

« Incertitude » : l'éléphant dans le salon de la gestion des sites et sols pollués ?

“Uncertainty”: the elephant in the living room of soil pollution management?

Charlotte Le Gavrian
Cloud Spotting
legavric@gmail.com

Hélène Demougeot-Renard
eOde
helenedemougeotrenard@eode.ch

Sylvain Girard
Phimeca
girard@phimeca.com

Baptiste Sauvaget
eOde
baptistesauvaget@eode.ch

Périllat Raphaël
Phimeca
perillat@phimeca.com

1 **Résumé** — Il existe des méthodes matures et robustes d'estimation des incertitudes spécialement adaptées à la gestion des sites et sols pollués.
2 Malgré les efforts déployés pour les promouvoir, elles sont fortement sous-utilisées pour gérer les risques liés à pollution des sols, notamment
3 des friches urbaines en reconversion. Le projet POLIVAL part du postulat que les blocages dépassent le cadre strictement technique et
4 scientifique. Au travers d'une enquête menée au printemps 2024 avec le prisme de la théorie de l'acteur-réseau, nous avons identifié six «
5 brèches » à partir desquelles nous proposons des pistes pour améliorer ces processus de décision.

6 **Mots-clés** — sites et sols pollués, risque, incertitude, théorie de l'acteur-réseau, géostatistique.

7 **Abstract**— *Despite significant effort to promote mature and robust available methods, uncertainty estimation is still ancillary in soil pollution*
8 *management. The POLIVAL projects starts from the premise that the obstacles to overcome are beyond the sole scientific domain. Using the*
9 *frame of actor-network theory, we elicited six «breaches» from interviews conducted with stakeholders and experts during Spring 2024.*
10 *Drawing on this material, with propose ideas to improve risk awareness in soil pollution management.*

11 **keywords**— soil pollution, risk, uncertainty, actor-network theory, geostatistics.

12

13

I. CONSTAT INITIAL ET PLAN D'ACTION

14 Les friches urbaines et péri-urbaines constituent un réservoir stratégique de terrains à reconquérir, mais les activités passées
15 y ont laissé leur trace : ces sols sont bien souvent le réceptacle de risques enfouis. Outre de nombreux autres facteurs, la viabilité
16 d'une reconversion dépend fortement du coût de travaux de dépollution du sol et de mesures constructives de protection sanitaire.
17 Or des erreurs d'appréciation de la situation de pollution peuvent générer des surcoûts et des délais supplémentaires dans la
18 remise en état des sites, avec une prise de risque significative et l'engagement de la responsabilité des décideurs (Jeannée et
19 Demougeot-Renard 2016).

20 Le niveau de pollution d'un terrain reste actuellement difficile à caractériser car les données collectées sont souvent limitées
21 alors que le milieu souterrain est complexe. La principale avancée des dernières années tient à l'utilisation croissante d'outils
22 mathématiques pour quantifier les incertitudes des diagnostics de pollution, avec la constitution d'un savoir-faire et la demande
23 de prestations dédiées par les donneurs d'ordre.

24 Cependant l'information et les raisonnements associés à l'estimation de l'incertitude ne sont pas pris en compte d'un bout à
25 l'autre des chaînes de décision, parmi l'ensemble des acteurs : promoteurs immobiliers, établissements publics fonciers,
26 entreprises de travaux... Plus précisément, on observe que les niveaux de confiance fournis avec les estimations de volumes ou
27 les zones à dépolluer sont sous-utilisés, et parfois occultés. Le risque et la responsabilité pris à chaque étape sont sous-estimés,
28 avec des conséquences financières, juridiques et sanitaires pouvant être très dommageables. À mesure que nous nous approchons
29 des limites planétaires, les sociétés doivent faire face aux risques qu'elles ont internalisés (Beck 2008). Ces risques sont
30 *inattendus*, ils ne sont ni recherchés ni anticipés, et par conséquent aucune provision n'est faite pour y parer, ce qui peut amener
31 à des situations explosives.

32 En 2021, l'ADEME a initié un groupe de travail (GT Incertitudes SSP) réunissant un ensemble d'acteurs de la dépollution et
33 du recyclage des friches, pour les faire réfléchir sur le sujet. Des membres de ce groupe établissaient dans un rapport
34 précédemment publié (Guyonnet et al. 2019) le constat suivant :

35 « Il ressort notamment de cette synthèse que s'il n'existe pas de méthode « passe-partout » pour gérer les incertitudes de
36 manière générique en contexte de sites et sols pollués, on peut néanmoins promouvoir une certaine cohérence entre le choix des
37 méthodes et la nature des informations dont on dispose dans la pratique. »

38 Dans la continuité et en complément de ces réflexions, nous avons démarré avec le soutien de l'ADEME le projet POLIVAL
39 (POLlution Incertitudes VALorisation) visant à proposer des outils pragmatiques pour améliorer la prise en compte de
40 l'incertitude dans les différentes étapes du processus décisionnel aboutissant à la dépollution et la revalorisation des friches. Le
41 projet, qui a démarré en janvier 2024 et s'achèvera en septembre 2025, se décompose en deux phases décrites ci-après, complétées
42 par des actions de valorisation.

43 *Phase 1 : Analyse des processus décisionnels de gestion des friches* – Cette phase vise à déterminer de manière pragmatique les
44 chaînes de décision, ses acteurs, leurs responsabilités et les risques qu'ils encourent. A partir d'une enquête et d'un atelier avec
45 un comité de suivi, cette étape aboutira à l'établissement d'arbres décisionnels, outils représentant un ensemble de choix sous la
46 forme graphique d'un arbre. Les différentes solutions possibles sont situées aux extrémités des branches, et sont atteintes en
47 fonction des décisions prises à chaque étape. Les nœuds critiques où l'incertitude a une forte influence sur le devenir des sites et
48 la réussite des projets seront identifiés, et les pratiques actuelles d'intégration de l'incertitude dans ces chaînes seront recensées.

49 *Phase 2 : Construction de traducteurs d'incertitude* – Pour améliorer la prise en compte des incertitudes aux nœuds critiques
50 des arbres décisionnels, nous développerons des traducteurs pouvant prendre la forme de recommandations, prescriptions ou
51 méthodes. Ils seront ensuite testés expérimentalement sur un site d'essai décliné en deux scénarios « friche » et « site pollué »,
52 puis ajustés avec le comité de suivi.

53 La section II définit les objets concrets (sol, pollution, friche urbaine...) de l'étude et en délimite le périmètre. Les méthodes
54 mathématiques d'estimation des incertitudes adaptées aux SSP sont introduites dans la section III. Le cadre théorique choisi pour
55 l'analyse, notamment la notion de « traducteur » issue de la théorie de l'acteur-réseau, est présenté dans la section IV. À la date
56 de rédaction de cet article, nous sommes à mi-chemin de la phase 1 du projet. L'enquête menée de février à avril 2024 et les
57 brèches qu'elle a ouvertes sont décrites dans la section V. Enfin, nous proposons dans la section VI des perspectives d'action
58 pour développer des outils pragmatiques susceptibles de faire évoluer les pratiques.

59

60

II. QUELQUES DEFINITIONS

61 Le **sol** est défini dans la norme ISO 11074 comme la « couche supérieure de la croûte terrestre transformée par des processus
62 climatiques, physico-chimiques et biologiques et composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et
63 d'organismes vivants, organisée en horizons de sols génériques ». Dans le domaine des sites et sols pollués en France, le sol
64 désigne (un peu par abus de langage) l'ensemble du milieu souterrain, c'est-à-dire les horizons de sol au sens pédologique, le
65 sous-sol formé de l'ensemble des matériaux intacts ou quasi-intacts dont l'étude relève du domaine de la géologie, ainsi que les
66 nappes d'eau souterraine présentes dans les couches géologiques. Le sol forme donc un milieu complexe au croisement de
67 multiples domaines de compétence (biologie, pédologie, chimie, géologie). Les sols de surface sont particulièrement vulnérables
68 car soumis à l'influence d'intenses activités humaines altérant leurs caractéristiques biologiques, chimiques et physiques. Ils
69 assurent pourtant de multiples fonctions écosystémiques, telles que la régulation du cycle de l'eau et la fourniture d'éléments
70 nutritifs aux plantes, et jouent en ce sens un rôle essentiel dans l'alimentation des populations et l'adaptation au changement
71 climatique. Les sols pédologiques résultent principalement de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère,
72 dégradée et enrichie en apports de matières organiques par les processus vivants de pédogenèse. Le développement complet des
73 horizons de sol nécessite beaucoup de temps, de cent à plusieurs milliers d'années suivant le climat et les conditions géochimiques
74 locales. La dégradation physique, biologique et chimique des sols peut en revanche être très rapide.

75 Les **Sites et Sols pollués (SSP)** désignent majoritairement des sites sur lesquels des activités exercées par le passé sont
76 susceptibles d'avoir marqué le terrain et son environnement. Des activités industrielles, artisanales, militaires, ferroviaires ou
77 encore minières peuvent être à l'origine de pollutions chimiques (p. ex. anciennes stations-services, centrales thermiques, dépôts
78 de carburants, ateliers de nettoyage à sec). Les sources de pollution sont très souvent localisées dans la partie fertile du sol et le
79 soubassement géologique du site, ainsi que dans les nappes d'eau souterraine. Les pollutions peuvent migrer dans d'autres
80 milieux, par exemple par volatilisation dans l'atmosphère ou transport sous forme dissoute vers des cours d'eau. La méthodologie
81 nationale de gestion des SSP (Ministère de l'environnement 2017) se base sur une gestion des risques sanitaires et
82 environnementaux associés aux pollutions en fonction des usages (actuels ou futurs) du terrain. L'évaluation est menée selon un
83 principe de spécificité et de proportionnalité, afin de définir des mesures au cas par cas en fonction de la situation de chaque site.

84 Les **installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)** sont des installations qui peuvent avoir des
85 impacts (pollution de l'eau, de l'air, des sols, etc.) et présenter des dangers (incendie, explosion, etc.) pour l'environnement, la
86 santé et la sécurité publique. Leur exploitation est contrôlée par les services de l'état, et est soumise à un ensemble d'obligations.
87 Celles pouvant être responsables d'une pollution des sols sont le plus souvent des installations industrielles. La méthodologie
88 nationale de gestion des SSP concerne tous les sites présentant potentiellement des problématiques de pollution de leur sol et/ou
89 de leur eau souterraine, ces sites relevant ou non de la réglementation des ICPE.

90 Les **friches** désignent des terrains qui ont perdu leur fonction initiale, qui peuvent être vacants ou majoritairement sous-
91 utilisés. Les friches font l'objet d'un intérêt croissant pour réimplanter des activités, des logements ou bien des installations utiles
92 à la collectivité (écoles, salles de sport) en raison de leur localisation dans les centres urbains ou en zone péri-urbaine. Mais elles
93 nécessitent souvent une gestion de la pollution pour permettre ces reconversions. Le stock de friches en France est actuellement
94 estimé à 150 000 ha, correspondant à près de 11 000 sites, alors que 20 000 ha d'espaces naturels, agricoles ou forestiers sont
95 consommés chaque année (source Cerema).

96 Les **polluants** concernés par la méthodologie nationale de gestion des SSP sont des substances chimiques, organiques ou
97 inorganiques. Les substances les plus fréquemment rencontrées dans l'environnement sont les hydrocarbures pétroliers (fuels et
98 carburants), les métaux et métalloïdes (plomb, arsenic, mercure) et les composés chlorés (solvants, PCB et dioxines).

100 III. INCERTITUDES ET SSP

101 Par la similitude des problématiques, le domaine des SSP a pu bénéficier des avancées techniques plus anciennes des secteurs
102 de la mine et du pétrole : les méthodes d'estimation des réserves récupérables ont été transposées à l'estimation des zones de
103 pollution concentrée. Ainsi, des outils et méthodes mathématiques avancées sont à disposition des professionnels pour quantifier
104 rigoureusement les incertitudes inhérentes à l'estimation du niveau de pollution d'un site

105 Les méthodes géostatistiques en particulier permettent de modéliser la variabilité spatiale d'une pollution à partir d'un jeu de
106 données collectées dans le milieu anthropisé. En France, depuis les premiers travaux applicatifs du début des années 2000
107 (Demougeot-Renard 2004; Jeannée 2001; Desnoyers 2010), de nombreuses actions ont été menées par des géostatisticiens et des
108 professionnels des SSP pour rendre accessibles ces méthodes dans les contextes opérationnels de gestion des sites. Un groupe de
109 travail dédié à la thématique (GeoSiPol) a été créé en 2004 pour organiser des rencontres et formations, et produire un guide
110 (Chilès et al. 2005), des études de démonstration et des fiches techniques (<https://geosipol.org/>). Des retours d'expérience
111 critiques de l'utilisation de la géostatistique sur plus de 20 sites réels ont donné lieu à la formulation de recommandations
112 pratiques dans une étude menée pour l'association Record en 2016 (Jeannée et al. 2013; Jeannée et Demougeot-Renard 2016).
113 Ces mises en pratique ont conduit finalement à l'intégration de ces méthodes dans les guides méthodologiques nationaux (Lion
114 et al. 2016; Ministère de l'environnement 2017; Blusseau et al. 2016), et leur intérêt a été validé par la communauté des
115 professionnels lors d'une journée technique sur la géostatistique appliquée aux sites pollués, organisée par l'ADEME et
116 RECORD le 23 janvier 2019.

117 Outre l'interpolation optimale des mesures *in situ*, le diagnostic de la pollution d'un sol fait aussi intervenir des modèles
118 physico-chimiques de propagation et de transformation des polluants dans la matrice du sol. Ces simulations comportent une part
119 très importante d'incertitude par la complexité des phénomènes modélisés, et parce que les données d'entrée des modèles sont
120 elles-mêmes très incertaines. La propagation d'incertitude consiste à modéliser ces incertitudes, à en déduire par la simulation
121 l'incertitude des grandeurs calculées, puis à interpréter méthodiquement les résultats obtenus pour passer de la simulation à la
122 décision. Le cas des SSP soulève deux difficultés. D'une part, nous avons affaire à des phénomènes spatio-temporels et la
123 modélisation des incertitudes est délicate en grande dimension. D'autre part, le coût en temps de calcul des simulations empêche
124 parfois de produire des simulations en nombre suffisant pour obtenir des résultats statistiquement significatifs. Dans le domaine
125 de la dispersion de polluant dans l'atmosphère, ces problèmes ont été abordés par des techniques de réduction de dimension et
126 d'émulation de modèle (Mallet et al. 2018; Périllat, Girard, et Korsakissok 2020; Girard et al. 2020; Périllat et al. 2021; Caillat
127 et al. 2023). L'un des objectifs du projet QUASPER (<https://www.ginger-burgeap.com/quasper/>) était la transposition des ces
128 approches au contexte de la pollution des sols (Périllat et al. 2022).

130 IV. CADRE D'INVESTIGATION : THEORIE DE L'ACTEUR-RESEAU

131 Il apparaît clairement que malgré la robustesse des outils scientifiques de prise en compte des incertitudes dans les SSP, les
132 efforts de vulgarisation et la promesse d'une meilleure gestion des projets, les acteurs ne voient pas comment mobiliser ces
133 compétences dans leurs pratiques, ni quel bénéfice ils pourraient en retirer. En prenant en compte comment se construisent les
134 traductions (au sens de Serres (1974)) dans les séries d'interactions qui lient les acteurs, l'étude POLIVAL propose de rendre
135 visibles, compréhensibles et mobilisables les incertitudes.

136 La théorie de l'acteur-réseau est une approche sociologique développée par des scientifiques (Akrich, Callon, et Latour 2006)
137 dans laquelle la science n'est pas séparée de la politique, et qui invite à penser le monde en réseau et non en groupes sociaux. La
138 théorie de l'acteur-réseau a permis le développement de méthodes pragmatiques d'innovation centrées sur les usagers regroupées
139 sous le vocable de *design thinking*.

140 Un *acteur* est un être individu, organisation, humain ou non-humain qui transforme son environnement. Une *boîte noire* est
141 un ensemble de croyances et de comportements induits, tacitement admis et non remis en question par un groupe d'acteurs. Ce
142 faisant, les boîtes noires sont un élément important d'organisation sociale dynamique, en perpétuelle reconfiguration.

143 Quand les acteurs considèrent explicitement le contenu d'une boîte noire et le remettent en question, ils peuvent percevoir
144 des incompatibilités, des *brèches*. Les acteurs vont chercher à opérer une *traduction*, c'est-à-dire altérer leurs comportements
145 pour résoudre ces incompatibilités. Cependant, un changement d'ordre individuel n'est perçu que comme une anomalie et ne
146 permet pas de reconfigurer les boîtes noires. Il est nécessaire de *rallier d'autres acteurs* pour s'accorder sur de nouvelles
147 croyances et comportements.

148 Certaines traductions peuvent en engendrer d'autres en cascade. Un *macro-acteur* est assis sur un empilement de boîtes noires
149 : il est à l'initiative d'une première traduction dont découlent tout un ensemble de boîtes noires.

150 Les *micro-acteurs* cherchent à s'infiltrer individuellement dans les brèches, mais pour cela il leur est indispensable d'aller
151 chercher des alliés dans d'autres domaines.

152 Dans le cas de POLIVAL, la boîte noire qui est remise en question par les mesures de l'incertitude des SSP est le sol, avec
153 le verrou de la propriété. Le sol est ce qui nous porte, c'est notre premier lien support à notre environnement, et c'est aussi
154 l'archive cachée de l'ensemble de nos actions. Le sol et l'action que l'on a sur le sol sont des impensés verrouillés dans la boîte
155 noire de la propriété. Donc, le fait que l'on connaisse mal ce qu'est scientifiquement le sol (Burniat et Sélosse 2021), que son
156 étude et sa mesure soient peu développées, au-delà du fait que ce soit parce qu'on ne le voit pas, s'explique par des intérêts de
157 préservation économiques et donc juridiques forts et occultants.

158 Cependant, les limites terrestres bousculent les *statu quo* et les comportements ainsi installés. Pour POLIVAL, les SSP sont
159 le lieu d'attachements, de liens inattendus (Latour et al. 2012) avec des actions passées qui peuvent être sources de risques. Tant
160 qu'il y avait l'espace géographique, géologique ou culturel disponible, les risques liés à des activités humaines ont été
161 *externalisées*, en l'occurrence poussées plus loin. Aujourd'hui, alors que les ressources se trouvent limitées, les sociétés et leurs
162 acteurs doivent *internaliser* les conséquences de leurs activités (Beck 2008). Le cadre juridique actuel ne porte que sur la
163 responsabilité individuelle, excluant ainsi des pratiques de gestion la notion de responsabilité collective du sol.

164 La question de la prise en compte de l'incertitude intervient dans le contexte de Zéro Artificialisation Nette (ZAN 2023), et
165 donc d'une pression plus accrue sur les SSP et leur gestion. La gestion individuelle des sols ainsi que la pollution et les risques
166 associés s'ouvrent à un questionnement collectif autour de ce qui devient un commun. Ces communs, fruits de l'historique
167 d'action des humains, dits « communs négatifs » (Nègre 2021), sont l'objet de nouvelles traductions entre humains et non
168 humains, pour dépasser les conséquences de la modernité et préserver l'habitabilité de la terre pour les humains. Dans ces
169 nouvelles traductions, il faut trouver les micro-acteurs pour sortir ce que révèle la science de l'obscurité des boîtes noires, et se
170 doter des moyens de mesurer et mobiliser les informations qui construiront les traducteurs nécessaires. Avec les *arbres de*
171 *décisions* nous retraçons les relations entre les acteurs, leurs intérêts communs ou contraires, la métrologie qu'ils peuvent
172 mobiliser pour stabiliser leurs nouvelles relations.

173

174 V. BRECHES OUVERTES PAR L'ENQUETE « INCERTITUDE SSP » DU PRINTEMPS 2024

175 Au cours des mois de février à avril 2024, nous avons mené une enquête auprès de 15 personnes directement impliquées dans
176 la gestion des SSP ou disposant d'une expertise sur le sujet : propriétaires, responsables au sein d'agglomérations, chargés de
177 l'aménagement des territoires, promoteurs immobiliers, exploitants d'ICPE, bureaux d'étude SSP, juristes et entreprises de
178 dépollution.

179 Les entretiens ont été menés du point de vue d'une « extra-terrestre », c'est-à-dire sans présumer de connaissance autre qu'une
180 acculturation rapide sur la nature du sol, des pollutions, et des grandes lignes de la gestion actuelle des SSP (voir la section II).
181 La démarche n'est pas celle d'une observation sociologique : l'objectif assumé était de confronter des points de vue pour
182 rechercher des brèches ouvrant des possibilités de créer de nouvelles traductions.

183 A. Brèche du référent

184 Selon les données fournies par la Commission Européenne (<https://www.senat.fr/ue/pac/EUR000009421.html>), environ 60
185 à 70 % des sols de l'Union Européenne (U. E.) sont actuellement en mauvaise santé, et cette situation qui concerne tous les États
186 membres a des conséquences sur les services rendus par les écosystèmes, et par conséquent sur les défis environnementaux et
187 climatiques que doit relever l'U. E. Or en l'état actuel, il n'existe pas de législation européenne spécifique concernant la
188 protection des sols et la prévention de leur dégradation.

189 Le droit, unique référence partagée, régleme essentiellement les niveaux de pollution acceptables en regard de l'usage
190 d'un terrain. Il n'intègre pas la préservation de la nature des sols (la qualité physique, chimique et biologique), qui inciterait à
191 une gestion envisagée à une échelle de temps plus longue. Le droit se focalise sur *l'usage* du terrain, qui devient *de facto* une
192 notion centrale de la gestion des SSP (Ministère de l'environnement 2017). Les types d'usage sont fixés par décret du 19.12.22,
193 et recouvrent les fonctions ou activités ayant cours ou envisagées pour un terrain ou un ensemble de terrains. L'usage d'un terrain
194 peut changer.

195 De par la grande complexité des SSP, il est difficile de choisir un référent qui soit à la fois universel et mesurable. Dans le
196 contexte du déploiement de la ZAN, l'ADEME et l'INRAE ont enclenché la transition d'une approche surfacique à une approche
197 fonctionnelle. On pourrait s'attendre à la création dans les prochaines années d'une évaluation publique de la qualité des sols,
198 analogue au Diagnostic de Performance Énergétique (<https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>)
199 qui bouscule actuellement les pratiques et marchés immobiliers.

200 B. Brèche de la temporalité

201 Il faut plusieurs siècles pour que se forme un centimètre de sol, qui peut disparaître en une dizaine d'années sous l'effet de
202 l'érosion. L'excavation d'un mètre de sol pour le terrassement détruit le résultat d'un processus de plusieurs milliers d'années.
203 Les terres propres et *a fortiori* fertiles sont une ressource qui devient rare.

204 Dans le cadre du paquet législatif sur les ressources naturelles, la Commission Européenne a présenté le 5 juillet 2023 une
205 proposition de directive sur la surveillance et la résilience des sols, qui prévoit d'établir un cadre juridique afin de permettre à
206 l'U. E. de parvenir à un bon état des sols d'ici à 2050.

207 Pour l'heure, c'est le temps juridique qui rythme la gestion des SSP : la délivrance d'un permis de construire donne le « top
208 départ » de la mesure de rentabilité d'un projet. La transaction associée opère en quelque sorte une « remise à zéro » de la
209 description de l'état du site : les informations relatives au SSP ne sont convoquées qu'au moment de la transaction, sans réelle
210 continuité dans le relevé et l'analyse de données. Cependant, appréhender les risques liés à la pollution des sols nécessite une
211 compréhension d'interactions de facteurs complexes, intervenant sur un temps parfois bien plus long que les garanties décennales
212 de la construction.

213 C. Brèche de l'interprétation

214 Il existe une certification pour les moyens mis en œuvre, et l'application de la méthodologie SSP. Cela étant, les bureaux
215 d'étude produisent des informations polymorphes et les analysent, mais ne livrent pas ou peu de résultats conclusifs. Les
216 interprétations de différentes natures, mobilisant des modèles différents, ne sont pas formellement encadrées.

217 Par ailleurs, les pertes de compétence dues notamment au *turn over* des effectifs dans les bureaux d'études accentuent le
218 sentiment chez les donneurs d'ordre d'un manque d'homogénéité pour des études dites certifiées. Ils ont alors à isoler ces
219 informations en s'en tenant aux strictes nécessités juridiques qui deviennent difficiles à réemployer.

220 L'absence de consolidation des interprétations laisse des zones grises qui ont tendance à favoriser le moins-disant pour le
221 coût des études, et les mesures de protection et de préservation. Elles soulèvent également des risques de manipulation de
222 l'information, ou tout simplement d'oubli.

223 D. Brèche du processus d'action

224 Le processus de gestion des SSP, tel que documenté par exemple par d'Hotelans et al. (2023), se révèle en pratique un agrégat
225 de processus de création de connaissances et de décisions avec des recouvrements partiels dans le temps et des personnes
226 impliquées. Tout au long de la filière, des experts sont sollicités pour interpréter ces données et les transformer en arguments
227 décisionnels mais souvent sans cadre de référence formel, hormis la loi du marché et les arbitrages coûts-délais.

228 La non-conciliation du temps du sol et des impératifs de temps des métiers de la construction produit une information « hors-
229 sol », non mobilisable.

230 E. Brèche des coûts

231 Les objectifs des professionnels des SSP et des aménageurs sont divergents. En effet, les critères de succès changent selon le
232 point de vue, ce qui engendre des tensions sur les coûts et délais :

- 233 • Du point des professionnels des SSP, une pollution a été gérée avec succès lorsque les zones de pollution concentrées
234 ont pu être éliminées, des mesures constructives mises en place pour protéger les usagers, et les pollutions résiduelles
235 documentées dans un Système d'Information des Sols (SIS), dans le respect du droit de l'environnement et de la
236 méthodologie nationale de gestion des SSP.
- 237 • Du point de vue des aménageurs, la réussite d'un projet se définit principalement en fonction de la qualité de
238 l'aménagement et de la construction, de la maîtrise du budget global du projet de réhabilitation et du respect des délais
239 de réalisation. A ces critères s'ajoute celui de la préservation de la santé des populations utilisatrices des bâtiments et
240 installations.

241 Le coût du risque sanitaire est peu perceptible par les donneurs d'ordre car il y a peu de risque qu'ils soient considérés comme
242 responsables, étant donné la complexité des SSP. Néanmoins, le coût économique d'une mauvaise interprétation d'étude des SSP
243 est perceptible au degré de crise que génère la gestion de la pollution dans les sites et les sols en impactant les délais et la
244 rentabilité de la construction.

245 F. Brèche du sentiment de gâchis, de mauvais travail

246 La plupart des personnes interrogées ont exprimé une impression d'une succession de mauvaises décisions, d'une perte
247 d'efficacité, ou d'un manque de sérénité vis-à-vis des responsabilités endossées quant aux risques sanitaires.

248

249 VI. LEVIERS ET PERSPECTIVES

250 Nous avons identifié trois pistes pour poursuivre notre investigation dans les brèches présentées dans la section précédente.

251 A. Introduire la culture du risk management

252 Plusieurs personnes interrogées ont évoqué une démarche d'atténuation des risques ou *derisking*. Ce terme semble emprunté
253 aux domaines financier et géopolitique (Daoudal 2023) où il désigne une stratégie de désengagement de positions non
254 maîtrisables ou sous influence exogène, pouvant s'avérer dommageables.

255 Le volet « risque » de la gestion des SSP n'intervient qu'en bout de chaîne. Soit parce que les risques ne sont pas perçus par
256 les acteurs, soit parce qu'il se sentent démunis pour les gérer. Pour autant, la culture de la gestion du risque est bien établie dans

257 d'autres domaines, notamment l'industrie et la finance. Notons que la gestion d'un SSP n'est pas une activité récurrente d'une
258 entreprise comme l'exploitation d'un actif industriel : c'est plutôt un coût ponctuel, « avant de faire », pour établir un capital. En
259 ce sens, il nous semble intéressant d'approfondir le parallèle avec le domaine financier, dans lequel *risk manager* est une carrière
260 standard. D'une certaine manière, gérer les risques n'est pas seulement éviter les ennuis : on peut y gagner, comme en finance.

261 L'intégration de la gestion du risque SSP au modèle d'affaires des organisations pourrait prendre deux formes :

262 • Un risque SSP vu comme une externalité financière de l'activité de l'organisation. Les organisations peuvent spéculer
263 sur la nature du SSP qui va se révéler dans le projet d'action et sur l'usage projeté. Ici la gestion du risque s'inscrit dans l'écart
264 entre le prix du foncier négocié selon une étude SSP partagée fonction des usages, et les plus- ou moins-values des travaux par
265 rapport à un site adapté à l'usage projeté.

266 • Un risque SSP vu comme un coût nécessaire associé à l'investissement en capital que représente la parcelle et son sous-
267 sol associé. Les coûts de travaux de dépollution sont donc dissociés des travaux de construction car ces coûts sont engagés pour
268 préserver ponctuellement et structurellement un capital nécessaire à l'organisation. Les coûts des travaux de construction sont
269 des coûts d'exploitation.

270 B. Vers un suivi évolutif des SSP, cohérent avec les modifications en cours des directives comptables européennes

271 Dans le secteur agricole, le lien entre bon état des sols et services rendus est plus ou moins admis : c'est une boîte noire pour
272 la plupart des acteurs. Même si les critères de bon état peuvent être sujets à débat, les acteurs entrent spontanément dans une
273 démarche

274 • de suivi (*monitoring*) : est-ce que mon terrain s'améliore ?

275 • de comparaison : tel terrain est-il meilleur que tel autre ?

276 • et pour certain de recherche de lien de causalité.

277 Ces pratiques s'inscrivent souvent dans une recherche de rendement, là encore intimement liée à l'usage. Néanmoins, le suivi
278 et la comparaison mettent en lumière l'intérêt de la caractérisation des incertitudes. La question « est-ce que tel écart est
279 significatif ? » est posée explicitement.

280 Plusieurs personnes interrogées souhaiteraient disposer de référentiel pour l'état des sols (quelle situation est « grave » ou
281 non ?) et pour la prise en compte de l'incertitude (quelle zone présente un risque faible, moyen ou fort ?). Or, il n'existe pas
282 vraiment dans la gestion des SSP de critère partagé pour qualifier une évolution de l'état du sol pensé comme un bien commun.

283 La directive Corporate Sustainability Reporting Directive (« CSRD » 2023) adoptée en novembre 2022 par la Commission
284 Européenne introduit dans les mesures économiques des organisations, l'écologie en imposant le principe de la double matérialité
285 (Ben Saad, Viallanex, et Palencher 2023). Cette métrologie propose que les capitaux financiers, comme les capitaux
286 environnementaux et sociaux doivent être préservés pour assurer la soutenabilité de l'activité de l'organisation. Pour les
287 organisations il sera donc nécessaire de prendre en compte, compter et rendre compte de l'évolution de l'état des SSP suite à
288 leurs activités de construction et exploitations.

289 La transition d'une manière de penser binaire (pollué ou non) au suivi quantitatif d'un état de santé évolutif nécessite
290 l'agrégation des données dans une archive pérenne. Se pose alors la question de la gouvernance (qui conserve ? détient ? peut
291 consulter ?) des données.

292 C. Vers un mode de coopération propice à l'appropriation des raisonnements

293 La transcription de modèles d'incertitudes à l'adresse des non-spécialistes est délicate en général (Padilla et al. 2021), et l'est
294 encore plus quand s'agit de phénomènes spatiaux comme c'est le cas pour la gestion des SSP. Sans chercher à épuiser le sujet,
295 nous relevons les trois difficultés suivantes

296 1. Une carte utilise les deux dimensions de la page. Il est impossible de représenter simplement l'exposition et l'aléa sur
297 une seule carte, sans parler des informations complémentaires à mobiliser pour éclairer la décision (Bonneau et al. 2014). Or le
298 sol est un compartiment de l'environnement à trois dimensions, qui peut être affecté par plusieurs polluants, auxquels plusieurs
299 seuils de coupure doivent être appliqués.

300 2. Un modèle d'incertitudes est un raisonnement avec de nombreuses hypothèses, souvent assez techniques, comme le
301 choix arbitraire de certains paramètres.

302 3. Une estimation d'incertitudes est elle-même incertaine : une source intarissable de confusion. Nous proposons dans la
303 suite de cette section des idées pour contourner ces difficultés, offrant par ailleurs des opportunités de valorisation.

304 1) Promouvoir l'appropriation des raisonnements

305 Nous supposons que l'utilisation des estimations d'incertitude nécessite une appropriation du raisonnement dont elles sont
306 issues, mais que cette appropriation peut passer par un autre chemin, mobilisant d'autres compétences.

307 Nous proposons trois préceptes pour y parvenir (illustrés dans la Fig. 1) :

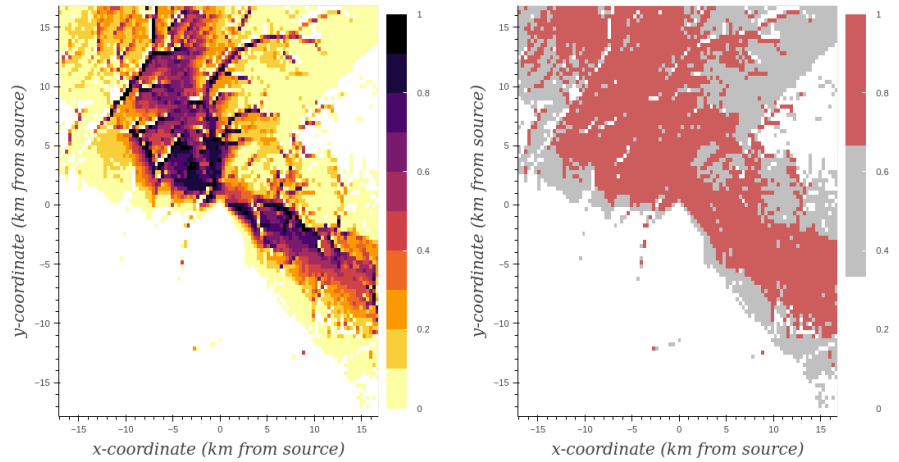
308 1. Dissocier les données «brutes» des analyses. Les données brutes sont « figées » : elles peuvent être complétées ou
309 remises en question mais constituent le point de départ du raisonnement.

310 2. Agréger le produit final d'aide à la décision (par exemple une carte). C'est-à-dire, intégrer-combiner les sources de
311 données (fond cartographique, probabilités de dépassement de seuil avec intervalle de confiance, risque...) de façon à proposer
312 des cartes interprétables de façon autonome.

313 3. Rendre activables les étapes du raisonnement, la formulation d'hypothèses et le choix des paramètres. Par exemple en
314 rendant la carte d'aide à la décision interactive à l'aide de curseurs, menus déroulants ou cases à cocher.

From simulation to decision

Concentration threshold ($\mu\text{g}/\text{cm}$): 2.00
Exceedance probability threshold: 0.05
Risk: 0.05



315
316 Fig. 1. Exemple interactif (https://showroom.phimeca.com/decision_map) de transition d'une carte d'estimation de probabilité de dépassement de seuil à une
317 carte d'aide à la décision s'appuyant sur le concept de significativité statistique et de curseur pour tester la robustesse des décisions vis-à-vis des paramètres
318 du modèle (Caillat et al. 2023).

319 6.3.2 Création de connaissances par la coopération

320 Le recours à l'interaction permet de s'appuyer sur des mécanismes cognitifs de rétroaction pour créer des connaissances à partir
321 d'informations trop complexes pour être transcrites par des nombres ou des images figées, par exemple l'effet sur une carte
322 d'interactions multifactorielles entre de nombreux paramètres.

323 Plus généralement, Polanyi (1966) qualifie d'*explicit* les connaissances pouvant être transcrites dans un langage : texte,
324 diagramme, équations... Il argumente que ces connaissances sont toujours enracinées dans des connaissances *tacites* (intuition,
325 expérience personnelle, savoir-faire...) qui ne se prêtent pas à la transcription. L'interaction au moyen d'une interface dédiée
326 nous semble susceptible de permettre la transmission, ou plutôt la (re)création, de connaissances tacites.

327 Dans le modèle SECI (Nonaka et Takeuchi 1995, 2019), l'innovation résulte de conversions successives de connaissances entre
328 tacite et implicite, impliquant un nombre croissant de personnes. La socialisation est l'étape initiale de transfert de connaissances
329 tacites au travers d'une coopération étroite autour d'objets partagés. Le support interactif d'aide à la décision et les données
330 brutes sous-jacentes constituent un objet commun propice à la socialisation des connaissances

331 Selon Laurent (2018) « on collabore pour faire, on coopère pour savoir ». Il définit la coopération comme un processus libre de
332 découverte mutuelle mobilisant l'ensemble des capacités et finalités humaines (au-delà du seul travail), pouvant s'étendre dans
333 le temps et les objets traités. Le changement de paradigme d'un outil qui « donne la solution » à un « outil de dialogue » suppose
334 une transition de la collaboration vers la coopération.

335 Nouer des relations de coopération entre les acteurs de la gestion élargie SSP et de la revalorisation des friches pourrait contribuer
336 à transformer une séquence unique d'actions ponctuelles en un processus cyclique itératif. Ce pourrait être un autre axe
337 d'alignement des intérêts des parties prenantes. En effet, les pratiques industrielles de conception concurrente (Takeuchi et
338 Nonaka 1986) nous enseignent que l'agilité, un concept formulé dans le domaine du développement logiciel et enraciné dans le
339 pragmatisme et la pensée *lean* (Schwaber et Sutherland 2011), peut être un levier de réduction de coût et de délais.

340 La méthode Cartorisk (Demougeot-Renard et al. 2016; Demougeot-Renard et al. 2024) a été développée dans cet objectif (voir
341 la Fig. 2). En facilitant la cartographie des risques à partir d'un modèle géostatistique de la pollution des sols, la méthode permet
342 de tester et comparer différentes variantes d'aménagement, pour rechercher un optimum technique et financier tenant compte de
343 la pollution. En permettant d'obtenir rapidement des cartographies et des estimations de coûts, le code informatique Cartorisk
344 devient alors un outil de dialogue entre les acteurs du réaménagement et de la gestion des SSP pour trouver un meilleur
345 compromis. Cette méthode ne peut être mise en œuvre que si les parties prenantes acceptent un changement de paradigme, en
346 caractérisant très tôt l'état de pollution du sol, et en intégrant de la flexibilité dans les usages et équipements prévus sur la friche
347 à reconverter.

Un processus itératif intégrant risques sanitaires et coûts

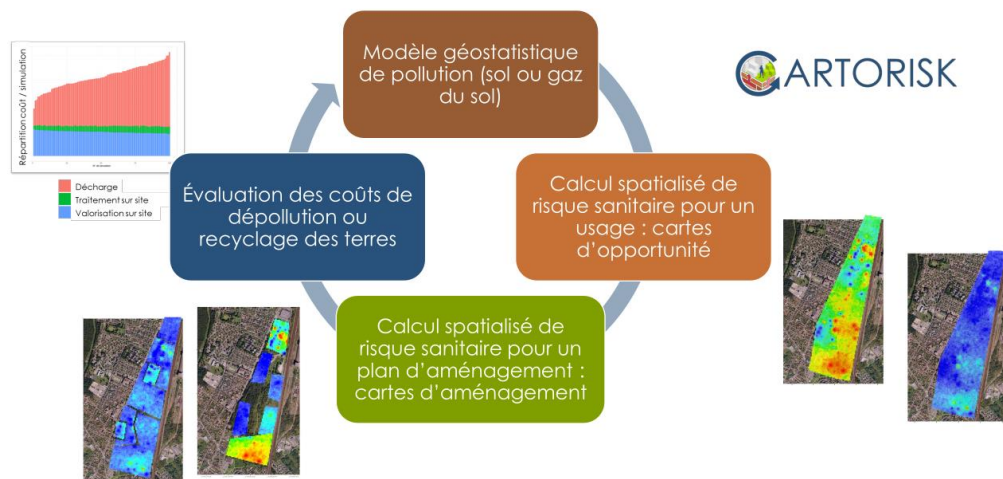


Fig. 2. Méthode interactive Cartorisk pour trouver un aménagement compatible avec les risques sanitaires et les coûts de dépollution des terres excavées.

REMERCIEMENT

Nous remercions chaleureusement toutes les personnes nous ayant accordé leur temps pour partager leur point de vue et expertise.

L'idée de monter ce projet est le fruit des rencontres stimulantes provoquées par le GT Incertitudes SSP.

Le projet POLIVAL est rendu possible grâce au soutien financier de l'ADEME, et à la confiance témoignée par Hélène Roussel et Frédérique Cadière.

REFERENCES

- Akrich, Madeleine, Michel Callon, et Bruno Latour. 2006. *Sociologie de la traduction : textes fondateurs*. Presses des MINES.
- Beck, Ulrich. 2008. *La société du risque, Sur la voie d'une autre modernité*. Flammarion.
- Ben Saad, Emna, Patrick Viallanex, et Pierre Palencher. 2023. « La CSRD ou le défi de la double matérialité pour les entreprises ». *Havard Business Review France*. <https://www.hbrfrance.fr/strategie/reporting-esg-et-evaluation-de-la-materialite-un-nouveau-defi-60382>.
- Blusseau, Boursiez, Cimolino, Croze, Hirrien, Kaskassian, Lambert, Latron, et Vircondelet. 2016. « Pollution concentrée : définition, outils de caractérisation, et intégration dans la méthodologie nationale de gestion des sites pollués ». UPDS. <https://upds.org/collections/pollution-concentree-definition-outils-de-caracterisation-et-integration-dans-la-methodologie-nationale-de-gestion-des-sites-pollues-upds-2016/>.
- Bonneau, Georges-Pierre, Hans-Christian Hege, Chris R Johnson, Manuel M Oliveira, Kristin Potter, Penny Rheingans, et Thomas Schultz. 2014. « Overview and state-of-the-art of uncertainty visualization ». *Scientific visualization: Uncertainty, multifield, biomedical, and scalable visualization*, 3-27.
- Burniat, Mathieu, et Marc-André Sélosse. 2021. *Sous terre*. Dargaud.
- Caillat, Maéva, Valentin Pibernus, Sylvain Girard, Mathieu Ribatet, Patrick Armand, et Christophe Duchenne. 2023. « Adaptive probabilistic modeling to support decision-making in the event of accidental atmospheric releases ». *Atmospheric Environment*, 119865. <https://sylvaingirard.net/pdf/caillat23-adaptive-modeling-decision.pdf>.
- Chilès, Jean-Paul, Hélène Demougeot-Renard, Michel Garcia, Nicolas Jeannée, Gaëlle Le Loc'h, et Jean-Jacques Péraudin. 2005. « Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués – Manuel méthodologique et exemples d'applications ». Ineris & ADEME. http://geosipol.org/wp-content/uploads/2013/02/GeoSiPol_Manuel_MethodologiqueJuin06-2-2.pdf.
- « CSRD ». 2023. https://finance.ec.europa.eu/regulation-and-supervision/financial-services-legislation/implementing-and-delegated-acts/corporate-sustainability-reporting-directive_en.
- d'Hotelans, Raoul, Guillaume Masselot, Sophie Favéreaux, Aurore Rouby, Hubert Léprond, Maheut Emélie, Badreddine Rabia, et al. 2023. « Guide du donneur d'ordre dans le domaine des sites et sols pollués ». Ministère de la transition écologique et de la transition des territoires. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2023-12/Guide_du_Donneur_Ordre_septembre_2023.pdf.
- Daoudal, Marie. 2023. « Le mot du jour. Face à la Chine, l'UE prône la stratégie bien pratique de l'atténuation des risques ». *Courrier International*. <https://www.courrierinternational.com/article/le-mot-du-jour-face-a-la-chine-l-ue-prone-la-strategie-bien-pratique-de-l-attenuation-des-risques>.

387 Demougeot-Renard, Hélène. 2004. *De la reconnaissance à la réhabilitation des sols industriels pollués : estimations*
388 *géostatistiques pour une optimisation multicritère*. Vol. 1. vdf Hochschulverlag AG.

389 Demougeot-Renard, Hélène, Véronique Croze, Claire Faucheux, David Pitaval, et Baptiste Sauvaget. 2024. « CARTORISK 2
390 – Enrichissement de La Méthode de Cartographie Géostatistique Des Risques Sanitaires Pour La Reconversion Des Friches –
391 Rapport Final ». ADEME.

392 Demougeot-Renard, Hélène, Véronique Croze, Claire Faucheux, David Pitaval, et Sylvie Traverse. 2016. « CARTORISK –
393 Spatialisation Géostatistique Des Risques Sanitaires – Etude Méthodologique et Conditions de Mise En Oeuvre Opérationnelle
394 – Rapport Final ». ADEME.

395 Desnoyers, Yvon. 2010. « Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques
396 dans les installations nucléaires ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

397 Girard, Sylvain, Patrick Armand, Christophe Duchenne, et Thierry Yalamas. 2020. « Stochastic perturbations and dimension
398 reduction for modelling uncertainty of atmospheric dispersion simulations ». *Atmospheric Environment*, 117313.
399 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117313>.

400 Guyonnet, Dominique, D. Dubois, Chantal de Fouquet, J.-P. Ghestem, Hubert Leprond, O. Atteia, et J. M. Côme. 2019. « Prise
401 en compte des notions d'incertitude dans la gestion des sites et sols pollués ». ADEME. [https://bibliothèque.ademe.fr/sols-
402 pollues/1761-prise-en-compte-des-notions-d-incertitude-dans-la-gestion-des-sites-et-sols-pollues.html](https://bibliothèque.ademe.fr/sols-pollues/1761-prise-en-compte-des-notions-d-incertitude-dans-la-gestion-des-sites-et-sols-pollues.html).

403 Jeannée, Nicolas. 2001. « Caractérisation géostatistique de pollutions industrielles de sols : cas des hydrocarbures aromatiques
404 polycycliques sur d'anciens sites de cokeries ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

405 Jeannée, Nicolas, et Hélène Demougeot-Renard. 2016. « Méthodes d'estimation et d'optimisation des quantités de terres
406 polluées à traiter. Retour d'expérience sur la validité des estimations à partir de données réelles ». *Geovariances*, eOde.
407 <https://record-net.org/rapports/en-savoir-plus/188>.

408 Jeannée, Nicolas, Claire Faucheux, Hélène Demougeot-Renard, et S. Belbeze. 2013. « Retour d'expérience critique sur
409 l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués ». *Geovariances*, eOde & ANTEA.
410 <https://record-net.org/rapports/en-savoir-plus/18>.

411 Latour, Bruno et al. 2012. *Enquête sur les modes d'existence : une anthropologie des modernes*. La découverte Paris.

412 Laurent, Éloi. 2018. *L'impasse collaborative : pour une véritable économie de la coopération*. Éditions Les liens qui libèrent.

413 Lion, F., S. Colombano, N. Aubert, et G. Boissard. 2016. « Définir une stratégie de dépollution : Approche basée sur la masse
414 de polluant et la capacité de relargage d'une pollution ». BRGM. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64350-FR.pdf>.

415 Mallet, Vivien, Anne Tilloy, David Poulet, Sylvain Girard, et Fabien Brocheton. 2018. « Meta-modeling of ADMS-Urban by
416 dimension reduction and emulation ». *Atmospheric Environment* 184:37-46.
417 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.009>.

418 Michel, SERRES. 1974. « Hermès III, la traduction ». Paris, éditions de Minuit, 269p.

419 Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. 2017. « Guide méthodologie nationale de gestion des sites et sols
420 pollués ». Gouvernement Français.

421 Nègre, Anne-Louise. 2021. « Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement : Emmanuel Bonnet, Diego Landivar et
422 Alexandre Monnin ». *DARD/DARD*, 149-49.

423 Nonaka, Ikujiro, et Hirotaka Takeuchi. 1995. *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics
424 of innovation*. Oxford university press.

425 ———. 2019. *The wise company: How companies create continuous innovation*. Oxford University Press.

426 Padilla, Lace M. K., Maia Powell, Matthew Kay, et Jessica Hullman. 2021. « Uncertain About Uncertainty: How Qualitative
427 Expressions of Forecaster Confidence Impact Decision-Making With Uncertainty Visualizations ». *Frontiers in Psychology* 11
428 (janvier). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.579267>.

429 Périllat, Raphaël, Claire-Eleuthèriane Gerrer, Sylvain Girard, David Pitaval, et Juliette Chastanet. 2022. « Accounting for
430 uncertainties in the simulation of soil pollution by metamodeling ». Poster IAMG 2022.

431 Périllat, Raphaël, Sylvain Girard, et Irène Korsakissok. 2020. « Solutions rapides pour la prévision des risques de pollution
432 atmosphérique ». In *Lambda Mu* 22. IMdR. <https://sylvaingirard.net/pdf/talk/perillat20-lambdamu21.pdf>.

433 Périllat, Raphaël, Sylvain Girard, Irène Korsakissok, et Emmanuel Quentric. 2021. « Emulators for the rapid prediction of
434 consequences in case of nuclear hazards ». Poster at HARMO20.

435 Polanyi, Michael. 1966. *The tacit dimension*. University of Chicago press.

436 Schwaber, Ken, et Jeff Sutherland. 2011. « The scrum guide ». *Scrum Alliance* 21 (1).

437 Takeuchi, Hirotaka, et Ikujiro Nonaka. 1986. « The new new product development game ». *Harvard business review* 64 (1):
438 137-46.

439 ZAN. 2023. « Zéro Artificialisation Nette : guide synthétique ». Ministère de la transition écologique et de la cohésion des
440 territoires. <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/guide-synthetique-zan>.