

# Interactions Between Land Use, Water and Sediment Flows and the Spread of Bacterial Contaminants in the Mountain Environments of Northern Lao PDR

Oloth Sengtaeuanghoung<sup>1,\*</sup>, Olivier Ribolzi<sup>2,\*</sup>,  
Emma J. Rochelle-Newall<sup>3</sup>, Laurie Boithias<sup>2</sup>, Olivier Evrard<sup>4</sup>,  
Thierry Henri-des-Tureaux<sup>3</sup>, Sylvain Huon<sup>3</sup>, Jean-Louis Janeau<sup>3</sup>,  
Keoudone Latsachack<sup>5</sup>, Irène Lefèvre<sup>4</sup>, Emmanuel Mouche<sup>4</sup>,  
Henri Robain<sup>3</sup>, Anneke de Rouw<sup>3</sup>, Khampaseuth Xayyathip<sup>5</sup>,  
Norbert Silvera<sup>3</sup>, Pem Sisouvanh<sup>6</sup>, Bounsamay Soulileuth<sup>5</sup>,  
Phabvilay Sounyafong<sup>5</sup>, Chanthamousone Thammahacksa<sup>5</sup>,  
Marion Viguiet<sup>5</sup>, Guillaume Lacombe<sup>7</sup>,  
Christian Valentin<sup>3</sup>, Alain Pierret<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Agriculture Land-Use Planning Center (ALUPC), Department of Agricultural Land Management (DALaM), Vientiane, Lao PDR*

<sup>2</sup>*Géosciences Environnement Toulouse (GET), UMR 5563 (CNRS-UPS-IRD), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France*

<sup>3</sup>*iEES-Paris (IRD, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, INRA, UPEC, Université Paris Diderot), Paris, France*

<sup>4</sup>*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), UMR 8212 (CEA-CNRS-UVSQ/IPSL), Gif-sur-Yvette cedex, France*

<sup>5</sup>*IRD-iEES-Paris, Department of Agricultural Land Management (DALaM), Vientiane, Lao PDR*

<sup>6</sup>*National University of Laos (NUoL), Faculty of Agriculture, Nabong Campus, Vientiane, Lao PDR*

<sup>7</sup>*International Water Management Institute (IWMI), Southeast Asia Regional Office, Vientiane, Lao PDR*

Received 19 June 2020

Revised 10 July 2020. Accepted 30 July 2020

**Abstract** : Over the past two decades, the mountainous regions of mainland South East Asia have witnessed a massive conversion of forests and agricultural land into commercial tree plantations, the environmental cost of which has most often been neglected. In northern Laos, the M-TROPICS program (<https://mtropics-fr.obs-mip.fr/>) has made it possible to establish that the

\* Corresponding author.

E-mail : [oloth.sengtaeuanghoung@yahoo.com](mailto:oloth.sengtaeuanghoung@yahoo.com); [olivier.evrard@ird.fr](mailto:olivier.evrard@ird.fr)

conversion of itinerant rice growing systems to teak plantations, while doubling runoff has resulted in a six-fold increase in the sediment load of surface water. In addition, the practice of animal husbandry concomitant with such land uses has had a direct impact on the load of faecal indicator bacteria, a proxy for the presence of human pathogens of faecal origin, in stream water. Such interactions between land use and the spread of bacterial pathogens therefore represent a serious, although virtually ignored, danger to public health. The conservation of undergrowth in teak plantations represents an economically and ecologically rational management practice which preserves soil resources and minimizes the risk of contamination of downstream populations by bacterial pathogens. Given the advantages of such vertically structured vegetation, this type of land cover should be encouraged by the competent government agencies.

*Keywords* : Land use change ; soil erosion ; surface runoff ; vegetation structure ; faecal indicator bacteria.

# Interactions entre usage des terres, flux d'eau et de sédiments et propagation de contaminants bactériens dans les environnements de montagne du Nord de la RDP Lao

Oloth Sengtaheuanghoung<sup>1,\*</sup>, Olivier Ribolzi<sup>2,\*</sup>,  
Emma J. Rochelle-Newall<sup>3</sup>, Laurie Boithias<sup>2</sup>, Olivier Evrard<sup>4</sup>,  
Thierry Henri-des-Tureaux<sup>3</sup>, Sylvain Huon<sup>3</sup>, Jean-Louis Janeau<sup>3</sup>,  
Keoudone Latsachack<sup>5</sup>, Irène Lefèvre<sup>4</sup>, Emmanuel Mouche<sup>4</sup>,  
Henri Robain<sup>3</sup>, Anneke de Rouw<sup>3</sup>, Khampaseuth Xayyathip<sup>5</sup>,  
Norbert Silvera<sup>3</sup>, Pem Sisouvanh<sup>6</sup>, Bounsamay Soulileuth<sup>5</sup>,  
Phabvilay Sounyafong<sup>5</sup>, Chanthamousone Thammahacksa<sup>5</sup>,  
Marion Viguiet<sup>5</sup>, Guillaume Lacombe<sup>7</sup>,  
Christian Valentin<sup>3</sup>, Alain Pierret<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Agriculture Land-Use Planning Center (ALUPC), Department of Agricultural Land Management (DALaM), Vientiane, Lao PDR*

<sup>2</sup>*Géosciences Environnement Toulouse (GET), UMR 5563 (CNRS-UPS-IRD), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France*

<sup>3</sup>*iEES-Paris (IRD, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, INRA, UPEC, Université Paris Diderot), Paris, France*

<sup>4</sup>*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), UMR 8212 (CEA-CNRS-UVSQ/IPSL), Gif-sur-Yvette cedex, France*

<sup>5</sup>*IRD-iEES-Paris, Department of Agricultural Land Management (DALaM), Vientiane, Lao PDR*

<sup>6</sup>*National University of Laos (NUoL), Faculty of Agriculture, Nabong Campus, Vientiane, Lao PDR*

<sup>7</sup>*International Water Management Institute (IWMI), Southeast Asia Regional Office, Vientiane, Lao PDR*

Reçu le 19 juin 2020

Relu et modifié le 10 juillet 2020. Accepté le 30 juillet 2020

**Résumé :** Au cours des deux dernières décennies, les régions montagneuses d'Asie du Sud-Est continentale ont été le siège d'une conversion massive des forêts et des terres agricoles en plantations commerciales d'arbres dont le coût environnemental n'a pas réellement été considéré. Dans le nord du Laos, le programme M-TROPICS (<https://mtropics-fr.obs-mip.fr/>) a ainsi permis d'établir que la conversion des systèmes de culture rizicoles itinérants en

\* Coordonnées des auteurs.

Courriel : [oloth.sengtaheuanghoung@yahoo.com](mailto:oloth.sengtaheuanghoung@yahoo.com); [olivier.evrard@ird.fr](mailto:olivier.evrard@ird.fr)

plantations de teck, tout en doublant le ruissellement, a entraîné une multiplication par six de la charge en sédiments des eaux de surface.

Par ailleurs, la pratique de l'élevage en parallèle avec de tels usages des terres s'avère avoir un impact direct sur la charge en bactéries indicatrices de contamination fécale, potentiellement pathogènes pour l'homme, des eaux de ruissellement. De telles interactions entre usage des terres et dissémination de pathogènes bactériens représentent donc un danger grave, quoique virtuellement ignoré, pour la santé publique. La conservation du sous-bois dans les plantations de teck représente une pratique de gestion économiquement et écologiquement rationnelle, qui préserve les ressources en sol et minimise le risque de contamination des populations en aval par des pathogènes bactériens. Compte tenu des avantages que présentent de tels couverts structurés verticalement, leur mise en place doit être promue auprès des agriculteurs par les agences gouvernementales compétentes.

*Mots-clés* : Changement d'usage des terres ; érosion des sols ; écoulements de surface ; structure de la végétation ; bactéries indicatrices de contamination fécales.

## 1. Introduction

Au cours des deux dernières décennies, le développement économique et la croissance démographique ont profondément modifié les pratiques agricoles dans les zones de montagne en Asie du Sud-Est (Valentin *et al.*, 2008). En particulier, les plantations commerciales d'arbres ont connu un développement qui a entraîné la conversion massive de zones forestières et de terres utilisées pour la production alimentaire (Ziegler *et al.*, 2009). Au nord du Laos, dans le cadre de l'effort national pour éradiquer la culture sur brûlis, les plantations de teck et d'hévéa ont ainsi de plus en plus remplacé les systèmes traditionnels à base de riz pluvial (Lestrelin et Giordano, 2007). En l'absence d'information technique pertinente et de directives de gestion explicites, la plupart des agriculteurs brûlent la litière et suppriment le sous-bois de ces plantations, exposant directement le sol à l'énergie des gouttes de pluie et induisant la formation d'une croûte superficielle peu perméable (Lacombe *et al.*, 2018). Cet article résume les principales conclusions du suivi à long terme mené dans le cadre du programme M-TROPICS (<https://mtropics-fr.obs-mip.fr/>), et visant à caractériser la réponse hydrologique et les pertes en terre d'un bassin versant du nord du Laos, suite à la conversion progressive d'un système de culture rizicole dominant en plantations de teck (Ribolzi *et al.*, 2017). Les travaux conduits ont également caractérisé la saisonnalité des charges en bactéries indicatrices de contamination fécales et identifié les périodes hydrologiques (par exemple crues ou périodes de débit de base) durant lesquelles les niveaux de contamination les plus élevés sont observés (Rochelle-Newall *et al.*, 2016).

## 2. Méthodologie

Site d'étude et usage des terres : Le bassin versant de Houay Pano (0,6 km<sup>2</sup>) est situé à 10 km au sud de Luang Prabang dans le nord du Laos (Fig. 1a). Le climat de mousson tropicale est caractérisé par une température annuelle moyenne de 25 °C et une saisonnalité élevée de la pluviosité, avec 80 % des précipitations annuelles survenant de mai à octobre (Ribolzi *et al.*, 2011). Les sols principaux sont des alfisols<sup>1</sup> profonds (> 2 m) et modérément profonds (> 0,5 m). Les usages des terres principaux sont les cultures annuelles (riz pluvial et larme de Job), la jachère, les plantations de teck et les forêts secondaires (Patin *et al.*, 2018). Le système de culture sur brûlis, dominant de 2002 à 2007, a été progressivement remplacé par des plantations de teck (Fig. 2b). Les flux d'eau et de sédiments ont été enregistrés à l'exutoire du bassin versant (Fig. 1b) depuis 2002.

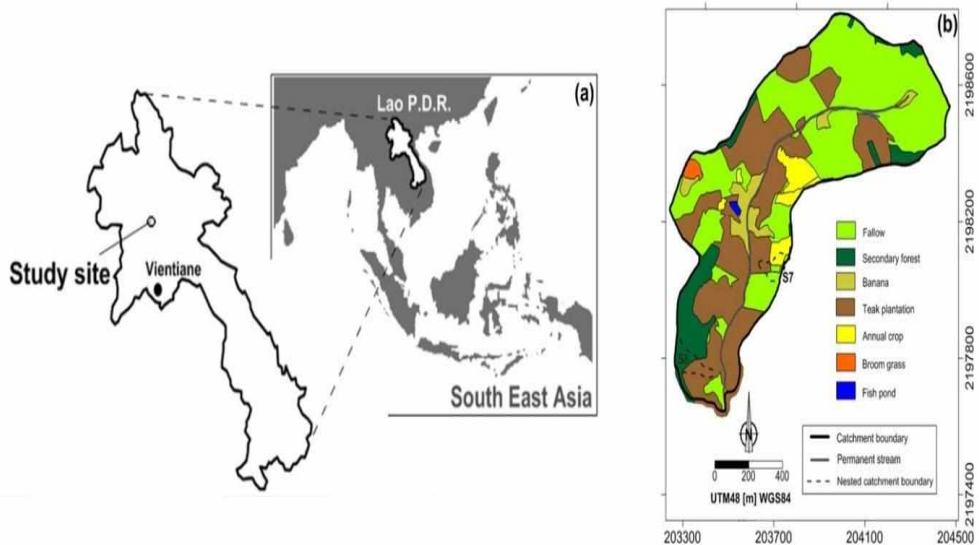


Figure 1 : Localisation du site expérimental de Houay Pano (a) et carte d'usage des terres sur le bassin versant en 2014 (b) (Adapté de Ribolzi *et al.*, 2017).

Hydro-météorologie et échantillonnage hydro-sédimentaire : Les précipitations et le débit du cours d'eau sont mesurés en continu depuis 2002 grâce à des stations pluviométriques et hydrologiques. Les pertes en sédiments de fond ont été estimées grâce à des fosses totalisatrices tandis que les flux de sédiments en suspension ont été suivis à l'aide d'échantillonneurs automatiques lors de chaque crue et la concentration

<sup>1</sup> Les alfisols sont des sols qui se forment dans les zones semi-arides à humides, généralement sous un couvert forestier de feuillus. Ils ont un sous-sol enrichi en argile et une fertilité native relativement élevée.

de solide total en suspension (TSS) a été déterminée après filtration et séchage à l'étuve à 105 °C pendant 48 h. Les contributions respectives des écoulements superficiels et souterrains au débit de la rivière à la sortie du bassin versant ont été évaluées en utilisant la conductivité électrique des eaux comme traceur (Ribolzi *et al.*, 2017). Les taux d'infiltration ont été estimés à partir de la différence entre le volume de pluie et le volume écoulé à l'exutoire, divisée par la durée de chaque événement pluvieux. Toutes les données hydro-sédimentaires sont disponibles en ligne sur le site web M-TROPICS (<https://mtropics-fr.obs-mip.fr/>).

Déterminations d'*Escherichia coli* (*E. coli*) : L'analyse de l'effet de l'usage des terres et des processus hydrologiques sur les concentrations d'*E. coli* dans les eaux de surface a été réalisée en 2015 (Rochelle-Newall *et al.*, 2016). La méthode des microplaques (ISO 9308-3) a été utilisée pour les déterminations du nombre d'*E. coli* (Causse *et al.*, 2015). Chaque échantillon a été incubé pendant 48 h à 44 °C et le nombre le plus probable (Most Probable Number, MPN) a ensuite été déterminé par comptage des puits positifs sur chaque microplaque.

### 3. Résultats

Changement d'usage des terres : La proportion de forêts secondaires dans le bassin versant est passée de 16 % en 2002 à 8 % en 2014 (Fig. 2b). Au cours de cette période, les proportions respectives de jachère (29-69 %) et de cultures annuelles (4-42 %) étaient négativement corrélées, avec de grandes variations interannuelles, correspondant aux périodes des rotations sur brûlis (cycles de 2 à 6 ans). À partir de 2008, la superficie des plantations de teck a augmenté de façon continue. En conséquence, la période de suivi a été divisée en une première sous-période (2002-2007) dominée par des rotations sur brûlis et une deuxième sous-période (2008-2014) correspondant à l'expansion des plantations de teck. Au cours des cinq dernières années de cette deuxième sous-période, la plupart des plantations de teck avaient plus de 3 ans et se caractérisaient par un sous-bois clairsemé à inexistant.

Précipitations, hydrologie et charges en sédiments : Entre 2002 et 2014, le cumul annuel des précipitations (pluie) a varié de 978 mm (2012) à 1884 mm (2011) (Fig. 2a). Seulement 32 % des événements pluvieux ont déclenché des crues avec des grandes variations interannuelles pour le ruissellement (Fig. 2a). Les valeurs médianes annuelles d'infiltration sont passées de 9 à 20 mm h<sup>-1</sup> au cours de la sous-période 2002-2007 et sont retombées à 4 mm h<sup>-1</sup> à l'issue de la sous-période 2008-2014. La contribution médiane annuelle des écoulements de surface au débit total du cours d'eau pendant les crues a augmenté entre 2010 et 2014, suite à la diminution des surfaces protégées par un sous-bois de 31 à 16 % avant et après 2010 (Fig. 2d).

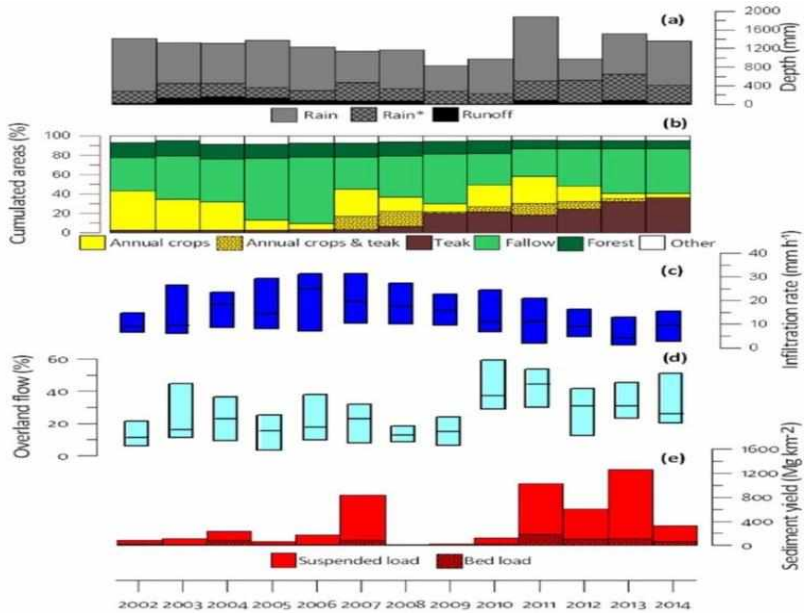


Figure 2 : Changements hydro-sédimentaire et d'utilisation des terres dans le bassin versant de Houay Pano : cumul annuel a) des précipitations, des précipitations déclenchant une crue (Rain\*) et du ruissellement), b) pourcentages surfaciques des principaux types d'usage des terres, c) box plot (25e et 75e centiles et médiane) des taux d'infiltration, d) box plot de la contribution des écoulements rapides de surface aux crues, e) pertes en sédiments en suspension et par charriage de fond (Adapté de Ribolzi *et al.*, 2017).

De même, les rendements annuels en sédiments ont augmenté entre les deux sous-périodes, passant de 98 à 609 Mg km<sup>-2</sup> (Fig. 2e). La contribution annuelle médiane des écoulements de surface au débit total du cours d'eau pendant les crues était positivement corrélée à la superficie des monocultures de teck de plus de 3 ans et négativement corrélée à la somme des surfaces de jachères et de zones forestières ( $p < 0,05$ ).

Contamination de l'eau du ruisseau par *E. coli* : Dans les zones supérieures du bassin versant, la concentration d'*E. coli* est  $< 1$  MPN 100 mL<sup>-1</sup> (Causse *et al.*, 2015) mais les concentrations augmentent à mesure que la densité d'animaux et d'humains croît vers l'aval. Pendant les épisodes pluvieux, l'interaction entre l'encroûtement du sol et la présence humaine fait augmenter les concentrations d'*E. coli* dans l'eau du ruisseau (Rochelle-Newall *et al.*, 2016). Pendant la mousson, les concentrations d'*E. coli* varient entre 78 et 14 000 MPN 100 mL<sup>-1</sup> et augmentent de façon concomitante avec l'augmentation du débit, des TSS et la baisse de CE. Les concentrations d'*E. coli* et de TSS sont ainsi plus de deux ordres de grandeur plus élevées en période de crue que pendant la période de débit de base (Fig. 3).

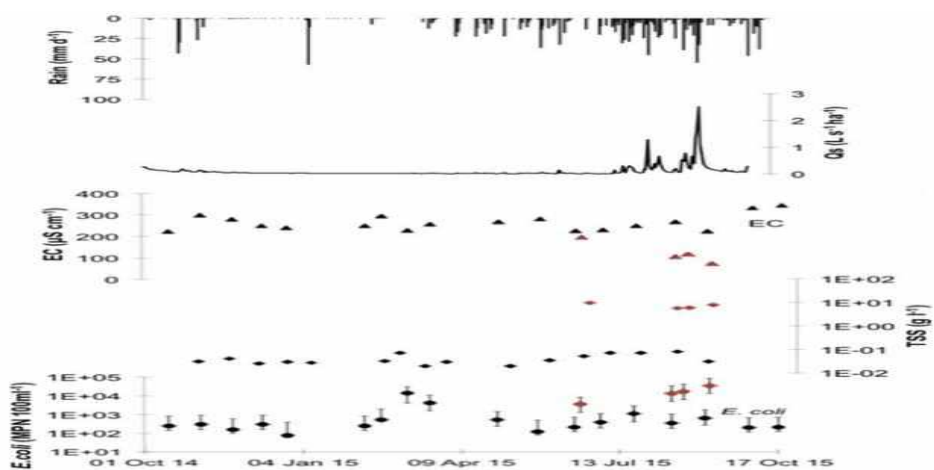


Figure 3 : Comparaison de la contamination de l'eau du ruisseau par *E. coli* en période de débit de base et de débit de crue. Intensité des précipitations ( $\text{mm j}^{-1}$ ) ; débit spécifique du cours d'eau ( $Q_s, \text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ) ; conductivité électrique (EC,  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) ; solides en suspension totaux (TSS,  $\text{g L}^{-1}$ ) ; concentration d'*E. coli* (MPN 100  $\text{mL}^{-1}$ ). Symboles noirs pleins : échantillons de débit de base, symboles rouges pleins : échantillons de débit de crue (Adapté de Rochelle-Newall *et al.*, 2016).

#### 4. Discussion

Les travaux rapportés dans cet article ont établi que la suppression récurrente, par brûlis, de la litière et du sous-bois spontané qui s'établit sous les tecks expose directement le sol à l'énergie des gouttes de pluie. Les grandes feuilles des tecks concentrent les précipitations et augmentent la taille des gouttes qui impactent le sol avec une plus grande énergie cinétique (Lacombe *et al.*, 2018), compactant la surface et modifiant la structure superficielle du sol, les deux processus contribuant à la formation de croûtes et à la réduction associée des taux d'infiltration.

L'augmentation subséquente des écoulements de surface détache davantage de particules, entraînant des quantités substantielles de matières fécales des pentes vers le cours d'eau (Causse *et al.*, 2015). Un tel processus explique pourquoi les concentrations d'*E. coli* augmentent de plus de deux ordres de grandeur pendant la saison des pluies comparativement à la saison sèche. Très fréquemment, au cours de notre campagne d'échantillonnage, les concentrations d'*E. coli* constatées ont ainsi dépassé le seuil de 500 colonies pour  $100 \text{ mL}^{-1}$ , seuil au-dessus duquel l'Organisation Mondiale de la Santé considère qu'une exposition unique correspond à un risque de 10 % de contracter une maladie gastro-intestinale (OMS, 2003). L'utilisation d'eau provenant de sites fortement contaminés par des bactéries indicatrices de contamination fécales constitue une menace sérieuse pour la santé publique, ce qu'a montré une première étude épidémiologique menée en parallèle de ces travaux (Boithias *et al.*, 2016). La mise en évidence de liens de causalité éventuels entre contamination des eaux de surface résultant de certains usages des



terres et épidémies de maladies gastro-intestinales constitue une piste de recherche qui reste à explorer.

## 5. Conclusions

Nous montrons dans cet article que l'usage des terres, le type et la structure de la couverture végétale et l'hydrologie contrôlent fortement les concentrations d'*E. coli* dans les cours d'eau des bassins versant de montagne en Asie du Sud-Est. L'interaction entre l'utilisation des terres, les pratiques agricoles et le transfert d'agents pathogènes bactériens représente donc un risque grave, quoique que virtuellement ignoré actuellement, pour la santé publique. L'entretien de structures de végétation adéquates, combinant une strate proche du sol (pour réduire la vitesse des gouttes de pluie) et une couverture maximale au niveau de la canopée (pour intercepter la plus grande quantité de précipitations) permettent, non seulement de réduire les pertes de sol et d'augmenter les stocks de carbone dans les horizons de surface, mais contribuent également à une meilleure qualité de l'eau de surface, réduisant ainsi les risques pour les populations humaines utilisant la ressource en eau en aval des bassins versants agricoles.

## 6. Remerciements

Nous remercions l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), le Département of Agriculture Land Management (DALaM), le réseau M-Tropics, le SOERE RBV (Réseau des Bassins Versants) et l'International Water Management Institute (IWMI). Une partie de cette recherche a été réalisée grâce au soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche (projet TecItEasy; ANR-13-AGRO-0007), du programme de recherche du CGIAR « Integrated Systems for the Humid Tropics » et du Laboratoire Mixte International LUSES (Impacts of rapid Land Use change on Soil Ecosystem Services).

## Références

- [1] Boithias, L. et al. 2016. Hydrological Regime and Water Shortage as Drivers of the Seasonal Incidence of Diarrheal Diseases in a Tropical Montane Environment. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 1–27.
- [2] Causse, J. et al. 2015. Field and modelling studies of *Escherichia coli* loads in tropical streams of montane agro-ecosystems *J Hydro-Environment Research* 9, 496-507.
- [3] Lacombe, G. et al. 2018 Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in Northern Laos, *Science of the Total Environment* doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.185.
- [4] Lestrelin, G., Giordano M. 2007. Upland development policy, livelihood change and land degradation: interactions from a Laotian village. *Land Degradation and Development* 18, 55-76.

- [5] Patin, J. *et al* 2018. Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: an analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database. *Journal of Hydrology* 563, 480–494.
- [6] Ribolzi, O. *et al*. 2011. Land use and water quality along a Mekong tributary in Northern Lao PDR. *Environmental Management* 47, 291-302.
- [7] Ribolzi, O. *et al*. 2017. From shifting cultivation to teak plantation: effect on overland flow and sediment yield in a montane tropical catchment. *Scientific Reports* 7: 3987.
- [8] Rochelle-Newall, EJ. *et al*. 2016. Effect of land use and hydrological processes on *Escherichia coli* concentrations in streams of tropical, humid headwater catchments. *Scientific Reports* 6, 32974.
- [9] Valentin, C. *et al*. 2008. Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128, 225-238.
- [10] WHO. Guidelines for safe recreational water environments (WHO, Geneva, 2003).
- [11] Ziegler, AD *et al*. 2009. Environmental Consequences of the Demise in Swidden Cultivation in Montane Mainland Southeast Asia: Hydrology and Geomorphology. *Human Ecology* 37, 361-373.