

L'approche Triade pour améliorer l'analyse du risque environnemental face aux défis de la contamination diffuse des sols

La gestion des risques environnementaux est désormais une priorité face au nombre croissant d'écosystèmes impactés par des activités anthropiques. La nécessité d'outils de diagnostic dédiés à l'évaluation du risque écologique (ERE) s'impose donc dans le contexte de la prévention et de la remédiation des environnements pollués. Les sols représentent des compartiments environnementaux primordiaux qui contribuent à de nombreux services écosystémiques, et leur dégradation suite à différentes pressions anthropiques peut entraîner une détérioration de ces fonctions. En particulier, les sols sont des puits de substances chimiques qui s'y accumulent, qu'il s'agisse de contamination ponctuelle ou diffuse. Les caractéristiques intrinsèques des sols déterminent largement la biodisponibilité des contaminations chimiques, et par conséquent le risque environnemental. Il y a ainsi de nombreux scénarios pour décrire les pollutions chimiques dans les sols, suivant les teneurs mises en cause, l'historique de la contamination, sa chronicité etc. Dans ce panorama, les outils pour l'ERE sont confrontés à leurs limites et nécessitent d'évoluer continuellement pour mieux s'adapter aux défis imposés par les sols contaminés.

Historiquement, différents cadres pour la réalisation d'une ERE existent, encadrés par des législations nationales ou faisant l'objet de standardisation dans des lignes guides. L'approche la plus simple et directe consiste toujours à mesurer les concentrations d'une ou plusieurs substances dans le sol et à comparer cette teneur totale avec des seuils de risques qui, si dépassés, entraînent différentes actions d'atténuation du risque. Cependant, le problème avec une telle approche est double. Si d'un côté la mesure des teneurs en contaminants est rapide, de l'autre les valeurs seuil ne sont pas toujours existantes et dépendent de plusieurs facteurs tels que la géochimie du sol et l'usage considéré du site. En second lieu, l'information apportée par la seule mesure chimique des teneurs totales est réputée un indicateur restrictif du risque environnemental, d'autant que la disponibilité chimique des contaminants dans un sol n'est prise en compte que rarement. De ce fait, les approches ERE multidisciplinaires semblent bien plus adaptées pour mieux quantifier le risque lié à la pollution chimique. Parmi celles-ci, l'approche dite « Triade » se base sur la complémentarité de différentes disciplines, telles que la chimie, l'écotoxicologie et l'écologie et se veut une mesure du risque écologique plus globale et non plus seulement ancrée qu'aux analyses chimiques.

Principe et déroulement de la Triade

Théorisée initialement par Long et Chapman (Long and Chapman, 1985), la méthode Triade a fait récemment l'objet de standardisation avec la publication d'une norme ISO (ISO 19204, 2017), qui définit le cadre d'usage et les grandes lignes de la démarche. Plus précisément, cette méthode se base sur l'utilisation en parallèle d'outils chimiques, écotoxicologiques et écologiques, organisés en différents faisceaux de preuves, ou « *lines of evidence* (LoE) ». Ces faisceaux de preuves sont structurés en une démarche itérative qui vise à prioriser les méthodes simples et moins onéreuses, avant de progresser vers un niveau de complexité plus important s'il s'avère nécessaire d'améliorer les résultats de la procédure, comme montré en Fig. 1.

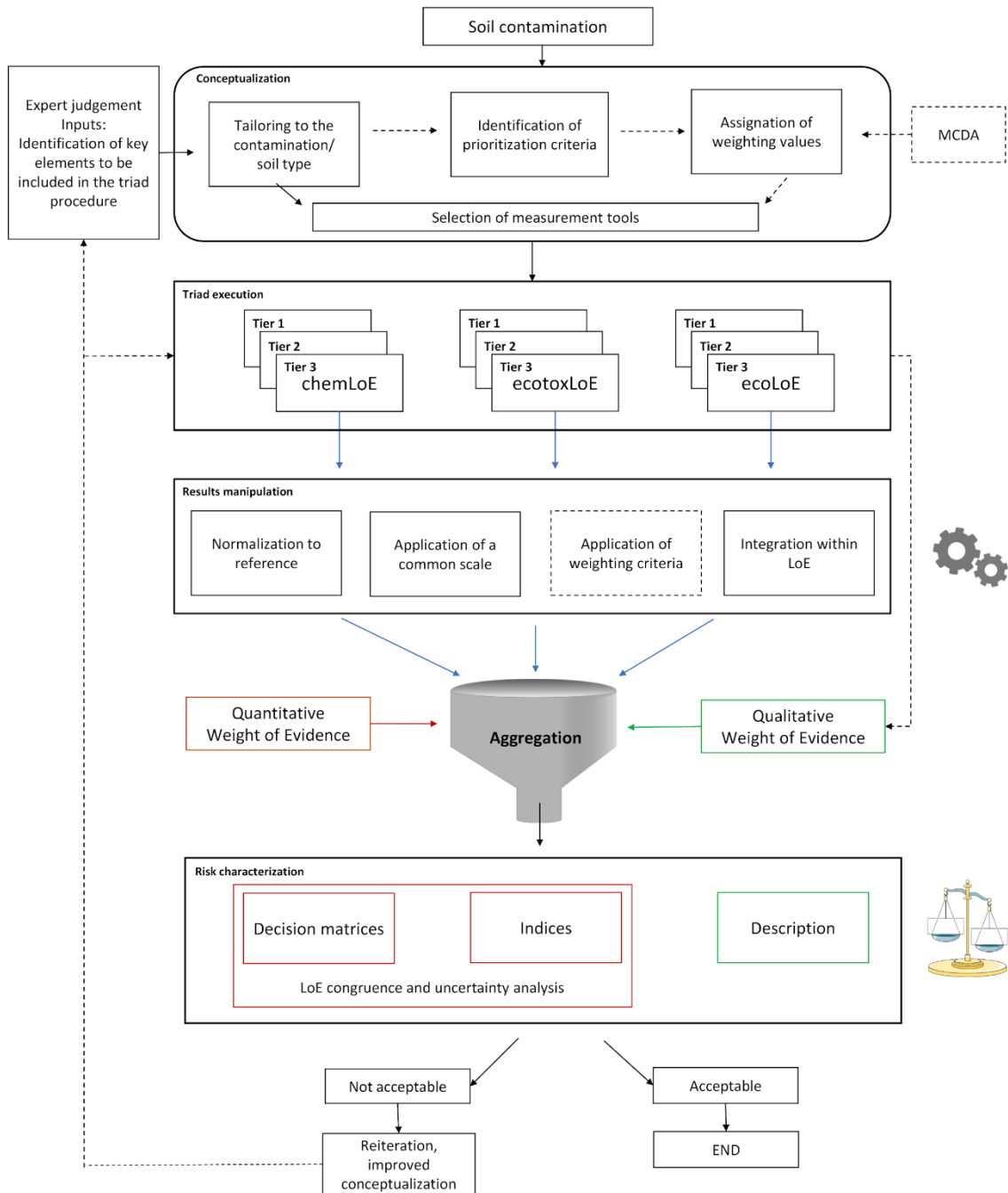


Figure 1. Schéma des différentes étapes qui constituent le déroulement d'une ERA au moyen de l'approche Triade, de la formulation du problème à l'exécution de analyses et synthèse des résultats. Les lignes pleines indiquent le workflow minimal pour la réalisation d'une Triade, et les lignes pointillées représentent des intégrations possible aux différentes étapes de la procédure (MCDA : multicriteria decision analysis – analyse décisionnelle multicritères)

Classiquement, la méthode préconise trois itérations de la procédure, depuis la première en tant que criblage simple pour arriver à une évaluation détaillée au troisième niveau, avec une complexité croissante des analyses utilisées. Bien qu'il n'existe pas de liste exhaustive des analyses pouvant intégrer les trois LoEs aux différents niveaux, des indications pour le choix de celles-ci sont données dans la norme ISO. En se voulant un outil « site-spécifique », cela permet une grande flexibilité aux utilisateurs qui peuvent décider des contenus de chaque LoE pour mieux s'adapter à leur problématique. Par exemple, la simple mesure des teneurs totales d'une substance dans un sol, bien adaptée pour le premier niveau de la Triade, peut être complétée avec des mesures de leur disponibilité dans les niveaux supérieurs. De la même façon, pour la LoE écotoxicologique, des endpoints de toxicité aiguë ou de tests en batterie sont utilisés dans un premier temps, pour ensuite cibler, par exemple, des effets sublétaux tels que les traits de vie ou de réponses de biomarqueurs. Les investigations écologiques reposent souvent sur des inventaires de couverture végétale au premier niveau, et sur l'étude des communautés d'oligochètes, la diversité microbienne du sol ou la caractérisation de traits fonctionnels d'organismes du sol aux niveaux deux et trois. A l'issue de la phase expérimentale, les résultats sont confrontés avec ceux obtenus sur un sol témoin, normalement aux caractéristiques similaires à celui étudié mais non contaminé, et normalisés pour permettre l'intégration au sein de chaque LoE. Ensuite, un indice de risque final synthétise la contribution de chaque discipline à la mesure du risque environnemental selon une approche de poids de la preuve « *weight-of-evidence (WoE)* », qui vise à intégrer la multidisciplinarité des informations obtenues en évaluant l'ampleur de leurs apports à l'évaluation. Enfin, l'indice de risque final, d'une valeur comprise entre 0 et 1, est comparé à des seuils préalablement établis qui catégorisent le risque lié à la contamination du sol selon une échelle de préoccupation, à la base d'une décision sur la prise d'action ou non face à la contamination du sol. Au moment de l'intégration, la cohérence des indications chimiques, écotoxicologiques et écologiques est évaluée, et en cas d'incongruence (e.g. risque chimique mis en évidence sans correspondance avec effets biologique du même sol) le processus est répété au niveau suivant, jusqu'à ce que l'incertitude associée à l'évaluation soit considérée acceptable.

Applications in situ, problématiques et propositions

Une revue sur l'application de la Triade dans des scénarios réels de contamination des sols (Grassi et al., 2022) a montré l'état actuel de son utilisation. Bien que la Triade présente de nombreux avantages et de potentiel pour une ERE site-spécifique, le nombre d'études appliquées aux écosystèmes terrestres témoigne d'une littérature peu développée autour de ce sujet. En particulier, cette revue a mis en évidence des traits communs des procédures en question. La plupart des sites étudiés étaient impactés par des activités industrielles ayant engendré des émissions locales de substances chimiques, caractérisant les sols concernés comme des « hotspots » de pollution avec des teneurs élevées en contaminants. De plus, les contaminants plus souvent ciblés par l'application de la Triade se limitent aux éléments potentiellement toxiques (PTE ; métaux, éléments en trace) et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Si l'ERE a été conçue avant tout pour répondre à l'urgence que présentent les sites fortement contaminés, cela dénote les défis associés à la contamination diffuse des sols, où les teneurs en contaminants sont beaucoup plus faibles, sublétales pour les organismes. En général, les difficultés rencontrées par l'évaluation du risque des sols contaminés de façon diffuse sont plus importantes par rapport aux contaminations aiguës, et nécessitent une approche site-spécifique (Posthuma et al., 2008). Par exemple, pour les apports continus de mélanges de contaminants provenant de plusieurs sources spatialement hétérogènes, la mise en évidence des conséquences environnementales est rendue complexe par différents facteurs. Ainsi, les seuils de contamination connus dans la littérature sont peu adaptés à la complexité engendrée par ces faibles

teneurs en contaminants, laissant la place à de nombreux facteurs confondants interférant dans la réponse des organismes. De plus, le processus connu de vieillissement des contaminants dans les sols peut entraîner une diminution de biodisponibilité. Enfin, les batteries de tests plus communément utilisées et qui ciblent des effets aigus ne sont pas adaptés à la mise en évidence d'effets écotoxiques qui se manifestent au niveau subléta, et par conséquent ne sont pas adaptées pour établir un lien cause-effet. La Triade s'est donc révélée jusqu'à présent comme un outil site-spécifique qui théorise une ERE basée sur les effets biologiques d'un sol contaminé en lien avec les substances qui y sont retrouvées, plutôt que simplement basée sur leur concentration dans le sol. Par contre, les applications concrètes aux sols faiblement contaminés sont rares.

Les méthodes utilisées dans les trois LoEs appartiennent majoritairement au premier niveau. Pour la LoE chimie, cela se traduit concrètement par la mesure des teneurs totales d'éléments traces métalliques (ETM) ou de HAPs et, le cas échéant, le calcul d'indices de risque à partir de celles-ci. En revanche, la fraction disponible de contaminants n'est pas souvent prise en compte et les méthodes telles que les extractions avec agents chélatants pour les ETM sont peu représentées, ou totalement absentes. C'est aussi le cas d'extractions partielles et de méthodes biomimétiques pour les contaminants organiques (Cachada et al., 2014). De façon similaire, les approches écotoxicologiques se limitent souvent à des tests d'immobilisation avec des organismes modèles en aquatique, comme *Daphnia magna*, ou des tests d'évitement avec des organismes du sol. L'utilisation de test d'inhibition de bioluminescence est également très répandue pour le LoE écotoxicologique qui ne va souvent pas au-delà du premier niveau dans la littérature analysée. Finalement, les méthodes écologiques se basent majoritairement sur des inventaires des invertébrés du sol. *In fine*, il n'y a pas de retour important sur l'application de la Triade à l'évaluation du risque liée à la contamination diffuse du sol. Les techniques qui pourraient permettre de mieux déchiffrer les effets liés à ce type de problématique n'enrichissent pas encore de façon systématique l'approche multidisciplinaire mise en place par la Triade.

Il est intéressant de remarquer qu'il y a plusieurs étapes critiques lors de la mise en place de la Triade, qui ressortent de la littérature actuelle sur le sujet. Ainsi, au moment de l'intégration des résultats des LoEs, il y a une perte d'information qui provient de la nécessité de synthétiser des informations de natures différentes. En effet, même-si un compromis entre la réduction de la complexité environnementale et le gain en simplicité d'interprétation est nécessaire pour arriver à un indice final concrètement utile à la catégorisation du risque, il y a souvent une forte discordance entre les LoEs. Ceci impacte la robustesse des résultats et demande le passage au niveau supérieur. Au même temps, les seuils d'incertitude préconisés afin de considérer fiables les résultats de la Triade semblent peu conservatifs et en général questionnent la raison scientifique de divisions si tranchantes. Une solution pourrait être une approche qui permet une meilleure prise en compte de l'incertitude associée aux LoEs et de sa propagation jusqu'à l'estimation du risque final. A cet effet, les networks Bayésiens ont été récemment proposés comme des outils novateurs pour les ERE (Landis, 2021; Moe et al., 2021), en raison des possibilités qu'ils offrent dans le traitement des incertitudes associées avec des données multidisciplinaires. Une autre amélioration en ce sens serait de moduler le pouvoir décisionnel d'une LoE, ou d'une méthode au sein de celle-ci, en établissant des facteurs de poids, ou « *weighting factors* ». Avec un processus décisionnel structuré *a priori*, et basé sur les inputs des experts, la contribution de chaque analyse dans l'ERE site-spécifique du risque serait évaluée selon des critères précis, prenant en compte leur sensibilité, leur pertinence pour le type de contamination, et la capacité de l'information produite à révéler un dommage environnemental. Cette approche serait envisageable pour rééquilibrer les contributions des LoEs et harmoniser les méthodes qui se veulent complémentaires dans le concept de la Triade. En outre, cette démarche pourrait faciliter l'intégration des analyses qui peuvent améliorer la Triade dans le cas de contaminations diffuses. En fait, cela

demande, par exemple, la prise en compte de la biodisponibilité ou de certaines caractéristiques du sol, afin d'orienter l'évaluation du risque vers la fraction de contaminants plus pertinent en terme d'effet toxique. De même, la LoE écotoxicologique devrait prendre en compte plus systématiquement les réponses de biomarqueurs d'exposition et d'effet pour mettre en évidence des effets sublétaux de sols moyennement et faiblement contaminés. Or ceci est à présent peu développé dans une ERE alors que de nombreux biomarqueurs ont démontré dorénavant leur pertinence. A titre d'exemple, bien que des effets au niveau subcellulaire soient détectables chez les organismes impactés par une contamination diffuse, il est encore compliqué dans la pratique de les mettre en relation de façon causale avec le risque environnemental. L'assignation d'un poids à ce type de réponses pourrait formaliser leur contribution dans une démarche WoE, par rapport à des tests écotoxicologiques ciblant des critères d'effet à plus haut niveau d'organisation biologique.

Conclusion

Dans le but d'évaluer les risques liés à une contamination diffuse impactant de nombreux écosystèmes terrestres, l'approche Triade est prometteuse et offre une grande flexibilité aux évaluateurs pour répondre aux spécificités rencontrées. Cependant cet outil à l'interface de la recherche et du management environnemental est encore peu utilisé, alors que de simples aménagements des critères pourraient permettre de rendre compte de la spécificité des écosystèmes faiblement multi-contaminés de façon chronique. Il faut noter que l'année 2022 voit la norme actuelle sur l'utilisation de la Triade remise en révision, ce qui annonce une évolution vers la prise en compte de différents types de milieux, qu'ils soient fortement ou faiblement contaminés.

Contacts

Giacomo Grassi

Juliette Faburé

UMR 1402 Ecosys - Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech
Centre Inrae de Versailles, RD 10 route de Saint Cyr
78026 – Versailles cedex

UMR ECOSYS

université
PARIS-SACLAY

INRAE

AgroParisTech 

Pour en savoir plus

Grassi, G., Lamy, I., Pucheux, N., Ferrari, B.J.D., Faburé, J., 2022. State of the Art of Triad-Based Ecological Risk Assessment: Current Limitations and Needed Implementations in the Case of Soil Diffuse Contamination. *Front. Environ. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878238>

Bibliographie citée

- Cachada, A., Pereira, R., da Silva, E.F., Duarte, A.C., 2014. The prediction of PAHs bioavailability in soils using chemical methods: State of the art and future challenges. *Sci. Total Environ.* 472, 463–480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.038>
- Grassi, G., Lamy, I., Pucheux, N., Ferrari, B.J.D., Faburé, J., 2022. State of the Art of Triad-Based Ecological Risk Assessment: Current Limitations and Needed Implementations in the Case of Soil Diffuse Contamination. *Front. Environ. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878238>
- ISO 19204, 2017. Soil quality. Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach) (No. ISO 19204:2017). Geneva, Switzerland.
- Landis, W.G., 2021. The Origin, Development, Application, Lessons Learned, and Future Regarding the Bayesian Network Relative Risk Model for Ecological Risk Assessment. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 17, 79–94. <https://doi.org/10.1002/ieam.4351>
- Long, E.R., Chapman, P.M., 1985. A Sediment Quality Triad: Measures of sediment contamination, toxicity and infaunal community composition in Puget Sound. *Mar. Pollut. Bull.* 16, 405–415. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(85\)90290-5](https://doi.org/10.1016/0025-326X(85)90290-5)
- Moe, S.J., Carriger, J.F., Glendell, M., 2021. Increased Use of Bayesian Network Models Has Improved Environmental Risk Assessments. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 17, 53–61. <https://doi.org/10.1002/ieam.4369>
- Posthuma, L., Eijsackers, H.J.P., Koelmans, A.A., Vijver, M.G., 2008. Ecological effects of diffuse mixed pollution are site-specific and require higher-tier risk assessment to improve site management decisions: A discussion paper. *Sci. Total Environ., Ecological effects of diffuse pollution* 406, 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.065>