



HAL
open science

Un risque d'origine anthropique : la contamination chronique par les métaux lourds à proximité d'anciens sites miniers. Le cas de la mine (plomb, zinc, cadmium) de Jebel Ressas (Tunisie nord-orientale)

Manel Ghorbel, Pierre Courjault-Radé, Marguerite Munoz, Éric Maire, Christine Destrigneville, Radia Souissi, Fouad Souissi

► **To cite this version:**

Manel Ghorbel, Pierre Courjault-Radé, Marguerite Munoz, Éric Maire, Christine Destrigneville, et al.. Un risque d'origine anthropique : la contamination chronique par les métaux lourds à proximité d'anciens sites miniers. Le cas de la mine (plomb, zinc, cadmium) de Jebel Ressas (Tunisie nord-orientale). Risques et environnements : recherches internationales sur la vulnérabilité des sociétés, L'Harmattan, pp.271-284, 2009. halshs-01057339

HAL Id: halshs-01057339

<https://shs.hal.science/halshs-01057339>

Submitted on 22 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UN RISQUE D'ORIGINE ANTHROPIQUE : LA
CONTAMINATION CHRONIQUE PAR LES METAUX
LOURDS A PROXIMITE D'ANCIENS SITES MINIERS.
LE CAS DE LA MINE (PLOMB, ZINC, CADMIUM) DE JEBEL RESSAS
(TUNISIE NORD-ORIENTALE)**

M. GHORBEL, P. COURJAULT-RADÉ, M. MUNOZ, E. MAIRE,
C. DESTRIGNEVILLE, R. SOUISSI, F. SOUISSI¹

L'estimation du risque de contamination métallique autour d'un ancien site minier conduit à adapter l'analyse au caractère chronique de cette contamination. La diversité des enjeux concernés, environnementaux (écosystèmes...) et sociétaux (impacts sanitaires...), implique l'intégration de l'ensemble des paramètres constitutifs du risque - aléas et vulnérabilité des enjeux - dans un système à données spatialisées (SIG). La carte de risque préliminaire obtenue sur l'enjeu sol illustre notre démarche pluridisciplinaire.

Introduction

L'analyse des risques en relation avec l'environnement s'intéresse surtout aux catastrophes naturelles telles que les éruptions volcaniques, les inondations, les séismes. Or, la société actuelle étant fortement marquée par le développement industriel et technologique, les risques d'origine anthropique deviennent de plus en plus prégnants. Dans ce contexte, les risques associés aux contaminations métalliques qui résultent d'un excès d'accumulation, accidentelle ou chronique, de métaux lourds dans l'environnement, restent peu étudiés. De fait, les études menées

¹ Manel Ghorbel, RME, Université de Tunis –Tunisie ; Pierre Courjault-Radé, LMTG Université de Toulouse – France ; Marguerite Munoz, LMTG, Université de Toulouse – France ; Eric Maire, LMTG, Université de Toulouse – France ; Christine Destrigneville, LMTG, Université de Toulouse – France ; Radia Souissi, INRAP (Tunis) – Tunisie ; Fouad Souissi, RME, Université de Tunis- Tunisie

sont le plus souvent des études d'impact dont la finalité est l'évaluation de l'état du milieu suite à l'occurrence d'une contamination par les métaux (Kontopoulos et al., 1995). Certaines d'entre elles s'intéressent au risque mais ne traitent que la partie aléa du risque (Korre et al., 2002 ; Xenidis et al., 2003), analyse dite « aléa-centrée » sensu d'Ercole et Demoraes (2003). De ce fait, les résultats obtenus sont en général difficilement exploitables dans une optique d'aide à la prise de décision pour la gestion des sites contaminés qui, en tout état de cause, doit tenir compte des situations spécifiques des populations riveraines et des écosystèmes.

La prise en considération de la problématique contamination métallique en tant que risque pour l'environnement et l'être humain conduit à prendre en compte un ensemble de paramètres faisant intervenir non seulement les notions de source et vecteurs de la contamination pour les aspects concernant la caractérisation de l'aléa, mais également les notions d'enjeux et de vulnérabilité de ces enjeux qu'ils soient d'ordre écologique ou sociétal. Dans le cadre de l'analyse du risque de contamination métallique chronique, les éléments du risque tels que, aléa, enjeux et vulnérabilité doivent être adaptés à la problématique spécifique de l'accumulation chronique de métaux lourds, sensiblement différente des contaminations accidentelles. La vulnérabilité correspondra à un ensemble de paramètres spécifiques à ces différents enjeux qui favoriseront ou limiteront l'accumulation de la contamination. En outre, ces éléments étant spatialisables et par conséquent intégrables dans un système d'information géographique (e.g. Propeck-Zimmermann et al., 2002), il est alors possible de produire des cartes du niveau de risque associé à la contamination métallifère à proximité des anciens sites miniers.

L'objectif de l'étude entreprise est de proposer une nouvelle méthode d'évaluation et de cartographie du risque de contamination métallique sur et autour d'un ancien site minier situé à proximité de la ville de Tunis. Ce type de risque que les sociologues dénomment « risques diffus » (Beck, 1992 ; Peretti-Watel, 2000), appelle une approche interdisciplinaire couvrant un large spectre depuis la géochimie jusqu'aux données sociétales afin d'intégrer les données quantitatives et qualitatives dans un même modèle.

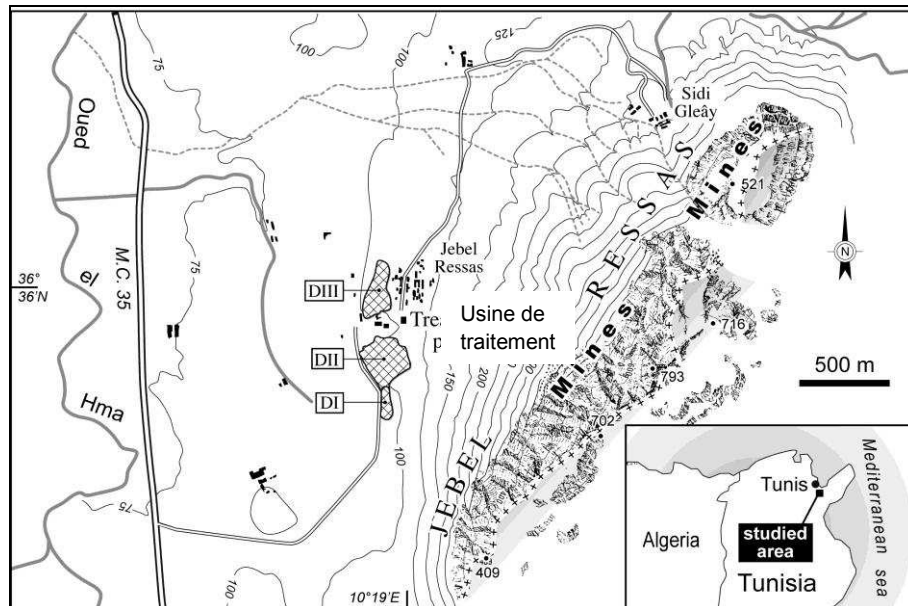
L'ensemble des données nécessaires à la construction de différents documents cartographiques concernant le « risque post-mine », en fonction des différents enjeux pris en compte est en cours d'acquisition dans le cadre d'une collaboration franco-tunisienne. Bien que notre objectif final soit l'Homme en tant qu'enjeu premier soumis à la contamination métallique chronique générée par les déchets miniers, la première phase de l'analyse s'attachera à la caractérisation des enjeux environnementaux qui constituent une chaîne de transfert jusqu'à l'Homme. De ce fait, dans cet article ne seront précisés que les différents concepts utilisés et la méthodologie suivie. Les résultats préliminaires consistent en la construction de la carte de risque de contamination métallique des sols situés à proximité de l'ancien site minier de Jebel Ressas.

Notre ambition - à terme - est de faire en sorte que cette méthodologie mise au point à partir de l'analyse exhaustive du site de Jebel Ressas puisse être transposable à d'autres sites miniers tunisiens et plus généralement aux sites miniers situés en climat semi-aride, afin de fournir des outils d'aide à la décision adaptés à leur gestion.

1. L'objet d'étude : l'ancien site minier de Jebel Ressay

Le site minier de Jebel Ressay est situé à environ 30 kilomètres au sud de la ville de Tunis. Il comprend, dans le massif, le site d'extraction pour le plomb (Pb) et le zinc (Zn), en activité jusqu'à 1951 et, à quelques centaines de mètres vers l'ouest, au pied du massif, le site de traitement du minerai où ont été laissés trois terrils de déchets de laverie (notés DI, DII, DIII) (Fig. 1).

Figure 1 : Localisation du site de Jebel Ressay (DI, DII et DIII correspondant aux trois terrils de déchets)



Jouxtant le terril DIII, se situe le village de Jebel Ressay (Figure 1). A la bordure ouest des terrils, l'activité agricole s'est développée sur la plaine jusqu'à l'Oued Hma. Le secteur d'étude est ainsi délimité par le massif de Jebel Ressay à l'est et l'Oued Hma, à l'ouest.

Au point de vue climatique, la région de Tunis se situe dans la zone méditerranéenne semi-aride caractérisée par de longues périodes de sécheresse entrecoupées par de fortes pluies torrentielles. Ces caractéristiques climatiques ont une incidence marquée sur les modalités de diffusion de la contamination métallique en particulier par les aérosols soulevés par les vents et par le ruissellement.

2. Les composantes du risque à Jebel Ressay

Les nombreuses définitions du risque proposées dans la littérature varient selon la discipline concernée ; elles s'adressent essentiellement à des phénomènes ponctuels (e.g. Barki et al., 1993 ; Rapant et al., 2008). Dans le cadre de la présente étude, la définition du risque retenue est celle d'un aléa croisé avec la vulnérabilité des enjeux, telle que proposée par Propeck-Zimmerman et al (2008) dans le cadre des risques industriels mais qu'il s'avèrera nécessaire d'adapter à l'analyse de risques chroniques. Les différentes composantes, aléas, enjeux et vulnérabilité, sont définies ci-après.

2.1. Les aléas

L'aléa est défini par Propeck-Zimmerman et al. (2008) comme le résultat du croisement de l'intensité d'un danger avec sa probabilité d'occurrence.

Le danger

Dans le cas de contaminations chroniques, le danger est constitué par la source de cette contamination. Le volume et les concentrations en métaux lourds sont les deux paramètres clés qui caractérisent l'intensité du danger.

A Jebel Ressas, les déchets de laverie représentent un volume important et des concentrations élevées en métaux lourds, plomb (Pb) et cadmium (Cd) dont la toxicité est reconnue pour l'Homme (Papanikolaou et al., 2005) et les écosystèmes (Muhamad et al., 2005).

Les déchets de laverie sont stockés en terrils à sommet plat de 10 mètres de hauteur en moyenne représentant un volume total d'environ 600 000 m³. Une étude géochimique et minéralogique a été menée pour caractériser la source de la contamination en Pb, Zn et Cd (Ghorbel et al., 2008). L'étude a abouti à la distinction entre deux types de déchets. Le premier type (DI) est caractérisé par des minéraux métallifères sulfurés (sphalérite, galène et pyrite) et le deuxième type (DII et DIII) par la dominance de carbonates et oxydes métallifères (smithsonite, cérusite, hydrozincite et hémimorphite). C'est dans ce dernier type que les concentrations en Pb, Zn et Cd sont les plus importantes, atteignant respectivement 2%, 6% et 0,025% du poids. Avec de telles concentrations concernant des volumes importants, le stock de métaux toxiques et cancérigènes que sont le plomb et le cadmium représente un danger pour l'environnement et les populations avoisinantes.

La probabilité d'occurrence

Dans ce cas de contamination chronique, pour évaluer la probabilité d'occurrence, il s'agira d'estimer le potentiel de mobilisation et le taux de transfert des métaux lourds depuis la source vers les différents compartiments de l'environnement (eau, sols, atmosphère et organismes vivants). Cette estimation passera par l'analyse des différents mécanismes physico-chimiques de transfert qu'il sera nécessaire de paramétrer et de quantifier dans l'espace et le temps afin de prévoir des niveaux toxiques d'accumulation en métaux lourds potentiellement toxiques.

Les déchets de Jebel Ressas étant stockés sans aménagement et non végétalisés, ils sont soumis aux intempéries de cette région semi-aride qui induisent une intense érosion éolienne et hydrique. Plus précisément, les mécanismes de transfert à

envisager sont : le transport en solution après altération chimique, le transport de particules en suspension dans l'eau ou par l'air et le transport d'origine anthropique.

- Le transport en solution

Le transport en solution est contrôlé par la solubilité des minéraux métallifères dans les eaux de drainage des déchets. La modélisation géochimique de l'altération dans les terrils a permis d'établir que la présence de minéraux carbonatés exerce un effet tampon sur les eaux de drainage et contribue au piégeage des métaux sous forme de minéraux métallifères stables en conditions atmosphériques (carbonates métallifères essentiellement). La modélisation a permis de calculer des concentrations maximales de Pb et Zn dans les eaux de drainage. Les concentrations obtenues varient entre 40 et 114 µg/l pour Pb et entre 124 et 7600 µg/l pour Zn (Ghorbel et al., 2008). Ces concentrations excèdent légèrement les normes de potabilité européennes (DCE 2000), indiquant un faible taux de transport des métaux sous forme dissoute. Notons que les paramètres géologiques, tels que la perméabilité et l'épaisseur des couches, sont également à prendre en compte pour estimer le taux d'infiltration de la contamination vers les nappes souterraines.

- Les transports physiques

Les mécanismes de transport physique de la contamination apparaissent prépondérants sous ces conditions climatiques. L'érosion physique est potentiellement élevée en raison d'une forte érodibilité des déchets (granulométrie fine associée à une faible cohésion). Les transferts sont également fonction des caractéristiques morphologiques et de la topographie de détail du bassin versant.

L'érosion hydrique entraînant des particules métallifères par ruissellement vers les terrains agricoles, les cours d'eau et le village peut être particulièrement efficace lors des fortes pluies torrentielles.

Le transport éolien ~~avec des vents dominants provenant du nord-ouest~~ est susceptible d'entraîner la contamination vers le village de Jebel Ressas.

L'activité anthropique constitue également un potentiel de transfert de la contamination. Les terrils sont en effet utilisés comme terrain de jeux et recoupés par des voies de passages routiers et piétonniers. Le piétinement favorise le soulèvement de poussières et le transport sur les vêtements amène la contamination jusqu'aux habitations.

2.2. Les enjeux et leur vulnérabilité

Les enjeux

On définira l'enjeu comme toute entité susceptible d'être affectée par la contamination. Ces enjeux pourront être d'ordre environnemental, socio-économique et/ou sanitaire.

Dans le système considéré, les enjeux peuvent être affectés par la contamination provenant directement de la source ou par celle transmise par un enjeu qui lui-même contaminé devient une source secondaire. Il est alors possible de hiérarchiser des enjeux de différents ordres. Ainsi, par exemple, le sol peut être considéré comme enjeu de premier ordre affecté par la contamination provenant directement des terrils. Une fois contaminé par le dépôt de particules métallifères, le sol peut se comporter comme une source secondaire à partir de laquelle la contamination biodisponible pourra ensuite être transférée vers les cultures qui représentent alors un enjeu de second ordre. Les végétaux cultivés représentent une nouvelle source de contamination qui peut affecter par ingestion les êtres humains, enjeu de troisième

ordre. Entre les végétaux et les êtres humains peuvent aussi s'intercaler les animaux d'élevage qui entrent dans la chaîne alimentaire et ainsi dans la chaîne source-enjeux-source. Selon la problématique environnementale ou sociétale sur laquelle portera l'intérêt, l'étude se concentrera sur un enjeu spécifique ou sur toute ou partie de la chaîne de contamination.

La vulnérabilité des enjeux

Dans son acception la plus simple, la vulnérabilité d'un enjeu est « la capacité ou la propension à favoriser l'endommagement (dans le cas des biens) ou les préjudices (dans le cas des individus) des éléments exposés à un aléa » (MATE, 1997). Si la vulnérabilité reflète la fragilité d'un enjeu donné, elle doit également prendre en compte d'une part les éléments de prévention et de protection qui la diminuent et d'autre part la capacité de résilience du système exposé (D'Ercole et Pigeon, 1999). La vulnérabilité sera qualifiée d'environnementale si les enjeux pris en compte concernent le domaine de l'écologie au sens large tels que la qualité des eaux et des sols et la biodiversité des écosystèmes (Adger et al., 2005 ; Cartier, 2005). Elle sera qualifiée de sociale, si les enjeux correspondants s'adressent in fine, à tout ce qui touche les populations et en particulier, à la santé humaine (D'Ercole et Demoraes, 2003).

Dans le cadre spécifique de l'analyse du risque de contamination métallique associé aux sites miniers, la vulnérabilité des enjeux pourra être estimée à partir des différents paramètres qui favorisent ou limitent leur contamination. En ce qui concerne les enjeux environnementaux air, eau et sol, il s'agira de paramètres physiques et chimiques spécifiques à ces milieux qui contrôlent l'accumulation des métaux. Dans le cas des enjeux sociaux et particulièrement de la santé humaine, au-delà des paramètres intrinsèques de la population (sexe, âge), la connaissance de ses pratiques et de ses perceptions sera déterminante quant à son degré de vulnérabilité quelle soit physique et/ou socio-économique. En outre, l'existence d'une éventuelle réglementation et de méthodes de prévention seront autant de paramètres à prendre en compte afin d'avoir une évaluation exhaustive de cette vulnérabilité.

3. Spatialisation du risque à Jebel Ressas

Dans cet article, seule l'édification de la carte de risque de contamination métallique du sol sera exposée afin d'illustrer la méthodologie adoptée.

3.1. Méthodologie

Les paramètres permettant de caractériser les modes de transfert de la contamination, les enjeux et leur vulnérabilité, sont dans un premier temps, intégrés dans un système d'information géographique (SIG) qui est un outil de gestion et d'analyse de l'ensemble des données d'entrée (e.g. Bonnet, 2004).

La mise en place d'un tel SIG conduit à l'inventaire des données (cartes thématiques, modèle numérique de terrain...). En outre, le SIG permet d'une part de combiner et de synthétiser les données et d'autre part, de présenter les résultats de manière opérationnelle et adaptée à la gestion du site.

Dans l'étude présentée, la méthode utilisée est basée sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région, en donnant un index numérique ou une

valeur à chaque paramètre (Belzègues et al., 2002). La combinaison des cartes est effectuée par des logiciels de traitement comme « multicritères-ArcGIS ». Chaque paramètre possède une gamme de variation définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré relatif de contribution ou de sensibilité vis-à-vis du processus de contamination.

3.2. Premiers résultats : cartographie du risque de contamination du sol par transport hydrique de surface

La carte de risque est construite à partir d'une carte d'aléa représentant le réseau potentiel de transfert par ruissellement et d'une carte de vulnérabilité de l'enjeu sol représentant les zones de niveau d'accumulations potentielles de la contamination.

Cartographie de l'aléa

L'aléa correspond à la mobilisation des métaux suite à l'érosion des terrils et à leur transport par ruissellement vers le sol lors d'évènements pluvieux torrentiels. L'intensité de cet aléa dépend de la susceptibilité des déchets à l'érosion et de la topographie du bassin versant qui influence l'hydrodynamisme et le transport des particules.

Dans un premier temps, trois cartes ont été établies à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) obtenu par l'intermédiaire de couples stéréoscopiques d'images satellites du type SPOT IMAGE REF 3D :

- **la carte du réseau hydrographique** (Fig. 2a) est extraite à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et à l'aide du logiciel River Tools. Elle permet de dessiner le réseau hydrographique potentiel à toutes les échelles.
- **la carte de l'indice topographique** (Fig. 2b) est extraite à partir du logiciel RiverTools qui calcule l'indice topographique à partir du MNT avec la formule $IT = \log (A / S)$, où, pour chaque pixel, A est l'aire contributive et S est la pente locale. L'indice topographique caractérise le pouvoir d'un terrain à retenir, ou au contraire à transférer, un flux hydrique ; un terrain très incliné présentera un indice topographique faible et un fort hydrodynamisme.
- **la carte de l'érodibilité des déchets** (Fig. 2c), est basée sur l'équation développée par Wischmeier et Smith (1978) dont l'expression est la suivante : $100K = 2,1.M^{1,14} .10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$. Celle-ci intègre la granulométrie (notée M), la structure (notée c), la proportion de matière organique (notée a) et la perméabilité (notée b) pour calculer l'érodibilité K.

A partir de cette équation, ont été calculées l'érodibilité des déchets puis celles des différents sols sur lesquels sont transportés ces déchets, soit le sol du village et les terrains agricoles. Les différents intervalles de valeurs ont été représentés par des polygones sous ArcGis. Par la suite, l'analyse spatiale, sous le logiciel ArcGis, permet le croisement de ces différentes données afin d'aboutir à une carte d'aléa constituée de 3 intervalles de degré d'intensité (Fig. 3).

Figure 2 : a) Réseau Hydrographique ; b) Indices topographiques ; c) érodibilité des déchets.

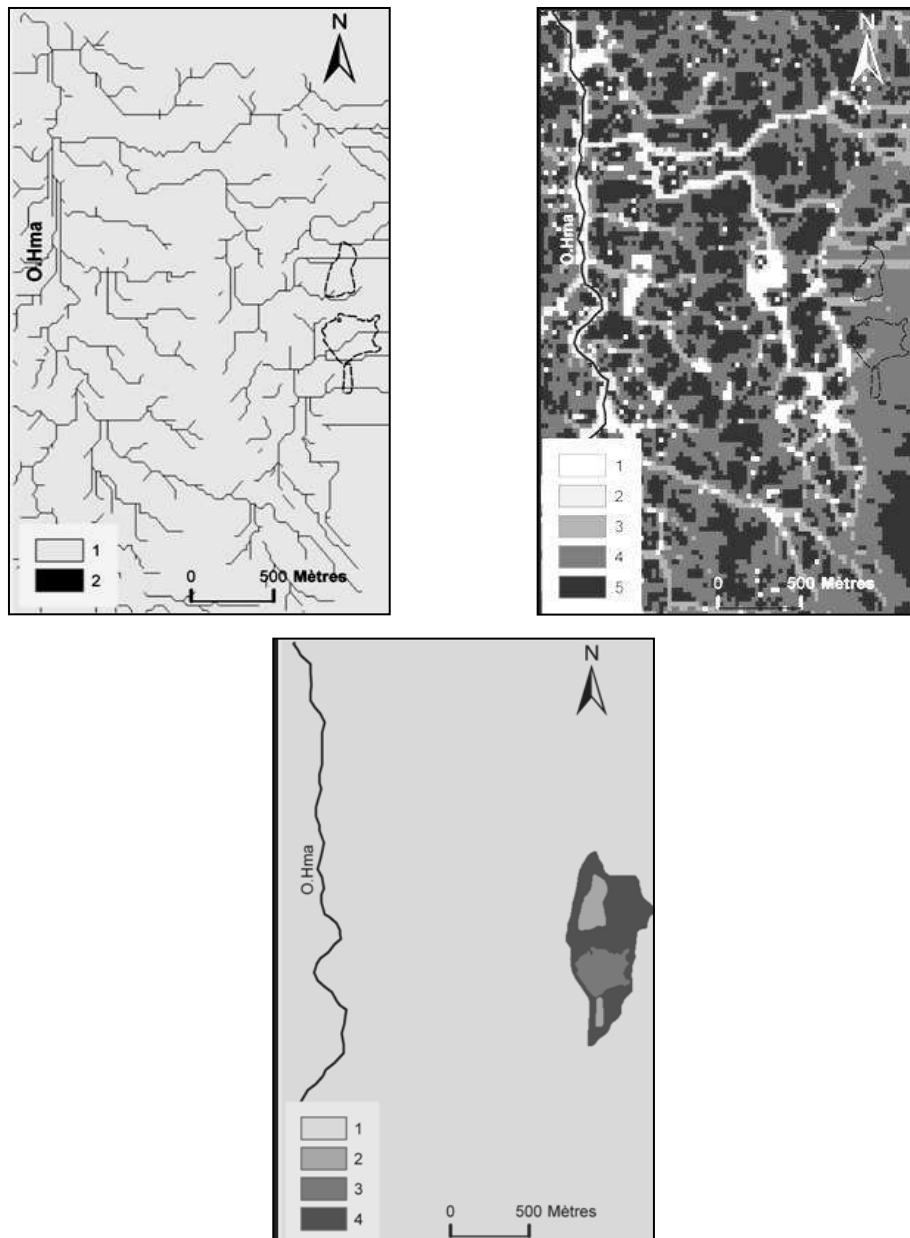
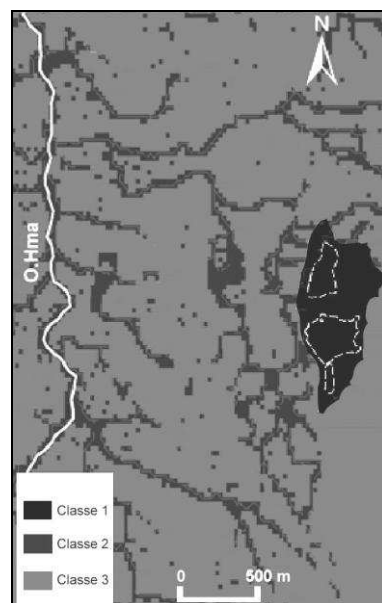


Figure 3 : Carte de l'aléa de contamination des sols par transport hydrique de surface



Elle met en évidence une mobilisation forte de la contamination à partir de la zone des terrils le long d'un réseau dense jusqu'à l'oued Hma (Fig. 3).

Cartographie de vulnérabilité de l'enjeu

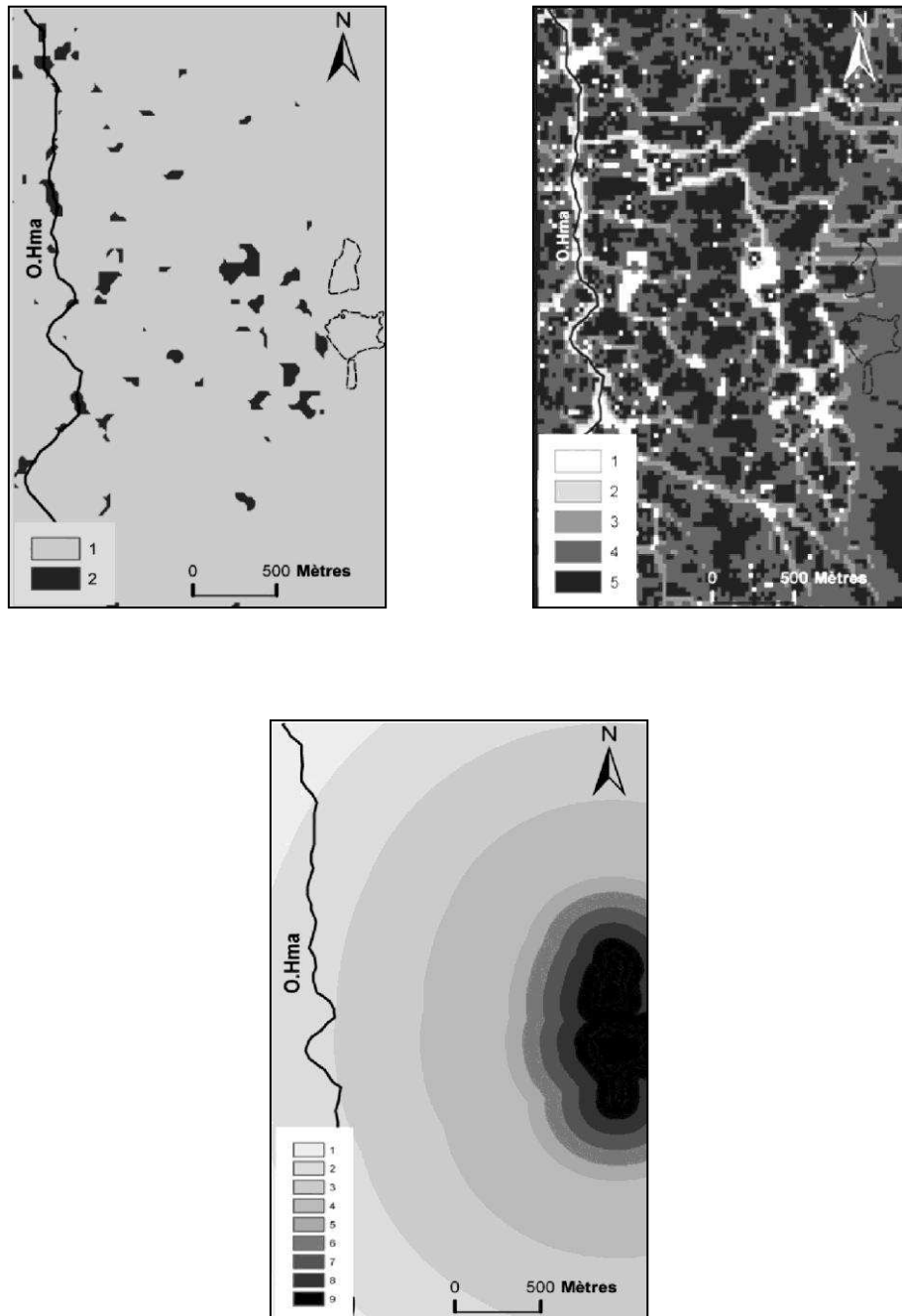
La carte de vulnérabilité du sol représente les zones de niveau d'accumulation potentielle des particules métallifères transférées par les processus de ruissellement.

Cette carte est établie à partir de :

- **la carte des dépressions topographiques** (Fig. 4a) qui sont autant de lieux privilégiés de sédimentation et donc d'accumulation.
- **la carte de l'indice topographique** (Fig. 4b) permet de représenter les zones de faible hydrodynamisme favorables au dépôt des particules en suspension.
- **la carte de distance par rapport aux déchets** (Fig. 4c) définit des aires concentriques à pas réguliers (100m et 500m) à partir des terrils; les zones les

plus proches étant considérées comme les plus vulnérables on leur attribue les plus forts indices.

Figure 4 : a) Carte des dépressions ; b) Indices topographiques ; c) Carte des distances



La combinaison de ces 3 cartes met en évidence un certain nombre de zones particulièrement vulnérables (Fig. 5).

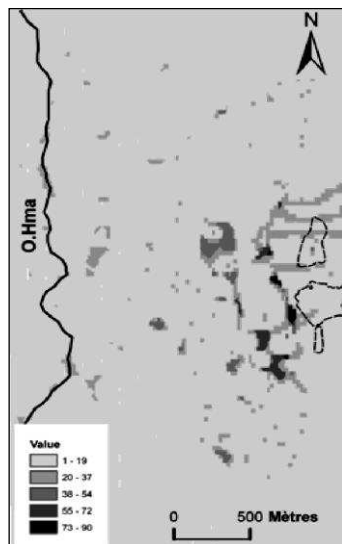
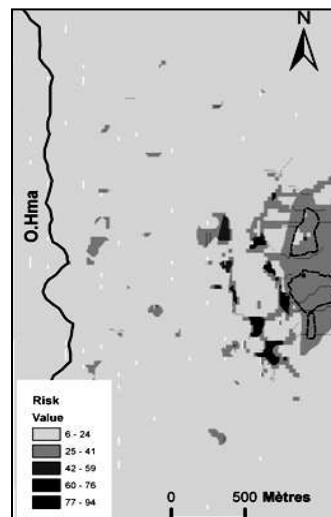


Figure 5 : Carte de vulnérabilité du sol face à la contamination par transport hydrique de surface

Construction de la carte de risque

Le croisement des cartes d'aléa et de vulnérabilité du sol aboutit à la carte de risque de contamination en métaux lourds des sols à partir de l'érosion, du transport hydrique et de la sédimentation des particules métallifères (Fig. 6).

Figure 6 : Carte du risque de contamination des sols par transport hydrique de surface



La carte des risques de contamination des sols par le transport hydrique de surface met en évidence une intensité du risque plus élevée dans un périmètre de quelques centaines de mètres (< 500m) autour des terrils proprement dits. Ce périmètre inclut le village à forts enjeux humains. En outre, elle montre également l'existence de zones potentiellement à fort risque au niveau des parcelles agricoles situées à l'aval des terrils soulignant ainsi le transfert de la contamination à des distances non négligeables. Chacune de ces zones situées à l'aval de la source primaire de contamination est susceptible de se comporter comme source secondaire et d'accroître ainsi le processus de diffusion spatiale de la contamination.

Conclusion et perspectives :

Les apports d'une recherche interdisciplinaire pour l'étude des risques chroniques

Les résultats préliminaires exposés dans cet article ont été obtenus en adoptant une démarche d'analyse du risque basée sur le couplage entre une analyse de l'intensité de l'aléa et de l'estimation du degré de vulnérabilité des enjeux, adaptés à une contamination chronique d'un écosystème. La spatialisation telle qu'elle a été menée pour l'enjeu sol sera appliquée aux autres compartiments de l'écosystème, air, eau et biosphère en prenant en compte les différents paramètres de transfert de manière exhaustive. Pour ce faire une démarche résolument interdisciplinaire sera menée. Par exemple, dans le cas de la contamination atmosphérique, des modèles de soulèvement des poussières (Fugitive Dust Model ; Wings, 1992) et de dépôts (Dust Entrainment And Deposition model ; Zender et al., 2003) pourront être appliqués en tenant compte des paramètres météorologiques locaux et des caractéristiques physiques des déchets (granulométrie, cohésion). Cette modélisation permettra de calculer des concentrations de matière en suspension dans l'air et de définir la géométrie de l'aire contaminée sujette au dépôt des particules soulevées à partir de la source de la contamination.

Par la suite, le modèle prédictif de la dispersion physique obtenu à partir des cartes de risques devra être validé par des données de terrain obtenues après échantillonnage raisonné. Ce dernier consistera à effectuer des prélèvements d'eau, de sols et d'aérosols sur la base des cartes prévisionnelles au sein desquelles les zones à niveau de risque élevé en contamination métalliques seront géoréférencées.

En ce qui concerne la quantification du risque pour la santé humaine, l'objectif sera d'estimer le risque de contamination de la population suite à son exposition par inhalation, ingestion directe ou indirecte et contact dermique en s'appuyant sur les modèles utilisés pour le calcul du risque pour la santé humaine (IPCS, 1999).

Pour chaque mode d'exposition, la dose journalière de métaux incorporés est calculée avec des modèles spécifiques. Ces doses seront ensuite comparées aux doses maximales admissibles de référence (Petts et al., 1997).

Cette volonté de quantification ne pourra être conduite qu'en intégrant la dimension sociétale. Elle passe nécessairement par une approche plus qualitative permettant de comprendre et spatialiser les comportements face au risque et les pratiques des populations potentiellement exposées en matière de pratiques agricoles, de gestion de l'eau ou des déchets ainsi que leurs perceptions des risques associés à ces comportements et plus généralement à la contamination de leur environnement.

Bibliographie

- Adger W.N., Hughes T.P, Carl Folke C., Carpenter S.R., Johan Rockström J., 2005 « Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters », *Science*, t.12, n° 309, 1036 - 1039pp.
- Barki, H., Rivard, S., Talbot, J., 1993, « Perspectives and methods in risk assessment », *Cahier du Gres*, 93-100pp.
- Beck U., 1992, « Risk Society - Towards a New Modernity », *Sage*, London, 622pp.
- Bonnet E., 2004, « Risques industriels : les territoires vulnérables de l'estuaire de la Seine », *Mappemonde*, t.76, 4.
- Cartier S., 2005, « Les sciences sociales et les risques naturels : approches récentes », *Nature, Sciences, Société*, t.13, 454-457pp.
- DCE (2000). « Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE », *Journal Officiel des Communautés*, L37, 72p.
- D'Ercole, R., Demoraes, F., 2003, « Risques et réponses institutionnelles en Equateur cartes et méthodes », *Cahier de géographie*, t. 1, 157-168pp.
- D'Ercole R. et Pigeon P., 1999, « L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt en géographie », *Annales de géographie*, t. 608, 339-357pp.
- Ghorbel M., Souissi F., Souissi R., Munoz M., Courjault-Radé P., Destrigneville C., 2008, « Geochemical and mineralogical evolution of the Pb-Zn mining wastes of Jebel Ressas (north-estern Tunisia) », *Proceedings International Congress of Solid Waste Management & Sustainable Development*, 231-236pp.
- IPCS (International Programme on Chemical Safety) 1999, *Principles for the assessment of risks to human health from exposure to chemicals* (Environmental Health Criteria 210) World Health Organization, Geneva (Switzerland), 110p.
- Korre A., Durucan S., Koutroumani A., 2002, « Quantitative-spatial assessment of the risks associated with high Pb loads in soils around Lavrion, Greece », *Applied Geochemistry*, t.17, n° 8, 1029-1045pp.
- MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), 1997, *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), guide général*, La Documentation Française, Paris.
- Muhamad A., Xu J., Li Z., Wang H., Yao H., 2005, « Effects of lead and cadmium nitrate on biomass and substrate utilization pattern of soil microbial communities », *Chemosphere*, t. 60, n°4, 508-514pp.
- Papanikolaou N.C., Hatzidak E.G., Belivanis S., Tzarakakis G.N., Tsaksakis A.M.,

- 2005, « Lead toxicity update – a brief review », *Medecine Sciences. Monitoring*, t. 11, n° 11, 329-336pp.
- Peretti-Watel P., 2000, *Sociologie du risque*, Paris : Armand Colin, 230p.
- Petts, J., Cairney, T., Smith, M., 1997, *Risk-Based Contaminated Land Investigation and Assessment*, John Wiley & Sons, 183p.
- Propeck-Zimmermann E., Ravenel L., Saint-Gérand Th., 2002, « Cartographie des risques technologiques majeurs : nouvelles perspectives avec les SIG », *Mappemonde*, t.65.
- Propeck-Zimmermann E., Saint-Gérand T., Bonnet E., Blondel C., 2008, *Les nouvelles formes d'inscription territoriale des risques industriels. Appui méthodologique aux gestionnaires et décideurs de l'Estuaire de la Seine dans le domaine des sciences humaines et sociales*, Colloque « RDT », Lyon, janvier 2008.
- Rapant S., Salminen R., Tarvainen T., Krcmova K., Cveckova, V., 2008, « Application of a risk assessment method to Europe-wide geochemical baseline data », *Geochemistry-exploration, environment, analysis*, t. 8, 291-299pp.
- Winges, K.D., 1992, « User's Guide for the Fugitive Dust Model », *Environmental Protection Agency Report*, EPA-910/9-88-202R.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978, « Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science », U.S. Dept. Agriculture. Agric. Handbook, 537, 60p.
- Xenidis A., Papassiopi N., Komnitsas K., 2003, « Carbonate-rich mining tailings in Lavrion: risk assessment and proposed rehabilitation schemes », *Advances in Environmental Research*, t. 7, n° 2, 479-494pp.
- Zender, C. S., Bian H., Newman D., 2003, *Mineral Dust Entrainment And Deposition (DEAD) model : Description and 1990s dust climatology*, *J. Geophys. Res.*, t.108, 4416, doi : 10.1029/2002JD002775.