

Évaluation du risque sanitaire de sols pollués méditerranéens : choix de variables et spatialisation

Aurélie Arnaud, Pascale Prudent, Isabelle Laffont-Schwob

▶ **To cite this version:**

Aurélie Arnaud, Pascale Prudent, Isabelle Laffont-Schwob. Évaluation du risque sanitaire de sols pollués méditerranéens : choix de variables et spatialisation. VertigO : La Revue Électronique en Sciences de l'Environnement, 2021. hal-03567287

HAL Id: hal-03567287
https://hal.science/hal-03567287

Submitted on 22 Feb 2022

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.

English | Share

OpenEdition Journals

HOME | CATALOGUE OF 565 JOURNALS | OPENEDITION SEARCH | All OpenEdition

Home Numéros Volume 21 numéro 1 Section courante Évaluation du risque sanitaire de...

VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement

Volume 21 numéro 1 | mai 2021
Préservation, conservation et exploitation : enjeux et perspectives pour un Océan mondial en santé
Section courante

Évaluation du risque sanitaire de sols pollués méditerranéens : choix de variables et spatialisation

Aurélie Arnaud, Pascale Prudent and Isabelle Laffont-Schwob
https://doi.org/10.4000/vertigo.31309

Abstracts

Français English
La notion de risque sanitaire se doit d'être mise en regard avec les notions d'aléa, vulnérabilité, capacité et danger de manière à la considérer de façon intégrative et choisir des variables adéquates pour sa spatialisation. Dans cette réflexion pluridisciplinaire, la question posée est plus particulièrement « comment intégrer la sensibilité physique de la population dans la prise en considération de la pollution des sols afin de localiser les zones les plus vulnérables dans un contexte de risque sanitaire ? ». Le massif de Marseilleveyre situé au sud de Marseille (Bouches-du-Rhône) permet d'y répondre à travers une application sémantique et une application spatiale. Très contrasté dans ces enjeux, ce territoire est à la fois inclus dans le cœur du Parc national des Calanques (PNCal) et demeure affecté par une pollution diffuse des sols issue des activités industrielles passées sises sur le littoral. Cette zone cœur du PNCal est toutefois habitée dans sa périphérie et accueille de nombreux usagers. Un modèle de généralisation de la méthodologie développée dans cette étude de cas est ensuite proposé afin de valoriser cette production et ce mode de visualisation de l'information qui pourrait constituer une base précieuse d'aide à la concertation.

The concept of health risk needs to be compared with the notions of hazard, vulnerability, capacity and danger so as to consider it in an integrative way and choose appropriate variables for its spatialization. In this multidisciplinary reflection, we particularly questioned "how to integrate the physical sensitivity of the population when considering soil pollution in order to locate the most vulnerable areas in a context of health risk ? ". The Marseilleveyre massif located south of Marseille (Bouches-du-Rhône) is adequate object of study for both semantic and spatial enforcements. Highly contrasted in its issues, this territory is at the same time included in the core area of the Calanques National Park (PNCal) and remains affected by a diffuse soil pollution resulting from past industrial activities located on the coast. This core area of the PNCal is however inhabited in its periphery and welcomes many users. A model of generalization of the methodology developed in this case study is then proposed in order to perform this production and this mode of visualization of the information which could constitute a precious base of aid to the consultation.

Index terms

Mots-clés : modèle, sensibilité physique, méthode de visualisation, territoire protégé et pollué, métaux et métalloïdes, parc national des Calanques
Keywords : model, physical sensitivity, visualization method, polluted protected area, metals and metalloids, Calanques national park

Full text

Introduction

1 Il est actuellement difficile d'appréhender un risque sanitaire, tant sa complexité est grande dans sa définition multifactorielle, entravant, entre autres, sa spatialisation et sa gestion (Ménard, 2002). De plus, la définition de risque sanitaire est trop souvent incomplète empêchant une vision globale de la notion (Pigeon, 2005, p. 8). Notre hypothèse est que l'on puisse obtenir une représentation spatiale acceptable de la notion de risque sanitaire en superposant une partie des variables constituantes. Le questionnement pluridisciplinaire repose donc sur le choix des variables (aléa, danger, exposition, vulnérabilité, enjeux, capacité, etc.) qui doivent être retenues selon l'accessibilité aux données, leur pertinence (fiabilité des sources, lacunes, unités de mesure, etc.) et leur échelle de spatialisations. Pour répondre à cette problématique générale, le cas de pollution des sols de surface dans le massif de Marseilleveyre (Marseille, Sud de la France) est choisi, car nous sommes dans ce cas face à des pollutions héritées des activités industrielles passées sur un territoire aujourd'hui ayant un statut d'espace protégé (Laffont-Schwob et *al.*, 2016) et qui ne devrait pas être soumis à de nouvelles formes d'activités industrielles.

2 La prise en compte de la temporalité dans notre analyse fait aussi l'objet d'un questionnement. En effet, la pollution des sols n'est pas amenée à évoluer rapidement à l'échelle humaine si aucune intervention humaine ne se produit (p. ex. dépollution). De plus, les transferts de pollution actuels (envols de particules contaminées, lessivages de surface par les eaux de pluie, déplacements de matériaux…) apparaissent négligeables, mais non nuls en comparaison avec ceux qui ont probablement eu lieu pendant la période d'activité des usines générant les niveaux de pollution actuels dans les sols (Marséco, 2012). Ainsi, ces niveaux de pollution des sols ne sont pas susceptibles de subir des variations à une échelle infra-générationnelle (Picheral, 1982, p. 168). Notre étude s'inscrit alors dans un contexte de prévention des risques à long terme.

3 L'enjeu de cet article est de proposer une méthode permettant de choisir et spatialiser des variables appliquées au risque sanitaire. Celles-ci sont liées, d'une part, au niveau de concentrations de la pollution dans les sols, de l'hétérogénéité de la pollution (due à une pollution diffuse[1]) ainsi que de la diversité des contaminants ; et d'autre part, à l'exposition humaine à ces contaminants et aux vulnérabilités physiques et socio-économiques des populations. Cette méthode présente de multiples intérêts : permettre une visualisation de l'aléa (probabilité qu'un phénomène réel survienne), du danger (mesure des concentrations de polluants dans les sols et étude de leur toxicité) et des vulnérabilités (en tant que fragilités) dont un Indice de sensibilité physique humaine (ici créé sous le nom d'ISPH). Cette démarche

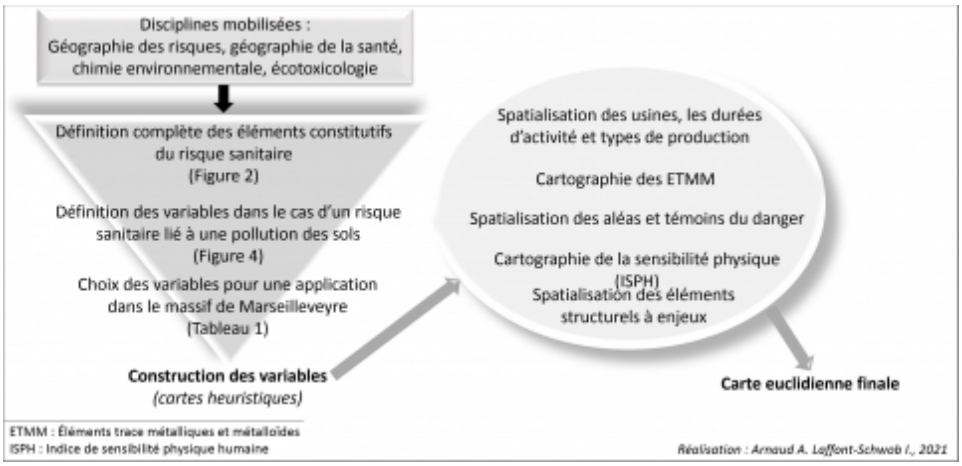
nécessite une réflexion sur la représentation spatiale de chaque variable demandant à être traitée conjointement entre les disciplines de la géographie humaine et sociale et plus précisément la géographie des risques[2] et la géographie de la santé[3], de la chimie environnementale et de l'écotoxicologie. Cette visualisation pourrait alors répondre au questionnement pluridisciplinaire suivant : existe-t-il une coïncidence entre la localisation de l'aléa et le niveau de vulnérabilité ? Les zones d'aléa où se concentre une vulnérabilité sont-elles aussi source de capacité (en tant que ressource) ? Les zones d'inégalités socio-écologiques cumulant aléa et vulnérabilité élevée sont-elles des zones que les pouvoirs publics surveillent ? Le but est de cibler des zones sensibles sur lesquelles devront être privilégiées des études sanitaires plus poussées (dont écotoxicologiques) afin d'informer les autorités d'une situation pouvant influencer des projets liés à l'implantation d'aménagements publics, ou encore mettre en évidence des inégalités socio-écologiques et territoriales. Cette recherche fait alors le lien avec le territoire dans son approche opérationnelle.

4 Notre terrain d'étude figure au cœur d'un débat public, entre nature – avec la création du Parc national des Calanques (PNCal) en 2012 – et risque pour la santé dû aux pollutions terrestres et marines. Les enjeux politiques demeurent importants (p. ex. Claeys et *al.*, 2016). Pour apporter des éléments à ce débat, il est nécessaire de définir précisément les contours du territoire impacté par les pollutions pour pouvoir proposer une spatialisation du risque sanitaire qui pourrait devenir alors un outil décisionnel des actions à mener.

5 L'échelle spatiale d'analyse concerne le massif de Marseilleveyre (Bouches-du-Rhône) dont les sols ont été pollués par les activités industrielles passées (milieu XIXe siècle jusqu'au début du XXe siècle) comme détaillées dans l'ouvrage de Daumalin et Laffont-Schwob (2016). Le contour de la zone d'étude a été imposé par les études précédentes sur la qualification et la quantification des polluants inorganiques dans les sols de surface (Laffont-Schwob et *al.*, 2016), elles-mêmes dictées par les travaux en histoire industrielle contemporaine sur l'emprise des anciennes usines ayant été en activité de la moitié du XIXe siècle jusqu'au début du XXe révélant les procédés industriels utilisés (Daumalin et Raveux, 2016) et les types de déchets potentiellement toxiques générés (p. ex. scories riches notamment en plomb et en zinc, et fines particules au niveau des anciennes cheminées riches notamment en plomb et en arsenic, Laffont-Schwob et *al.*, 2016). Cette zone va bien au-delà de l'emprise au sol des friches industrielles identifiées dans les bases de données comme l'Inventaire historique de sites industriels et activités de service (BASIAS)[4] et la Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués (BASOL),[5] car elle englobe les sols de surface soumis à la pollution diffuse due à la présence de polluants issus de ces activités industrielles passées.

6 La démarche déductive utilisée propose un modèle générique d'analyse d'un risque sanitaire s'appuyant sur une méthodologie alliant cartes heuristiques et cartes thématiques. Le choix des données recueillies et la modélisation appliquée ont permis de proposer un Indice de sensibilité physique humaine (ISPH). Même partiel, il synthétise une information spatialement juxtaposable à d'autres facteurs de vulnérabilité, de risque et au passé industriel du territoire (Figure 1). Pour conclure, l'applicabilité, l'élargissement et la reproductibilité de l'utilisation de ce modèle sont discutés.

Figure 1. Démarche de réalisation d'une carte permettant de cibler les zones sensibles à un risque sanitaire.



Les composantes du risque sanitaire

7 Le concept de risque apparait dans différentes disciplines comme la géophysique ou l'hydrologie, puis plus tard, au début du XXe siècle, le risque est traité en géographie de la santé avec Sorre (1933), Hervouet et Prest (1979), Picheral (1982 et 1995), Salem (1995), et en sciences humaines et sociales, notamment en géographie des risques (p. ex. Veyret, 2001 ; D'Ercole et *al.*, 1995). Les définitions de « risque », « aléa », « danger », « vulnérabilité », « capacité » et « exposition » abondent dans la littérature tant grise que technique ou politique (p. ex. Kermisch, 2011 ; le ministère de la transition écologique[6]). Lors de l'évaluation du risque sanitaire, c'est l'exposition au danger qui est abordée (p. ex. Agence régionale de santé (ARS), 2011 ; Host et *al.*, 2006) sans aborder la notion de vulnérabilité, or, en ce qui concerne les risques naturels, technologiques et climatiques[7], la vulnérabilité (Rasse, 2009) et la capacité sont constitutives de la notion (p. ex. ADEME, 2016 ; ONU, 2002). Celles-ci doivent être étudiées, car elles peuvent prendre en compte une échelle individuelle comme collective, locale comme étendue, alors que l'exposition d'un individu au danger prend en compte uniquement l'échelle individuelle d'un être ou organisme vivant. C'est pourquoi nous proposons une définition des éléments qui gravitent autour de la notion de risque sanitaire issue du croisement de diverses disciplines assorti d'un choix de variables (partie 2).

Définir le risque sanitaire

8 Dans la discipline scientifique de la médecine et en ingénierie de la santé, le risque sanitaire se définit par l'exposition des populations, la qualification et la quantification du danger (ARS, 2011 ; Host et *al.*, 2006). De manière unanime, le danger induit le risque. En médecine, il s'agit d'« une menace potentielle pouvant donner lieu à un risque sanitaire dès lors que les effets adverses sont identifiés et appréciés en relation avec la source » Setbon (2000). Le danger se caractérise par ses effets infectieux, toxiques, cancérogènes ou physiques, et ses agents sources du danger (p. ex. une substance chimique, un phénomène physique ou un agent biologique). Le danger est aussi la source d'exposition (ARS, 2011). Il se définit plus précisément comme « la capacité intrinsèque à produire des effets sanitaires indésirables » (Host et *al.*, 2006). Dans le cas de la zone d'étude, il a été démontré que les activités industrielles passées ont généré une pollution des sols en métaux et métalloïdes, principalement le plomb, l'arsenic, le cuivre, le zinc et l'antimoine, et leur transfert à la biocénose (Laffont-Schwob et *al.*, 2016 ; Affholder et *al.*, 2013 et 2014 ; Testiati et *al.*, 2013). Outre le risque pour la santé environnementale, une évaluation des risques sanitaires a été réalisée en 2007 par l'institut national de veille sanitaire (Lasalle, 2007). Dans cette étude, divers scénarios d'exposition au plomb et à l'arsenic ont été proposés induisant tous des risques de dépassement du seuil de 100 µg/L de la plombémie notamment pour les enfants et un risque cancérogène lié à l'arsenic inorganique pour l'ensemble de la population humaine exposée. Ces types d'évaluation reposent sur des schémas conceptuels d'exposition individuelle face à un danger avéré évalué par la mesure des concentrations en polluants dans l'environnement étudié.

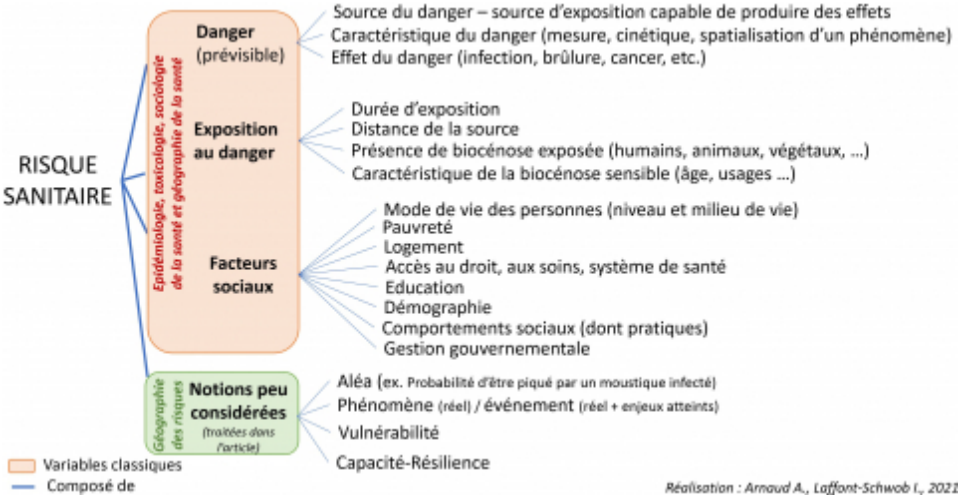
9 Ainsi, outre le danger, l'exposition au danger des individus fait également partie des concepts clés. L'exposition est dépendante de la présence d'individus, de leur distance à la source, et de leurs caractéristiques propres comme par exemple l'âge et leurs pratiques. Quant au risque, il est la résultante de la combinaison d'au moins un danger et une exposition[8] et représente alors la probabilité d'un problème pour une population donnée (Host et *al.*, 2006 et p. ex. Reis et *al.*, 2014[9]). Des études en toxicologie permettent de mieux cibler les populations humaines exposées les plus sensibles, mais leur quantification, même probable, demeure souvent complexe, d'autant plus que les maladies peuvent provenir de multiples facteurs parmi lesquels les modes de vie des personnes et leur durée d'exposition au danger jouent également un rôle fondamental (Host et *al.*, 2006)[10]. De plus, de nombreux polluants n'ont toujours pas fait l'objet d'étude concernant leur nocivité et leurs effets en mélange et il existe des biais dans l'effort de recherche sur les expositions aux polluants industriels notamment au travail (Counil et Henry, 2016). Le Larousse médical (dans : ARS, 2011) parle également, lorsqu'il traite du sujet du saturnisme (lors d'exposition au plomb comme pour

notre étude), de « facteurs de risque » tels que la pauvreté pouvant se cumuler à des « facteurs d'inégalités sociales de santé » tels que le logement, l'accès aux droits ou encore l'éducation.

10 À partir des années 1980, la géographie de la santé s'intéresse à la naissance du concept de risque, apportant une dimension spatiale cruciale. La notion de « risque » relève d'abord de l'épidémiologie en localisant les maladies, en cherchant les facteurs ou groupes d'individus à risque (Sorre, 1933, précurseur avec son concept de « complexe pathogène »), puis réussie à pénétrer la géographie de la santé en croisant ces informations avec les conditions physiques du milieu (concept de « système pathogène ») de Picheral (1982, 1983, 1995), « suggér [ant] des foyers à risques » avant d'être spatialisée et croisée avec des variables sociales, culturelles ou économiques. L'étude de risque revient à définir des « facteurs impliqués dans l'apparition de [...] pathologies » tout en utilisant des « caractéristiques de lieux et de personnes dans une réflexion espace-temps -population » (Ménard, 2002)[11]. Plus concrètement, dans une étude liée à l'onchocercose, Hervouët et Prost (1979) mettent en évidence deux facteurs aggravants : les pratiques des espaces et les distances aux gites larvaires. Puis Picheral (1982) considère les variables d'accès au soin, la démographie, le niveau de vie, le milieu de vie (montagnard, rural, urbain, etc.) et les comportements sociaux. Sur ce dernier point, Picheral (1995) mentionne également l'importance de s'intéresser aux perceptions et « usages de l'espace » par les individus. Salem (1995) s'inscrit également dans cette approche articulant faits naturels et sociaux. Dorier-Apprill (1993) s'inscrit dans ce courant et cartographie en 1993, dans sa thèse, de nombreux facteurs (figure 2, partie du haut) sans pour autant les superposer. L'auteure parle de « géographie thérapeutique » et insiste sur l'importance de prendre en compte et spatialiser le système de santé réel comme légal (médecines alternatives ou douces) afin de « démontrer toutes ses articulations socio-spatiales » (Dorier-Apprill, 1995). Plus tard, la notion de vulnérabilité apparait dans la thèse de Lysaniuk (2009) sur le risque grippal[12] où la vulnérabilité est définie par des facteurs « physiques » (météorologie qui augmente la susceptibilité des organismes) et des facteurs « humains » (caractéristiques sociales). Méha et *al.* (2012), dans leurs travaux sur la borréliose de Lyme[13], approfondissent la notion de comportement humain comme vulnérabilité, avec l'originalité de cartographier les pratiques socio-spatiales favorisant le contact avec le vecteur de maladie (p. ex. la cueillette). Cette timide immersion dans la notion de vulnérabilité mérite d'être creusée, car les travaux en géographie de la santé l'utilisent sans pour autant se pencher sur l'intégralité de sa richesse. Côté opérationnel, le rapport de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS, 2016) mentionne « vulnérabilité de population » à plusieurs reprises et « vulnérabilité sociale et sanitaire » sans pour autant les définir.

11 L'ensemble de ces travaux en médecine et en géographie de la santé révèlent de nombreux facteurs dont certains s'appliquent aisément à notre problématique de sols pollués comme les notions de danger et d'exposition au danger ou encore d'accès au soin, et autres aspects sociaux (Figure 2). Pour permettre une vision plus complète du risque, les notions de vulnérabilité et capacité doivent être considérées, car en synergie avec les facteurs liés au danger et à son exposition.

Figure 2. Les limites des composantes du risque sanitaire tel qu'il est défini actuellement.



L’aléa, la vulnérabilité et la capacité : des notions à considérer

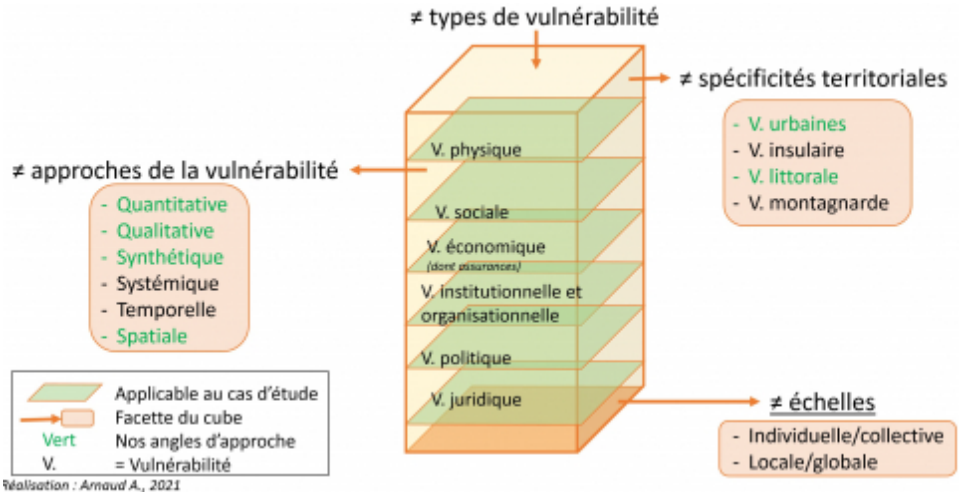
12 Afin d’enrichir la notion de risque sanitaire, nous allons étudier une autre approche du risque, celle abordée chez les géographes des risques qui tentent de prime abord de quantifier à tout prix la notion, pour ensuite s’intéresser davantage aux aspects sociaux à travers les notions de vulnérabilité et capacité.

13 À l’origine, le risque est une probabilité qui se calcule à travers des lois mathématiques[14]. Les études d’évaluation des risques naturels adoptent communément une équation qui prend justement en compte un calcul de probabilité d’occurrence d’un aléa[15] (A), mais également la définition, la localisation et la quantification des vulnérabilités (V), c’est-à-dire les dommages physiques potentiels matériels et humains. Si l’aléa (p. ex. inondation) ou la vulnérabilité (p. ex. maisons ou personnes exposées) sont absents, le risque (R) n’existe pas, d’où l’équation « R = AxV » énoncée en 1992 dans le Glossaire international de l’Organisation des Nations Unies (ONU, 1992)[16] et reprise par le gouvernement français. En 2002, l’ONU propose une nouvelle définition qui met en valeur le cadre social en ajoutant la capacité (notée C dans l’équation)[17], traduisant le temps de rétablissement de la société suite à un événement plus ou moins catastrophique : $R = (A \times V)/C$[18]. Dans cette équation, l’aléa relève principalement des géosciences puisque la probabilité d’un phénomène est régie par des lois physiques issues de la lithosphère, de l’hydrosphère et de la croute terrestre. Appliquée aux risques sanitaires, la probabilité d’occurrence d’un phénomène (p. ex. la probabilité qu’un vecteur soit infecté ou la probabilité de toxicité d’un sol contaminé) va relever des sciences biologiques (médecine, toxicologie et écotoxicologie) dont la spatialisation, nous l’avons vu, demeure laborieuse.

14 Ces équations montrent l’importance de la vulnérabilité et plus précisément ses aspects physiques, toutefois sans aborder les aspects sociaux, relégués à la notion de capacité. Or, la dimension sociale est déjà très présente dès les années 1970 chez les auteurs anglo-saxons qui développent la notion de vulnérabilité sociale (Burton et al., 1978). Quant à Wisner et *al.* (2012), ils donnent une définition claire de « *capacity* » bien distincte de la résilience[19] spécifiquement associée à la dimension temporelle. La capacité au sens de Wisner et *al.* (2012) fait référence aux ressources endogènes d’un individu ou groupe d’individus en danger, leur permettant de résister au choc d’une catastrophe, mais aussi de faire face aux risques quotidiens. Ces ressources peuvent être sociales (p. ex. solidarité), humaines (p. ex. connaissances locales), politiques (p. ex. prise de décision des acteurs locaux), physiques (p. ex. architecture traditionnelle), etc. La capacité sera d’une grande utilité pour interpréter nos résultats lors de la spatialisation des autres notions.

15 Revenons sur la notion de vulnérabilité étudiée en géographie des risques. Souvent considérée comme la traduction des fragilités, de quels éléments se compose-t-elle ? Plusieurs définitions la caractérisent selon l’approche, le type, le territoire et l’échelle de vulnérabilité (Figure 3). La géographie des risques rassemble l’ensemble de ces aspects (p. ex. Pigeon, 2005 ; ou encore D’Ercole et Metzger, 2009 ou Dauphiné, 2001). Qu’apporte l’utilisation de la vulnérabilité qui est utilisée dans la géographie des risques à la notion de risque sanitaire ? Ses possibles quantifications et spatialisations font que nous allons davantage nous attarder sur cette notion[20].

Figure 3. Les multiples facettes pour définir la vulnérabilité.



16 La vulnérabilité sociale, directement liée aux aspects humains, se caractérise par des facteurs structurels (densité de population, migrations, nombre de lits d'hôpitaux, etc.) et relatifs aux individus (âge, structure familiale, revenu, etc.), est identifiée dès les années 1970 dans des applications sur les inondations (p. ex. Slovic et *al.*, 1982 ; Burton et *al.*, 1978), et bien enrichie par la suite dans ce domaine. Ces facteurs liés à l'environnement social collectif et individuel comme la démographie, la culture (Douglas et Wildavsky, 1983), l'économie, la technique et la politique (White et Haas, 1975), ainsi que des aspects cognitifs et perceptifs (p. ex. Douglas, 2003 ; Slovic et Weber, 2002 ; Dauphiné, 2001) sont intégrés depuis longtemps à la notion de vulnérabilité sociale puisqu'ils impactent les réactions et comportements des individus. Ces géographes qui étudient les risques naturels notent également un élément important de la vulnérabilité qui rejoint une caractéristique du danger : la vitesse de propagation de l'aléa mentionnée dans Thouret et D'Ercole (1996) en parlant de dynamique, cinématique ou encore du caractère lent ou rapide d'un phénomène. Cet élément permet de spatialiser les populations[21] et autres éléments exposés matériels les plus sensibles, aussi nommés éléments à vulnérabilité physique, afin d'adapter l'organisation de l'urgence. Afin de définir cette sensibilité, Lutoff (2000) et D'Ercole et Metzger (2009) localisent et quantifient les éléments exposés selon une hiérarchie basée sur leur enjeu dans un contexte d'urgence. C'est-à-dire, si ces éléments étaient affectés physiquement par un aléa, le blocage du système serait tel que le bon fonctionnement du territoire serait altéré : les voies de communication, les hôpitaux, les lieux de décision tels qu'une cellule de crise. Cette méthode s'avèrerait alors très utile pour réduire la résilience dans un cas d'épidémie virale à propagation rapide, comme par exemple le virus du Chikungunya, ou d'une contamination subite de nappe phréatique, où la localisation des hôpitaux et la description de leurs moyens seraient indispensables pour gérer la crise[22]. De plus, la définition des éléments exposés peut varier et avoir son intérêt dans d'autres contextes tels que la prévention et le rétablissement d'un territoire suite à une catastrophe[23] (Arnaud, 2009, p. 102 à 105), ce qui s'avère particulièrement intéressant dans le cas de sols pollués où la cinétique peut être lente. Cette notion de cinétique, ici facteur de vulnérabilité, est une composante du danger en géographie de la santé.

17 La notion de « vulnérabilité sanitaire » se concentre sur le coût et l'endommagement[24], facteurs importants mais difficilement quantifiables. Nous préférons retenir des éléments de vulnérabilité et de capacité qui alimentent les définitions classiques de la géographie des risques : d'un point de vue de la vulnérabilité sociale : la localisation et la densité de personnes et lieux de concentration de ces dernières (p. ex. une école sur un terrain pollué) ; et vulnérabilité physique : la localisation des éléments exposés à enjeux vis-à-vis de la gestion de la prévention (p. ex. un hôpital) ; et d'un point de vue de la capacité (au sens de ressource)/vulnérabilité (au sens de fragilité) : les facteurs démographiques, économiques, politiques (en tant que décisions des États, outils juridiques en place, politique locale), et culturels[25].

18 Ces éclaircissements théoriques sur l'aléa, la vulnérabilité et la capacité vont maintenant permettre d'appliquer les notions constitutives d'un risque sanitaire au cas d'une pollution des sols, encore peu abordé à notre connaissance sous cet angle. En effet, les travaux des géographes (p. ex. Zanetti, 2018), urbanistes (p. ex. Barles, 1993), socio-historiens (Remy et *al.*, 2017) et juristes (Ogé, 1999) sur la pollution des sols se concentrent sur la production de

connaissances et la lisibilité du risque sanitaire sur la scène publique notamment dans le cadre, respectivement, de la valorisation des sols et plus largement de l'environnement, et de la dénonciation de pollutions, tout en soulignant la complexité d'appréhension de cette notion et en se questionnant sur ses limites. Ceci explique probablement son timide traitement par les géographes des risques.

Une application aux sols pollués : vers une équation du risque sanitaire

19 Dans le cadre des risques sanitaires appliqués à une pollution des sols, il semble possible de quantifier et spatialiser un certain nombre d'éléments traduisant les potentiels préjudices aux échelles individuelle et collective. Cette tâche reste fastidieuse, car d'une part, si la caractérisation du danger est abordable parce que commune à propos de la pollution, la définition de seuils de toxicité reste délicate, non consensuelle et variable selon l'exposome. D'autre part, l'utilisation des termes d'aléa, de vulnérabilité et de capacité est employée ou utilisée dans une forme incomplète pour ce type de risque, d'où l'intention d'appliquer notre précédente réflexion sur le risque sanitaire au cas d'une pollution des sols.

20 D'une part, l'approche de spatialisation des pollutions sur la base des concentrations en métaux et métalloïdes dans les sols de surface est une approche très développée dans la littérature scientifique (Ashraf et *al.*, 2015 ; Wang et *al.*, 2008 ; Frangi et Richard, 1997), mais le risque sanitaire subséquent ne fait pas encore l'objet de réflexion approfondie à notre connaissance. Certains travaux traitant de pollutions métalliques dans des poussières routières en Chine présentent une représentation spatialisée sur la base d'un indice de risque proposé par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (Li et *al.*, 2015), qui est plus proche d'un calcul de danger sans intégrer les autres composantes du risque.

21 Dans les études de risque pour la santé humaine, l'utilisation de Valeurs toxicologiques de référence (VTR) permet de calculer un effet du danger lié aux concentrations de métaux et métalloïdes en présence en fonction des voies d'exposition (p. ex. inhalation). Les VTR sont issues de 6 organismes et agences reconnus et regroupés, réactualisées régulièrement par l'INERIS (p. ex. INERIS 2009, 2010 et 2016). Les VTR peuvent proposer un seuil à partir duquel une substance est considérée comme toxique pour un individu ou une population humaine ou non humaine. Pour certains polluants, aucun seuil minimum n'a pu être identifié signifiant que leur simple présence indépendamment de leur concentration est problématique d'un point de vue sanitaire. De plus, même si aujourd'hui il est reconnu que des mélanges de polluants, même à faible dose peuvent générer une toxicité différente de celle de chacun d'entre eux pris isolément aux mêmes concentrations, il apparait très complexe de pouvoir disposer d'un référentiel toxicologique pour la diversité des mélanges pouvant se produire (Badot, 2011).

22 En France, il n'existe pas de seuil réglementaire en métaux et métalloïdes dans les sols permettant de définir si un sol est pollué comme c'est le cas dans d'autres pays au fond géochimique plus homogène et présentant moins d'anomalies que ceux sur le territoire français. Il est d'usage de se référer à des valeurs seuils associées, par exemple, à l'utilisation de boues[26] (comme amendement organique pour les sols), mais sans que cela n'apporte une indication satisfaisante. C'est au regard des usages envisagés de ces sols qu'une réflexion est menée. Concernant la gestion des sites et sols pollués, des valeurs guides ont été proposées pour définir les priorités d'action de gestion de la pollution : il s'agit des Valeurs de constat d'impact (VCI) comparées à des Valeurs de définition de source sol (VDSS) (Delahaie, 2007). Cependant, un nombre restreint de travaux réutilisent ces valeurs, car elles ne font pas consensus dans la communauté scientifique française malgré leur caractère pratique pour accompagner les mesures de gestion.

23 Pour permettre une adaptation de la notion de risque sanitaire appliquée aux sols pollués, une traduction de ces différents niveaux d'information pourrait être :

- Pas de risque : si les concentrations de tous les éléments présents dans le sol sont à un niveau inférieur aux seuils toxicologiques définis et en adéquation avec les VDSS, ils sont considérés[27] comme non toxiques et donc ils ne présentent pas de risque,

- Danger : si l'un des éléments est identifié à une concentration supérieure aux seuils toxicologiques définis ou à une valeur supérieure à sa VDSS, il s'agit d'un danger,
- Aléa : si aucun seuil n'est défini pour au moins un des éléments (p. ex. VTR sans seuil), alors il est probable qu'il présente une toxicité : il s'agit alors d'un aléa,
- Aléa « effet cocktail » : si la toxicité de l'association de plusieurs éléments à des niveaux inférieurs aux seuils définis est supérieure à la somme des toxicités envisagées pour chacun des éléments pris séparément à la même concentration, alors il s'agit d'un effet cocktail que l'on peut considérer comme un aléa. L'effet cocktail étant complexe à quantifier, aujourd'hui les indices utilisés abordent des notions intégratives de multi-pollution au travers, par exemple, de l'indice de charge polluante (ou PLI : *Pollution Load Index*)[28].

24 Dans le cas de pollution des sols, l'aléa représente également la probabilité d'exposition soit la probabilité d'ingérer, de respirer ou d'être en contact avec des particules contaminées. Dans le cadre de l'évaluation de risques sanitaires par les services de l'État (p. ex. Institut de veille sanitaire (InVS), ARS) sur des territoires pollués, le danger et certains facteurs de la vulnérabilité sont intégrés. Cependant, la notion de capacité est rarement intégrée et elle fait pourtant l'objet d'un travail approfondi sur le terrain d'étude des Calanques où les habitants mettent en œuvre des comportements particuliers pour éviter d'être exposés à des éléments toxiques susceptibles d'être présents dans le sol : ainsi il est relaté que des habitants ont fait remplacer la terre dans leur jardin après avoir eu connaissance de niveau de pollution élevé dans le sol ou ont arrêté de consommer des oursins (Barthélémy, 2016).

25 S'intéresser au risque dans le cadre de pollution des sols implique également d'étudier la vulnérabilité, autant sociale que physique. Les études sanitaires telles qu'épidémiologiques ou toxicologiques vont permettre de déterminer l'exposition au danger. En effet, elles définissent les doses admissibles journalières du danger pour les humains exposés en fonction de paramètres liés à la sensibilité physique intégrant des facteurs démographiques[29] et liés au niveau de vie. Par exemple des études menées par Pascal (2009) permettant d'apprécier les populations exposées aux effets des polluants atmosphériques montrent « une plus grande sensibilité des enfants, des personnes âgées, des personnes souffrant d'une maladie chronique ainsi que des personnes défavorisées sur le plan socio-économique ». Quant à Multigner et *al.* (2016), dans leur article sur l'exposition au chlordécone et ses effets, ils montrent que la « fenêtre d'exposition critique » est la grossesse et le développement du nourrisson. Même si ces études demeurent peu nombreuses, elles restent précieuses au regard d'une quantification et d'une spatialisation de certaines variables permettant de visualiser une sensibilité physique : celle d'une population sensible, comme par exemple en localisant la densité d'habitants, ou encore leur densité en fonction d'une tranche d'âge, ce qui revient à localiser un aspect de la vulnérabilité sociale. Par contre, l'approche écotoxicologique s'est largement développée et de nombreuses études sur les organismes végétaux ou animaux montrent des altérations de leur métabolisme en fonction des expositions à des pollutions (p. ex. Affholder et *al.*, 2013 ; Laffont-Schwob et *al.*, 2009). Mais ces études sont encore compliquées à exploiter du point de vue du géographe qui cherche à spatialiser les zones où se situent les populations exposées, car les résultats sont issus d'expérimentations réalisées déconnectées d'un milieu pollué (écotoxicologie potentielle en conditions contrôlées en laboratoire) ou avec un nombre restreint d'individus d'une espèce donnée étudiés *in natura* soumis à des niveaux de contamination hétérogène ne permettant pas une exploitation spatialisée représentative.

26 Dans le concept de vulnérabilité, outre la considération de ses aspects sociaux tels que l'âge, les aspects physiques comme les dommages matériels et coûts indirects de ces derniers (cela rejoint la notion de préjudice écologique récemment introduite en droit environnemental) sont indispensables à associer. Pour ce qui est des dommages matériels, il s'agit d'une variable bien légitime puisque des substances chimiques émises par certaines usines peuvent avoir un effet corrosif tel que l'on peut l'observer dans la commune de Gardanne et bien décrit par ses habitants[30] (Arnaud, 2015), ou dans le cas des usines de savon au XIXe siècle. Ainsi, des archives de l'histoire industrielle de la soude (carbonate de sodium utilisé en savonnerie) dans les calanques marseillaises au XIXe révèlent un cas concret de ce paramètre. Grâce aux travaux de Daumalin et Raveux (2016), les nombreuses dégradations matérielles liées aux émanations d'acides liées à la fabrication de la soude ont été décrites en indiquant : « que les fumées chargées d'acide chlorhydrique [...] attaquent « les étoffes, les dorures, les meubles et

les ustensiles de métal » des habitations » (AMM, 1810 dans Daumalin et Raveux (2016)). Outres ces dommages matériels, les atteintes à la santé des habitants sont très bien décrites pour les usines passées (Massard-Guilbaud, 2010), et plus récemment (Arnaud, 2015), s'agissant notamment de gênes et nuisances olfactives, voire atteintes à la santé humaine telle que le développement de maladies respiratoires. L'application complète du concept de vulnérabilité physique, intégrant les dommages corporels en fonction des propriétés intrinsèques de l'humain, les dommages sur les végétaux et les animaux et les dommages matériels, dans le cadre de risques sanitaires semblent alors permettre de localiser un certain nombre de variables qui superposées (à minima[31]) au danger favorisent une interprétation spatiale indispensable pour l'action publique sanitaire dont une estimation du coût sociétal réaliste dû à l'exposition à ce type de danger/aléa.

27 En se basant sur les définitions des géographes des risques, la vulnérabilité physique dépend également de la position des enjeux dans un contexte de risque particulier (prévention, alerte ou crise). Dans le cadre des sols pollués, ces enjeux peuvent prendre la forme de structures telles que des hôpitaux, des maternités, des maisons de retraite, des écoles, des casernes de pompiers, ou tout autre établissement recevant du public, structures sensibles en cas de risque sanitaire dans un contexte de prévention, d'urgence ou de rétablissement. Toutefois, ces structures peuvent également être considérées comme ressources en cas de crise, donc éléments de capacité. Seule l'analyse de la localisation (p. ex. cas d'un hôpital plus ou moins proche du foyer sensible) et de la gestion (personnel suffisant ou compétent pour traiter les malades) de ces structures pourra déterminer s'il s'agit d'une vulnérabilité ou d'une capacité[32].

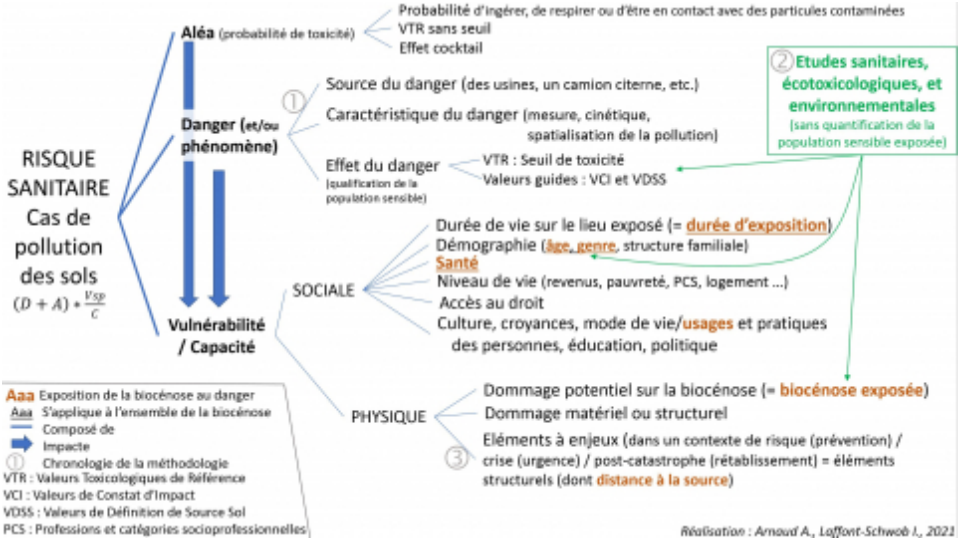
28 Ainsi, l'équation de probabilité pourrait s'exprimer =

$$Risque\ sanitaire = \ (D + A) * \frac{Vsp}{C}$$

29 Avec D, le danger, A, l'aléa, V*sp*, la vulnérabilité sociale et physique et C, la capacité. Si le danger et/ou l'aléa n'existent pas ou si des éléments potentiellement vulnérables n'existent pas alors le risque sanitaire n'a pas lieu. La capacité améliore la possibilité d'un individu ou groupe d'individus à se protéger ou faire face à un phénomène. La vulnérabilité cible davantage les fragilités et les dommages potentiels. Cette équation gomme volontairement la notion d'exposition qui intègre les variables de la vulnérabilité (Figure 4) et la notion de résilience ici considérée uniquement comme un temps de retour à la normale d'une organisation sociale suite à une catastrophe.

30 La représentation d'un risque sanitaire impose des choix de variables intimement liées à la problématique du terrain, où les facteurs spatiaux et temporels demeurent cruciaux (Figure 4).

Figure 4. Le risque sanitaire dans le cadre de pollution des sols : proposition d'une définition et méthodologie d'appréciation.



31 Dans le cas de la pollution des sols du massif de Marseilleveyre, nous détaillons dans la partie suivante un choix de variables appliquées à cette définition.

Choix des variables pour appréhender un risque sanitaire dans le massif de Marseilleveyre

32 La définition de la notion de « risque sanitaire » maintenant enrichie des 4 disciplines (Figure 4) laisse se dessiner un choix de variables. Pour affiner ce choix, une analyse des études sanitaires liées aux pollutions des sols du massif de Marseilleveyre permet de définir les caractéristiques de la population sensible et les éléments exposés structurels. Les variables retenues (Tableau 1) intègrent une dimension spatiale, indispensable à leur localisation (partie 3). Ces données doivent aussi être accessibles, réutilisables (format des données) et diffusables (droit d'utilisation), fiables (qualité de la source, précision des dessins, etc.). Le tableau 1 informe sur quelques métadonnées et montre que seules les données sur la capacité et la vulnérabilité sociale, bien que partielles, rassemblent l'ensemble de ces critères.

Tableau 1. Données et métadonnées liées à un risque sanitaire sur Marseilleveyre.

Notions	Variables : bases de données	Sources des BD et métadonnées	Accessibilité des BD et métadonnées
Danger – source de danger	Localisation des sites industriels et activités de service	BASIAS (Inventaire historique de Sites Industriels et Activités de Service) https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/basias	Public
Danger – source de danger	Localisation des sites et sols pollués	BASOL (Base de données sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif) https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/basol	Public
Danger – source de danger	-Localisation des usines -État actuel des usines*	Projet MARSECO, 2012 ; Daumalin et Laffont-Schwob, 2016	Accessibilité sur demande et ouvrage
Danger – source de danger	- Polluants émis (en fonction du type de production) -Durée d'activité des usines	Projet MARSECO, 2012 ; Daumalin et Laffont-Schwob, 2016	Accessibilité sur demande et ouvrage
Danger – Source du danger	-Dépôts de scories (déchets générés par les activités industrielles passées)	Relevés de Dumas P-J et Heckenroth A., 2013 (données personnelles)	En cours de mise en accès
Danger – Source du danger	Sites à « responsables défaillants » ayant généré un problème de santé publique	ADEME, 2013 (Agence de la transition écologique)	Public
Danger – caractéristiques du phénomène	-Localisation des mesures de concentrations en plomb et arsenic en fonction des VCI non sensible et VCI	Projet MARSECO, 2012 ; Daumalin et Laffont-Schwob, 2016 SynTerCalM, 2017	Accessibilité sur demande et ouvrage En cours de mise en accès

	Sensible		
Aléa – Effet cocktail	ICP (Indice de charge polluante) co-occurrence du Pb et As > VCI sensible	Projet MARSECO, 2012 ; Daumalin et Laffont-Schwob, 2016	Accessibilité sur demande
Vulnérabilité physique	Densité de population	INSEE carroyée 200mx200m, 2010** (Institut national de la statistique et des études économiques)	Public
Vulnérabilité sociale	Nombre d'enfants de moins de 5 ans	INSEE carroyée 200mx200m, 2010	Public
Vulnérabilité sociale	Ancienneté d'habitation sur le lieu (durée d'exposition)	INSEE carroyée 200mx200m, 2010	Public
Vulnérabilité sociale	Seuil de pauvreté	INSEE, 2010	Public
Vulnérabilité	Indice de sensibilité physique humaine (ISPH)	SynterCalM, 2017	En cours de mise en accès
Vulnérabilité/capacité structurelle	Établissements médicaux	Google, 2017	Public
Vulnérabilité structurelle	Établissements liés à l'enfance Crèches, maternelles	***, 2017 : Géolocalisées à partir des adresses avec http://dehaese.free.fr/Gmaps/testGeocoder.htm, puis géocodé avec la fonction de « XY tools > Open Excel File » de Qgis 2.14.7	Public
Vulnérabilité physique	Habitations	BD TOPO IGN, 2016 (Institut national de l'information géographique et forestière)	Licence recherche - enseignement
Vulnérabilité/capacité structurelle	Routes	BD TOPO IGN, 2016	Licence recherche - enseignement
Autre variable	Isolignes des altitudes (10 m)	BD ALTI IGN, 2016	Licence recherche - enseignement

* Réaffectations : détruite (des habitations ont été construites dans le périmètre de l'ancienne usine), reconstruite (les murs existent encore et la destination a changé (habitations, commerces, etc.) ou en friche / ** https://www.insee.fr/fr/statistiques/2520034 / *** http://lescreches.fr/marseille-13000 ; http://education.marseille.fr/ecoles-maternelles-publiques

33 Plus précisément, la définition des variables commence par la localisation des sources du danger et la localisation de sa présence plus particulièrement dans les sols. La caractérisation du danger a été facilitée par le travail des historiens qui ont étudié les industries passées potentiellement polluantes de ce territoire apportant des informations complémentaires à la base de données BASOL permettant ainsi aux géographes de les spatialiser grâce aux documents d'archives. La quantification du danger a pu être réalisée par un consortium de scientifiques, avec notamment des chimistes de l'environnement, par la mesure des concentrations de métaux et métalloïdes dans les sols de surface (Laffont-Schwob et *al.*, 2016 ; Marséco, 2012[33]). Ensuite, les études sanitaires réalisées par plusieurs organismes de santé et de recherche (p. ex. InVS, ARS) permettent de cibler les caractéristiques de la population humaine sensible. Les données livrées par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) facilitent alors leur spatialisation. Enfin, les éléments exposés structurels pourront en être définis.

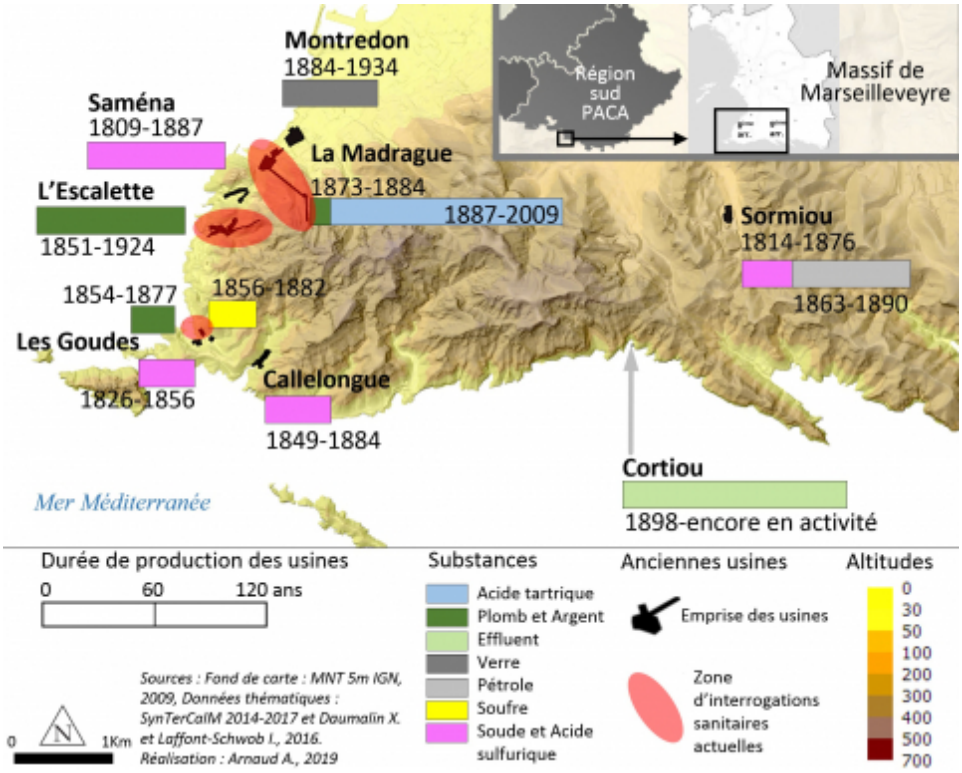
34 Par ailleurs, les nombreuses études réalisées sur la pollution du territoire des Calanques

apportent de la donnée sur le danger et/ou l'exposition et/ou la vulnérabilité sociale (p. ex. âge), mais non spatialisable à l'échelle des calanques (p. ex. étude de l'InVS (Lasalle, 2007) très localisée sur l'Escalette et Saména ; étude d'AirMaraix (2003) très localisée sur l'Escalette).

Qualification et quantification du danger et de l'aléa

35 À partir de la description du danger de pollution des sols dans le massif de Marseilleveyre dans l'ouvrage de Daumalin et Laffont-Schwob (2016) qui présente également l'histoire des activités industrielles de Marseilleveyre, on peut faire le constat d'une grande diversité de types de production industrielle (fabrication de « soude » et de soufre, transformation de la galène en plomb…) s'étalant du XIXe au XXe siècle. Celles qui interrogent le plus en matière de santé aujourd'hui sont les productions de plomb qui ont eu lieu entre 1851 et 1924 au niveau de La Madrague de Montredon, de l'Escalette et des Goudes (Figure 5).

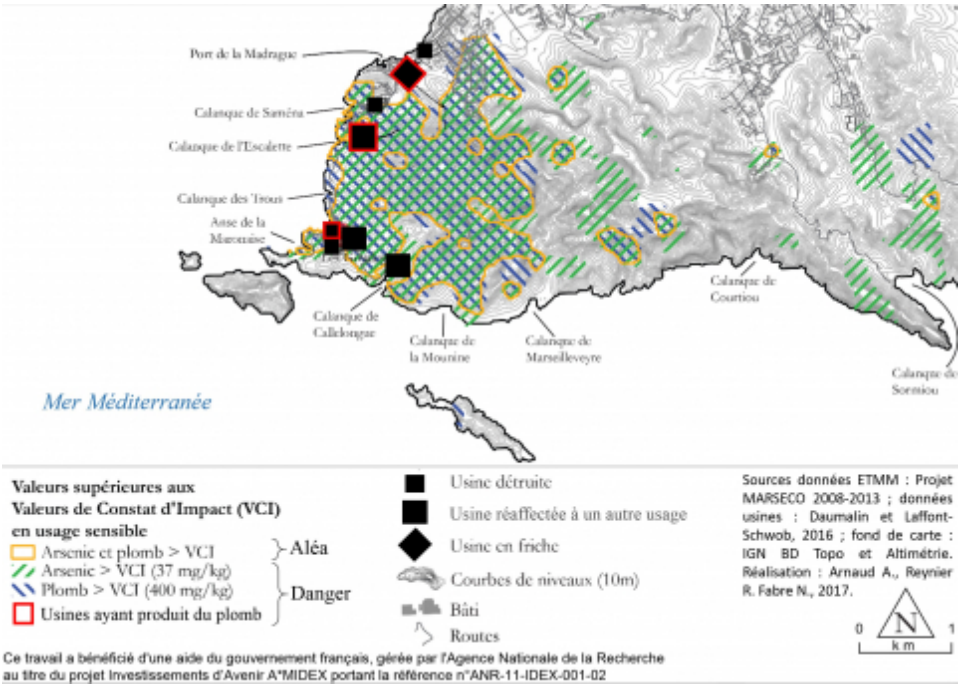
Figure 5. Carte des sources du danger : localisation et durée des activités industrielles dans le sud de Marseille au XIXe et XXe siècle.



36 Dans le cadre du projet Marséco qui a visé à étudier les flux de contaminants sur le littoral des Calanques marseillaises et leurs effets sur le fonctionnement des écosystèmes littoraux avec notamment les transferts de contaminants dans le sol, l'eau et la biocénose, un consortium de scientifiques impliquant notamment des écologues et des chimistes a mené une campagne de mesures des Éléments trace métalliques et métalloïdes (ETMM) présents dans les sols de surface (cinq à dix premiers cm du sol hors litière) en lien avec les activités industrielles passées. Ces mesures dans les sols de surface ont été réalisées en 2009 sur 260 points de prélèvements[34] espacés de 250 mètres sur le massif de Marseilleveyre, hors zone de dépôts de scories. Leur travail montre une contamination diffuse des sols notamment en arsenic, plomb, cuivre et zinc s'étendant au-delà de l'emprise des anciennes usines. Ces résultats montrent d'une part une contamination mixte en ETMM et d'autre part, le dépassement des Valeurs de constat d'impact (VCI) pour plusieurs ETMM. Une cartographie a alors été réalisée de manière à observer de nouveaux phénomènes. La représentation spatiale de ces mesures se réalise en utilisant une méthode d'interpolation[35]. D'après Reynier (2015, p. 16 à 23), l'interpolation linéaire des voisins naturels semble la plus adéquate pour représenter la pollution dans ce secteur, compte tenu de sa diffusion spatiale dans un substrat homogène calcaire et un relief très prononcé. À partir des interpolations pour l'arsenic et le plomb, ETMM les plus problématiques sur la zone considérée, les polygones représentant les sols qui concentrent une dose supérieure à la VCI (en usage sensible) ont été extraits de

manière à détourer les zones présentant simultanément cette caractéristique (en orange sur la Figure 6). Conformément à la définition proposée dans la première partie, ces polygones représentent des zones d'aléa.

Figure 6 : Carte d'aléa et danger dans le massif de Marseilleveyre à partir des mesures réalisées en 2009.



Localisation des sols de surface présentant des teneurs en arsenic et en plomb supérieures aux VCI par élément ou pour les deux éléments simultanément.

37 Les zones d'aléa c'est-à-dire où les teneurs en plomb et en arsenic sont supérieures aux VCI notamment à proximité de zones urbanisées interrogent sur le risque sanitaire, c'est pourquoi la première variable faisant référence à la vulnérabilité qui semble intéressante à représenter est la densité de population. Au-delà de la densité, des études sanitaires et environnementales ont été réalisées dans certains de ces secteurs (comme l'Escalette et Saména), permettant de spatialiser de nouvelles variables liées à la sensibilité physique de la population humaine.

Vers une quantification de la vulnérabilité physique et sociale : apport des études sanitaires et environnementales

38 Les études sanitaires et environnementales focalisées sur la présence des ETMM dans le massif de Marseilleveyre permettent d'extraire des informations sur les vulnérabilités sociales et physiques parfois spatialisables. Dans le cadre du projet de recherche Marséco réalisé entre 2008 et 2013, des écotoxicologues ont montré que certains sols présentaient une génotoxicité potentielle et dans le projet A*MIDEX SynTerCalM[36] de 2014 à 2017, des écologues ont mis en évidence une baisse de la biodiversité en lien avec cette contamination (Laffont-Schwob et *al.*, 2016). En 2007, Jean-Luc Lasalle de l'InVS (Institut de veille sanitaire) a réalisé une étude sanitaire dont les résultats sont éloquents : « les jeunes enfants qui résident sur le site de l'Escalette ou fréquentent la plage de Saména encourent un risque sanitaire, principalement dû à l'ingestion de terre ou de sable pollué ». Les risques sanitaires concernent également « la consommation par les adultes ou les enfants des oursins et des moules contaminés pêchés localement ». Plus précisément, l'évaluation du risque sanitaire montre que le risque de dépassement des seuils de plombémie pour les enfants de moins de deux ans est fort probable et ainsi qu'ils devraient « bénéficier d'une évaluation de leur intoxication », ainsi que les enfants de moins de six ans lorsqu'ils fréquentent la plage de Saména et qu'ils consomment des oursins provenant de la zone nord de l'étude[37].

39 Ces études, en l'état, permettent deux choses : la première, de définir des facteurs de vulnérabilité sociale – la pratique des plages, l'ingestion de terre et de sable, la consommation

d'oursins et de moules ou celle de plantes aromatiques – cette dernière étudiée par notre équipe de recherche (Affholder et *al.,* 2013) ; la seconde, de cibler quelques caractéristiques de la population sensible, élément de vulnérabilité sociale et physique. Il s'agit d'une population habitant au sein ou limitrophe du massif de Marseilleveyre (8e arrondissement de Marseille), et plus spécifiquement des enfants de moins de six ans, qui, de plus, sont susceptibles d'être exposés à ces pollutions par leurs pratiques sur les plages, lors de la baignade et par la consommation régulière des produits de la mer. Les localités de Saména et de l'Escalette sont celles le plus souvent retenues. L'ancienneté des habitants représente également un facteur de vulnérabilité à prendre en compte (cf. note de bas de page précédente). En effet, les « maladies se manifestent chez les individus généralement longtemps après leur contact avec les agents dangereux » (Host et *al.*, 2006), et les habitants qui résident dans la zone de Marseilleveyre depuis plus de cinq ans présentent une période d'exposition plus longue que celle mentionnée dans l'étude de l'InVS (Lasalle, 2007). Dans le cas de la pollution au plomb, même s'il n'y a pas de cas de plombémies aiguës actuellement déclarés dans ce secteur – car il s'agit d'une maladie qui serait due à une exposition à des teneurs élevées en plomb – le risque réside dans une exposition chronique de la population qui peut se manifester par des effets neurologiques chez les enfants et un effet fœtotoxique chez la femme enceinte (Haut conseil de la santé publique (HCSP), 2017). À ceci s'ajoutent les effets de l'exposition chronique à l'arsenic susceptible de générer des conséquences cutanées pouvant aller jusqu'à des carcinomes (Haute autorité de santé (HAS), 2020). La variable des familles à bas revenus semble également importante à retenir notamment compte tenu de ce que l'on peut apprendre dans le Larousse Médical dans le cas de saturnisme infantile (ARS, 2011) : « Le saturnisme infantile est une pathologie qui atteint en majorité les groupes sociaux les plus pauvres [...] ». De plus, les économistes intègrent souvent le niveau de vie des ménages dans leurs calculs de vulnérabilité (Dumont *in* Moriniaux, 2003)[38]. Quant aux géographes, Thouret et D'Ercole (1996)[39] montrent que les familles dont les revenus sont les plus modestes peuvent présenter une forme de marginalité dans leur comportement lié aux réseaux d'information, la fréquentation des médecins et leur pratique alimentaires. Cette variable renseigne également, même si indirectement et partiellement, sur le niveau de scolarisation qui peut influencer l'interprétation de l'information selon la forme de sa présentation et donc la perception du risque. À ce sujet, Host et *al.* (2006) pointent du doigt le peu d'effort des experts à rendre compte des résultats scientifiques[40].

40 Les variables de l'âge des enfants, l'ancienneté des habitants et les familles à bas revenus – composantes de la vulnérabilité sociale – avec la densité de population – composante de la vulnérabilité physique – permettraient de révéler une sensibilité physique[41] potentielle de la population humaine à la pollution liée aux activités industrielles passées, notamment à l'arsenic et au plomb dans le massif de Marseilleveyre. Ces données peuvent être accessibles au travers des bases de données de l'INSEE, à une maille fine, carroyée, de 200 m sur 200 m. C'est pourquoi la troisième partie tente de cartographier cette sensibilité. Avant cela, il convient de définir les éléments structurels intervenant dans la définition de la vulnérabilité physique.

Autre élément de vulnérabilité physique : les éléments structurels

41 Afin de compléter la visualisation d'une vulnérabilité, il convient de définir les éléments structurels, c'est-à-dire, les éléments indispensables à localiser en fonction du contexte de risque (prévention[42]), crise (urgence[43]) ou post-crise (rétablissement[44]). Pour définir ce contexte, la connaissance de la cinétique du danger peut aiguiller sur ce choix, notamment à travers l'étude de la vitesse de propagation des polluants dans l'environnement (sols, eau, plantes, etc.) et celle des pathologies associées développées.

42 Dans le cas de Marseilleveyre, la diffusion des polluants dans les sols est lente et longue puisque les mesures réalisées en 2009 par le projet Marséco et cartographiées en 2015 (Figure 6) révèlent la présence de contaminants qui ont été émis entre 1851 et 1924 (Figure 5). Aujourd'hui, la mise en relation entre ce danger lié à la pollution des sols et les impacts sur la biocénose est toujours en cours (projet SynTerCalM 2014-2017 ; projet Marséco 2008-2013 ; Lasalle, 2007). Nous en déduisons que le potentiel transfert des polluants vers l'humain, et

leurs effets perceptibles sur l'humain sont de l'ordre de plusieurs décennies, la cinétique du risque peut alors être qualifiée de lente. Le constat clinique peut ne pas percevoir à l'heure actuelle de maladies subséquentes à l'ingestion ou l'inhalation de ces ETMM qui sont la conséquence d'exposition à long terme[45]. Cependant, des effets d'expositions conjuguées peuvent se produire et il est indispensable d'évaluer toutes les sources d'exposition y compris non industrielles. Afin d'affiner cette hypothèse et de mieux comprendre les effets du plomb et de l'arsenic sur la santé, des études sanitaires poussées sur la contamination de l'eau au plomb et à l'arsenic ont été réalisées (INERIS, 2010 ; Organisation mondiale de la santé (OMS), 2017 ou Direction générale de la santé (DGS), 2002[46]). Elles informent des effets de ces éléments en fonction des doses ingérées, cependant, quelles que soient les recherches, elles ne fournissent pas d'informations précises sur le laps de temps entre l'ingestion du substrat pollué (sol, eau, plante), la déclaration potentielle de symptômes et la propagation des maladies. Toutefois, la présentation de ces effets globaux laisse à penser que l'association des symptômes chez l'humain à une contamination des sols, si elle n'est pas ou peu soupçonnée, semble peu évidente. Par exemple, les cancers, les troubles neuronaux ou les troubles digestifs sont des maladies multifactorielles. De plus, les maladies comme les cancers ou les maladies neurodégénératives s'observent souvent sur du temps long (Host et *al.*, 2006). À notre connaissance, aucun cancer-signature n'est identifié pour des expositions à l'arsenic ou au plomb ne permettant ainsi pas de faire de lien direct entre une éventuelle exposition à ces éléments et des pathologies développées, même de nombreuses années plus tard contrairement au constat qui semble se dessiner à Fos-sur-Mer (Goix et *al.*, 2018 ; Pascal et *al.*, 2013).

43 La réflexion sur les maladies liées aux pollutions à l'arsenic et au plomb longues à se déclarer et complexe à observer et la réflexion sur la vitesse de propagation du danger permettent de déduire que la cinétique du risque est lente. Cet aspect temporel place alors l'étude dans un contexte de risque (prévention). Dans ce contexte, quels éléments structurels jouent un rôle dans la vulnérabilité et la capacité de la population humaine sensible ? Les cabinets médicaux, les hôpitaux et les cliniques, les crèches et les écoles sont des éléments structurels à enjeux. Leur localisation, leur capacité d'accueil et leur gestion peuvent en effet influer sur la vulnérabilité physique des personnes si le système de gestion est défaillant, et à l'inverse, comme une capacité.

44 Les médecins et les pédiatres jouent un rôle de sentinelles en observant les pathologies des patients, et plus précisément, les jeunes patients, davantage sensibles, exposés de manière chronique au danger auquel peuvent s'ajouter d'autres formes d'expositions à d'autres éléments et/ou molécules toxiques. Le travail mené par l'Institut écocitoyen pour la connaissance des pollutions (IECP) en coordination avec des médecins permet, par exemple, de sensibiliser le corps médical ainsi que les populations autour de la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer sur les imprégnations potentielles aux polluants pour des suivis de santé ciblés et adaptés (Goix et *al*, 2018). C'est un accompagnement précieux pour que le corps des métiers de la santé puisse mener un vrai travail d'observation dédié. Les hôpitaux et cliniques présentent un lieu de concentration de médecins et donc une sorte d'observatoire des phénomènes liés à la santé des humains et du vivant de manière plus générale. Les vétérinaires sont également intéressants à localiser, pouvant diagnostiquer des intoxications potentielles au plomb chez des animaux généralement de petite taille et donc plus sensibles (p. ex. Zook et *al.*, 1972) et ainsi constituer une forme de réseau sentinelle permettant l'anticipation d'éventuelles pathologies humaines. Ces lieux sont susceptibles de fournir des éléments alertant, mais faut-il encore que ces établissements soient informés et formés.

45 Les crèches et les écoles représentent des lieux de fragilité puisqu'elles concentrent une population jeune, davantage sensible au danger de pollution. Des préconisations semblent nécessaires pour limiter les expositions des enfants selon la proximité aux sources de pollution et en fonction des conditions météorologiques. En effet, la négligence de dispositifs de vigilance augmente la vulnérabilité de la population concernée les soumettant à inhalation quotidienne de poussières potentiellement polluées qui peuvent être plus nombreuses par temps sec et venteux (Airmaraix, 2003)[47]. Cela peut venir s'ajouter aux autres formes de pollution de l'air dont les écoles de notre zone sont cependant relativement peu impactées[48].

46 La forme spatiale de ce réseau qui se dessine sur une carte par les éléments structurels sera commentée de manière à ce que, dans ce contexte de risques et donc de prévention, il soit possible de l'optimiser. Dans ce cas de pollution avec des effets à cinétique lente, la « crise »

prend une autre forme, en passant (ou pas) par le scandale, et la dure tâche de rendre visible l'invisible pour réparer, panser un mal déjà en cours (Frioux et Canavese, 2019 ; Lambert et *al.*, 2017 ; Daumalin et *al.*, 2016).

47 Notre analyse du risque sanitaire repose sur l'observation spatiale de l'ensemble de ces variables synthétisées dans le tableau 1. La partie suivante s'attache à la superposition des variables retenues spatialisées et pour certaines cartographiées.

Visualiser un risque sanitaire

48 Les résultats des études sanitaires et des projets de recherche Marséco et SynTerCalM nous renseignent sur de nombreux éléments qui, une fois spatialisés, cartographiés et superposés, sont ici analysés de manière à discuter un possible risque sanitaire sur Marseilleveyre. Pour cela, le recours à un Système d'information géographique (SIG) va faciliter le croisement spatial de toutes les variables liées au risque sanitaire, permettant ainsi le repérage des zones les plus sensibles ; deuxièmement, cet outil donne accès à des fonctionnalités de réalisation de calculs ou transformations de variables ; et troisièmement, il permet de générer des cartes thématiques dont les plus éloquentes sont présentées dans cette partie. La représentation spatiale des variables, qui dépend de leur nature (quantitative, qualitative) et de leur mode d'implantation (point, ligne, polygone), suit des méthodes et des techniques cartographiques (Tableau 2) telles que la sémiologie graphique de Bertin (1967), la discrétisation ou encore l'interpolation (p. ex. Cauvin et *al.*, 2007). Les cartes produites permettent ici une série de réflexions analytiques à la fois sur la cartographie d'un indice synthétique de sensibilité humaine comprenant les variables de vulnérabilité retenues (densité, âge, revenu et ancienneté d'habitat), puis sur la superposition des cartes d'aléa et danger produites (Figures 5 et 6) avec d'autres facteurs de vulnérabilité tels que les éléments structurels.

Tableau 2. Procédés cartographiques pour représenter les variables liées au risque sanitaire sur Marseilleveyre.

Variables	Modalité/unité	Forme élémentaire/Base spatiale	Méthodes et techniques cartographiques	
-Localisation des usines -État des usines	Localisation des objets	Polygone	Emprise spatiale de l'usine + variation de la forme du contour en fonction de l'état de l'usine (détruite, reconstruite, en friche)	
-Type de polluants produits -Durée de production des usines	- p. ex. Plomb - en nombre d'années	Point	Diagramme avec une variation de la teinte de la couleur : variable « type de polluant » qualitative nominale ; une variation de la taille : variable temporelle	
Dépôts de Scories	Loc. des objets	Polygone	Coloration en fonction de la source d'information	
Concentration en plomb et arsenic > au VCI	En mg de polluant par kg de sol (ppm)	Point	Interpolation linéaire des voisins naturels puis extraction des polygones dont les mesures sont > au VCI en usage sensible	
plomb + arsenic > au VCI	Loc. des objets	Polygone	Extraction des polygones plomb + arsenic dont les valeurs > VCI en usage sensible	
Densité de population		Polygone carré de 200mx200m		Discrétisation : méthode des seuils naturels* (Figure 7a)

Âge	En nbr de personne/4 ha	Polygone carré de 200mx200m	Discrétisation des variables possibles parce que les carrés ont une taille identique. Choix de discrétisation en fonction du graphe de répartition des valeurs ordonnées.	Discrétisation : méthode géométrique (Figure 7 b)
Ancienneté d'habitation sur le lieu		Polygone carré de 200mx200m		Discrétisation : méthode géométrique (Figure 7c)
Seuil de pauvreté		Polygone carré de 200mx200m		Discrétisation : méthode géométrique (Figure 7 d)
Indice (densité, âge, ancienneté, seuil de pauvreté)	Valeur de l'indice de zéro à un	Polygone carré de 200mx200m	Transformation : calcul d'un indice via l'agrégation de quatre indicateurs : la densité, l'âge, l'ancienneté et le seuil de pauvreté. Discrétisation : méthode standardisée (Figure 8)	
Établissements médicaux et enfance	En nbr de médecins et d'enfants + loc.	Point	Variation de la taille des cercles en fonction du nombre de médecins et d'enfants. Localisation des hôpitaux, des vétérinaires et des maternelles.	
Habitations	Loc. des objets	Polygone	Localisation des polygones	
Courbes de niveau	Loc. des objets	Ligne	Localisation des altitudes tous les dix mètres	

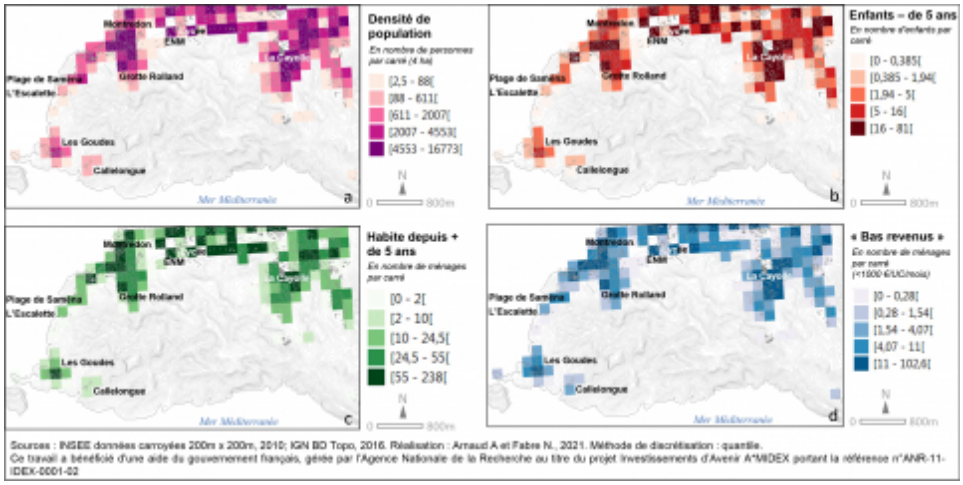
* La méthode géométrique qui s'applique lors d'une concentration des valeurs dans les valeurs faibles est ici remplacée par une méthode manuelle reprenant la méthode des seuils naturels et du bon sens afin de distinguer la diversité des valeurs élevées et ainsi optimiser la lecture de la carte à cette l'échelle.

Cartographie d'un indice de sensibilité physique humaine à l'arsenic et au plomb

49 Les études sanitaires et environnementales ciblent une population sensible : les enfants de moins de six ans, les habitants anciens (augmentant la durée d'exposition), les familles à bas revenu et la proximité (zones de forte densité). Compte tenu de ces résultats et des variables disponibles dans la base de données de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)[49], il est possible d'exploiter ces informations en tant qu'indicateurs pour générer un indice de vulnérabilité que nous appelons « indice de sensibilité physique humaine » (ISPH). La cartographie de cette information sous forme de carrés de deux-cents mètres de côté est adéquate pour une interprétation corrélée à l'aménagement du territoire (localisation d'enjeux) et au tissu urbain (habitat individuel, collectif, etc.). Chaque variable de l'indice est d'abord spatialisée puis analysée. Notre méthode pour générer l'ISPH est ensuite décrite.

50 Les attributs de la base de données INSEE facilitent la représentation cartographique de ce choix de variables offrant la possibilité de calculer la « densité de population », le « nombre d'enfants de cinq ans et moins de cinq ans », le « nombre d'habitants résidents depuis plus de cinq ans » et le « nombre de ménages à bas revenu » pour chaque carré[50] (Figure 7, cf. Tableaux 1 et 2 pour les détails de représentation cartographiques).

Figure 7. Cartes de densité de population (a), enfants de cinq ans et moins de cinq ans (b), ménages résidants depuis plus de cinq ans (c) et population à bas revenus (d) dans le massif de Marseilleveyre en 2010.



51 Les concentrations de population visibles sur la figure 7a s'expliquent tout d'abord par des effets de site et de situation. D'une part, l'orographie joue un grand rôle dans ce secteur, puisque le relief constitue une barrière physique à l'urbanisation. De plus, le caractère escarpé ne favorise pas le développement d'un port influant ou de connexions avec l'est ou encore d'une vaste urbanisation. D'autre part, le fait de se situer à l'extrême sud de Marseille avec une route sans issue se terminant dans un vallon escarpé (Callelongue) donne un effet de « bout du monde » qui a sans doute permis à ce lieu de peu s'urbaniser. Mais les concentrations de populations s'expliquent plus précisément par les décisions politiques en matière de planification urbaine, de choix du type d'urbanisation ou encore en termes de protection environnementale (cf. carte de l'annexe 1). Plus précisément, les zones peuplées correspondent aux zones qui ont été réservées à l'urbanisation dans les documents d'urbanisme tels que les Schémas de cohérence territoriale (SCOT) ou les Plans locaux d'urbanisme (PLU), et le tissu urbain plus ou moins dense (immeubles, maisons individuelles, etc.) demeure un facteur incontournable de densité de population. Plus en détail, sa spatialisation montre que les secteurs les plus peuplés sont la Madrague – sud Montredon, un quartier anciennement ouvrier devenu résidentiel, notamment installé sur le périmètre d'une ancienne usine ayant produit du verre (verrerie de Montredon, 1884-1934), le secteur situé au niveau de l'École nationale de la marine marchande (ENM) qui accueille de nombreux résidants temporaires ; et le secteur de la Cayolle, quartier historiquement populaire, qui demeure en pleine mutation notamment de par sa proximité avec le parc national des Calanques (Deldrève et Candau, 2014). Dans une moindre mesure nous observons le quartier du Roy d'Espagne qui comprend de grands immeubles[51] construits dans les années 1970, le quartier de la Grotte Roland composé de pavillons individuels avec jardins témoignant d'une population aisée (la Figure 7 d montre d'ailleurs que ce secteur comprend peu de personnes à bas revenus), et les Goudes composé d'un tissu pavillonnaire dense notamment construit sur le périmètre de trois anciennes usines dont l'une produisait du plomb, les autres du soufre et, de l'acide sulfurique (Figure 5 sur l'histoire des usines). Le type de logement (p. ex. avec un jardin dont le sol peut potentiellement être pollué) et leur situation à proximité de sites de dépôts de déchets industriels ou des friches industrielles fournissent une grille de lecture sur les possibles sources d'exposition.

52 La localisation du nombre d'enfants de moins de cinq ans (Figure 7 b) permet quant à elle d'observer des concentrations semblables à la densité de population excepté pour les Goudes, où il réside peu d'enfants de cet âge-là ou plus jeunes. Outre le phénomène de densité de population, ceci est concordant avec la proximité d'établissements scolaires se situant davantage au nord de la zone[52] (localisés sur la Figure 9). De plus, la proximité de la nature et de la mer rend plus facile la pratique de la balade et l'accès à certaines plages en famille (Deldrève et Hérat, 2012), comportement aggravant dans notre cas la vulnérabilité par une potentielle exposition à des particules contaminées.

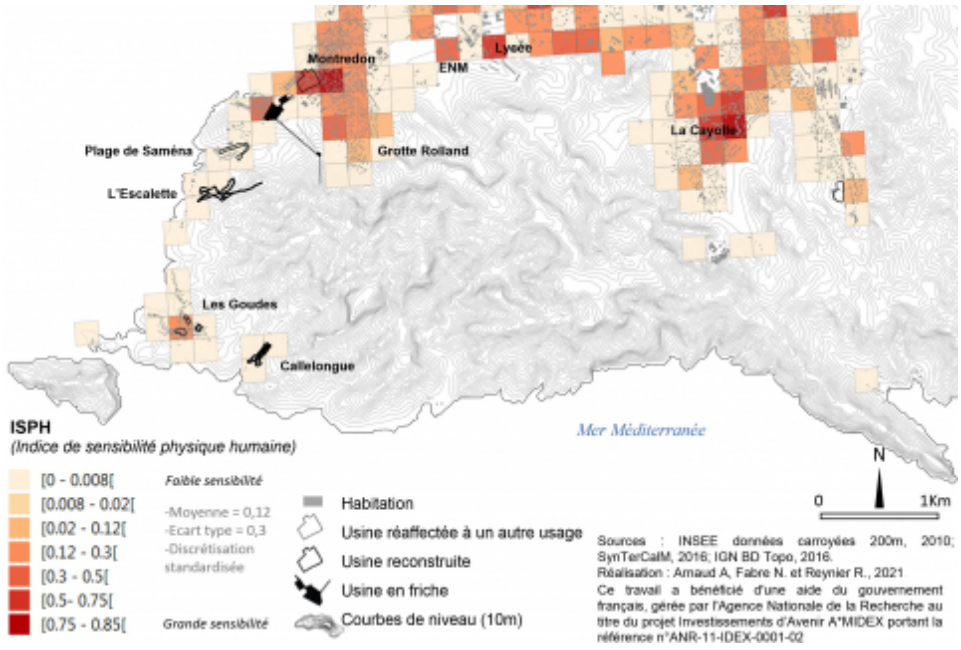
53 Le nombre de ménages qui habitent dans le massif depuis plus de cinq ans (Figure 7c) se concentre aux mêmes lieux que précédemment, avec une proportion marquée pour les quartiers du Roy d'Espagne[53], autour de l'ENM et une partie de la Cayolle. L'attractivité de ces quartiers est certainement due à un cadre de vie plaisant et des conditions d'accès à la propriété raisonnables financièrement.

54 Enfin, le nombre de ménages à bas revenus[54] (Figure 7 d) est principalement élevé à la

Cayolle et à la Madrague, notamment là où se trouvent des immeubles collectifs. Les données disponibles sur les loyers et prix de l'immobilier sont en concordance avec la présence de ces ménages à bas revenus à la Cayolle tandis qu'à l'ouest, à la Madrague, ils demeurent élevés (cf. carte sur le prix des loyers en annexe 2) et, dans une moindre mesure, pour le quartier des Goudes, pour lequel moins de 11 ménages à bas revenus (cf. Figure 7 d) sont présents, ce qui semble correspondre à de l'habitat de cabanonniers, au sens de Claeys et *al.* (2016).

55 L'observation des disparités géographiques de ces quatre variables impose, pour une analyse spatiale directement associée à notre problématique, la production d'une nouvelle information. Pour cela, deux opérations sont appliquées :1 – la transformation des variables pour en créer des indicateurs comparables, 2 – une agrégation des quatre indicateurs pour produire un indice : l'Indice de sensibilité physique humaine (ISPH). Plus précisément, chaque variable devient un indicateur en utilisant une méthode de transformation standardisée qui selon Grasland et Hamez (2005) « consiste à réaliser une interpolation linéaire entre les valeurs minimales et maximales de la distribution observée »[55]. L'emploi de cette méthode nous semble adapté, les distributions ne présentant pas de valeurs extrêmes qui risqueraient de tirer l'indice vers une valeur biaisée. Dans notre application, chaque carré prend une valeur de zéro à un, donnée INSEE transformée sous forme d'indicateur. L'ISPH se construit en agrégeant les quatre indicateurs. Chaque indicateur vaut un, considérant leur impact sur la sensibilité équivalent, mais cette attribution peut être adaptée si des données complémentaires venaient prouver qu'un indicateur est plus important qu'un autre. En pondérant ces indicateurs, l'indice synthétique est compris entre zéro et quatre. Pour faciliter sa lecture, l'ISPH a été réduit à un en utilisant la formule d'agrégation de la moyenne algébrique pondérée[56], méthode qui nous parait à la fois plus simple, transparente[57] et adaptée compte tenu du maillage régulier (4 ha). Plus l'ISPH est proche de la valeur un, plus il est fort[58], traduisant une sensibilité physique élevée (Figure 8).

Figure 8. Cartographie de l'indice de sensibilité physique humaine au plomb et à l'arsenic dans le massif de Marseilleveyre en 2010.



56 La spatialisation de l'ISPH montre trois zones plus sensibles : les secteurs de Montredon et de la Cayolle où l'indice est supérieur à 0,75 et la zone située entre l'ENM et le lycée Marseilleveyre où l'ISPH atteint 0,64. Ces secteurs cumulent une forte densité d'habitants, l'ancienneté de ces derniers, des enfants âgés de cinq ans et moins de cinq ans et de faibles revenus. Dans une moindre mesure (entre 0,3 et 0,5), on identifie la Madrague, la Grotte Roland, le secteur sud-ouest du parc du Roy d'Espagne et Beauvallon. Concernant la Grotte Roland, quartier aisé (peu de bas revenus et grandes maisons individuelles ou immeubles collectifs de prestige), sa sensibilité peut s'expliquer par la densité de la population élevée et ses habitants installés de longue date.

57 Pour les quartiers de Montredon, de l'ENM et de la Cayolle, où l'indice de sensibilité physique est élevé (> 0,75), quelques facteurs aggravants apparaissent au travers des résultats d'une enquête au cours du projet SynTerCalM réalisée en 2015 et 2016 et dans la littérature.

En effet, la population locale occupant ces quartiers entretient un rapport singulier avec son environnement littoral susceptible d'être contaminé et se situant à moins de trois kilomètres de chez eux. Ce rapport à leur environnement s'exprime sous la forme de pratiques régulières telles que la baignade (80,6 %), la promenade et la randonnée (90 %)[59]. Des enquêtes menées par Deldrève et Candau (2014) révèlent également une fréquentation régulière des plages de Sormiou et de Morgiou par la population du quartier de La Cayolle, et plus largement une grande fréquentation des calanques par ses riverains (Deldrève et Hérat, 2012). Les calanques constituent pour les habitants généralement très modestes[60] et parfois plus aisés[61] (localisés dans la Figure 7 d) un véritable territoire d'appartenance avec un rapport identitaire fort où les usages tels que la promenade et la baignade font partie de pratiques soit ancrés depuis plusieurs générations (Deldrève et Hérat, 2012 ; La chaîne de Marseille (LCM), 2011) soit seulement depuis l'installation des personnes dans le massif[62]. Cependant, les études de l'InVS (Lasalle, 2007) pointent justement du doigt ces pratiques que nous considérons ici comme source de vulnérabilité, en mettant l'accent sur la consommation de moules et la pratique de baignade sur la plage de Saména. Concernant la cueillette, 32,6 % des interrogés[63] affirment cueillir des asperges sauvages ou encore des plantes aromatiques à des fins de consommations, mais les travaux de Affholder (2013) modèrent cette vulnérabilité encourue : en effet, d'après leurs estimations, il faudrait boire plusieurs litres de tisane de romarin contaminé par jour pour dépasser les doses admissibles journalières de chacun des éléments considérés séparément (p. ex. plomb, arsenic). Cependant, les effets sur la santé humaine de l'ensemble des éléments présents simultanément dans le romarin lors de son ingestion n'ont pas pu être déterminés. Outre leurs pratiques, certaines personnes habitent dans ces secteurs depuis longtemps et sont donc exposées aux sols pollués par différentes voies d'exposition notamment par inhalation des poussières contaminées (AirMaraix, 2003).

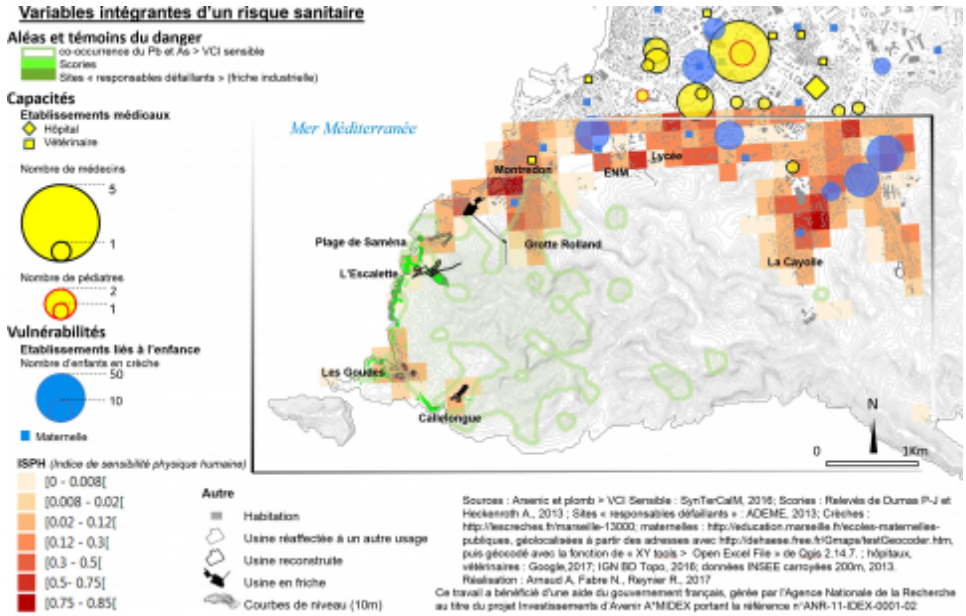
58 Les quatre variables cartographiées et analysées ci-dessus ont permis de construire l'indice de sensibilité physique humaine ou ISPH que l'on va maintenant superposer à d'autres éléments constitutifs du risque sanitaire pour affiner le diagnostic sanitaire.

Vers une carte de risque sanitaire

59 Même non exhaustive, une carte du risque sanitaire probable dans le massif de Marseilleveyre intégrant tous les éléments spatialisables du tableau 2 peut être construite en superposant chaque variable. À la représentation du danger, du phénomène de pollution, de l'aléa et de la vulnérabilité dont l'IPSH, peuvent être ajouté de nouveaux éléments comme la capacité (p. ex. hôpitaux), la vulnérabilité structurelle (p. ex. écoles). Que peut alors apporter ce type de visualisation ?

60 La localisation, l'état et la gestion des éléments structurels sont susceptibles d'influencer la vulnérabilité physique. Par exemple, concernant les établissements scolaires accueillant de jeunes enfants (crèches, maternelles), plus ils sont concentrés sur un site pollué, plus la vulnérabilité est grande compte tenu du nombre d'enfants exposés. Pour une approche plus exhaustive, la prise en compte de la localisation des activités liées à la petite enfance[64] aurait été intéressante, mais la fiabilité des sources et le manque d'actualisation des données ne l'ont pas permis. Quant aux établissements publics liés à l'observation des pathologies (hôpitaux, vétérinaires), ils peuvent constituer de véritables sentinelles et leur concentration associée à une bonne information fonde une réelle capacité en tant que ressource locale (Figure 9).

Figure 9. Cartographie d'un risque sanitaire dans le massif de Marseilleveyre, 2010 – 2016.



61 La figure 9 sur le thème du risque sanitaire répond ainsi au questionnement de l'introduction en montrant trois informations importantes : 1-les zones où coïncident une sensibilité physique humaine et un fort aléa et/ou danger, il y aurait alors un intérêt à poursuivre un travail fin en termes de vulnérabilités, d'aléas et de danger ; 2– les zones concentrant des vulnérabilités par la concentration ou l'absence de certains éléments structurels et où la mise en place d'une réflexion sur les capacités serait très intéressante ; 3– les zones d'inégalités socio-écologiques utiles à la réflexion notamment dans le domaine des politiques publiques.

62 Revenons sur le premier point où l'on remarque tout d'abord qu'un ISPH élevé présente peu de coïncidence spatiale avec les zones d'aléa ou de danger : Saména et l'Escalette soumises à un aléa et un danger ont un ISPH faible ; les Goudes et La Grotte Roland ont un ISPH faible à moyen (indice < 0,12), tandis que Montredon, situé en lisière de l'aléa, possède un ISPH moyen à élevé (entre 0,12 et 0,84) et cumule ainsi les vulnérabilités[65]. Des quartiers méritent alors d'être pointés : certains concentrent des personnes à revenus moyens à élevés, mais la densité d'enfant de moins de cinq ans (surtout au niveau de la Grotte Roland et de Montredon) permet d'avancer qu'il serait intéressant d'y poursuivre un travail fin sur les pratiques du territoire. La cheminée rampante de l'ancienne usine de plomb de Montredon se situe en effet à quelque 200 mètres des habitations. Sont également concernées les populations peu sensibles habitant proche du littoral, à la fois dans des zones de possibles effets cocktails et proche des dépôts de déchets industriels nommés scories tels que Saména, L'Escalette et les Goudes. Finalement, les populations les plus sensibles ne représentent pas les populations les plus concernées par un danger élevé (superposition spatiale de trois éléments : cooccurrence de plomb et arsenic à une VCI sensible, présence de scories et friche industrielle), rejoignant ainsi la thèse développée par Beck (2008)[66]. Il serait également intéressant de mener des études sanitaires fines sur les secteurs où se trouvent les personnes habitant depuis plus de cinq ans et plus précisément dans certains secteurs du quartier de la Grotte Rolland et de Montredon, ainsi que les quartiers proches des dépôts de scories et des périmètres des anciennes usines de plomb tels que les Goudes ou l'Escalette. Ces zones possèdent-elles des facteurs aggravant leur vulnérabilité ou, au contraire, des capacités, permettant de réduire le risque ? Il apparait par exemple que le danger de pollution a été peu pris en compte dans le massif (Desrousseaux et Ugo, 2016) comme par exemple le quartier des Goudes où des habitations ont été construites sur le périmètre de l'ancienne usine de plomb. Par ailleurs, une étude a été initiée sur le site de l'Escalette dans le cadre du Projet SynTerCalM – à travers une enquête sociologique menée par Carole Barthélémy entre 2015 et 2017 (p. ex. Barthélémy, 2016) – montrant la difficile mise en relation entre la connaissance des sols pollués et leurs impacts potentiels sur la santé. Les habitants rencontrés n'estiment pas, pour leur grande majorité, vivre dans un environnement pouvant impacter leur santé, reflétant alors une vulnérabilité sociale toutefois contrebalancée par une capacité : le comportement de certains habitants modifiant leurs pratiques culturales pour éviter le transfert de polluants dans leurs plantations à visée alimentaire. Quant à la friche industrielle de Legré-Mante, à la Madrague de Montredon, la seule hors du périmètre du PNCal et dont la

fermeture est la plus récente (2009), des habitants inquiets se mobilisent face à un projet immobilier prenant place sur l'ancienne usine (Desrousseaux et Ugo, 2016 ; article paru dans la Marseillaise[67]). L'inquiétude porte sur la gestion de la pollution sur ce site pour la mise en place des futurs aménagements. Ce soulèvement des habitants constitue une capacité sociale, liée entre autres à une population dotée d'un capital social et culturel, ainsi qu'à une « *sensibilité aux questions sanitaires et environnementales* » héritée de leur trajectoire de vie (Olive, 2018).

63 La figure 9 montre également que les crèches et les maternelles ne sont pas localisées dans les zones de possible effet cocktail (c.-à-d. avec des concentrations en arsenic et plomb supérieures aux VCI sensibles), cependant la maternelle de la Madrague de Montredon se situe en lisière du polygone où les concentrations en plomb et en arsenic sont supérieures à la VCI sensible, là même où ont lieu les revendications. Tout comme la crèche halte-garderie parentale « Les petits lutins » au nord de la Cayolle localisée dans une zone d'aléa où les concentrations en arsenic et en plomb sont supérieures au VDSS[68] (cf. cartes des VDSS p. 217 dans Daumalin et Laffont-Schwob, 2016). Par ailleurs, les médecins et les vétérinaires se localisent au nord du massif, situé en périphérie des zones concernées par un potentiel risque sanitaire. Leur localisation permet d'avoir une idée de leur répartition en cas de signalement d'anomalie pathologique qui pourrait jouer un rôle de sentinelle. Toutefois, leur éloignement par rapport à la zone polluée ne permet pas de les considérer comme une réelle capacité.

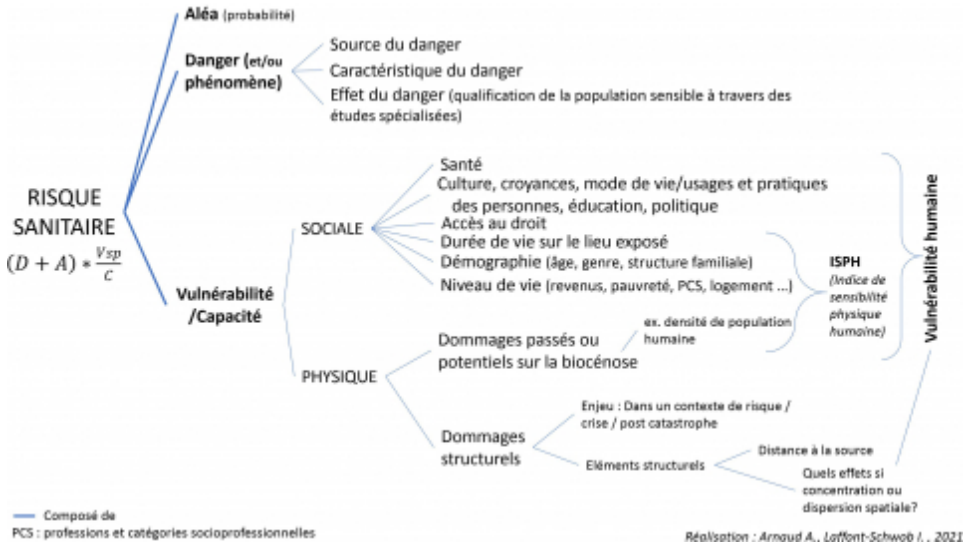
64 La figure 9 ouvre également une perspective d'analyse en termes d'inégalités socio-écologiques et plus précisément d'inégalités environnementales au sens de Deldrève et Candau (2014) appliquée à ce territoire à travers par exemple une relecture des travaux de Barthélémy (2016) et Olive (2018) qui montrent justement la discrétion des pouvoirs publics vis-à-vis de cette problématique. De plus, on constate dans les cartes de Arnaud et Desrousseaux (dans Desrousseaux et Ugo, 2016 – chapitre 2) que les secteurs identifiés en figure 9 comme sensibles demeurent peu ou pas ciblés par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), la BD BASOL et le PLU de Marseille comme des zones appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. Ces facteurs institutionnels et politiques aggravent alors la vulnérabilité de ces zones sensibles.

65 Cette dernière représentation spatiale permet d'obtenir une vision globale d'un probable risque sanitaire sur le massif de Marseilleveyre. La production de nouvelles données et de nouveaux traitements cartographiques pourrait être une suite dans cette analyse. Cependant, en l'état actuel de nos réflexions sur la notion de risque sanitaire, aller plus loin dans les traitements nuirait à la précision qu'offre la présente superposition. Cette opération mérite un temps de réflexion supplémentaire qui pourrait bien apparaitre dans l'axe de recherche d'un futur projet. Même si cette carte finale garde une grande marge d'évolution en termes de cartographie des zones les plus « à risque », la globalité de la méthodologie peut être maintenant présentée sous une forme générique.

Généralisation de la méthode de lecture sémantique et spatiale d'un risque sanitaire

66 La généralisation de cette méthode basée sur un choix de variables, l'accessibilité de leurs données, leur organisation puis leur spatialisation a pour objectif d'offrir un cadre général applicable pour n'importe quel autre risque sanitaire et ceci également sur d'autres territoires. Cette généralisation de la méthode a pour but de faciliter la réalisation d'une carte dédiée à une observation globale, même si non exhaustive, d'un risque sanitaire probable (Figure 10). Le calcul et la cartographie de l'ISPH superposé à la localisation des autres facteurs de risque présentent une base de réflexion étoffée pour cibler et interpréter les zones sensibles, mais également pour améliorer et adapter cette carte à d'autres domaines.

Figure 10. Variables à spatialiser pour une vision globale d'un risque sanitaire.



67 En effet, cette proposition pourrait également s'appliquer aux invasions biologiques telles que des moustiques sur le domaine terrestre ou encore des méduses sur le domaine marin, ou des plantes telles que des espèces végétales exotiques envahissantes ou des proliférations d'algues. Cette méthode de choix de variables et leur spatialisation ont aussi la possibilité de s'appliquer en épidémiologie à des problématiques liées à des agents infectieux tels que des virus, ou des molécules synthétisées par des organismes vivants telles que des allergènes. L'important est de contrôler la fiabilité des études du danger et des études sanitaires et environnementales permettant d'optimiser le choix des indicateurs en utilisant les bases de données INSEE, et des éléments structurels concernés par le danger au plus proche de la réalité. Leur choix réfléchi, notamment en examinant bien le contexte d'inscription de la problématique (risque, crise ou post-crise c'est-à-dire rétablissement), permettra ainsi de produire une image du risque sanitaire au plus proche de la réalité.

68 La force de cette méthodologie réside dans la possibilité de visualiser spatialement un maximum de variables liées à une notion bien complexe, le risque sanitaire. Cette approche basée sur des critères numériques et des seuils appliqués à l'échelle d'un territoire sans faire de discernement de pratiques ou d'usages dans un premier temps doit cependant être mise en regard des variables qualitatives telles que la capacité sociale (le comportement des individus/groupes utilisant des ressources propres pour se protéger d'un risque) ou la vulnérabilité sociale (le comportement à risque de certains groupes ou individus). L'intégration de ces variables permet une réflexion plus objective pour une meilleure gestion du risque sanitaire sans inquiéter toute la population du territoire considéré en se focalisant sur les personnes les plus concernées. Il s'agit d'une forme d'économie dans la façon de gérer ce type de risque. Les politiques de prévention des risques sanitaires devraient ainsi tenir compte de certaines populations lors de leurs prises de décision en termes de santé, d'environnement, d'aménagement et d'urbanisme. Dans ce sens, Picheral, dès 1995, propose dans ses travaux la mise en œuvre d'une « politique prédictive de santé publique ».

Conclusion

69 Tendre vers une carte qui représente un risque sanitaire impose plusieurs étapes. Premièrement, à partir des recherches sur les notions qui gravitent autour du « risque », nous proposons une définition complète de « risque sanitaire » intégrant, en plus de l'approche en géographie de la santé, écotoxicologie et épidémiologie, les variables d'aléa, de vulnérabilité physique et sociale et de capacité empruntées à la géographie des risques. Cet enrichissement nous apporte la possibilité de regarder la notion dans sa globalité en y ajoutant une visualisation à moyenne échelle de la population sensible, avec la création d'un Indice de sensibilité physique humaine (ISPH), et d'éléments à enjeux tels que les bâtiments de santé, liés à l'éducation ou les Établissements recevant du public (ERP).

70 À partir de la localisation des friches industrielles d'après archives, de la mesure des Éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) dans le sol de surface, d'études sanitaires et des données démographiques produites par l'INSEE ayant permis le calcul de l'ISPH, cet

article éclaire sur la nécessité d'intégrer certaines variables, qui, une fois spatialisées, permettent de cibler des zones sensibles à un potentiel risque sanitaire. Cette spatialisation des différents éléments constitutifs du concept de risque sanitaire sur le massif de Marseilleveyre permet dans un premier temps de mieux connaitre le territoire ciblé, et donc d'augmenter la prise de recul sur les critères décisionnels. Cette carte dévoile en effet un certain nombre d'éléments. Par exemple, les personnes les plus concernées par l'aléa et le danger sont plutôt des personnes à ISPH moyen à faible s'éloignant ainsi de la thèse du cumul des vulnérabilités et ne rejoignant ainsi pas complètement les théories sur la justice environnementale. L'effort sera donc à porter sur des éléments particulièrement sensibles tels que des éléments liés à l'enfance parfois localisés dans des zones très exposées aux pollutions et fréquentées par des enfants venant de carrés à ISPH élevé générant ainsi un cumul de vulnérabilités. Ce type de carte pourrait donc devenir un outil d'aide à la décision.

71 Cette recherche aurait également pu s'étendre vers la représentation de la sensibilité physique à travers le temps avec les données historiques sur le nombre d'ouvriers dans les usines et leur origine (à partir des données collectées par Daumalin et Raveux, 2016), ainsi que l'extension récente de l'urbanisation qui montrerait un déplacement de la vulnérabilité au sein du même massif. Ce déplacement est d'ordre social, il ne touche plus les ouvriers, mais toutes les classes sociales (Figure 7 d sur les bas revenus). Cette vulnérabilité tend à affecter de plus en plus les classes les plus aisées au vu des projets immobiliers qui s'étendent jusqu'en lisière du territoire du PNCal.

72 Enfin, cette approche du risque sanitaire potentiel peut être utile au Plan régional en santé environnement (PRSE) puisque le « Plan national santé environnement (PNSE) qui constitue un cadre de programmation de l'action gouvernementale à travers l'identification d'actions à engager [vise] à prendre en compte la santé environnementale dans les politiques publiques de façon pérenne. La réduction des expositions responsables de pathologies à fort impact sur la santé et des inégalités environnementales constitue deux axes structurants du PNSE 3. Chaque région devra sélectionner, au regard des enjeux spécifiques sur son territoire, les actions qui répondent aux préoccupations majeures de santé environnementale de la population locale. Cette analyse aboutira à l'élaboration de PRSE 3 dont l'une des actions est de caractériser les inégalités environnementales en vue de définir les priorités d'une future politique publique de réduction des expositions » (INERIS, 2016). Cette recherche peut également servir la réflexion de la mission Évaluation des risques sanitaires (ERS) : « L'ERS permet d'estimer l'impact sanitaire d'une situation passée ou projetée, en vue de mettre en place des mesures de gestion adaptées (prévention, prise en charge sanitaire…) » (Host et *al.*, 2006).

Remerciements

73 Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir A*MIDEX portant la référence n° ANR-11-IDEX-0001-02. Les auteurs remercient le consortium du projet Marséco (CESA 018) financé par l'Agence nationale de la Recherche (ANR) de 2008 à 2013 pour l'accès à la base de données biogéochimiques sur les concentrations en ETMM des sols de surface sur le massif de Marseilleveyre.

74 Nous remercions les chercheurs du projet SynTerCalM dont les résultats et discussions ont permis d'alimenter cet article et plus particulièrement les relecteurs de cet article : Xavier Daumalin et Olivier Raveux.

75 Tous nos remerciements à Nicolas Fabre et Romain Reynier, ingénieurs cartographes, pour leur aide précieuse, pour la réalisation de l'ensemble des cartes du projet SynTerCalM.

Bibliography

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2013, Sites pollués du littoral sud de Marseille. Secteur Mont Rose – Callelongue. Réunion publique. Présentation de Marot F. et C. Regnaut, 41 diapos, [en ligne] URL : http://marseco.imbe.fr/colloque/12042013/ADEME%20sur%20Calanques.pdf.

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2016, PCAET – Plan Climat-Air-Énergie Territoire. Comprendre, construire et mettre en œuvre. Clé pour agir, 87 p.

Affholder, M.C., 2013, Approche des mécanismes de tolérance du romarin aux éléments traces métalliques et métalloïdes : perspectives pour une phytostabilisation des sols méditerranéens pollués. Thèse de doctorat en Chimie de l'environnement. (Dir. Pascale Prudent et Bruno Coulomb) Aix-Marseille Université, Marseille, 288 p.

Affholder, M.C., A.-D. Pricop, I. Laffont-Schwob, B. Coulomb, J. Rabier, A. Borla, C. Demelas, P. Prudent, 2014, As, Pb, Sb and Zn transfers from soil to root of wild rosemary : do native symbionts matter ?, *Plant and Soil*, vol. 382, No. 1/2 (September 2014), pp. 219-236.
DOI : 10.1007/s11104-014-2135-4

Affholder, M.C., P. Prudent, V. Masotti, B. Coulomb, J. Rabier, B. Nguyen-The, I. Laffont-Schwob, 2013, Transfer of Metals and Metalloids from Soil to Shoots in Wild Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Growing on a Former Lead Smelter Site : Human Exposure Risk, *Science of The Total Environment* (June 2013), 219–29, pp. 454–455.

AirMaraix, 2003, Particules et métaux lourds sur le site de l'Escalette (Marseille). Campagne de mesures temporaires. Réf dossier : 02-06-mesure-goudes métaux lourd-dr-LP08, 38 p.

Arnaud, A., 2015, La ville industrielle : un territoire désirable. Exemple de la commune de Gardanne (Bouches-du-Rhône). 4ème Rencontres scientifiques internationales de la cité des territoires : Habitable, Vivable, Désirable, 25-26-27 mars 2015, Grenoble.

Arnaud, A., 2009, Valorisation de l'information dédiée aux événements de territoires à risque. Une application cartographique et géovisualisation de la couronne grenobloise. Thèse en Géographie sociale, Dir. Gumuchian H. et Davoine P.A., Université Joseph Fourrier, Grenoble, 500 p.

Agence régionale de santé (ARS), 2011, Intoxication au plomb, Prévention, Dépistage et Prise en charge de l'enfant et de la femme enceinte. Rapport réalisé par le Comité Départemental d'Éducation pour la Santé des Bouches-du-Rhône (CoDES 13), Juillet 2011, 35 p.

Ashraf, S., F.Abbas, M. Ibrahim, U.Rashid, S.Khalid, HR.Ahmad, KR.Hakeem, T.Majeed, 2015, Application of GIS for the Identification and Demarcation of Selective Heavy Metal Concentrations in the Urban Groundwater, *Journal of Geographical Sciences* 25, n. 2, 225–35, 11 p.

Badot, P-M., 2011, L'évaluation de la toxicité des mélanges est-elle un défi impossible ? Archives des Maladies Professionnelles et de L'Environnement, Elsevier Masson, 72 (6), pp. 600-612.

Barles, 1993, La pedosphere urbaine : le sol de paris, xviii éme-xx éme siecles, Thèse de doctorat sous la direction de André Guillerme – Marne-la-vallée.

Barthelémy C., 2016, La prise en charge publique contemporaine des sites pollués dans les calanques, dans : Les Calanques industrielles de Marseille et leurs pollutions : une histoire au présent. Dir. Daumalin X. et Laffont-Schwob I., pp. 2 51-289.

Bertin, J., 1967, Sémiologie graphique : les diagrammes, les réseaux, les cartes. École des hautes études en sciences sociales (EHESS). Paris. 431 p.

Beck, U., 2008, La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité. Éditions Champs essai, 500 p.

Bourrelier, P- H, G. Deneufbourg, J.Grassin, P.Huet, B. de Vanssay, J.-D. Vazelle, 1997, La prévention des risques naturels. Rapport de l'instance d'aluation – Premier Ministre – Commissariat général du Plan – Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques. La Documentation Française, 700 p.

Burton, I., RW. Kates, GF. White, 1978, The Environment as Hazard. New York : Oxford University Press, 240 p.

Cauvin C., F. Escobar, A. Serradj, 2007, Cartographie Thématique 2, des transformations incontournables. Hermes Science, Lavoisier, Paris, 260 p.

Claeys, C., A. Hérat, C. Barthélémy, V. Deldrève, 2016, Quand les Calanques deviennent Parc National : disputes autour de la définition et de la répartition des efforts environnementaux et urbains induits, *Norois*, 238-239, (1), pp. 71-84.
DOI : 10.4000/norois.5871

Counil, E., E. Henry, 2016. Produire de l'ignorance plutôt que du savoir ?, *Travail et Emploi*, 148, 5-29.
DOI : 10.4000/travailemploi.7347

Daumalin, X., I. Laffont-Schwob, 2016, Les Calanques industrielles de Marseille et leurs pollutions : une histoire au présent. Xavier Daumalin et Isabelle Laffont-Schwob (dir.), édition REF.2C, Aix-en-Provence, 336 p.

Daumalin, X., O. Raveux, 2016, Un territoire marqué par les pollutions. In Les Calanques industrielles de Marseille et leurs pollutions : une histoire au présent. Dir Daumalin X. et Laffont-Schwob I., édition REF.2C, Aix-en-Provence, pp. 131-204.

Daumalin, X., I. Laffont-Schwob, O. Raveux, 2016, La construction de l'ignorance ou l'occultation du passé industriel des calanques de Marseille-Cassis, *Lettre de l'InSHS*, N. 44, novembre 2016, INSHS CNRS, Paris, pp. 30-31

Dauphiné, A., 2001, Risques et catastrophes – Observer – Spatialiser – Comprendre – Gérer, Armand et Colin, Paris. 290 p.

DOI : 10.3917/arco.dauph.2013.01

Dauphiné, A., D. Provitolo, 2007, La résilience : un concept pour la gestion des risques, *Annales de géographie*, 2007/2 n° 654, pp. 115 à 125.
DOI : 10.3917/ag.654.0115

Decrop, G., Charlier C., 1995, De l'expertise scientifique au risque négocié : vers des scènes locales du risque ?, *Futur Antérieur*, Grenoble, Cemagref, 48 p.

Delahaie, S., 2007, Impact de la nouvelle politique des sites et sols pollués sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux. Étude d'un cas concret : le réaménagement d'une friche industrielle. Mémoire ENSP et ICF Environnement, Dir. Paradis K. et Bard D., 95 p.

Deldrève, V., J. Candau, 2014, Produire des inégalités environnementales justes ?, *Sociologie*, vol. 5 n. 3, p. 255-269, DOI : 10.3917/socio.053.0255
DOI : 10.3917/socio.053.0255

Deldrève, V., A. Hérat, Des inégalités garantes de la protection des Calanques ?, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 12 Numéro 2, septembre 2012, URL : http://journals.openedition.org/vertigo/12700 ; DOI : https://doi.org/10.4000/vertigo.12700
DOI : 10.4000/vertigo.12700

D'Ercole, R., J.C. Thouret, O. Dollfus, J.P. Asté, 1994, Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de géographie alpine*, tome 82, n. 4, pp. 87-96.
DOI : 10.3406/rga.1994.3776

D'Ercole, R., J-C Thouret, J-P Aste, O. Dollfus, A.Gupta, 1995, Croissance urbaine et risques naturels : présentation introductive. *Bulletin de l'Association de géographes français, Association des Géographes Français*, pp. 311-338.

D'Ercole, R., P. Metzger, 2009, La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. Territorial vulnerability : a new approach of risks in urban areas, *CyberGeo,* [En ligne] URL : http://cybergeo.revues.org/22022

Desrousseaux, M., E. Ugo, 2016, Analyse juridique de la pollution diffuse du massif de Marseilleveyre, Valérie Mercier (dir.), avec la participation de Arnaud A., Presses Universitaires d'Aix-Marseille Presses Universitaires d'Aix-Marseille, 164 p.

Direction générale de la santé (DGS)/sous la direction de la gestion des risques des milieux et des pathologies de la santé, 2002, Les effets du plomb sur la santé, 6 p., [En ligne] URL : http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/effetsplombsante.pdf

Douglas, M., A. Wildavsky, 1983, Risk and culture : An essay on the selection of technological and environmental dangers, University of California Press, 224 p.

Douglas, M., 2003, Purity and Danger : An Analysis of Concepts of Pollution and Taboo, Routledge-London, 272 p.

Dorier-Apprill, E., 1993, Environnement et santé à Brazzaville, Congo : de l'écologie urbaine à la géographie sociale, Thèse en Géographie, Paris 10, 668 p.

Dorier-Apprill, E., 1995, Pour une géographie du pluralisme thérapeutique dans les grandes villes d'Afrique noire, *Espace, populations, sociétés. La géographie de la santé en question*, pp. 135-141.
DOI : 10.3406/espos.1995.1681

Ewald, F., 1986, L'État providence, Paris, Grasset, 610 p.

Frangi, J-P., D. Richard, 1997, Heavy metal soil pollution cartography in northern France. *Science of the Total Environment* 205, pp. 71-79
DOI : 10.1016/S0048-9697(97)00184-8

Frioux, S., M. Canavese, 2019, Les sols pollués, un risque discret ? Le cas de l'agglomération lyonnaise. *Écologie & politique : sciences, culture, société, Le bord de l'eau*, éditions/ Presses de Sciences Po/ Syllepses/ Ecopresse, pp. 53-68.

Glatron, S., 2004, Le citoyen et le politique dans la gestion urbaine des risques majeurs, *Écologie & politique*, 2 (2), pp. 85-98.
DOI : 10.3917/ecopo.029.0085

Grasland, C., G. Hamez, 2005, Vers la construction d'un indicateur de cohésion territoriale européen ? *L'Espace géographique*, tome 34, (2), pp. 97-116.

Goix, S., M. Periot, K. Douib, 2018, Étude d'imprégnation de la population aux polluants atmosphériques de la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 296 p.

Haute autorité de santé (HAS), 2020, Service des bonnes pratiques professionnelles Dépistage, prise en charge et suivi des personnes potentiellement surexposées à l'arsenic inorganique du fait de leur lieu de résidence. [En ligne] URL : https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2020-03/reco_arsenic.pdf

Haut conseil de la santé publique (HCSP), 2017, Mise à jour du guide pratique de dépistage et de prise en charge des expositions au plomb chez l'enfant mineur et la femme enceinte. Rapport final, 62 p.

Hervouët, J- P., A. Prost, 1979, Organisation de l'espace et épidémiologie de l'onchocercose, in J. – Y.

Marchal (éd.), Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale, Mémoire, ORSTOM, n° 89, pp. 179-189.

Holling, C.S., 1973, Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 4 , pp. 1-23.
DOI : 10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Host, S., J.P. Camard, A. Franconi et A. Lefranc, 2006, L'évaluation des risques sanitaires : principe et méthode. Observatoire régional de la santé d'Ile de France édition, Collection Méthode en environnement et santé, Paris, 6 p.

Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), 2010, Arsenic et ses dérivés inorganiques. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Experts : B. La Rocca, N. Houeix, S. Andres, 124 p.

Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), 2016, Retour d'expérience des travaux de caractérisation des inégalités environnementales réalisés en région, Rapport d'étude réalisé pour le Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. INERIS – DRC-09-103112-11453A. Version n. 4 – 2010. 52 p.

Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), 2009, Point sur les valeurs toxicologiques de référence (VTR). Mars 2009, [En ligne] URL : http://www.ineris.fr/centredoc/vtr.pdf

Kermisch, C., 2011, Le concept de risque. De l'épistémologie à l'éthique. Paris : Lavoisier, 96 p.

Laffont-Schwob, I., A. Heckenroth, J. Rabier, V. Masotti, B. Oursel et P. Prudent, 2016, Une pollution présente diffuse et étendue. In Les Calanques industrielles de Marseille et leurs pollutions : une histoire au présent, Dir Daumalin X. et Laffont-Schwob I., édition REF.2C, Aix-en-Provence, pp. 206-249.

Laffont-Schwob, I., X Moreau, V Masotti, C.Di Giorgio, L. De Jong-Moreau, J. Rabier, M. De Méo, C. Martin-Chauvin, L. Sarrazin, F. Rousset et A. Thiéry, 2009, Outils décisionnels dans la gestion des pollutions accidentelles des cours d'eau : vers des solutions écologiquement durables. *Ingénieries*, n. Spécial 200, 10 p.

Lambert, M-L., C. Clayes et A. Arnaud, 2017, Vulnérabilité économique et sociale, facteur d'invisibilité des risques ?, *RISEO* 2017-2. Les risques invisibles, pp. 97-116, [En ligne] URL : https://fr.calameo.com/read/005049066fa9bf1a01289

Lasalle, J.L., 2007, Présence de plomb et d'arsenic sur le littoral sud de Marseille : une étude de santé (juillet 2005), Rapport InVS, 44 p.

La chaîne de Marseille (LCM), (chaine TV sud – la grande émission), 2011, Propos de Thierry Garcia habitant du quartier et de « connexion immobilier » [En ligne] URL : https://www.youtube.com/watch ?v =YPPqWiAX90o et https://www.youtube.com/watch ? v =XPla8pTNGRs

Leone, F., J.-P. Asté et E. Leroi, 1996, L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains : pour une meilleure quantification du risque, *Revue de géographie alpine*, tome 84, n. 1, pp. 35-46.

Li, K., T. Liang, L. Wang et Z. Yang, 2015, Contamination and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust in Bayan Obo Mining Region in Inner Mongolia, North China, *Journal of Geographical Sciences* 25, n. 12, 1439–51. 13 p.
DOI : 10.1007/s11442-015-1244-1

Lutoff, C., 2000, Le système urbain niçois face à un séisme. Analyse des enjeux et des fonctionnements potentiels, Thèse de doctorat, Université de Chambéry, 400 p.

Lysaniuk, B., 2009, Le risque grippal en France métropolitaine : étude géographique d'un risque sanitaire saisonnier, Thèse en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne – Paris I, 389 p.

Marséco, 2012, Biodiversité et pollution en zone littorale marseillaise : comprendre les risques pour les écosystèmes et l'homme. Les cahiers de l'ANR-Contaminants et environnements : constater, diffuser, décider, n. 6, p. 94

Massard-Guilbaud, G, 2010, Histoire de la pollution industrielle. France, 1789-1914, Paris, Éditions de l'EHESS.

Mathieu, J-P., 1991, Dictionnaire de physique, Paris, Masson, 567 p.

Méha, C., V. Godard, B. Moulin et H. Haddad, 2012, La borréliose de Lyme : un risque sanitaire émergent dans les forêts franciliennes ?, *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, document 601, 24 p.
DOI : 10.4000/cybergeo.25285

Ménard, B., 2002, Questions de géographie de la santé., *L'Espace géographique*, tome 31, (3), pp. 264-275

Moriniaux, 2003, Les risques, extrait de La Cliothèque, Ouvrage collectif des questions de géographie, 4 p.

Multigner, L., P. Kadhel, F. Rouget, P. Blanchet et S. Cordier, 2016, Chlordecone exposure and adverse effects in French West Indies populations , *Environmental Science and Pollution Research*, Springer Verlag, 23 (1), pp. 3-8.
DOI : 10.1007/s11356-015-4621-5

November, V., 2002, Les territoires du risque : le risque comme objet de réflexion géographique, Editeur : Berne, Peter Lang.

Obrist, B., 2006, Risque et vulnérabilité dans la recherche en santé urbaine, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Hors-série 3, URL : http://journals.openedition.org/vertigo/1483 ; DOI : https://doi.org/10.4000/vertigo.1483
DOI : 10.4000/vertigo.1483

Olive, M., 2018, Du trouble privé au problème public ou… l'inverse ? Mobilisation locale autour d'un site industriel pollué, *Géocarrefour,* 92/2, [En ligne] URL : https://journals.openedition.org/geocarrefour/11815
DOI : 10.4000/geocarrefour.11815

Ogé, F., 1999, Les recherches sur les sites potentiellement pollués en région Rhône-Alpes/Research on potentially polluted sites in the Rhône-Alpes region, *Revue de géographie de Lyon*, vol. 74, n. 3, Industrie et environnement, pp. 217-223
DOI : 10.3406/geoca.1999.4963

Organisation mondiale de la santé (OMS), 2017, Intoxication au plomb et santé. Aide-mémoire OMS, n° 379. Aout 2017, 4 p.

Organisation des Nations unies (ONU), 1992, Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la Gestion des Catastrophes. Nations Unies, Département des affaires Humanitaires, ONUG/DHA, Gestion des catastrophes (ESF), 83 p.

Organisation des Nations Unies (ONU), 2002, « Disaster Reduction for Sustainable Mountain Development », UN/ISDR 2002. [En ligne] URL : https://www.unisdr.org/2002/campaign/pa-camp02-kit-eng.htm#n1

Pascal, L., 2009, Effets à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité, *Revue française d'allergologie* 49, n. 6, pp. 466-476.
DOI : 10.1016/S0761-8425(09)71597-9

Pascal, L., M. Pascal, M. Stempfelet, S. Goria, C. Declercq, 2013, Ecological Study on Hospitalizations for Cancer, Cardiovascular, and Respiratory Diseases in the Industrial Area of Etang-de-Berre in the South of France, *Journal of Environmental and Public Health*, Article ID 328737, 13 p.
DOI : 10.1155/2013/328737

Peretti-Watel, P, 2010, La société du risque, La Découverte, 128 p.

Pichard, A., 2004, BRGM-INERIS. Arsenic – Impact sur la santé, Présentation à la journée d'échange BRGM du 23 novembre 2004, 30 diapos.

Picheral, H., 1982, Géographie médicale, géographie des maladies, géographie de la santé », *L'Espace géographique*, 11 (3). Pp. 161-175.

Picheral, H., 1983, Complexes et systèmes pathogènes : approche géographique, De l'épidémiologie à la géographie humaine. Travaux et documents de géographie tropicale, n. 48, pp. 5-22.

Picheral, H., 1995, Le lieu, l'espace et la santé. *Espace, populations, sociétés*. La géographie de la santé en question, pp. 19-24.

Pigeon, P., 2005, Géographie critique des risques, Edition Anthropos, 230 p.

Pilon-Smits, E.A.H., 2005, Phytoremediation, Annual Review of Plant Biology 56, pp. 15-39.
DOI : 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214

Rasse, G., 2009, Les plans de prévention des risques technologiques au prisme de la vulnérabilité. Le point de vue du juriste, *Sciences de l'ingénieur [physics]*, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 327 p.

Reis, A., C. Patinha, Y. Noack, S. Robert, A. Dias et E. Ferreira da Silva, 2014, Assessing the human health risk for aluminium, zinc and lead in outdoor dusts collected in recreational sites used by children at an industrial area in the western part of the Bassin Minier de Provence, France, *Journal of African Earth Sciences*, 99, pp. 724–734
DOI : 10.1016/j.jafrearsci.2013.08.001

Rémy, E., P. Branchu, M. Canavese et N. Berthier, 2017, Les risques sanitaires liés aux jardins collectifs : l'expertise sur le sol urbain en débat, *Lien social et Politiques* [En ligne], (78), pp. 49–69, URL : https://doi.org/10.7202/1039338ar
DOI : 10.7202/1039338ar

Reynier, R., 2015, La pollution des sols par éléments traces métalliques : le cas du massif de Marseilleveyre, Mémoire de Master 2 Géographie « Structures et Dynamiques Spatiales » à Aix-Marseille Université, 96 p.

Salem, G., 1995, Géographie de la santé, santé de la géographie, *Espace, populations, sociétés*, 1995-1. La géographie de la santé en question, pp. 25-30.

Sen, A., 2000, Un nouveau modèle économique : développement, justice, liberté, 368 p

Setbon, M., 2000, Les Risques Sanitaires, *Médecine/sciences*, 16, n. 1203–6, 4 p.

Slovic, P., B. Fischhoff et S. Lichtenstein, 1982, "Why Study Risk Perception ?" Risk Analysis 2, n. 2 (June 1982), pp. 83–93.
DOI : 10.1111/j.1539-6924.1982.tb01369.x

Slovic, P., E.U. Weber, 2002, Perception of risk posed by extreme events, Conference “Risk Management strategies in an Uncertain World,” Palisades, New York, April 12-13, 21 p.

Sorre, M., 1933, Complexes pathogènes et géographie médicale, *Annales de géographie*, vol. 42, n. 235, pp. 1-18.

Sy, I., M. Koita, D. Traoré, M. Keita, B. Lo, M. Tanner et G. Cissé, 2011, Vulnérabilité sanitaire et environnementale dans les quartiers défavorisés de Nouakchott (Mauritanie) : analyse des conditions d’émergence et de développement de maladies en milieu urbain sahélien, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 11 Numéro 2, URL : https://journals.openedition.org/vertigo/11174

SynTerCalM, 2014-2017, Interdisciplinarity Project Report, Dir I. Laffont-schwob, 22 p.

Taylor, D.E., 2000, The rise of the environmental justice paradigm. Injustice framing and the social construction of environmental discourses, *American Behavioral Scientist*, 43, 4, pp. 508-580.
DOI : 10.1177/00027640021955432

Testiati, E., J. Parinet, C. Massiani, I. Laffont-Schwob, J. Rabier, H. R. Pfeifer, V. Lenoble, V. Masotti, P. Prudent, 2013, Trace metal and metalloid contamination levels in soils and in two native plant species of a former industrial site : evaluation of the phytostabilization potential, *Journal of Hazardous Material*, 248-249, pp. 131-141.
DOI : 10.1016/j.jhazmat.2012.12.039

Thouret, J-C, R. D’Ercole, 1996, Vulnérabilité Aux Risques Naturels En Milieu Urbain : Effets, Facteurs et Réponses Sociales, *Cahiers Des Sciences Humaines*, ORSTOM 32, no. 2, pp. 407-422.

Veyret, Y., 2001, Géographie des risques naturels, *L’information géographique*, volume 66, n° 3, p. 288.

Wang, L., Z. Guo, X. Xiao, T. Chen, X. Liao, J. Song, B. Wu, 2008, Heavy Metal Pollution of Soils and Vegetables in the Midstream and Downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province, *Journal of Geographical Sciences,* 18, n. 3, 353–62, 10 p.
DOI : 10.1007/s11442-008-0353-5

Wisner, B., J.C. Gaillard et I. Kelman, 2012, Handbook of Hazards and Disaster Risk Reduction, Routledge, London, 880 p.
DOI : 10.4324/9780203844236

White, GF., JE. Haas, 1975, Assessment of research on natural hazards. Massachusetts Institute of Technology Press, 487 p.

Zanetti, T., 2018, La pollution des sols dans les territoires (post) industriels : la Résilience entre norme institutionnelle et cadre de lutte socio-environnementale, *Géocarrefour*, 92/2, [En ligne] URL : https://journals.openedition.org/geocarrefour/11744

Zook, B-C., R. M. Sauer, F.M. Garner ,1972, Lead poisoning in captive wild animals, *Journal of Wildlife Diseases,* 8, no. 3 (July 1972), pp. 264–272.
DOI : 10.7589/0090-3558-8.3.264

Notes

1 « On entend par “pollution diffuse” toute pollution dont l’origine ne peut être localisée en un point précis, mais procède d’une multitude de points non dénombrables et répartis sur une surface importante » : Arrêté du 17 juillet 2009 relatif aux mesures de prévention ou de limitation des introductions de polluants dans les eaux souterraines.

2 La géographie des risques est celle qui tente de comprendre la relation « risque – territoire ». Elle se fonde sur la répartition des risques dans l’espace (diffus, concentrés, en réseau, territorialisés). Ce travail s’inscrit dans plusieurs approches, celle de Veyret (2001) qui catégorise les risques « naturels, technologiques, sociaux », et une approche développée par November (2002), permettant de contourner des difficultés théoriques, qui se fonde sur « l’articulation des notions de réseau et de territoire, sur la prise en compte de l’hétérogénéité des risques (phénomènes sociaux, politiques, environnementaux, etc. » ; permettant de ne pas séparer le couple nature/culture), et sur la notion d’acteur-réseau (Glatron, 2004). D’autres approches, plus spécifiques, telles que l’étude du couple “vulnérabilité – territoire” (D’Ercole et *al.*, 1994) s’inscrivent et marquent la géographie des risques. De nombreux auteurs incontournables s’inscrivent dans ces approches et sont cités tout au long de cet article.

3 La géographie de la santé est « l’étude spatiale de la qualité de la santé dans ses relations avec l’environnement physique, biologique, socio-économique, comportementale et culturel » (Picheral, 1982) ; « la géographie de la santé demeure à l’intersection d’un champ social et d’un champ écologique, exprimant diverses relations de communautés humaines avec des milieux physiques et anthropiques » (Ménard, 2002).

4 [En ligne] URL : https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/basias

5 BASOL : base de données présentant les sites appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif, [en ligne] URL : https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/basol

6 Les ministères successifs liés à l’environnement ont repris le concept de risque et l’ont largement

développé sur la base de travaux scientifiques à partir des années 1990 et surtout depuis la loi Barnier, en 1995. Les services techniques de l'État ou déconcentrés tels que les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), Directions départementales des territoires et de la mer (DDTM), Établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), communes, etc., se sont alors adaptés en créant des services spécifiquement dédiés au risque ou couplés à l'urbanisme.

7 Le concept de risque climatique est récent. Il reprend les concepts d'aléa, de vulnérabilité et de risque et y ajoute l'exposition selon l'équation suivante : Aléa x Exposition x Vulnérabilité = Risque (source 2017 : centre de ressources pour les plans climats-air-énergie territoriaux : http://www.territoires-climat.ademe.fr/content/les-concepts-de-risques-climatiques-et-d'impacts).

8 Danger x Exposition des organismes vivants au danger = Risque. Comme pour le risque naturel, s'il n'y a pas de danger ou pas de population exposée, le risque n'existe pas.

9 Reis et *al.* (2014) étudient par exemple un risque sanitaire tel que défini « danger x exposition » sur le territoire de l'OHM-BMP (Observation Homme Milieu Bassin Minier de Provence) : avec la description du danger à travers « l'identification des principales sources et des voies de l'exposition humaine aux PHE [Potentially Harmful Elements]… » et plus précisément l'interprétation de « résultats des tests de bioaccessibilité orale pour Al, Zn et Pb dans les poussières », et l'évaluation de l'exposition potentielle (« risque non cancérigène pour les enfants tout en jouant à l'extérieur », car « l'exposition cutanée est la plus susceptible de se produire par contact avec des surfaces, des sols, des poussières, des liquides et de l'eau contaminés chimiquement »).

10 Les « expositions, susceptibles de provoquer des maladies, n'induisent pas des pathologies qui leur sont spécifiques, dans la mesure où d'autres facteurs liés aux comportements des individus (tabac, alcool) ou aux antécédents génétiques peuvent en être la cause. Par ailleurs, ces maladies se manifestent chez les individus généralement longtemps après leur contact avec le ou les agent(s) dangereux. Il n'est donc pas aisé de relier avec certitude un facteur environnemental et un effet sanitaire » (Host et *al.*, 2006).

11 Pour Ménard (2002) « la géographie de la santé vise à mettre en perspective des déterminants naturels et sociaux des états de santé en des lieux donnés, et affine ainsi la détection de groupes à risque par de strictes localisations. Le système de santé correspond à un ensemble de pratiques sociales qui traduisent en leur espace des profils sanitaires spécifiques. »

12 Dans ce cas, l'aléa est le virus en considérant son échelle de cycle de vie, sa récurrence et son emprise spatiale.

13 Pour Meha et *al.* (2012), le risque sanitaire se définit par l'aléa. Dans le cas de la maladie de Lyme, il s'agit de la probabilité d'être piqué et l'abondance du taux d'infection du vecteur, la tique.

14 Au 17e siècle, la loi mathématique Poisson permet de calculer la probabilité d'un nombre d'accidents en fonction du nombre moyen d'accidents observé sur une période (Peretti-Watel, 2010). Mais la loi Poisson purement chiffrée montre vite ses limites, ne prenant pas en compte un certain nombre de paramètres d'ordre géographique, démographique, politique, sociologique ou psychologique.

15 Probabilité de transformation d'un aléa en un phénomène naturel réel.

16 ONU, 1992 : « Le risque et les menaces majeurs sont la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou humaine, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et mettre en péril le fonctionnement de la société ».

17 La notion de « capacité » peut se distinguer de celle de résilience. Dans les sciences humaines et sociales elle fait référence à la mise en œuvre d'actions par les acteurs locaux (dont les habitants) permettant de diminuer leur vulnérabilité (Sen, 2000) tel un régime alimentaire ou un potager hors sol. La capacité devient alors l'inverse de la vulnérabilité. C'est ce sens même que nous retiendrons pour cet article.

18 ONU, 2002 : Risk = (Hazard (H) x Vulnerability (V))/Capacity (C).

19 Cette notion est polysémique, définit au départ par les sciences physiques comme une « mesure de la capacité d'un objet à retrouver son état initial après un choc ou une pression continue » (Mathieu, 1991) ; puis reprise par les écologues (Holling, 1973) définissant un écosystème résilient comme capable d'absorber les effets d'une perturbation. Enfin, la géographie présente la résilience de la manière suivante : « toute catastrophe est assimilable à un système dynamique » et la résilience se traduit par un temps de retour à la « normale » et une vitesse nécessaire pour retrouver l'équilibre. On peut mesurer inversement la persistance (Dauphiné et Provitolo, 2007).

20 Bien que dans Pigeon (2005), l'approche « aléa-vulnérabilité » soit critiquée, nous ne pouvons y échapper dans notre application aux sols pollués. Pigeon préfère en effet une approche systémique partant de l'« endommagement socialement reconnu » (p.147). Cependant, cette approche n'est pas applicable dans notre cas compte tenu de l'incertitude d'un endommagement difficile à estimer (notamment à cause des effets cocktails entre polluants). Les « témoignages de dommages », point de départ du raisonnement de Pigeon, se révèlent peu exploitables dans ce genre d'étude, car incomplet et/ou en cours (Barthélémy, 2016). Quant à « l'information accessible », elle est dans notre cas trop partielle (sur l'état de santé des personnes localement, il n'existe pas d'études épidémiologiques réalisées sur notre zone). Il est alors difficile de croiser ces données et de s'inscrire dans cette approche systémique très pertinente dans le cadre d'autres risques.

21 Par exemple, un danger à cinétique rapide affectera une population différente de celle atteinte par

un événement à cinétique lente.

22 Lorsqu'un phénomène atteint des enjeux et que la gestion de ces derniers en local devient problématique, les autorités sont obligées d'intervenir pour gérer et limiter les dommages : c'est la crise.

23 Il s'agit d'un phénomène ayant atteint de nombreux éléments exposés à enjeux transformant ainsi un événement mineur en événement catastrophique, que l'on nomme une catastrophe et dont on peut quantifier des dégâts suffisamment importants pour marquer les mémoires.

24 Le coût d'endommagement est largement développé en géographie des risques (Bourrelier et *al.*, 1997 ; Léone et *al.*, 1996 ; Ewald, 1986). Utilisée également en géographie de la santé, la notion de « vulnérabilité sanitaire » apparait dans des articles sur la santé urbaine, appliquée aux risques urbains (p. ex. Sy et *al.*, 2011 ; Obrist, 2006).

25 Un héritage culturel peut par exemple être considéré comme une vulnérabilité s'il s'agit par exemple de manger certaines parties d'animaux concentrant de la radioactivité, ou comme une capacité s'il s'agit de mobiliser ses connaissances et d'emprunter certaines routes pour éviter les avalanches.

26 Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

27 Cette « considération » rejoint la notion d'acceptabilité du risque que ne nous ne traiterons pas dans cet article.

28 Le PLI (*Pollution Load Index*), ou l'ICP en français (Indice de charge polluante) se calcule à partir des facteurs de contamination (FC) de chacun des éléments métalliques ou métalloïdes considérés qui correspondent chacun à des concentrations d'un élément en un point donné sur les concentrations de ce même élément du fond géochimique local (exemple pour l'arsenic, le cuivre, le plomb, l'antimoine et le zinc : $PLI = \sqrt{5}\ (FC_{As} \times FC_{Cu} \times FC_{Pb} \times FC_{Sb} \times FC_{Zn})$ d'après Affholder et *al.*, 2014). Si le PLI est supérieur à 1, on considère qu'il y a un aléa, c'est-à-dire une probabilité d'effet, même si les éléments considérés individuellement sont à des concentrations considérées comme non toxiques.

29 Sexe, âge, état de santé, de gestation.

30 Lors d'une enquête auprès des habitants de la commune de Gardanne (Bouches-Du-Rhône) – enquête réalisée dans le cadre du projet Cartographie des écarts dans un contexte de risque industriel (CECRI, Dir. Aurélie Arnaud) et financée par la fédération de recherche Ecosystèmes continentaux et risques environnementaux (ECCOREV) et l'OHM-BMP en 2012 – des personnes témoignent de leur inquiétude notamment lorsqu'elles observent de la corrosion sur leur véhicule : les poussières « abiment les voitures », ou encore lorsque celles-ci « salissent le paysage », le linge, le mobilier de jardin, « même les animaux sont rouges ! ».

31 La superposition cartographique des couches d'information est un travail préalable à des traitements plus complexes tels que des analyses spatiales comme des tests de corrélations spatiales.

32 Il s'agira d'une vulnérabilité si le facteur aggrave la fragilité du territoire, et d'une capacité, si au contraire, cette fragilité est réduite parce que les ressources sont identifiées et utilisées.

33 Projet ANR Marséco CESA 018 réalisé entre 2008 et 2013.

34 Concentration en ETMM exprimée en milligramme de polluant par kg de sol ou ppm (partie par million).

35 L'interpolation spatiale permet de générer à partir d'une donnée ponctuelle une continuité spatiale telle que des cartes en isolignes, « mais on trouve aussi les champs vectoriels auxquels on peut ajouter les transformations par lissage » (Cauvin et *al.*, 2007, p. 163. Il existe plusieurs interpolations spatiales, cf p. 173).

36 SynTerCalM : Synergies sur le territoire des calanques marseillaises, projet pluridisciplinaire visant à définir un vaste réseau d'indicateurs apportant des connaissances et une expertise sur la gestion des sites pollués méditerranéens et permettant de formuler des recommandations à l'usage direct des décideurs.

37 J.-L. Lasalle (2007) montre dans son étude que « les quotients de danger, associés au risque non cancérogène de l'arsenic inorganique, sont supérieurs à la valeur repère de 1 pour la plupart des scénarios concernant les expositions des enfants aux sols pollués ; les excès de risque unitaire, concernant le risque cancérogène associé à l'arsenic inorganique, dépassent le seuil décisionnel classiquement admis en matière de sites et sols pollués (10-5), pour tous les scénarios d'exposition aux sols pollués envisagés, adultes et enfants compris ; la consommation de moules par les enfants et les adultes implique également un dépassement du seuil acceptable de risque cancérogène ».

38 Dumont (dans : Moriniaux, 2003) pointe les causes économiques comme facteur de vulnérabilité.

39 Thouret et D'Ercole (1996) parlent des ressources influençant l'exposition face aux risques naturels en milieu urbain « l'analyse des facteurs socio-démographiques et économiques vise à définir les populations exposées par leur structure et leur mobilité : rythmes de croissance, ressources et activité professionnelle, niveau de formation et de scolarisation, état sanitaire et alimentaire, migrations quotidiennes et type de quartier urbain… ».

40 « La reprise médiatique des résultats d'ERS amplifiant souvent cette confusion (en parlant de la

confusion entre danger et risque). Il revient aux experts d'exprimer, en termes accessibles pour tous, les résultats des évaluations scientifiques. Cet effort pédagogique peut contribuer à une meilleure perception des arguments sanitaires dans le processus décisionnel et à une plus grande adhésion aux mesures prises par les pouvoirs publics » (Host et *al.*, 2006). Cette remarque est également largement développée dans le domaine des risques naturels avec Decrop et Charlier (1995) par exemple.

41 Nous utilisons le terme de « sensibilité physique », car cette sensibilité fait référence à des éléments physiques que l'on peut numériser, opposé à « sensibilité psychologique », très qualitatif et difficilement quantifiable.

42 Sur les sites pollués historiquement il est par exemple indispensable de mettre en place une communication sur les activités passées et leurs incidences sur le présent (pour les nouveaux comme pour les anciens habitants), afin de sensibiliser les populations potentiellement exposées. La politique de prévention peut également suggérer un suivi de santé régulier même si ces habitants ne manifestent aucun symptôme. La mise en place de ce genre de dispositif permet de prévenir typiquement les carcinomes et en cas d'ostéoporose, l'éventuel relargage de plomb dans le sang par exemple.

43 Dans le cas de sols pollués, il s'agit du moment critique où l'organisation publique doit prendre des mesures particulières, telles que l'interdiction de fréquenter d'une zone, de manière à enrayer une contamination.

44 Un rétablissement lié à une pollution chronique en ETMM des sols issus d'activités industrielles gomme la notion de crise. C'est d'abord la cessation de la perturbation (p. ex. : arrêt d'activité polluante d'une usine) ou les mobilisations des riverains (p. ex. : jardins autour de Mangegarri, dépôt de résidus de bauxite sur la commune de Bouc-Bel-Air) qui suscitent le changement. Il est possible éventuellement d'observer à long terme la résilience de la végétation s'il n'y a pas de changement d'usage de ces sols ou de mesures de gestion de la pollution. Le sol pollué peut-être excavé (gestion des déchets délocalisée) ou géré *in situ* ouvrant à la possibilité, par exemple, de mise en place de procédés de phytoremédiation qui consistent à utiliser des plantes et leur micro-organismes associés pour extraire, transformer et/ou stabiliser les polluants (Pilon-Smits, 2005).

45 Une enquête auprès des médecins locaux permettrait d'affiner cette hypothèse.

46 Bismuth (2000 in DGS, 2002) montre que l'exposition chronique au plomb déclenche chez l'humain une plombémie qui se traduit par un syndrome abdominal (>1000 µg/L), encéphalopathie (>1000 µg/L chez l'enfant et > 2000 µg/L chez l'adulte) ou encore une neuropathie périphérique (dès 200 µg/L) et bien d'autres encore. L'OMS mentionne également en 2017 qu'une faible concentration sanguine telle que 5 µg/dL peut « affecter l'intelligence de l'enfant et entraîner des problèmes comportementaux et des difficultés d'apprentissage » (OMS, 2017). L'INERIS (2010) montre que l'exposition à l'arsenic par voie orale ou inhalée peut entraîner des effets qui peuvent varier d'une zone géographique à l'autre, engendrant une difficulté de définition universelle. L'arsenic peut provoquer des maladies vasculaires périphériques graves pouvant entraîner la gangrène, comme observé à Taiwan (INERIS, 2010), des changements dans la physiologie des cellules entraînant des altérations de la peau voire des cancers de la peau, ou du diabète observé au Bangladesh (Pichard, 2004 ; INERIS, 2010). Plus précisément, Pichard (2004) indique que des effets hépatiques ont été observés pour une exposition par voie orale s'élevant de 0,02 à 0,1 mg/kg/j, des effets digestifs (> 0,01 mg/kg/j), hématologiques (> 0,07 mg/kg/j), neuropathies périphériques systémiques (0,02 à 0,5 mg/kg/j), cancérigènes dans une exposition par voie orale supérieure à 75 mg/m3/an. La dose létale pour l'humain est de 1 à 3 mg/kg/j et l'OMS fixe la limite à 10 µg/litre qui est une valeur guide pour l'arsenic contenu dans l'eau de boisson inscrite dans un décret de 2001.

47 « Malgré un arrêt ancien de l'activité de l'usine, cette étude met en évidence l'influence toujours notable des sols sur les teneurs en métaux lourds des particules en suspension et sédimentables dans le secteur de l'Escalette » (Airmaraix, 2003). Ce même travail d'Aimaraix conseille des études complémentaires sur la sensibilité des alvéoles pulmonaires aux particules fines et l'évaluation des niveaux de plomb dans la fraction inhalable. Cependant, ces dernières n'ont pas été réalisées à notre connaissance.

48 [En ligne] URL : https://www.greenpeace.fr/espace-presse/marseille-58-ecoles-creches-cernees-pollution-de-lair/

49 Base de données carroyées 200 m x 200m

50 Les valeurs de chaque carré proviennent de la base de données INSEE rectangle, en suivant l'opération suivante proposée par l'organisme : Valeur du carré = (variable du rectangle/population dans le rectangle) x population dans le carreau.

51 Issue de la politique de grand ensemble des années 1970, la cité du Roy d'Espagne se compose de trois secteurs de mailles et hauteurs différentes, construites entre 1959 et 1974, dont dix tours rassemblant plus de 700 logements ([en ligne] URL : http://www.pss-archi.eu/immeubles/FR-13055-5121.html et Thierry Durousseau, architecte, 2006, [en ligne] URL : http://www.culturecommunication.gouv.fr/Regions/Drac-Paca/Politique-et-actions-culturelles/Patrimoine-du-XXe-siecle/Le-label/Les-edifices-labellises/Label-patrimoine-du-XXe-Bouches-du-Rhone/Marseille/Marseille-8e-arrondissement/Marseille-Cite-du-Roy-d-Espagne

52 Deux écoles primaires autour de la Grotte Roland, une école, un collège et deux lycées proches de l'ENM, deux écoles et un collège dans le quartier du Roy d'Espagne, et deux écoles dans le secteur de Cayolle les Baumettes.

53 « Ce n'est pas un quartier de passage, les familles y restent de génération en génération ». Ce

quartier offre un cadre de vie exceptionnel, le quartier est « lové sur les contreforts des Calanques », entre plage et collines avec des prix d'acquisition raisonnables (La chaîne de Marseille (LCM), 2011).

54 Nombre de ménages dont le revenu est inférieur au SMIC (Salaire minimum interprofessionnel de Croissance), c'est-à-dire inférieur à 1000 € par unité de consommation et par mois (source INSEE).

55 Calcul d'un indicateur : X'i = (Xi-Xmin)/(Xmax-Xmin) où X'i : indicateur ; Xi : valeur de l'indicateur (modalité) ; Xmin : valeur minimum de l'indicateur, Xmax : valeur maximale de l'indicateur. Le calcul de l'indice (X'i) s'effectue de la façon suivante : pour chaque valeur, correspondant à un calcul sur un carré, nous soustrayons le minimum de la distribution (Xi-Xmin), puis nous divisons ce résultat par l'étendue de la distribution (Xmax-Xmin).

56 Indice global de sensibilité physique : X'ig = Xi . 1/4 où X'ig : indice global de sensibilité physique ; Xi : la valeur de l'indice d'un indicateur.

57 En effet, Grasland et Hamez (2005) critiquent la facilité de manipulation des données : « tout spécialiste de l'analyse des données sait pertinemment qu'il est aussi facile de manipuler l'ordre d'apparition des axes factoriels d'une analyse en composantes principales que de trafiquer les résultats d'un indice ».

58 Nous sommes conscients d'avoir fait le choix d'une méthode classique et répandue (calcul de l'Indice de développement humain (IDH)). Cependant, il serait intéressant de tester la méthode de quantile pondéré, comme proposé par Grasland et Hamez (2005), idée en projet.

59 Enquête quantitative du projet SynTerCalM : Enquête quantitative réalisée auprès de 139 personnes fréquentant le massif de Marseilleveyre entre mai 2015 et juillet 2016.

60 Dans des parties des quartiers de la Cayolle, du Roy d'Espagne et de la Madrague.

61 Comme dans le quartier de la Grotte Rolland.

62 Enquête quantitative du projet SynTerCalM.

63 Enquête quantitative du projet SynTerCalM.

64 Accueil individuel avec garde à domicile (assistant(es) maternel(le)s, emploi familial, garde partagée), maisons d'assistant(e)s maternel(le) s (MAM), Relais d'assistant(e)s maternel(le) s (RAM) et jardins d'enfants.

65 Au sens de Taylor (2000) où cumul de vulnérabilité rime avec injustice sociale. Ainsi, dans notre cas, les variables sociales révélatrices d'une vulnérabilité accrue coïncident spécialement avec la proximité des sources de pollution.

66 L'attractivité paysagère d'un site même pollué peut attirer également des ménages à revenu aisé rejoignant ainsi la thèse développée par Beck (2008).

67 Article du mardi 10 février 2015 paru dans la Marseillaise, [en ligne] URL : http://www.lamarseillaise.fr/marseille/developpement-durable/36006-la-madrague-de-montredon-toujours-dans-le-rouge

68 VDSS : Valeurs de définition de source sol

List of illustrations

	**Title**	Figure 1. Démarche de réalisation d'une carte permettant de cibler les zones sensibles à un risque sanitaire.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-1.jpg
	File	image/jpeg, 612k
	**Title**	Figure 2. Les limites des composantes du risque sanitaire tel qu'il est défini actuellement.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-2.jpg
	File	image/jpeg, 792k
	**Title**	Figure 3. Les multiples facettes pour définir la vulnérabilité.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-3.jpg
	File	image/jpeg, 592k
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-4.png
	File	image/png, 2.5k
	**Title**	Figure 4. Le risque sanitaire dans le cadre de pollution des sols : proposition d'une définition et méthodologie d'appréciation.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-5.jpg
	File	image/jpeg, 880k
	**Title**	Figure 5. Carte des sources du danger : localisation et durée des activités industrielles dans le sud de Marseille au XIXe et XXe siècle.

	**URL**	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-6.jpg
	File	image/jpeg, 824k
	Title	Figure 6 : Carte d'aléa et danger dans le massif de Marseilleveyre à partir des mesures réalisées en 2009.
	**Caption**	Localisation des sols de surface présentant des teneurs en arsenic et en plomb supérieures aux VCI par élément ou pour les deux éléments simultanément.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-7.jpg
	File	image/jpeg, 1.0M
	**Title**	Figure 7. Cartes de densité de population (a), enfants de cinq ans et moins de cinq ans (b), ménages résidants depuis plus de cinq ans (c) et population à bas revenus (d) dans le massif de Marseilleveyre en 2010.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-8.jpg
	File	image/jpeg, 1.8M
	**Title**	Figure 8. Cartographie de l'indice de sensibilité physique humaine au plomb et à l'arsenic dans le massif de Marseilleveyre en 2010.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-9.jpg
	File	image/jpeg, 1.4M
	**Title**	Figure 9. Cartographie d'un risque sanitaire dans le massif de Marseilleveyre, 2010 – 2016.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-10.jpg
	File	image/jpeg, 1.6M
	**Title**	Figure 10. Variables à spatialiser pour une vision globale d'un risque sanitaire.
	URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/31309/img-11.jpg
	File	image/jpeg, 600k

References

Electronic reference
Aurélie Arnaud, Pascale Prudent and Isabelle Laffont-Schwob, « Évaluation du risque sanitaire de sols pollués méditerranéens : choix de variables et spatialisation », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [Online], Volume 21 numéro 1 | mai 2021, Online since 17 May 2021, connection on 31 October 2021. URL : http://journals.openedition.org/vertigo/31309 ; DOI : https://doi.org/10.4000/vertigo.31309

About the authors

Aurélie Arnaud
Géographie sociale et aménagement, enseignante-chercheure, Aix Marseille Université, Laboratoire Interdisciplinaire Environnement et Urbanisme (LIEU-UR 889), Aix-en-Provence, France, courriel : aurelie.arnaud@univ-amu.fr

By this author

Justice climatique et démocratie environnementale - Les inégalités d'accès au droit des populations vulnérables aux risques littoraux – quelques éléments de comparaison [Full text]
Published in *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 19 Numéro 1 | mars 2019

Les limites de la cartographie des risques littoraux : des perspectives pour la compréhension de tous [Full text]
Published in *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 21 | avril 2015

Pascale Prudent
Chimiste de l'environnement, enseignante-chercheure, Aix Marseille Université, CNRS, Laboratoire Chimie de l'Environnement (LCE-UMR 7376), Marseille, France, courriel : pascale.prudent@univ-amu.fr

Isabelle Laffont-Schwob
Écotoxicologue, enseignante-chercheure, Aix Marseille Université, IRD, Laboratoire Population Environnement Développement (LPED-UMR 151), Marseille, France, courriel : isabelle.schwob@univ-amu.fr

By this author

Regard écologique sur le recul stratégique : atouts et risques pour la diversité végétale péri-urbaine marseillaise [Full text]

Published in *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 21 | avril 2015

Copyright

Les contenus de *VertigO* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.