposent pas de beaucoup de semences, ils ne peuvent renouveler leurs semis si ceux-ci ont été submergés.

Or, les chroniques récentes montrent que la structure du cycle de décrue varie considérablement d'une année à l'autre (fig. 8). L'année 2002-2003 est un cas extrême puisque le niveau de l'eau a fortement baissé très tôt (- 3,9 m début juillet) puis est remonté de façon conséquente (+ 6,4 m fin juillet) avant de baisser à nouveau (cas de faux départ de la saison de décrue, fig. 9).

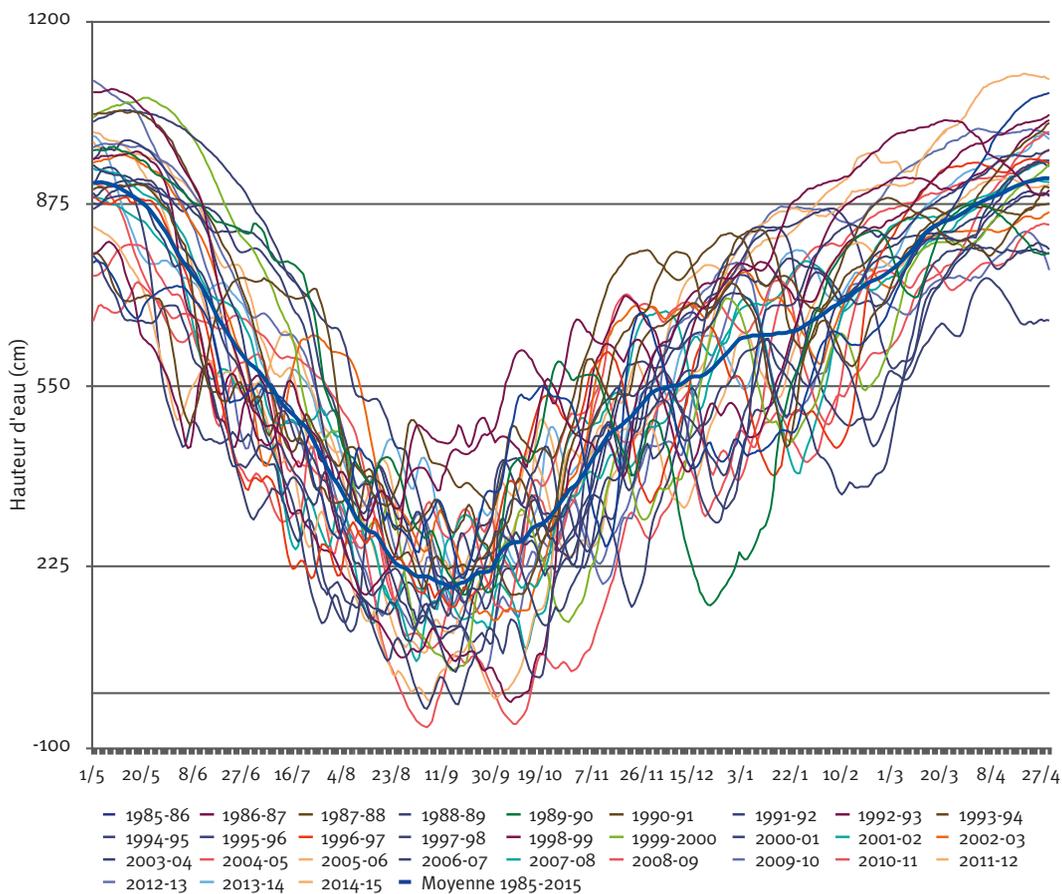
17 *Ibid.*; Lars Peter Kvist & Gustav Nebel, « A Review of Peruvian Flood Plain Forests: Ecosystems, Inhabitants and Resource Use », *Forest Ecology and Management*, vol. 150, n° 1-2, 2001, p. 3-26, en ligne : <https://www.sciencedirect.com/journal/forest-ecology-and-management/vol/150/issue/1>; Guillaume Drapeau, Catherine Mering, Josyane Ronchail & Naziano Filizola, « Variabilité hydrologique et vulnérabilité des populations du Lago Janauaca (Amazonas, Brésil) », *Confins*, n° 11, 2011, en ligne : <http://confins.revues.org/6904>; Irene Hofmeijer *et al.*, « Community Vulnerability to the Health Effects of Climate Change Among Indigenous Populations in the Peruvian Amazon: a Case Study From Panaillo and Nuevo Progreso », *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, vol. 18, n° 7, 2013, p. 957-978; Patrícia Fernanda Pinho *et al.*, « Complex Socio-ecological Dynamics Driven by Extreme Events in the Amazon », art. cit.; Javier Tomasella *et al.*, « The Droughts of 1997 and 2005 in Amazonia », art. cit.; Mya Sherman, James Ford *et al.*, « Indigenous Health Adaptation to Climate Change (IHACC) Research Group », art. cit.; MINAG, Dirección General de Competitividad Agraria, *El arroz. Principales Aspectos de la Cadena Agroproductiva*, Lima, 2013, 36 p., en ligne : <http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/agroeconomiaarroz3.pdf>; MINAG, Dirección Regional Agraria – Loreto, *Arroz. Boletín informativo, op. cit.*



8. Hauteurs d'eau (cm) de tous les cycles de décrue de 1985-1986 à 2014-2015
 Le cycle annuel moyen est représenté par une ligne en gras

8. Water levels (cm) of all the recession cycles from 1985-1986 to 2014-2015
 The average cycle is represented with a bold line

Source des données / source of data: SO-Hybam



9. Hauteurs d'eau (cm) des cycles de décrue de 1993-1994, 2002-2003 et 2010-2011
Le cycle annuel moyen (1985-2015) est représenté par une ligne bleu foncé

9. Water levels (cm) of the 1993-1994, 2002-2003 and 2010-2011 recession cycles
The average cycle (1985-2015) is represented with a dark blue line

Source des données / source of data: SO-Hybam

De plus, la décrue a duré moins longtemps que d'habitude ; l'eau est passée sous la cote des 6 m (valeur médiane de la hauteur d'eau) pendant à peine trois mois au lieu de six mois en moyenne, puis, en octobre, l'eau est remontée beaucoup plus vite que d'habitude. En 1993-1994, les eaux ne sont pas descendues aussi bas qu'en moyenne, ce qui a amputé l'étendue des surfaces cultivables (fig. 9). À l'inverse, les eaux sont descendues très bas en 2010-2011 et la durée de décrue a été plus longue qu'en moyenne, mais ce fut aussi une année de forte sécheresse¹⁸.

Or, si le riz a besoin de lumière (donc de peu de nuages), le manque d'eau constitue un facteur limitant : 160 mm de pluie par mois sont nécessaires pendant tout le cycle de croissance¹⁹. Comme cette valeur n'est pas toujours atteinte pendant la période de décrue, les pluies seront aussi examinées dans la suite du travail.

42

ÉVOLUTION DES EXTRÊMES HYDROLOGIQUES ET DE LA STRUCTURE DE LA SAISON DE DÉCRUE (1985-2015)

Compte tenu des risques évoqués dans la partie précédente, la variabilité des pluies, des extrêmes hydrologiques, ainsi que celle des variables hydrologiques qui caractérisent la structure du cycle de décrue (dates de début et de fin de saison de décrue, durée de la saison de décrue, vitesse de remontée des eaux à la fin de la saison de décrue) sont examinées dans cette partie.

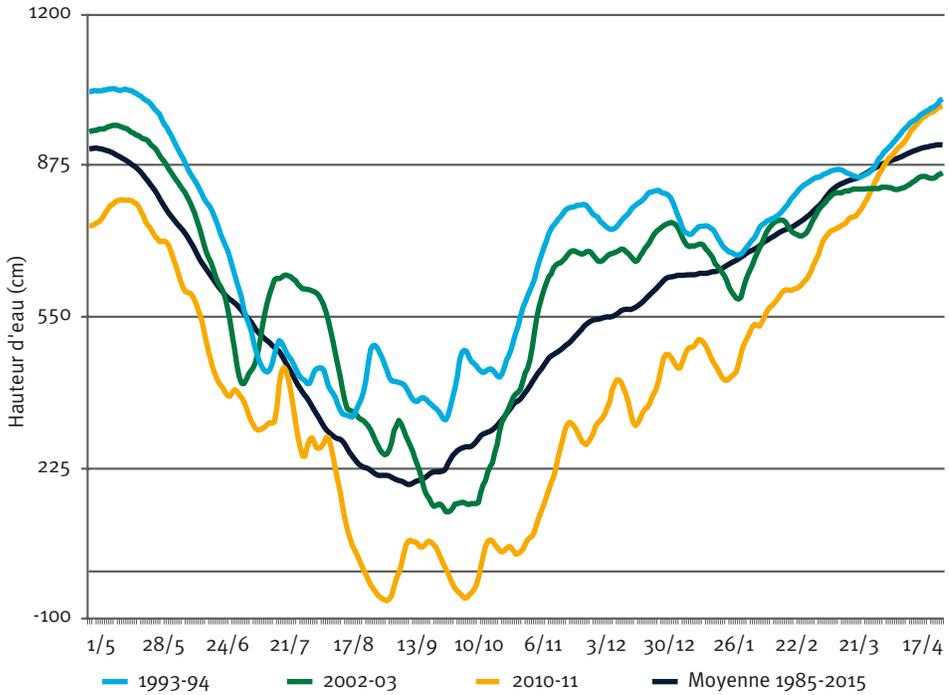
Les pluies de juin à octobre dans le département de Loreto pendant la période 1985-2009²⁰ varient entre 700 et 1 000 mm et elles sont restées stables pendant la période 1985-2009 (fig. 10). La figure 10 montre aussi l'évolution des hauteurs d'eau minimales (celles de septembre) et maximales (celles d'avril). Les valeurs maximales varient beaucoup d'une année à l'autre, entre 7 et 11 m, et ne présentent pas de tendance. Les valeurs minimales, très variables elles aussi, présentent une rupture en 1993, détectée avec la méthode de Hubert²¹ et significative avec un risque d'erreur inférieur à 1 %. Les hauteurs d'eau minimales moyennes qui étaient de 3 m avant 1993 sont passées à 1,6 m après cette date.

¹⁸ Jhan Carlo Espinoza *et al.*, « Climate Variability and Extreme Drought in the Upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the Exceptional 2010 Drought », *Geophys. Res. Lett.*, n° 38, 2011, doi/10.1029/2011GL047862

¹⁹ CIRAD-GRET-MAE, *Mémento de l'agronome*, Montpellier, CIRAD, 2002, 1691 p.

²⁰ Matthieu Guimberteau, Guillaume Drapeau *et al.* « Discharge Simulation in the Sub-Basins of the Amazon Using ORCHIDEE Forced by New Datasets », *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, n° 3, 2012, p. 911-935.

²¹ Pierre Hubert, Jean-Pierre Carbonnel & Ali Chaouche, « Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest », *Journal of Hydrology*, vol. 110, n° 3-4, 1989, p. 349-367.



10. Hauteur d'eau (cm) de l'Amazone à Tamshiyacu en septembre et en avril
 Pluie de juin à octobre dans le département de Loreto
 (fenêtre de 2,5 à 6,5° S et de 77,5 à 70,5° W).

10. *Water level of the Amazonas River in the station of Tamshiyacu in September and April*
source of data: SO-Hybam. Rainfall from June to October in the department of Loreto
(window from 2.5 to 6.5°S and from 77.5 to 70.5°W).

Source des données : SO-Hybam ; source : Matthieu Guimberteau, Guillaume Drapeau
et al., « Discharge Simulation in the Sub-Basins of the Amazon Using ORCHIDEE
 Forced by New Datasets », art. cit.

La durée de la saison de décrue est considérée comme la période pendant laquelle le niveau de la rivière passe en dessous d'une hauteur de 4,5 m. Cette valeur – appelée 33^e centile et abrégée en C33 dans la suite du texte – correspond à la hauteur d'eau qui délimite 33 % des valeurs quotidiennes les plus faibles de la période 1985-2015. Par conséquent, la date de début de la saison de décrue est la première date à laquelle le niveau de l'eau passe en dessous de C33 de façon durable (plus de dix jours) et la date de fin de la saison de décrue est définie comme la date à laquelle le niveau de l'eau passe au-dessus de C33 pendant au moins dix jours. Par ailleurs, la vitesse de remontée des eaux est estimée par le nombre de jours séparant les dates où se produisent le deuxième C33 et le deuxième 66^e centile (C66; 7,3 m). Des calculs identiques ont été réalisés avec les 10^e (C10; 2,1 m) et 20^e centiles (C20; 3,2 m).

44

Le début de la saison de décrue, quand on considère C33, se produit en moyenne le 20 juillet, sa fin le 10 novembre et la durée moyenne de la décrue est de cent-quatorze jours (**tableau 1a, fig. 11**), ce qui correspond à peu près à la durée de croissance du riz. La variation des dates est importante puisqu'on observe deux mois de battement pour la mise en place de la saison de décrue et six mois pour la date de fin. Le début de la saison de décrue est tardif (fin juillet) depuis quatre ans, ce qui alerte les agriculteurs. Il a été plus précoce (fin juin, début juillet) au milieu des années 1990 et 2000, mais encore plus tardif qu'à présent au début des années 2000. La durée de la décrue peut être réduite des deux tiers (trente-cinq jours en 1992-1993) ou doublée comme lors de la sécheresse de 2010 (**tableau 1b, fig. 11**). Elle présente par ailleurs une tendance à l'allongement de presque un mois entre les années 1980 et les années présentes, en lien avec un retard de la date de fin de la décrue d'un mois entre le début et la fin de la période étudiée. La fin de la décrue s'est ainsi décalée de fin octobre-début novembre à fin novembre. Ces résultats se vérifient également quand on considère le 20^e centile (**tableau 1b**).

Par ailleurs, la vitesse de remontée de l'eau entre 4,5 m (C33) et 7,3 m (C66) est très variable; elle est de soixante-dix jours en moyenne, mais peut durer entre trente-sept et cent cinquante jours selon les années (**tableau 1c, fig. 12**). Cette vitesse a par ailleurs tendance à s'accélérer avec le temps. Le passage entre 4,5 m (C33) et 7,3 m (C66) se faisait en moyenne en trois mois jusqu'à 2001 (date d'une rupture dans la série déterminée avec un risque d'erreur inférieur à 1 %), alors qu'elle ne dure plus qu'un mois et demi en fin de période (**fig. 12**). Cette durée s'est particulièrement raccourcie depuis cinq ans.

Tableau 1. Dates moyennes, minimales, maximales et tendances
(coefficients de corrélation avec le temps et probabilités associées)
(Source: SO-Hybam)

*Average, minimum and maximum dates and trends
(coefficient of correlation with time and associated probabilities)*

A	Date moyenne	Date la plus précoce	Date la plus tardive	Tendance: r et probabilité
C10 début - 211cm	24-août	25-juil	3-oct	
C10 fin	29-sept	19-août	14-nov	
C20 début- 322 cm	9-août	12-juil	9-sept	
C20 fin	17-oct	15-août	4-déc	0,48 (p<0,01)
C33 début- 447cm	20-juil	20-juin	24-août	
C33 fin	10-nov	30-août	2-févr	0,53 (p<0,01)
B	Durée moyenne (jours)	Durée minimale (jours)	Durée maximale (jours)	Tendance: r et probabilité
Durée C10	33	0	91	
Durée C20	67	0	129	0,38 (p<0,05)
Durée C33	114	35	225	0,39 (p<0,05)
C	Durée moyenne (jours)	Durée minimale (jours)	Durée maximale (jours)	Tendance: r et probabilité
Passage C33-C66	70	37	150	0,56 (p<0,01)
Passage C20-C66	96	30	165	0,52 (p<0,01)
Passage C10-C66	114	47	179	0,31 (p<0,1)

a. Première et deuxième dates d'apparition du 10^e (C10), du 20^e (C20) et du 33^e (C33) centiles des hauteurs d'eau de l'Amazone à Tamshiyacu (1985-2015)

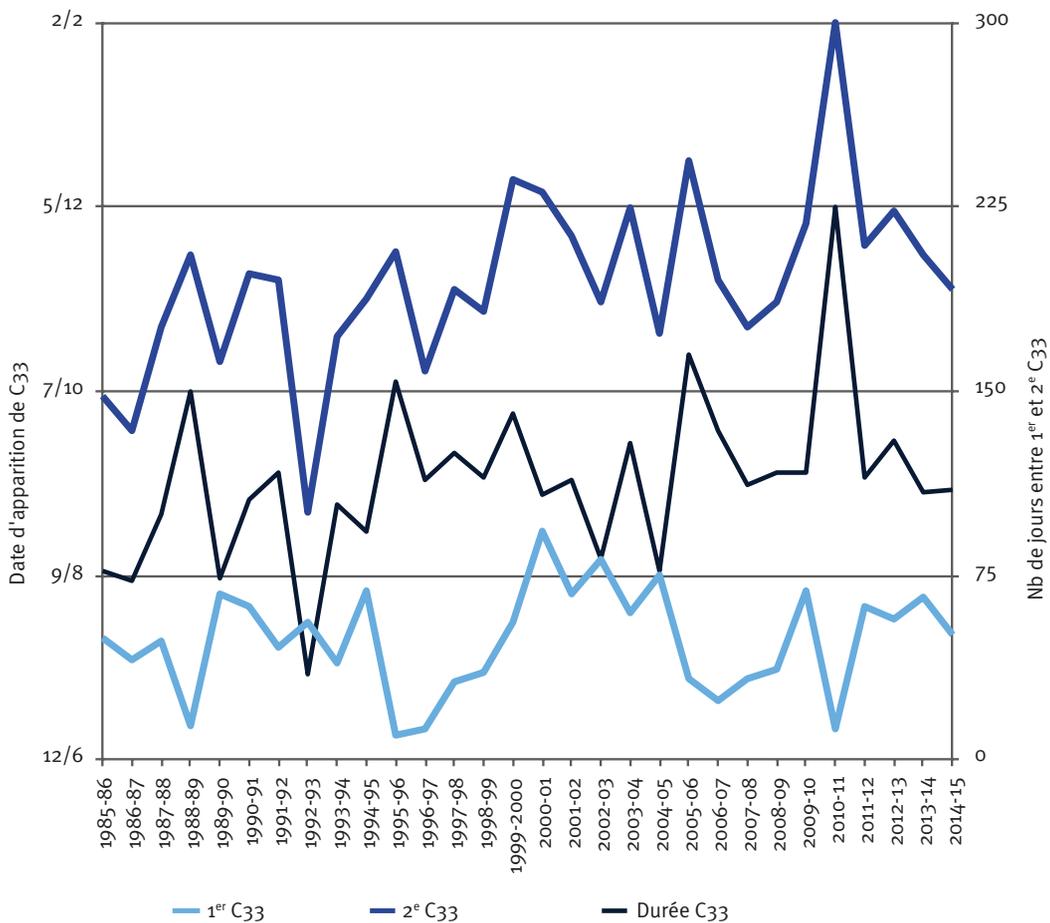
b. Durées (jours) des saisons de décrue correspondant aux trois centiles

c. Durées (jours) entre les deuxièmes C10, C20 et C33 et le deuxième 66^e centiles

a. the first and second occurrences of the 10th (C10), 20th (C20) and 33th (C33) centiles of the level of the river Amazonas in the station of Tamshiyacu (1985-2015)

b. durations (in days) of the water recession period corresponding to the three centiles

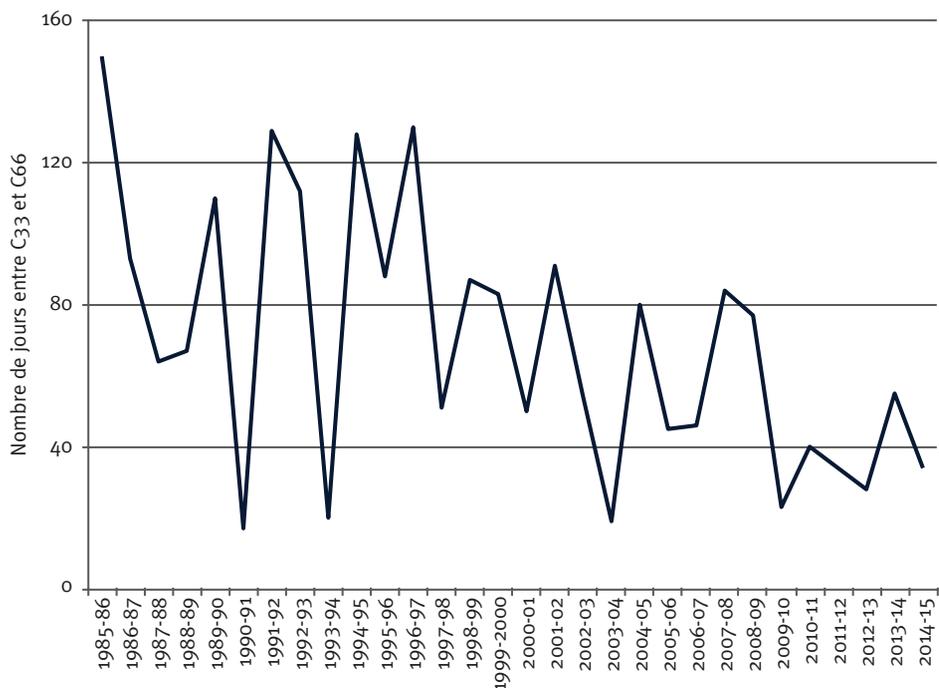
c. duration (in days) between the second occurrences of C10, C20 or C33 and the second 66th centiles



11. Dates d'apparition des valeurs de hauteur d'eau de l'Amazone à Tamshiyacu correspondant au 33^e centile (4,5 mètres) de la période 1985-2015, lors de la descente des eaux (premier C33) et lors de la remontée des eaux (deuxième C33), et durée (en jours) entre ces deux dates

11. Fall (first C33) and raising (second C33) dates of occurrence of a water level corresponding to the 33rd percentile (4,5 m) in the station of Tamshiyacu (Amazonas River)
The difference between both dates (in days) is the duration of the water recession period

Source des données / source of data: SO-Hybam



12. Nombre de jours entre les deuxièmes occurrences des 33^e (C33) et 66^e (C66) centiles des hauteurs d'eau de l'Amazone à Tamshiyacu pour la période 1985-2015

12. Number of days between the second occurrences of the 33rd (C33) and 66th (C66) percentiles of the water level of the Amazonas in the station of Tamshiyacu, during the 1985-2015 period

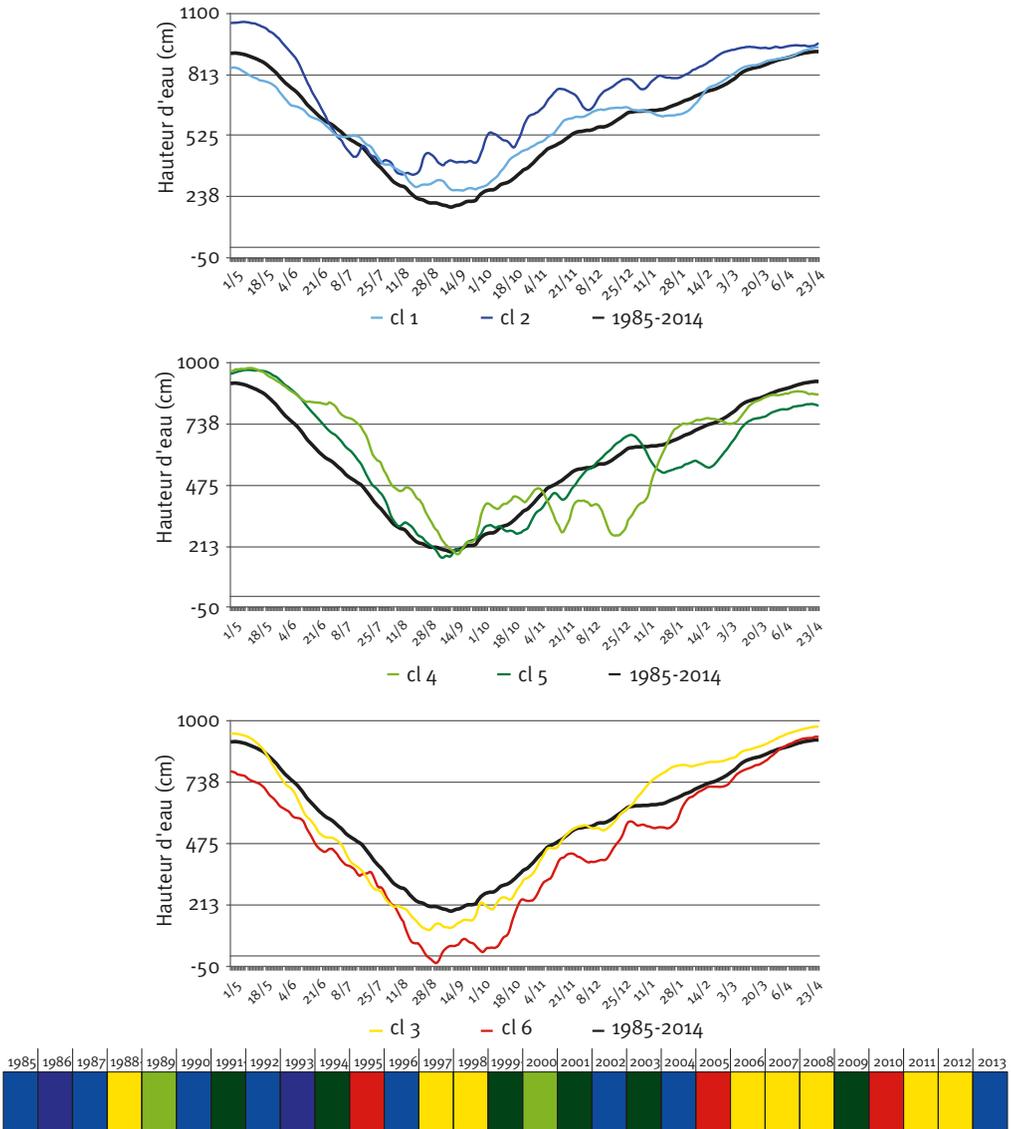
Source des données / source of data: SO-Hybam

Pour synthétiser ces différentes informations, une typologie des cycles hydrologiques de décrue a été réalisée au moyen d'une classification ascendante hiérarchique (CAH). Les classes 1 et 2 représentent les années de faibles et courtes décrues ; lors des années de la classe 2, faibles et courtes décrues sont exacerbées et la hauteur d'eau ne descend guère au-dessous de 4 m (contre 2 m en moyenne – **fig. 13**). La classe 5 représente une année proche de la normale, avec une descente des eaux rapide, tandis que la classe 4 regroupe des années dont la durée de décrue fut extrêmement brève à cause surtout d'une descente tardive des eaux. Ces dernières années, assez rares, sont par ailleurs caractérisées par une mise en place très tardive d'une réelle saison des pluies et de la remontée des eaux. Enfin, les dernières classes sont représentatives de cycles « secs », avec une décrue basse (classe 3) à très basse (classe 6) et plus longue que d'habitude, à la fois en raison d'une descente précoce et d'une remontée tardive des eaux. Les valeurs inférieures à C33 durent six mois dans le cas de la classe 6 (au lieu de quatre en moyenne). Enfin, le calendrier de la **figure 13** montre que les années appartenant aux classes 3 et 6 sont devenues plus fréquentes depuis 2005, ce qui est en accord avec les tendances observées précédemment.

LIEN ENTRE VARIABILITÉS HYDROCLIMATIQUES ET PRODUCTION AGRICOLE

Une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée sur les différents indicateurs hydrologiques mentionnés plus haut et les pluies dans le département de Loreto. Les valeurs retenues sont des écarts à la tendance linéaire quand on en observe une, afin de tenir compte non pas de leur variabilité à long terme, mais de leur variabilité interannuelle. Les écarts aux tendances des rendements, surfaces et productions sont également inclus dans l'analyse comme variables supplémentaires. On a enlevé la tendance des variables agricoles (selon une fonction polynomiale), car leur évolution à la hausse est supposée liée à une amélioration des pratiques agricoles et de la demande. Au contraire, les écarts à la tendance, qui montrent des années avec des résultats agricoles meilleurs ou moins bons que ce que laissent attendre les améliorations structurelles, sont supposés liés à la variabilité du climat et de l'hydrologie.

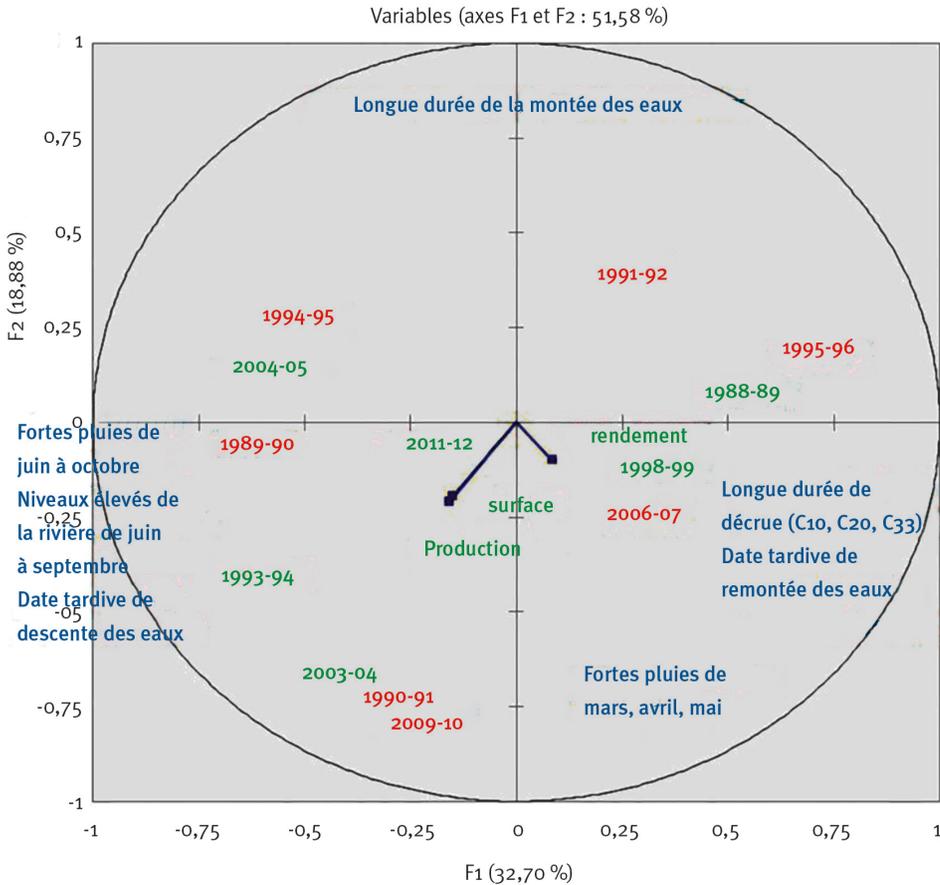
Le premier axe de l'ACP (33 % de la variance) montre l'opposition d'une part, entre des années de fortes pluies pendant la saison de basses eaux, un niveau élevé de la rivière et une date tardive de la descente des eaux, et, d'autre part, une longue durée de décrue et une remontée des eaux tardive, d'autre part (**fig. 14**). L'axe 2 (19 % de la variance) oppose une remontée des eaux lentes, d'une part, et de fortes pluies des mois d'automne austral (mars, avril, mai), d'autre part.



13. Typologie en six classes des cycles de décrue de l'Amazonie à Tamshiyacu, résultant d'une classification ascendante hiérarchique (distance euclidienne et critère de Ward) sur les hauteurs d'eau quotidiennes (cm) et occurrence temporelle des types (calendrier). Les codes couleur retenus pour la représentation des cycles de décrue sont utilisés pour le calendrier.

13. Six classes typology of the water recession cycles of the Amazonas River in Tamshiyacu, resulting from a hierarchical ascendant classification (Euclidian distance and Ward criteria) on the daily water levels (cm) and time occurrence of the different types (calendar). The colors that represent the different types are the same for the lines and in the calendar.

Source des données / source of data: SO-Hybam.



14. Plan 1-2 des variables (simplifié) et de quelques individus (l'échelle est différente pour ceux-ci) résultant d'une analyse en composantes principale sur un tableau dans lequel les années sont caractérisées par des variables relatives aux pluies, aux hauteurs d'eau, aux dates de début et fin de la saison de décrue, à la durée de la saison de décrue et à la vitesse de remontée des eaux.

Les données agricoles sont des variables supplémentaires.

Les années en rouge sont des années de production inférieure à la tendance polynomiale, celles en vert sont des années de production supérieure.

*Two first EOF (simplified) resulting from a principal component analysis on a table where annual water recession cycles are characterized by rainfall, water levels, dates of the beginning and end of the recession cycle, duration of the recession cycle, speed of rising water
Rice surface, production and yields are supplementary variables.*

Red (green) years had worse (better) productions than that predicted by a polynomial trend.

Source des données / sources of data : MINAG/SO-Hybam.

Mal représentées sur ce plan principal, les larges surfaces et les fortes productions de riz ne sont pas de plus associées – comme attendu et en première approche – à une décrue longue, ni à une remontée lente des eaux. La position des variables agricoles semble indiquer qu'elles prennent de fortes valeurs quand il y a des pluies importantes pendant la saison de croissance du riz (et aussi pendant l'automne qui précède) et corrélativement quand les niveaux de la rivière sont élevés. Néanmoins, la dispersion des points correspondant aux années de production supérieure ou inférieure à la tendance témoigne de la faible association statistique entre résultats agricoles et hydrologie (fig. 14).

*

En Amazonie péruvienne, le riz, cultivé majoritairement sur les berges des rivières en période de basses eaux, est une culture rentable et importante pour la sécurité alimentaire des villages et des petites villes autour de la triple frontière. Surfaces et production ont connu une forte progression vers la fin des années 1990 et présentent par ailleurs une importante variabilité.

Pour vérifier ce que suggèrent la littérature et nos interlocuteurs sur le rôle néfaste pour les cultures de décrues courtes et de remontées rapides des eaux, nous avons cherché à mettre en relation la variabilité de l'hydrologie et celle des résultats agricoles. Or, il semble, dans cette première approche qui mérite d'être confirmée, que les résultats agricoles sont peu liés à ces facteurs hydrologiques et qu'un certain nombre de pistes mériteraient d'être explorées. Concernant les données agricoles, il serait utile de rechercher (sur le terrain car elles ne sont pas disponibles en ligne) des données qui différencient productions de berges de celles de *restinga* puisqu'elles n'encourent pas les mêmes risques, aux mêmes moments. Le rôle des précipitations – non seulement de leur quantité, mais aussi de leur distribution avant et pendant la croissance du riz – est une autre piste qui mérite d'être explorée un peu plus avant. Le rôle des températures aussi, car le riz supporte mal les fortes chaleurs avec des maxima supérieurs à 40 °C²². Ces résultats suggèrent aussi des interrogations sur les pratiques adaptatives des agriculteurs. Sont-elles suffisantes pour que les résultats agricoles ne pâtissent pas des aléas climatiques et hydrologiques ? Quelles sont-elles ? Quand et comment sont-elles mises en œuvre ? Enfin, d'autres facteurs, tels que les maladies du riz ou la variabilité de l'apport sédimentaire par le fleuve et donc de la fertilisation, mériteraient attention, de même que des causes politiques et économiques qu'il conviendrait d'explorer dans une approche multidisciplinaire.

22 CIRAD-GRET-MAE, *Mémento de l'agronome*, op. cit.

L'analyse des niveaux d'eau du fleuve Amazone à Tamshiyacu a aussi permis de confirmer la tendance à la baisse des niveaux d'étiages au cours des trente dernières années et de montrer un allongement de la durée de décrue lié à une remontée plus tardive des eaux et une accélération de la remontée des eaux en fin de saison de décrue. Ces changements appellent une poursuite de l'analyse conjointe la variabilité des structures des saisons pluviométrique et hydrologique, en relation avec la circulation atmosphérique²³.

²³ Jhan Carlo Espinoza, Josyane Ronchail, Jean-Loup Guyot, Clémentine Junquas, Guillaume Drapeau, Jean-Michel Martinez, William Santini, Philippe Vauchel, Waldo Lavado, Lulio Ordoñez & Raúl Espinoza, « From Drought to Flooding: Understanding the Abrupt 2010-2011 Hydrological Annual Cycle in the Upper Solimões River (Western Amazon basin) ». *Environ. Res. Lett.*, n° 7, 2012, 7 p., en ligne : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/2/024008/pdf>

En « Amazonie des rivières », au nord-ouest du bassin, le fleuve *Amazonas* descend de 7 m entre la crue en avril-mai et l'étiage en septembre, à la station fluviométrique de Tamshiyacu (Pérou). La décrue permet la mise en culture de vastes zones exondées et fertiles sur les berges de la rivière et dans les plaines d'inondation (*varzea*). Les cultures de subsistance ou rentable (comme le riz) sont étagées selon leur vitesse de croissance notamment, avec vers le bas des plantes annuelles comme les haricots, les arachides, les pastèques et le riz, puis vers le haut et dans la terre ferme, non inondée, des plantes à cycles longs ou des plantes pérennes, comme le manioc, le maïs, ainsi que des arbres fruitiers tels que palmiers à coco, palmiers à *açaí*, papayers, bananiers, cacaoyers. La production et les rendements des *cultures de varzea* et des *cultures de terre ferme* changent d'une année à l'autre.

Les agriculteurs, les techniciens agricoles et la littérature indiquent souvent que la variabilité des extrêmes hydrologiques et du cycle de décrue sont les causes de la variabilité des récoltes. Par exemple, une crue très forte ou une fin de saison de décrue précoce peuvent engendrer la submersion des récoltes. Une saison de décrue trop courte en raison d'une descente des eaux tardives et/ou d'une remontée précoce de la rivière, ne permet pas la maturation des plantes. Une baisse réduite de la rivière pendant la saison de décrue limite l'extension des surfaces cultivables et donc la production. Un « faux départ » de la saison de décrue, avec une hausse inattendue des niveaux d'eau peut noyer les semences. Ces facteurs de risques sont testés dans le présent travail à partir des données de rendement et de production du riz dans le département de Loreto (Pérou) et des données hydrologiques de la station de Tamshiyacu.

La mise en relation entre résultats agricoles et variables décrivant le cycle hydrologique ne montre pas les liens évoqués habituellement par les professionnels sur le terrain et la littérature. L'explication de la variabilité des récoltes de riz pourrait être améliorée en utilisant des données plus locales et qui différencieraient productions de *varzea* des productions de *terre ferme*. De plus, la capacité adaptative des agriculteurs lorsque se produit un aléa, d'autres facteurs physiques que ceux qui ont été envisagés (températures, pluies, maladies du riz, qualité de l'apport sédimentaire...), ainsi que des facteurs économiques et politiques, sont d'autres pistes qui mériteraient d'être explorées pour expliquer la variabilité de la production et des rendements.

Néanmoins, l'analyse du cycle hydrologique pendant la période 1984-2014 apporte un certain nombre d'informations inédites. Par exemple, on observe une variation inter-annuelle très importante des dates de mise en place (en juillet en moyenne) et de fin (fin octobre) de la décrue. En fonction de ces dates,

la saison de décrue, d'une durée moyenne de 114 jours, ce qui correspond à la durée de croissance du riz, peut être raccourcie des deux tiers ou bien doublée, comme lors de la sécheresse de 2010. La durée de décrue présente par ailleurs une tendance à l'allongement de presque un mois entre les années 1980 et les années 2010, en lien avec un décalage de la fin de la décrue d'un mois entre ces deux périodes. Ce résultat est cohérent avec le retard de la mise en place de la mousson sud-américaine et de la saison des pluies dans une partie sud du bassin amazonien. De plus, on observe une accélération au cours du temps de la remontée des eaux après la décrue ; alors qu'elle durait en moyenne 3 mois jusqu'à 2001, elle ne dure plus qu'un mois et demi dans les années récentes. Les facteurs climatiques en lien avec ces variations seront examinés dans un prochain travail.

On the Amazon river, northwest of the basin of the Amazon river, the stream gauging station of Tamshiyacu (Peru) reports that the level goes down by 7 meters between the flood in April-May and the low water levels in September. This decline allows the cultivation of large fertile dewatered areas on the riverbanks and floodplains (*varzea*). Subsistence or profitable crops (such as rice) are organized according to their growth rate, especially, with annual plants such as beans, peanuts, watermelons and rice on the lower ground, and on upper ground and in the non-flooded mainland, long-cycle or perennial plants, such as cassava, maize and fruit trees, such as coconut palms, açai palms, papayas, bananas, and cacao trees. Production and yields of the *varzea* and mainland crops and land vary each year.

According to farmers, agricultural technicians, and existing studies, variability of hydrological extremes, and the recession cycle, are often the cause of the variability in yields. For example, a very high flood or the premature end to the recession early season can cause the crops to be flooded. A season shortened by a late recession and/or an early flood prevent the plants from growing. A shorter recession period limits the extension of arable land, and therefore limits production. A “false start” of the recession season with an unexpected rise in water levels, could drown the seeds. This work analyzes these risk factors by focusing on the yield and production of rice data in the Loreto region (Peru) and hydrological data from the Tamshiyacu station.

Linking agricultural performance and the variables describing the hydrologic cycle does not confirm the connection usually mentioned by professionals in the field and in existing works. Knowledge of the cause of variability in rice crops could be improved by using more local data that would differentiate *varzea* production from the mainland one. In addition, the ability of farmer to adapt to the consequences of unforeseen events, as well as other physical factors than those considered (temperature, rainfall, rice diseases, quality of sediment supply, ..), and economic factors and policies are other avenues that should be explored to explain the variability of output and yields.

However, the analysis of the water cycle during the 1984-2014 period provides several bits of new information. For example, there is a very important inter-annual variation in the dates of beginning (usually in July) and end (by the end of October) of water decline. Based on these dates, the recession season, with an average duration of 114 days, which corresponds to rice growth period, can be shortened by two thirds, or doubled as during the drought of 2010. The recession period also seems to have grown longer by almost a month between the 1980s and 2010s, which is to be correlated with a one-month shift of the

end of the decline period between those two periods. This result is consistent with the delay of the beginning of the South American monsoon and rainy season in a southern part of the Amazon basin. Moreover, water has been rising faster after the recession period; while it lasted on average three months until 2001, it lasted only a month and a half in recent years. A forthcoming work will discuss these climatic factors in connection with these changes.

TABLE DES MATIÈRES

Milieux extrêmes et critiques face au changement climatique. Climats, Territoires, Environnement Marianne Cohen & Christian Giusti	9
Encadré. Climat : étymologie, signification locale et questions autour d'un mot.....	14

PREMIÈRE PARTIE

MILIEUX CRITIQUES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Hydrologie et production agricole dans le nord-ouest de l'Amazonie Josyane Ronchail, Tatiana Schor, Jhan Carlo Espinoza, Manon Sabot, Heitor Pinheiro, Percy Gomez, Guillaume Drapeau, Véronique Michot, Naziano Filizola, Jean-Loup Guyot, Benjamin Sultan, Jean-Michel Martinez.....	27
Changement climatique et viticulture Hervé Quénel	57
Perception des aléas côtiers. Le cas de la société insulaire oléronaise (France) David Chionne.....	79
Utilité d'un diagnostic systémique pour appréhender l'adaptabilité d'un système territorial : application à la Camargue sous la menace de la montée des eaux Sophie Lizard & Christine Voiron-Canicio	105

DEUXIÈME PARTIE

MILIEUX EXTRÊMES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Changements climatiques et agriculture : impacts et adaptation en Afrique de l'Ouest Benjamin Sultan, Richard Lalou, Laurent Kergoat, Bénédicte Gastineau & Théo Vischel ...	139
Impacts de la variabilité climatique sur la démographie des rennes en Laponie suédoise : de l'intérêt du calendrier pastoral Romain Courault, Marianne Cohen, Sonia Saïd & Josyane Ronchail	155

Modélisation de l'impact du changement climatique sur trois aires de distribution végétales dans le Mercantour Matthieu Vignal & Julien Andrieu.....	195
---	-----

TROISIÈME PARTIE
LONGUE DURÉE QUATERNAIRE

Occupations humaines et dynamiques environnementales du Paléolithique à l'âge du bronze, secteur d'Adam, sultanat d'Oman. Conséquences régionales de la variation du signal hydroclimatique sur le long terme Tara Beuzen-Waller, Guillaume Gernez, Jessica Giraud, Stéphane Desruelles, Anaïs Marrast, Stéphanie Bonilauri, Marion Lemée, Amir Beshkani, Julien Guery, Raphaël Hautefort & Éric Fouache	225
Conclusion Laurence Eymard.....	271

APPENDICE

Changement climatique et ressource en eau en Himalaya. Enquêtes auprès de villageois dans quatre unités géographiques du bassin de la Koshi, Népal Olivia Aubriot, Joëlle Smadja, Ornella Puschiasis, Thierry Duplan, Juliette Grimaldi, Mickaël Hugonnet & Pauline Buchheit	273
Rôle du climat et de l'agriculture dans l'étiologie de la maladie de Kawasaki Joseph Boyard-Micheau, Xavier Rodó, Roger Curcoll, Joan Ballester & Josep Anton Morgui.....	274
Changement climatique et occupation humaine en Arabie du Sud au cours du Quaternaire récent Anne-Marie Lézine.....	275
Reconstitution des interactions entre l'évolution climatique et l'anthropisation de la vallée d'Ambato (nord-ouest de l'Argentine) depuis 2000 ans Bernarda Marconetto.....	276
L'impact des crises hydroclimatiques passées sur la gestion de l'eau en zones urbaines : le cas de Marseille aux XVIII ^e et XIX ^e siècles Nicolas Maughan.....	277
L'observatoire lyonnais du climat : premiers retours sur une approche pluridisciplinaire d'adaptation au changement climatique Dominique Soto, Florent Renard, Emmanuel Thimonier-Rouzet, Frédéric Kuznik, Luce Ponsar, Corinne Hooge, Lionel Soulhac, Christina Aschan-Leygonie, Alain Brisson, Ph. Mary & D. Saulnier	278