Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

36 | 2015

Environnement et santé : où en est la géographie ?

Impact environnemental de la diffusion de produits phytosanitaires par ruissellement

Deux exemples contrastés en Europe et en Afrique

Environmental impact of the spread of pesticides runoff. Two contrasting examples in Europe and Africa

Emmanuelle Cadot, Valérie Borrell Estupina, Marine Rousseau et David Sebag

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/1054>

DOI : 10.4000/dynenviron.1054

ISSN : 2534-4358

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2015

Pagination : 182-197

ISBN : 979-10-300-0107-5

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Emmanuelle Cadot, Valérie Borrell Estupina, Marine Rousseau et David Sebag, « Impact environnemental de la diffusion de produits phytosanitaires par ruissellement », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 36 | 2015, mis en ligne le 01 juillet 2016, consulté le 28 novembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/1054> ; DOI : 10.4000/dynenviron.1054

La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Paysage cévenole
(cliché : Philippe Nicolas,
Cévennes tourisme, 2016).

WARNING PESTICIDES

Impact environnemental de la diffusion de produits phytosanitaires par ruissellement. Deux exemples contrastés en Europe et en Afrique

Emmanuelle Cadot^{1,2,*}, Valérie Borrell Estupina^{1,4,*}, Marine Rousseau⁴ et David Sebag^{1,3}

FIRE WILL CAUSE
TOXIC FUMES

Résumé/Abstract

L'agriculture moderne s'est appuyée sur l'utilisation croissante de produits phytosanitaires. Toutefois, la contamination des milieux comme les impacts sanitaires sont aujourd'hui avérés. Le transfert de ces produits vers les eaux de surface ou souterraines pourrait conduire à l'exposition de la population générale résidant à proximité des zones agricoles. Notre objectif vise à définir une méthodologie pour caractériser l'aléa de pollution résultant tant de l'épandage direct de produits phytosanitaires que de leur transfert par ruissellement au sein d'un bassin versant. Cette méthodologie est testée sur deux zones où les précipitations intenses provoquent d'importants ruissellements, l'une en Languedoc-Roussillon et l'autre à l'extrême Nord du Cameroun. La première phase consiste à quantifier la pression phytosanitaire au niveau des communes de la zone d'étude grâce à l'Indicateur de Fréquence des Traitements (IFT). Ensuite, une analyse hydrologique, qui s'appuie sur l'adaptation de la méthode cartographique IRIP (Indicateur de l'aléa inondation par Ruissellement Intense Pluvial), permet de caractériser les zones propices à la production ou à l'accumulation du ruissellement. Enfin, l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) permet, en recoupant l'IFT et ces zones ruisselantes, de définir différents niveaux d'aléa de pollution au sein du bassin versant. Cette étude devrait permettre d'affiner la définition de l'exposition humaine dans les analyses épidémiologiques en population générale. Cependant, l'absence de prise en compte de la propagation aérienne et souterraine de ces produits constitue une de ses principales limites. Enfin, elle pourrait être complétée par la prise en compte des transferts d'eau souterrains pour mieux évaluer la pollution au sein de l'hydrosystème.

Environmental impact of the spread of pesticides runoff. Two contrasting examples in Europe and Africa.

Modern agriculture is based on the increasing use of pesticides. Environmental contamination by pesticides as well as the health impacts are now proven. The transfer of these products into surface waters or groundwater could lead to exposure of the general population living near agricultural areas. The study aims to provide a useful methodology to characterize the pollution risk resulting from the direct application of plant protection products and their transfer by runoff within a watershed. This methodology is tested on two areas where intense rainfall are causing major runoff, one in Languedoc-Roussillon (France) and the other in the extreme north of Cameroon. The first step is to quantify the pest pressure within the municipalities in the studied areas with the Treatment Frequency Index (IFT). Then in a second time a hydrological analysis, based on the adaptation of the cartographic method IRIP (Indicator of the flood hazard by Intense Pluvial runoff), allows a characterization of areas suitable for the production or accumulation of runoff. Finally, the use of a Geographic Information System (GIS) allows, by matching the IFT and the streaming areas to define different levels of pollution hazard within the watershed. This study should refine the definition of human exposure in epidemiological analyzes in the general population. However, the lack of consideration of the air and underground propagation of these products is one of its major limitations. Finally, it could be supplemented by the inclusion of underground water transfers to better assess the pollution in the river system.

Mots clés/Key-words

Aléa de pollution, phytosanitaires, pesticides, Système d'Information Géographique (SIG), ruissellement, contamination des eaux de surface.

Hazard of pollution, pesticides, Geographic Information System (GIS), runoff, contamination of surface water exposure.

Introduction

Environnement et santé

L'exposition est un concept central sur lequel repose les études épidémiologiques environnementales. Qu'il s'agisse d'études cas-témoin ou de suivi de cohorte,

elles reposent sur des comparaisons entre groupes exposés et non exposés qui cherchent à mettre en évidence une relation entre l'existence d'un risque (ou son accroissement) et le degré d'exposition à un facteur de risque. Si l'exposition ne peut être définie ou mesurée de façon claire et précise, c'est la validité même de l'étude et l'ensemble de ses résultats qui pourraient être remis en cause. L'épidémiologie

* Emmanuelle Cadot et Valérie Borrell Estupina ont contribué à part égale à ce travail.

1. Laboratoire Hydrosociétés – UMR 5569, Montpellier, France.
2. Institut de Recherche pour le Développement.

3. Université de Rouen, France.
4. Université de Montpellier, France.

environnementale repose sur l'hypothèse qu'il existe un certain nombre de facteurs de risques présents dans l'environnement où nous évoluons.

L'hypothèse selon laquelle les lieux que nous fréquentons, les endroits où nous vivons auraient un impact sur notre santé n'est pas nouvelle. Quatre siècles avant J.C., Hippocrate précisait dans son *Traité des airs, des eaux et des lieux* que « pour approfondir la médecine, il faut considérer d'abord les saisons, connaître la qualité des eaux, des vents, étudier les divers états du sol et le genre de vie des habitants ». Cette préoccupation a été longtemps ignorée alors que se développait une approche de la santé centrée sur l'individu et les maladies. Le mouvement hygiéniste de la fin du XIX^e Siècle réintroduit l'influence de l'environnement de vie sur les états de santé. Ainsi, les travaux pionniers de John Snow lors de l'épidémie de choléra qui ravagea Londres en 1854. En dressant une carte des personnes décédées du choléra, il mit en évidence des zones de concentration autour de certaines bornes d'approvisionnement. La fermeture de ces bornes permit d'endiguer l'épidémie : Snow venait de valider son hypothèse quant au rôle étiologique de l'eau (Snow, 2008). En 1933, Maximilien Sorre, géographe s'intéressant aux maladies vectorielles, pose les bases de l'épidémiologie environnementale en développant le concept de « complexe pathogène » (Sorre, 1933). Ce dernier exprime la coexistence et l'interaction – dans un espace donné – de trois déterminants : un agent pathogène, un vecteur et/ou un réservoir (homme, animal ou milieu naturel) et un hôte réceptif (le malade) qui aboutissent à l'expression d'une maladie. Par la suite, la révolution pasteurienne ramène au premier plan les germes, faisant oublier un temps, l'influence de l'environnement sur la santé.

L'environnement est une notion plurielle et polysémique, riche d'une multitude d'acceptions différentes, comme autant de morceaux distincts d'une signification globale. Ainsi, en droit français, ce terme recouvre la nature – les espèces végétales et animales – et les ressources naturelles. Au sens des géographes, l'environnement ne se réduit pas à la seule dimension physique ou naturelle d'un support matériel pour les activités humaines. C'est un construit scientifique résultant de l'interaction permanente entre le milieu physique, l'homme et les sociétés qui y vivent et caractérisé par deux dimensions, spatiale et temporelle. Si la dimension spatiale – le jeu des distances, des proximités, des interrelations entre les lieux – tombe sous le sens, la dimension temporelle n'en n'est pas moins capitale. Elle renvoie aux héritages qui caractérisent notre environnement qu'ils soient naturels (ressources renouvelables ou non, formes héritées du paysage, les paléo-environnements, etc.) ou anthropisés (disparitions d'espèces animales ou végétales, réduction des couverts végétaux, pollutions, etc. ; Veyret, 2007).

De même, l'impact de l'environnement sur la santé ne se résume pas à la seule dimension physique de l'environnement et la majorité des recherches récentes – tant en géographie de la santé qu'en épidémiologie sociale ou spatiale – s'articule davantage autour d'un système pathogène, concept systémique mettant en

exergue les relations entre santé et environnement « physique », mais aussi (surtout), les relations et interactions avec l'environnement « social » ou « économique ».

Toutefois, la relation santé environnement n'est pas si aisée à mesurer. En premier lieu, elle est souvent associée à des risques dits « faibles » rendant leur mise en évidence plus complexe et délicate. Il existe souvent un délai de latence important, pouvant aller jusqu'à plusieurs années, entre le moment de l'exposition initiale et le déclenchement de la maladie. Par ailleurs, l'exposition environnementale est souvent multiple et ne transite pas selon une seule voie d'exposition. L'analyse de la relation santé environnement requiert donc de développer une méthodologie précise et rigoureuse de mesure des expositions.

La contamination par les pesticides

Le terme générique de pesticide rassemble l'ensemble des produits, chimiques ou naturels, visant à combattre ou repousser les nuisibles (animaux ou végétaux) lors de la culture, du stockage et du transport des produits agricoles. Ils regroupent un ensemble très hétérogène de substances chimiques adaptées à la lutte contre les plantes et les animaux indésirables : herbicides, fongicides, insecticides, acaricides, nématicides, rodenticides, pour l'essentiel, dans le cadre des activités agricoles. Les mêmes molécules utilisées dans d'autres champs que l'agriculture (entretien des routes et des voies ferrées, lutte antivectorielle, application antiparasitaire, etc.) sont appelées biocides.

Depuis les années cinquante, l'usage intensif de produits phytosanitaires a permis l'augmentation significative des rendements productifs. L'agriculture française, comme celle d'autres pays développés, est largement dépendante de l'utilisation de ces produits ; la France est d'ailleurs le premier utilisateur européen et le quatrième utilisateur de pesticides au monde derrière les Etats-Unis, le Brésil et le Japon avec environ 78 000 tonnes de matières actives utilisées en 2008 (Observatoire des Résidus de Pesticides, 2016). Toutefois, les pays en développement face à l'accroissement accéléré de leur population, utilisent eux aussi, de façon grandissante ces produits. Leur usage systématique est aujourd'hui remis en cause du fait des conséquences et des risques qu'ils peuvent générer tant pour l'environnement que pour la santé humaine.

Lors de l'utilisation de produits phytosanitaires, seule une partie de la quantité épandue atteint effectivement la cible visée et le reste constitue les pertes dans l'environnement qui peuvent atteindre jusqu'à 70% de la dose épandue (Aubertot, Barbier et al., 2005). Du fait des techniques d'épandage (rampes de pulvérisation, mais aussi par avion) les pertes dans l'atmosphère peuvent intervenir dès l'application par dérive initiale, par érosion éolienne ultérieurement ou enfin, par volatilisation. Ensuite, ces produits peuvent être stockés dans l'eau du sol, adsorbés sur les particules de sol, être transportés par ruissellement ou percolation. Depuis de nombreuses années, les produits phytosanitaires ont été mis en évidence dans

l'ensemble des compartiments de l'environnement (air, sol, eau) mais aussi dans la faune et la flore. Des analyses menées de façon récurrente en France sur un certain nombre de cours d'eau montrent la présence de pesticides dans plus de 90% des cours d'eau testés (Dubois, 2013). Leur transport sur des milliers de kilomètres via le cycle de l'eau ou le transport des masses d'air a déjà été montré, comme en témoigne l'imprégnation des différents compartiments de l'écosystème arctique (Li & Macdonald, 2005).

Si les effets des intoxications aiguës par les pesticides sont assez bien connus, les conséquences de l'exposition chronique restent encore largement à démontrer. Toutefois, en dépit de certaines limitations, l'ensemble des plus récents résultats semble s'accorder pour pointer du doigt l'effet délétère de ces substances sur la santé (Multigner, 2005). Les effets cancérigènes, neurotoxiques ou de type perturbateurs endocriniens sont les plus évoqués et documentés. Concernant le cancer, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a déjà classé un certain nombre de pesticides comme cancérigènes certains (l'arsenic), probables ou possibles (DDT). De même, l'expertise conduite en 2008 par l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Inserm) conclue à la responsabilité probable des pesticides dans la plupart des cancers d'origine environnementale (Ferragu, Tron *et al.*, 2010).

L'ubiquité des pesticides et de leurs résidus implique pour la population une exposition secondaire (par opposition à l'exposition primaire qui caractérise les professionnels qui les manipulent). L'alimentation et la consommation d'eau sont les voies d'exposition les plus documentées, mais de récentes études montrent que la proximité résidentielle pourrait accentuer le risque d'exposition de la population, notamment les enfants (Rull, Gunier *et al.*, 2009) ou les femmes enceintes (Shirangi, Nieuwenhuijsen *et al.*, 2011).

Question de recherche et méthodologie proposée

L'épidémiologie environnementale qui vise à mesurer l'effet sur la santé humaine de l'exposition à certains facteurs de risques environnementaux, se doit de s'appuyer sur une définition précise et rigoureuse de cette exposition. Pour cela, des développements méthodologiques sont nécessaires, notamment en ce qui concerne la mesure ou la distribution des expositions (Ledrans, 2006). Dans le domaine de l'exposition à des polluants chimiques, il est classique de conduire en parallèle de l'enquête épidémiologique, une campagne spécifique de prélèvements et d'analyses d'échantillons des différents compartiments de l'environnement (eau, sol, air) en plusieurs points de la zone d'étude. Ce genre de campagne d'analyse spécifique constitue une façon classique, et coûteuse, mais toujours utilisée, d'appréhender la pollution environnementale, notamment par les pesticides (Gómez, Herrera *et al.*, 2012 ; Hellar-Kihampa, De Wael *et al.*, 2013).

Dans ce contexte, nous nous sommes plus interrogés sur la répartition spatiale des produits phytosanitaires dans une zone et nous nous sommes intéressés au risque de pollution des eaux de surface. Les zones

potentielles d'accumulation des écoulements pourraient constituer des zones d'exposition maximales pour les individus résidants à proximité. Différents paramètres déterminent les transferts de matières actives phytosanitaires vers les eaux superficielles. Le transfert des pesticides vers les cours d'eau se fait principalement sous l'action du ruissellement de la pluie, conditionné par les propriétés du terrain et du climat. Deux types de réactions du sol peuvent co-exister dans le temps et dans l'espace (Cosandey, 2000). En premier, si la capacité d'infiltration du sol, contrôlée par ses propriétés de texture et hydrodynamiques, est inférieure à l'intensité de la pluie, alors un ruissellement hortonien (Beven, 2004) va apparaître. En second, si le sol est saturé (par remontée d'une nappe perchée par exemple) alors quelle que soit l'intensité de la pluie incidente, un ruissellement par saturation du sol (Dunne & Black, 1970) se formera. Une fois généré en surface, le ruissellement, indépendamment de son origine, pourra transporter les pesticides et autres substances sur les versants et se concentrer vers les cours d'eau en aval. Au contraire, les eaux infiltrées pourront véhiculer les pesticides vers les nappes souterraines.

Il existe différentes méthodes pour évaluer la pollution des eaux de surface. Certaines, estiment la contamination d'une masse d'eau de surface par un épandage suite à une pluie (Verro, Calliera *et al.*, 2002 ; Bonzini, Verro *et al.*, 2006). D'autre le font par le biais de l'utilisation d'indicateurs environnementaux ou le développement de modèles de transfert (Thiollet-Scholtus, 2004 ; Macary, Balestrat *et al.*, 2007).

Notre objectif vise à définir une méthode pour caractériser l'aléa potentiel de pollution résultant tant de l'épandage direct de produits phytosanitaires que de leur transfert par ruissellement au sein d'un bassin versant. Notre méthode s'appuie sur un indicateur environnemental composite spatialisé qui combinera la pression phytosanitaire et la vulnérabilité des masses d'eau superficielles. Cette méthodologie est testée dans deux zones où d'intenses précipitations provoquent des ruissellements importants : en Languedoc-Roussillon et dans l'extrême Nord du Cameroun.

Définitions

Battance : Caractère d'un sol dont la structure se désagrège jusqu'à former une croûte en surface sous l'action de la pluie. La battance est étroitement dépendante des éléments qui composent le sol (argiles, limons, argiles, matières organiques, etc.). Elle se traduit par le colmatage de la partie superficielle du sol, empêchant l'infiltration. En conséquence, elle favorise souvent l'érosion hydrique.

Écoulement hortonien : Le ruissellement hortonien apparaît lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration des sols. L'excédent stagne à la surface du sol et peut s'écouler sous l'effet de la pente. C'est le type de ruissellement le plus naturellement compris, observé et intuitif.

Culture du sorgho dans l'Extrême Nord du Cameroun. Des pieds de sorgho, culture endémique de la région Nord occupent le premier plan (cliché : David Sebag, 2012).

I- Matériel et méthode

Estimation de la pression phytosanitaire

Pour évaluer l'utilisation des pesticides, différents indicateurs existent basés sur les quantités de substances actives (vendues, utilisées), sur le nombre de traitements ou encore sur le coût des traitements phytosanitaires appliqués. L'indicateur retenu, l'Indice de Fréquence des Traitements (IFT) est un indicateur synthétique de pression polluante qui permet d'estimer l'intensité du recours aux différents produits. Développé dans les années 80 au Danemark, le calcul de l'IFT a été adapté et développé en France par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et le Ministère de l'agriculture et de la pêche (Champeaux, 2006). L'indicateur de fréquence des traitements (IFT), mesuré notamment à partir des enquêtes sur les pratiques culturales, correspond, à la moyenne par hectare, du nombre des traitements effectués en produits commercialisés, pondérés par le rapport entre la dose utilisée et la dose homologuée (Pingault, Pleyber *et al.*, 2009). Ils peuvent être calculés par culture, par région ou encore par classe de produits (IFT herbicides, IFT pesticides, etc.).

Afin d'estimer spatialement la pression phytosanitaire d'une zone, nous avons combiné l'orientation culturale de cette zone et l'IFT correspondant à la culture dominante. La typologie des cultures a été construite à partir des données du recensement agricole (2010) qui définit, pour chaque exploitation, une orientation technico-économique qui rend compte de sa spécialisation. Ces données, agrégées par communes permettent de définir une orientation dominante par commune (la culture la plus présente). Plusieurs classifications existent (70 ou 18 postes).

Nous avons adopté une classification simplifiée en 6 postes à partir de regroupements de la liste en 18 postes (céréales et oléo protéagineux, maraîchage, horticulture, viticulture, arboriculture fruitière, polyculture / élevage). Au final nous avons calculé pour chaque commune un IFT communal résultat du produit de l'IFT de la culture dominante par la Surface Agricole Utilisée (SAU) de la commune rapporté à la surface communale totale.

Définition des zones de production et d'accumulation du ruissellement

La méthodologie mise en œuvre propose de caractériser le terrain selon sa faculté à produire du ruissellement. Pour cela, le territoire est découpé en unités de l'espace, appelées hydro-paysages pour lesquelles la réponse hydrologique est supposée homogène (Dehotin and Braud 2008). En se basant sur une méthode de cartographie du risque de ruissellement intense, la méthode IRIP (Indicateur de l'aléa inondation par Ruissellement Intense Pluvial) (Dehotin and Breil 2011), et de genèse du ruissellement de surface par une résolution lagrangienne (Estupina-Borrell, 2004, Estupina-Borrell *et al.*, 2005), il est possible de caractériser les zones propices à la production de ruissellement et celles susceptibles d'accumuler ce ruissellement. Nous utilisons la battance, la profondeur du sol, la pente du terrain et l'occupation des sols pour caractériser la propension d'un point du versant à ruisseler ou au contraire à infiltrer une pluie incidente. La battance est estimée à partir de la texture du sol (teneurs en argile, limon et sable). Les sols ont été regroupés selon leur granulométrie et leur profondeur. La pente du terrain est directement évaluée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). L'occupation du sol, est traduite en termes de sensibilité à la production

Zone de culture de coton dans l'Extrême Nord du Cameroun. Au premier plan, les pieds de coton asséchés à la fin de la saison sèche illustrent l'intrication étroite entre les zones de culture et l'habitat. Au fond, un inselberg, typique de la géomorphologie de cette zone (cliché : David Sebag, 2011).

de ruissellement hortonien (les cultures et zones urbaines favorisant le ruissellement, contrairement aux forêts et zones naturelles). Cette seconde étape conduit à l'élaboration de la carte de production du ruissellement. Ensuite, l'IFT et la capacité à produire du ruissellement sont combinés de façon à estimer quelles sont les zones pour lesquelles une pression phytosanitaire s'exerce sur un milieu susceptible de produire du ruissellement. Cette troisième étape conduit à définir des espaces de pression en production.

Enfin, la dernière étape consiste à évaluer les zones aval où vont s'accumuler les ruissellements issus des zones soumises à une «pression en production». Le calcul d'évaluation des zones à risques de pollution est proposé à travers la détermination des zones alimentées par des points amont potentiellement pollués et qui présentent une relative facilité à rejoindre le réseau hydrographique (permanent et transitoire). Ainsi, cette dernière étape permet de caractériser la pression phytosanitaire potentielle résultant de l'épandage direct et son transfert et constitue la carte de l'aléa potentiel de pollution.

Cette méthode cartographique repose sur la détermination d'un certain nombre de seuils qui fixent les classes de chaque grandeur considérée. Leur sensibilité a été étudiée, en particulier, la sensibilité au mode de calcul des pentes, à l'épaisseur des sols et à la battance. La méthode des quantiles a été retenue pour le seuil sur les pentes.

Sites d'étude

En Languedoc-Roussillon, la zone d'étude se situe aux confins du département du Gard, et dans une moindre mesure de l'Hérault et de la Lozère. Elle couvre une surface totale d'environ 5 000 km² qui correspond à 282 communes. Les sols sont renseignés dans la base de données sols du Languedoc-Roussillon (BDSol-LR), issue du Référentiel Pédologique Régional (RPR). D'épaisseurs variables, ils présentent différentes textures selon les secteurs (sables limoneux, argiles limoneuses, argiles, limons argilo-sableux essentiellement). La topographie est renseignée par la BD ALTI® de l'Institut Géographique National (IGN, 2012). L'occupation du sol est issue des données de Corine Land Cover (Union européenne – SOeS, CORINE Land Cover, 2006).

Au Cameroun, le bassin versant du Mayo Tsanaga, situé à l'extrême Nord du pays, constitue notre site d'étude. D'une surface d'environ 1535 km², il s'étend d'Ouest en Est, des Monts Mandara où le fleuve éponyme prend sa source, jusqu'à sa confluence avec le Logone, un affluent du Lac Tchad (Liéno, Mahé *et al.*, 2009). Les caractéristiques des sols sont issues d'une analyse détaillée conduite sur l'ensemble du bassin versant (Brabant and Gavaud, 1985). La géomorphologie, l'hydrographie et l'occupation du sol sont issues d'un travail de recherche conduit récemment sur le bassin versant à partir d'interprétation d'images satellites (Leroux, Oszwald *et al.*, 2013). La zone d'étude correspond à la partie supérieure du bassin versant, en amont de la ville de Maroua, 4^e ville du Cameroun avec 300 800 habitants en 2005.

II- Résultats

En Languedoc-Roussillon

Les valeurs de l'IFT communal s'échelonnent de 0 à 13,3. L'IFT communal moyen est de 1,65, mais la moitié des communes ont un IFT inférieur à 0,63. La répartition de l'IFT souligne un découpage assez net en trois bandes orientées sud-ouest / nord-est (**figure 1**, carte b). La plus septentrionale présente des valeurs d'IFT moyennes et correspond à une zone rurale dominée par la polyculture et l'élevage. La bande centrale affiche les valeurs les plus faibles et se caractérise par la coexistence de polycultures et de l'élevage. Enfin, la partie sud, largement dominée par la viticulture arbore les valeurs les plus élevées d'IFT communaux.

Concernant la carte de production de ruissellement, la battance est relativement faible sur l'ensemble de la zone d'étude. L'épaisseur des sols variables, allant d'une absence de sol sur des formations karstiques affleurantes et des sols très profonds. Les zones de sol profond se situent au niveau des régions naturelles. Les secteurs sud et sud-est présentent des sols fins et moyennement épais. Le relief est marqué, avec des altitudes supérieures à 1 000 m NGF sur une bande orientée nord-est sud-ouest sur le secteur de tête des bassins au nord-ouest de la zone étudiée. Puis le gradient altitudinal présente une orientation nord-ouest sud-ouest, avec une plaine marquée après la confluence des Gardons (altitudes inférieures à 200 m NGF). Les pentes varient de 0 à 52% avec une moyenne à 10%. Les pentes faibles se retrouvent sur le secteur anthropisé du sud-est. Le réseau hydrographique permanent et temporaire est dense et marqué sur tout le secteur étudié en dehors de cette zone anthropisée. Les 4 critères retenus sont traduits en classes binaires en fixant un seuil, puis ces classes sont sommées afin de construire les classes de production au ruissellement. L'étude de sensibilité portant sur les valeurs des différents seuils fixés pour chaque critère ne se traduit pas en fort impact sur la carte finale de production du ruissellement. Toutefois, le seuil fixé sur la profondeur du sol (incluant ou pas les sols d'épaisseur moyenne) est une donnée sensible, tout comme le seuil relatif aux pentes. Pour la suite de l'étude, la méthode des quantiles est retenue pour le seuil sur les pentes, et les sols d'épaisseur moyenne ont été regroupés avec les sols minces (ce qui favorise la production de ruissellement). Au final, la carte de l'aléa de pollution combine la pression phytosanitaire, la production de ruissellement et l'aptitude de la zone à l'accumulation (carte c, **figure 1**). La partie amont (au nord-ouest de la carte), qui correspond au piémont des Cévennes, présente de faibles aptitudes tant à la production qu'à l'accumulation du ruissellement, notamment en raison des fortes pentes qui peuvent atteindre 52% et sont soumises à une très faible pression phytosanitaire, déterminant un aléa faible dans toute cette zone. L'axe central où l'aléa est maximal (bleu foncé) correspond aux bassins versants des Gardons de Sainte-Croix et de Saint-Jean. Deux autres espaces, l'amont du Vidourle et les affluents les plus septentrionaux du Tarnon, se caractérisent par un aléa moyen (bleu clair). Ces zones combinent une forte pression phytosanitaire et une importante aptitude tant au ruissellement qu'à l'accumulation.

figure 1 : La zone d'étude en Languedoc-Roussillon. A- L'indice de Fréquence des Traitements. B- Carte d'accumulation des pesticides.

A l'extrême Nord du Cameroun

Une carte d'occupation du sol issue de traitements d'images satellitales a permis d'identifier des différents types d'occupation du sol (Leroux, Oszwald *et al.*, 2013). La zone amont, caractérisée par un relief marqué constituée de vallées encaissées, est peu propice au développement agricole. La zone du piémont, notamment aux alentours de Maroua est caractérisée par une mise en valeur agricole intense autour de deux cultures dominantes, le coton dans l'ensemble du sous-bassin versant de Maroua et le maraîchage aux abords de la ville. La culture cotonnière, pour répondre à des besoins de rentabilité, utilise d'importantes quantités de produits phytosanitaires, insecticides et herbicides (Seiny-Boukar, Poulain *et al.*, 1997). Différents protocoles de traitements existent pour la culture du coton, recommandés par la Société de développement du coton (Sodecoton), l'entreprise d'Etat qui gère la filière coton au Cameroun (Bertrand, Brévault *et al.*, 2010). Toutefois il n'existe aucune information suffisamment détaillée concernant les pratiques culturales tant du coton que du maraîchage pour calculer les IFT correspondant. Faisant l'hypothèse que les rendements sont étroitement corrélés aux épandages d'intrants, nous supposons que plus le rendement est élevé, plus la pression phytosanitaire qui s'exerce sur le milieu est intense. Nous nous sommes donc appuyés sur la carte des rendements de coton de la campagne 1985-1986 combinée à la carte des zones de cultures pour établir la carte de pression phytosanitaire en quatre classes (Roupsard 2004). En l'absence de culture, la pression phytosanitaire est nulle. En présence de culture avec un rendement faible ou nul, la pression est minimale (codée 1). Enfin, la présence de culture croisée avec deux classes de rendement constitue les classes 3 et 4.

Sur la carte de production du ruissellement, une majorité du bassin correspond à des zones de moyenne production. La production aux abords des cours d'eau est différenciée. En effet, en amont, la production des rives est faible et inférieure à celle des environs, alors qu'en aval la production est moyenne à forte, et supérieure aux environs. Ceci est lié aux dépôts de sédiments grossiers uniquement dans l'amont (écoulement rapide du cours d'eau), puis le dépôt de sédiments plus fins en aval lorsque l'écoulement ralentit. Les environs de Maroua correspondent à une zone de forte production. Au final, la carte de l'aléa potentiel de pollution (carte c, **figure 2**) fait ressortir trois zones, la partie amont où l'aléa est faible, la partie centrale où il est élevé à très élevé alors que la zone aval se caractérise par un aléa moyen.

Discussion et conclusion

Nous avons développé une démarche originale d'évaluation et de spatialisation d'un aléa de contamination phytosanitaire. Cette méthode cartographique simple à mettre en œuvre et reproductible permet de caractériser l'amplitude spatiale de l'aléa potentiel de pollution dans une zone, quelle que soit l'échelle d'analyse et le découpage utilisé, et donc de définir assez précisément des zones d'exposition potentielle maximale pour la population

résidant à proximité des zones de cultures. A notre connaissance, ce genre d'analyse environnementale d'un aléa n'a jamais encore servi à soutenir ou éclaircir des enquêtes épidémiologiques. Elle permet en outre, d'établir un diagnostic rapide d'une situation de pollution et d'en assurer le suivi pour mesurer, par exemple, l'impact de recommandations ou de politiques d'amélioration de la qualité de l'environnement, ou encore pour conduire des estimations de risques sanitaires.

Développée dans deux contextes différents qui se distinguent, entre autres, par l'accès aux données, la méthode s'avère suffisamment robuste pour être mise en œuvre même avec peu d'informations comme dans le cas de l'extrême Nord du Cameroun. Il faut alors dans ce cas, rester prudent avec les conclusions apportées, puisque la fiabilité du résultat final dépend, bien évidemment de la qualité des données qui servent à la construction des cartes.

Bien qu'impossible à mettre en œuvre au Cameroun, l'indice de pression phytosanitaire retenu pour l'étude menée en France, l'IFT, présente l'avantage de prendre en compte l'intensité du traitement et de permettre d'agréger les substances différentes afin d'obtenir une estimation globale de la pression phytosanitaire.

Les résultats que nous obtenons sont cohérents en regard de ceux d'autres études ayant utilisé une méthodologie similaire. En Languedoc-Roussillon, les résultats obtenus présentent une bonne similitude avec ceux de Bonnet pour les valeurs extrêmes (hautes et basses) de production du ruissellement (Bonnet 2012). Par contre, l'hétérogénéité de la zone productive ne présente pas le même faciès. Concernant l'aptitude à l'accumulation, nous avons choisi de favoriser la proximité du réseau hydrographique au pixel et sa facilité à l'atteindre. Ainsi, la sensibilité au mode de calcul de la pente diminue alors que l'influence des zones de production amont augmente.

D'autres méthodes cartographiques d'estimation des risques phytosanitaires existent, mais aucune n'intègre le ruissellement et son accumulation dans les zones basses. Macary *et al.* définissent le risque de contamination comme le produit d'une pression agricole et de la vulnérabilité des eaux de surface, définie selon différents critères (la nature du sol, la géomorphologie ou la pente). La pression agricole est définie par le nombre de traitements effectués par culture (Macary, Balestrat *et al.*, 2007, Macary, Morin *et al.*, 2014). Siber *et al.* estiment une capacité à diffuser les herbicides vers les eaux de surface en supposant que le transport des herbicides est essentiellement dû aux écoulements rapides qui sont estimés par un indicateur le Fast Flow Index (FFI) et combiné à l'utilisation d'herbicides (Siber, Stamm *et al.*, 2009). Cette méthode qui s'appuie sur un grand nombre de mesures de débit ne peut pas être développée dans le cas de bassins versants peu jaugés, comme parfois dans les pays du Sud.

Cette recherche présente certaines limites. D'une part, les propagations aériennes et souterraines de ces produits ne sont pas prises en compte. Cette limite

Les vignes, la culture dominante des basses plaines de l'Hérault et du Gard (cliché : Eric Bera-cassat, 2015).

WARNING

figure 2 : La zone d'étude dans l'Extrême Nord du Cameroun. A- Aptitude à la production de ruissellement. B- Aléa de pollution phytosanitaire en fonction des zones d'accumulation.

La plaine du Mayo Tsanaga (Extrême Nord du Cameroun). Les champs de maïs dans la plaine du Mayo Tsanaga. Au second plan, les Monts Mandara qui bordent la partie occidentale du bassin versant (cliché : David Sebag, 2012).

est particulièrement prégnante pour le contexte du Languedoc-Roussillon où le ruissellement du massif Cévenol est encore mal connu, et fait d'ailleurs l'objet de l'ANR FloodScale (Braud, Ayrat *et al.*, 2014) en cours. Bien que le processus de ruissellement ne soit pas visible sur les sols des Cévennes, la réponse des Gardons à une pluie incidente est suffisamment rapide pour imaginer la contribution d'autres processus de transferts rapides.

L'approche par calcul de l'IFT ne tient pas compte des spécificités des molécules et des composants qui constituent les pesticides ou leurs produits de dégradation. La capacité d'un pesticide à se déplacer dans le sol dépend en partie de son coefficient d'adsorption (K_{oc}) : plus la valeur du K_{oc} est élevée, plus sa mobilité est faible et, *de facto*, le risque de contamination du milieu. Une autre caractéristique, la rémanence estimée par la demi-vie de dégradation (DT_{50}) qui est la durée à l'issue de laquelle la moitié de la quantité présente est dégradée.

La validation des résultats de cette modélisation constitue une des prochaines étapes de cette recherche. Deux pistes de validation sont envisagées, des mesures de concentrations de polluants *in situ* d'une part et d'autre part, le développement d'un autre modèle intégrant la pluviométrie. À terme la confrontation avec des données de santé constituerait une validation tant de la méthode que de l'hypothèse d'une exposition secondaire en relation avec les lieux de résidence.

Contribution : Emmanuelle Cadot, Valérie Borrell Estupina, Marine Rousseau et David Sebag ont défini les protocoles de recherche. Emmanuelle Cadot et Valérie Borrell Estupina ont écrit le manuscrit avec une contribution égale. Valérie Borrell Estupina a conduit les analyses et interprété les résultats de la méthode hydrologique. Emmanuelle Cadot a mené les analyses et interprétation de la partie phytosanitaire. David Sebag a participé à la relecture du manuscrit et à l'interprétation des résultats.

WARNING

Références bibliographiques

- Aubertot J., J. Barbier, A. Carpentier, J. Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini and M. Voltz, (2005). *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*, INRA et Cemagref: 64.
- Bertrand A., T. Brévault, M. Thèze and M. Vaissayre, (2010). *De la LEC à la LOIC : comment aider les paysans à prendre en charge la protection phytosanitaire de leurs parcelles de coton ?* Colloque Savanes africaines en développement : Innover pour durer. B. P. Seiny Boukar L. Garoua, Cameroun, PRASAC: 12 p.
- Beven K., (2004). Infiltration excess at the Horton Hydrology Laboratory (or not?). *Journal of Hydrology* 293(1-4): 219-234.
- Bonnet S., (2012). *Cartographie des zones potentielles de production ou d'accumulation du ruissellement de surface en région cévenole*. Master II Eau, UM2.
- Bonzini S., R. Verro, S. Otto, L. Lazzaro, A. Finizio, G. Zanin and M. Vighi, (2006). Experimental Validation of a Geographical Information Systems-Based Procedure for Predicting Pesticide Exposure in Surface Water. *Environmental Science & Technology*, 40(24): 7561-7569.
- Brabant P. and M. Gavaud, (1985). *Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun (Provinces du Nord et de l'Extrême Nord) : cartes à 1:500000 Feuille Nord : Maroua-Kousséri Feuille Sud : Garoua*. Paris, ORSTOM.
- Braud, I., P. A. Ayral, C. Bouvier, F. Branger, G. Delrieu, J. Le Coz, G. Nord, J. P. Vandervaere, S. Anquetin, M. Adamovic, J. Andrieu, C. Batiot, B. Boudevillain, P. Brunet, J. Carreau, A. Confoland, J. M. Domergue, J. Douvinez, G. Dramais, R. Freydier, S. Gérard, J. Huza, E. Leblos, O. Le Bourgeois, R. Le Boursicaud, P. Marchand, P. Martin, L. Noffale, N. Patris, B. Renard, J. L. Seidel, J. D. Taupin, O. Vannier, B. Vincendon and A. Wijbrans, (2014). Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash-flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9): 3733-3761.
- Champeaux C., (2006). *Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures. Evolution de l'Indicateur de Fréquence de Traitements au travers des enquêtes « Pratiques Culturelles » du SCEE entre 1994 et 2001*. Ministère de l'Agriculture et de la pêche, Institut national de la recherche agronomique, UMR 211 Agronomie Grignon: 101.
- Dehotin J. and I. Braud, (2008). Which spatial discretization for distributed hydrological models? Proposition of a methodology and illustration for medium to large-scale catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12(3): 769-796.
- Dehotin J. and P. Breil, (2011). *Projet IRIP : Rapport technique - Cartographie de l'aléa ruissellement*.
- Dubois A., (2013). Contamination des cours d'eau par les pesticides en 2011. *Chiffres & Statistiques*, (436): 7.
- Dunne T. and R. D. Black, (1970). Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed. *Water Resources Research*, 6(5): 1296-1311.
- Estupina-Borrell V., (2004). *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du Sud de la France*. Soutenue le 21 avril 2004. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 253 p.
- Estupina-Borrell V., J. Chorda et D. Dartus, (2005). Flash floods anticipation / Prévision des crues éclair. *Comptes rendus Geoscience* (ISSN : 1631-0713 2005) Vol337 - Num 13 - pp. 1109-1119.
- Ferragu C., I. Tron and S. Bompays, (2010). *Pesticides et santé : état des connaissances sur les effets chroniques en 2009*. ORS Bretagne : 120.
- Gómez M. J., S. Herrera, D. Solé, E. García-Calvo and A. R. Fernández-Alba, (2012). Spatio-temporal evaluation of organic contaminants and their transformation products along a river basin affected by urban, agricultural and industrial pollution. *Science of The Total Environment*, 420(0): 134-145.
- Hellar-Kihampa H., K. De Wael, E. Lugwisha, G. Malarvannan, A. Covaci and R. Van Grieken, (2013). Spatial monitoring of organohalogen compounds in surface water and sediments of a rural-urban river basin in Tanzania. *Science of The Total Environment*, 447: 186-197.
- Ledrans M., (2006). L'épidémiologie en santé environnementale : un cadre méthodologique aux applications multiples étroitement lié à celui de l'évaluation des risques sanitaires. *Annales des Mines - Responsabilité & Environnement*, 41: 57-67.
- Leroux L., J. Oszwald, B. Ngounou Ngatcha, D. Sebag, M.-J. Penven and E. Servat, (2013). Le bassin versant du Mayo-Tsanaga (Nord Cameroun) : un bassin versant expérimental pour une compréhension des relations Homme/Milieu. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 202: 42-54.
- Li Y. F. and R. W. Macdonald, (2005). Sources and pathways of selected organochlorine pesticides to the Arctic and the effect of pathway divergence on HCH trends in biota: a review. *Science of The Total Environment*, 342(1-3): 87-106.
- Liéno G., G. Mahé, J.-E. Paturol, E. Servat, G. E. Ekodeck and F. Tchoua, (2009). Variabilité climatique et transport de matières en suspension sur le bassin de Mayo-Tsanaga (Extrême-Nord Cameroun). *Sécheresse*, 20(1): 139-144.
- Macary F., M. Baleslat, C. Puech and F. Saudubray, (2007). Méthode d'estimation d'un risque potentiel spatialisé de la contamination des eaux de surface par les intrants agricoles à différentes échelles spatiales. *SAGEO*, Clermont-Ferrand.
- Macary F., S. Morin, J. L. Probst and F. Saudubray, (2014). A multi-scale method to assess pesticide contamination risks in agricultural watersheds. *Ecological Indicators*, 36: 624-639.
- Mulligner L., (2005). Effets retardés des pesticides sur la santé humaine. *Environnement, Risques & Santé*, 4(3): 187-194.
- Observatoire des Résidus de Pesticides, (2016). Retrieved 07/03/2016, 2016, from <http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr/index.php?pageid=381>.
- Pingault N., E. Pleyber, C. Champeaux, L. Guichard and B. Omon, (2009). Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquence de traitements. *Notes et études socio-économiques*, (31): 61-94.
- Roupsard M., (2004). *Production cotonnière : campagne agricole 1985-1986 (planche 18)*. Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun. C. Seignobos and O. Iyébi-Mandjek. Paris, IRD: non paginé.
- Rull R. P., R. Gunier, J. Von Behren, A. Hertz, V. Crouse, P. A. Buffler and P. Reynolds, (2009). Residential proximity to agricultural pesticide applications and childhood acute lymphoblastic leukemia. *Environmental Research*, 109(7): 891-899.
- Seiny-Boukar L., ed., J.-F. Poulain, ed. and G. Faure, ed., (1997). *Agricultures des savanes du Nord-Cameroun, vers un développement solidaire des savanes d'Afrique centrale : actes de l'atelier d'échange, 25-29 novembre 1996, Garoua, Cameroun*. Atelier d'échange agricultures des savanes du nord-Cameroun : vers un développement solidaire des savanes d'Afrique centrale, Garoua, Cameroun, CIRAD.
- Shirangi A., M. Nieuwenhuijsen, D. Vienneau and C. D. A. J. Holman, (2011). Living near agricultural pesticide applications and the risk of adverse reproductive outcomes: a review of the literature. *Paediatric and Perinatal Epidemiology*, 25(2): 172-191.
- Siber R., C. Stamm and P. Reichert, (2009). Modeling potential herbicide loss to surface waters on the Swiss plateau. *Journal of Environmental Management*, 91(1): 290-302.
- Snow S. J., (2008). John Snow: the making of a hero? *The Lancet*, 372(9632): 22-23.
- Sorre M., (1933). Complexes pathogènes et géographie médicale. *Annales de Géographie*: 1-18.
- Thiollet-Scholtz M., (2004). *Construction d'un indicateur de qualité des eaux de surface vis-à-vis des produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant viticole*. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Verro R., M. Calliera, G. Maffioli, D. Auteri, S. Sala, A. Finizio and M. Vighi, (2002). GIS-Based System for Surface Water Risk Assessment of Agricultural Chemicals. 1. Methodological Approach. *Environmental Science & Technology*, 36(7): 1532-1538.
- Veyret Y., (2007). L'environnement, objet géographique ? *Responsabilité et Environnement* 48: 19-29.

Marlboro

Filage artisanal du coton
(cliché : David Sebag,
2012).