

Sélection multicritère de bioindicateurs de la qualité des sols

J. Devillers⁽¹⁾, P. Pandard⁽²⁾ et A.-M. Charissou⁽³⁾

- 1) CTIS, 3 Chemin de la Gravière, 69140 Rillieux La Pape, France
- 2) Parc Technologique ALATA, BP n°2, 60550 Verneuil en Halatte, France
- 3) IPL Santé Environnement Durables Est, Rue Lucien Cuenot, ZI Saint Jacques II, 54320 Maxeville, France

RÉSUMÉ

Une approche méthodologique fondée sur l'utilisation d'une méthode multicritère originale appelée SIRIS (système d'intégration du risque par interaction de scores) et de méthodes multivariées classiques (analyse factorielle des correspondances multiples et classification ascendante hiérarchique) a été utilisée pour réaliser une sélection *a priori* de bioindicateurs à partir de 63 indicateurs proposés dans le cadre du programme de recherche « Bioindicateurs de qualité des sols ». Chaque indicateur était caractérisé par 10 critères scientifiques et 11 critères techniques choisis en accord avec l'ADEME et exprimés sous la forme de modalités favorable / défavorable ou favorable / moyennement favorable / défavorable. Du fait de différentes contraintes, le codage des indicateurs a été réalisé par les participants au programme. Les critères ont été hiérarchisés en considérant la problématique d'évaluation des risques pour les sites et sols pollués et celle de la surveillance de la qualité des sols. Le choix des scénarios et la hiérarchisation des critères ont également été faits en accord avec l'ADEME. Les typologies obtenues sont intéressantes et montrent les potentialités de l'approche méthodologique proposée. Cependant, elles comportent des biais imputables à la stratégie de codage des indicateurs. Pour pallier ce problème, la mise en place d'un panel d'experts indépendants, non directement impliqués dans le programme, a été proposée afin de recoder les indicateurs. Ceci permettra une utilisation optimale de cette méthodologie de sélection *a priori* de bioindicateurs selon des critères scientifiques et techniques.

Mots clés

Analyse multicritère, méthode SIRIS, analyse multivariée, sélection *a priori*, bioindicateur, qualité des sols.

SUMMARY**MULTICRITERIA SELECTION OF BIOINDICATORS OF SOIL QUALITY**

A methodological framework, based on the use of an original multicriteria method called SIRIS (system of integration of risk with interaction of scores) and classical multivariate analyses (multiple correspondence factor analysis and ascending hierarchical cluster analysis), was used to perform an a priori selection of bioindicators among 63 indicators included in the research program « Bioindicators of the quality of soils ». Each indicator was characterized by 10 scientific criteria and 11 technical criteria selected in agreement with the ADEME and coded as favorable / unfavorable or favorable / moderately favorable / unfavorable. Due to various constraints, the descriptor coding task was performed by the participants involved in the program. The criteria were ranked by decreasing order of importance by considering the risk assessment of the sites and polluted soils as well as a soil quality survey. The choice of the scenarios and the criterion hierarchies were also made in agreement with the ADEME. The obtained typologies are interesting and show the potentialities of the proposed methodology. However, they present biases linked to the coding strategy of the indicators. To overcome this problem, the use of a panel of experts, not involved in the program, is requested to recode the indicators. This should allow the optimal use of this methodology of a priori selection of bioindicators based on scientific and technical criteria.

Key-words

Multicriteria analysis, SIRIS method, multivariate analysis, a priori selection, bioindicator, quality of soils.

RESUMEN**SELECCIÓN MULTICRITERIO DE BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS**

Se utilizó un enfoque metodológico fundado sobre el uso de un método multicriterio original llamado SIRIS (sistema de integración del riesgo por interacciones de resultados) y de métodos multivariados clásicos (análisis factorial de las correspondencias múltiples y clasificación ascendente jerárquica) para realizar una selección a priori de bioindicadores a partir de 63 indicadores propuestos en el cuadro del programa de investigación "bioindicadores de calidad de los suelos". Cada indicador se caracterizó por 10 criterios científicos y 11 criterios científicos y 11 criterios técnicos elegidos en acuerdo con ADEME y expresados bajo forma de modalidades favorable / desfavorable o favorable / medianamente favorable / desfavorable. Del hecho de diferentes limitantes, se realizó la codificación de los indicadores por los participantes al programa. Se jerarquizaron los criterios considerando la problemática de evaluación de los riesgos para los sitios y suelos contaminados y la de la vigilancia de la calidad de los suelos. Se hizo también la elección de los escenarios y la jerarquización de los criterios en acuerdo con la ADEME. Las tipologías obtenidas están interesantes y muestran las potencialidades del enfoque metodológico propuesto. Sin embargo, presentan errores imputables a la estrategia de codificación de los indicadores. Para atenuar este problema, se propuso la puesta en lugar de un panel de expertos independientes, no directamente implicados en el programa, con el fin de codificar de nuevo los indicadores. Esto permitirá un uso óptimo de esta metodología de selección a priori de bioindicadores según criterios científicos y técnicos.

Palabras clave

Análisis multicriterio, método SIRIS, análisis multivariado, selección a priori, bioindicadores, calidad de suelos.

Les sols sont en constante évolution grâce à l'action de facteurs intrinsèques liés à la pédogenèse mais également à cause de facteurs anthropiques qui agissent directement ou indirectement sur ces milieux complexes. Cette évolution rend nécessaire la mise en place d'indicateurs permettant d'évaluer la qualité des sols au cours du temps. Idéalement, ces indicateurs doivent être pertinents, simples à utiliser, fiables, peu onéreux et faciles à interpréter. Dans la pratique, la sélection de tels outils est difficile car elle met en jeu des critères scientifiques et techniques variés que l'on doit obligatoirement hiérarchiser dans le but de répondre à des objectifs précis. Les critères les plus importants sont ensuite agrégés d'une façon plus ou moins formelle afin de faciliter l'utilisation de cette information hétérogène. Ces opérations peuvent être réalisées grâce à l'emploi de méthodes multicritères qui permettent de construire d'une façon optimale des outils opérationnels d'aide à la décision. C'est la raison pour laquelle les méthodes multicritères ont trouvé des applications dans de nombreux domaines de l'environnement, dont le contrôle de la qualité de l'air (Teng et Tzeng, 1994; Ayoko *et al.*, 2004), la gestion des rivières (Hermans *et al.*, 2007), des ressources en eau (Joubert *et al.*, 2003), ou des crues (Kenyon, 2007; Raaijmakers *et al.*, 2008), l'estimation des risques environnementaux de sites contaminés (Critto *et al.*, 2007; Semenzin *et al.*, 2007, 2008; Promentilla *et al.*, 2008), la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques (Rousis *et al.*, 2008), ou celle de boues de traitements des eaux usées (Bellehumeur *et al.*, 1997), l'estimation des dangers et des risques des xénobiotiques (Vaillant *et al.*, 1995; Guerbet et Jouany, 2002; Vincent *et al.*, 2000; Linkov *et al.*, 2007), ou la sélection de tests écotoxicologiques (Devillers *et al.*, 2009).

Dans cet article, la méthode multicritère SIRIS (Système d'intégration du risque par interaction de scores) (Vaillant *et al.*, 1995) a été utilisée pour sélectionner *a priori* des bioindicateurs de la qualité des sols selon différents scénarios définis par l'ADEME. Une attention particulière a été apportée à montrer l'intérêt et la grande flexibilité de ce type d'approche mais également à souligner les difficultés méthodologiques rencontrées dans l'utilisation pratique de ces méthodes.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Caractérisation des bioindicateurs

Une liste de 63 bioindicateurs (*tableau 1*) se rapportant à des organismes vivant dans ou sur le sol et prenant en compte des critères physiologiques, écologiques et écotoxicologiques variés a été établie en collaboration avec l'ADEME dans le cadre du programme « Bioindicateurs de qualité des sols ». Ces indicateurs se répartissent en indicateurs végétaux (n° 1 à 9), indicateurs microbiologiques (n° 10 à 45) et indicateurs faunistiques (n° 46 à 62). L'indicateur n° 63 (effet de voisinage, correspondant à des métriques de paysages) n'appartient à aucune de ces

catégories. Dans le *tableau 1*, certains indicateurs apparaissent en double ou en triple. C'est le cas par exemple de BIOLOG 1 (n° 17), BIOLOG 2 (n° 35) et BIOLOG 3 (n° 42). Cela est lié au fait qu'ils ont été utilisés par différentes équipes du programme de recherche avec des protocoles variant sur les méthodes de prélèvements, de préparation ou de mesure de l'indicateur.

Bien que ces 63 indicateurs concourent tous potentiellement à fournir de l'information sur l'estimation de la qualité des sols, il est évident que, dans la pratique, pour des raisons d'opérationnalité et de coût, leur nombre doit être plus restreint. Cette réduction peut être réalisée de façon arbitraire ou raisonnée. Dans le second cas, elle peut être conduite *a posteriori*, à partir de la comparaison de résultats de mesures effectuées sur différents échantillons de sol ou *a priori* en sélectionnant les bioindicateurs sur la base de différents critères jugés importants dans le cadre de la problématique étudiée. Cette façon de procéder est la plus rationnelle, la moins coûteuse et la plus rapide. Elle permet d'ailleurs d'inclure dans la comparaison des indicateurs en cours de développement. Enfin, elle n'exclut pas une sélection *a posteriori*, réalisée dans le but d'affiner la sélection *a priori* et de conduire à l'élaboration de batteries optimales. Ainsi, il nous est apparu judicieux d'effectuer une sélection *a priori* à partir de 10 critères scientifiques et de 11 critères techniques décrits par deux ou trois modalités (*tableau 2*). La liste de ces critères permettant de caractériser les bioindicateurs et la définition de leurs modalités ont été établies en collaboration avec l'ADEME.

Typologie des bioindicateurs

Tous les critères n'ont pas le même poids, certains étant beaucoup plus importants que d'autres. La hiérarchisation des critères peut être différente d'une méthode multicritère à l'autre et surtout elle peut sembler plus ou moins arbitraire surtout pour les personnes qui n'ont pas l'habitude d'employer ces techniques. Pour pallier ce problème, nous avons décidé d'utiliser la méthode SIRIS (Vaillant *et al.*, 1995) pour laquelle la hiérarchisation des critères consiste uniquement à les positionner les uns par rapport aux autres sans qu'il soit nécessaire d'introduire des pondérations comme dans certaines approches. Les différents critères sont classés par ordre décroissant d'importance. Bien entendu, avec la méthode SIRIS, il est possible de considérer que deux critères ont la même importance.

La pratique de la méthode SIRIS nous a montré qu'il était préférable de grouper les critères qui codent le même type d'information et de traiter ces groupes distinctement plutôt que d'établir une seule hiérarchie sur l'ensemble des critères retenus. C'est ce que nous avons fait dans cette étude en hiérarchisant séparément les critères scientifiques et les critères techniques. En considérant d'une part le problème de l'évaluation des risques pour les sites et sols pollués (EDR) et d'autre part la surveillance de la qualité des sols (SQS), en col-

Tableau 1 - Liste des 63 bioindicateurs sélectionnés.
Table 1 - List of 63 selected bioindicators.

Numéro d'identification	Description
1	Profil des éléments métalliques accumulés dans les parties aériennes non ligneuses
2	Typologie des associations végétales
3	Photosynthèse nette
4	Fluorescence chlorophyllienne
5	Teneur en acide ascorbique
6	Taux de peroxydation des phospholipides membranaires
7	Teneurs en acides aminés libres dans les exsudats racinaires et organes
8	Capacité de germination des graines
9	Biomarqueurs lipidiques (rapport C18:3/autres C18)
10	Profil taxonomique communauté bactérienne (puce à ADN)
11	Biomasse microbienne (obtenue par fumigation)
12	Minéralisation du carbone
13	Structure des communautés fongiques et bactériennes (par T-RLFP)
14	Biomasse bactérienne vivante par fluorimétrie (LiveDead)
15	ATP bactérien (réaction luciférine – luciférase)
16	Activité déshydrogénase
17	Profil d'utilisation de substrats carbonés (par la technique BIOLOG) « BIOLOG 1 »
18	Bactéries : diversité génétique (DGGE T-RFLP)
19	Quantité d'ADN (ADNr 16S)
20	Structure des communautés bactériennes (PCR quantitative ADNr 16S)
21	Structure des communautés bactériennes (profil ARISA)
22	Activité phosphatase acide
23	Activité phosphatase alcaline
24	Activité β glucosidase
25	Activité N-acétyl- β -D glucosaminidase
26	Biomasse fongique totale par la mesure de l'ergostérol total
27	Biomasse fongique par la mesure de l'ergostérol lié
28	Biomasse fongique par la mesure de l'ergostérol libre
29	Biomasse fongique par la détermination de profils PLFA spécifiques
30	Biomasse microbienne (obtenue par fumigation extraction)
31	ADN microbien total
32	ADN fongique (ADNr 18S)
33	ADN bactérien (ADNr 16S)
34	(ADNfong+ADNbact.)/Corg.
35	Profil d'utilisation de substrats carbonés (par la technique BIOLOG) « BIOLOG 2 »
36	Quantité de <i>Pseudomonas</i> cultivables
37	ADN 16S des <i>Pseudomonas</i>
38	Bactéries totales (dénombrement par cytométrie en flux)
39	Bactéries cultivables
40	Structure des communautés bactériennes (par TTGE et T-RLPF)
41	Activités enzymatiques
42	Profil d'utilisation de substrats carbonés (par la technique BIOLOG) « BIOLOG 3 »
43	Densités microbiennes
44	Bactéries impliquées dans la mobilisation de l'arsenic : gène aoxB
45	Bactéries impliquées dans la mobilisation de l'arsenic : gène arrA
46	Communautés lombriciennes
47	Communauté des vers de terre
48	Activités enzymatiques chez le ver de terre (ChEs, catalases, GST)
49	Essai comet chez le ver de terre
50	Bioaccumulation chez le ver de terre (Pb, Cd, HAP)
51	Nématodes : abondances absolues et relatives des 20 guildes fonctionnelles majeures
52	Nématodes : indice de maturité
53	Nématodes : « Channel Ratio »
54	Nématodes : « Channel Index »
55	Nématodes : indice de structure
56	Nématodes : indice d'enrichissement
57	Nématodes : patron de communauté de nématodes phytoparasites
58	Indice Biologique de la Qualité du Sol
59	Indice Général de la Qualité du Sol
60	Escargots : richesse spécifique et indices de diversité
61	Micromammifères : richesse spécifique et indices de diversité
62	Oiseaux : indice de condition corporelle (suivi populationnel et individuel)
63	Effet de voisinage, correspondant à des métriques de paysages

Tableau 2: Liste des critères scientifiques et techniques.**Table 2:** List of scientific and technical criteria.

Code	Critères	Modalités		
S1	Réponse bien définie et non ambiguë à des perturbations/stress/contraintes anthropiques croissants	Non	Réponse tout ou rien	Dose-réponse établie
S2	Variations spatiales connues (géographique: au-delà de la parcelle)	Non	Variations limitées	Variations importantes
S3	Variations temporelles connues (saisonniers)	Non	-	Oui
S4	Capable de faire la différence entre variations naturelles et perturbations/ stress/contraintes induits par l'activité humaine	Non	Suspecté, mais reste à démontrer	Oui et résultats confirmés
S5	Capable de renseigner rapidement sur une modification du milieu	Non	-	Oui
S6	Sensibilité à la contamination (organique ou métallique): données générées par l'expérience propre ou par des données bibliographiques incontestables	Faible	Moyenne	Forte
S7	Sensibilité aux pratiques culturales/usage du sol	Forte	Moyenne	Faible
S8	Réponse globale, intégrant l'ensemble des perturbations/stress/contraintes	Non	-	Oui
S9	Possibilité de relier la réponse mesurée à des perturbations/stress/contraintes particuliers (ex: physiques, chimiques)	Non	-	Oui
S10	Mesure renseignant directement sur l'état d'une population ou d'une communauté	Non	-	Oui
T1	Méthode normalisée	Non	En cours de normalisation	Norme établie
T2	Restrictions d'utilisation selon les périodes de l'année	Oui	-	Non
T3	Nécessité de connaissances spécifiques	Oui	-	Non
T4	Niveau de compétence	Supérieur au technicien	-	Technicien
T5	Type de matériel	Très spécialisé	Spécialisé	Courant
T6	Coût d'obtention d'une mesure unique hors personnel	≥ 150 € HT	<150 et > 50 € HT	≤ 50 € HT
T7	Temps d'obtention d'un résultat interprétable (obtenu généralement à partir de plusieurs mesures)	≥ 5 jours	<5 jours et > 1 jour	≤ 1 jour
T8	Bases de données (BD) disponibles pour interpréter la mesure	Non ou pas assez de données	Des données existent mais cela ne constitue pas une BD structurée	Existence d'une BD pouvant servir de référentiel
T9	Informations complémentaires nécessaires pour obtenir un résultat interprétable: tout type (e.g. traitements statistiques et/ou mesures)	Oui	Référentiel établi une fois pour toutes	Non
T10	Perception par le public et les gestionnaires (informations fournies et concept)	Difficile	Modérée	Facile
T11	Opérationnalité du bioindicateur	Nécessité de travaux complémentaires	-	Directement opérationnel

laboration avec l'ADEME, nous avons établi les deux doubles hiérarchies suivantes :

EDR: S1 > S6 > S9 > S4 > S10 > S2 > S3 > S5 > S8 > S7 et T1 > T11 > T8 > T3 > T10 > T4 > T6 > T7 > T5 > T9 > T2

SQS: S3 > S4 > S2 > S9 > S5 > S1 > S6 > S8 > S10 > S7 et T1 > T6 > T2 > T11 > T10 > T8 > T9 > T7 > T4 > T3 > T5

Pour le scénario EDR, le plus important est d'être en mesure de relier un effet mesuré à un stress croissant (e.g., concentration d'un contaminant) alors que pour le scénario SQS le plus important est de bien maîtriser les variations naturelles spatiales et temporelles.

Dans la méthode SIRIS, les modalités des critères doivent être codées en favorable (f) / défavorable (d) ou favorable (f) / moyennement favorable (m) / défavorable (d) selon que les critères possèdent deux ou trois modalités. Si certaines modalités comme le faible coût d'un test sont toujours favorables, d'autres varient selon la problématique étudiée. Dans cette étude, le codage des modalités s'est fait en collaboration avec l'ADEME. La colonne 3 du *tableau 2* correspond aux modalités défavorables (d), la colonne 4 à celles moyennement favorables (m) lorsqu'elles existent et la colonne 5 correspond aux modalités favorables (f).

À partir des différents critères hiérarchisés et de leurs modalités exprimées comme indiqué précédemment, la méthode SIRIS construit une échelle min/max de scores selon des règles d'incrémentations très précises. La *figure 1* montre un exemple explicatif de construction d'échelle de scores pour un système utilisant trois critères (C1, C2 et C3) présentant chacun trois modalités et avec la hiérarchie suivante: C1 > C2 > C3. D'autres exemples ainsi que les fondements théoriques de la méthode SIRIS sont traités en détail dans Vaillant *et al.* (1995).

Logiquement, le codage des bioindicateurs aurait dû être réalisé par un panel de personnes extérieures à leur élaboration. Ceci permet d'éviter les biais inhérents à un codage individuel qui favorise consciemment ou non les réponses favorables et peut donc conduire à un surclassement des bioindicateurs. Certains indicateurs étant en cours de développement, seuls leurs concepteurs pouvaient les coder du fait d'une connaissance de leurs avantages et limites intrinsèques. C'est la raison pour laquelle, en accord avec l'ADEME, il a été décidé de confier le codage de chaque indicateur à l'équipe de recherche l'ayant proposé dans le cadre du programme « Bioindicateurs de qualité des sols ».

Le calcul des scores SIRIS pour chaque indicateur s'est fait à partir du logiciel SIRIS-2D (version 2.04, CTIS, France).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le calcul d'un score scientifique et d'un score technique pour chaque indicateur permet de les positionner les uns par rapport aux autres sur un graphique à deux dimensions ce qui facilite leur

Figure 1: Echelle SIRIS de scores pour un système à 3 critères (C1, C2, C3) présentant 3 modalités et avec C1 > C2 > C3.

Figure 1: Scale of SIRIS scores for a system at 3 criteria (C1, C2, C3) presenting 3 modalities and with C1 > C2 > C3.

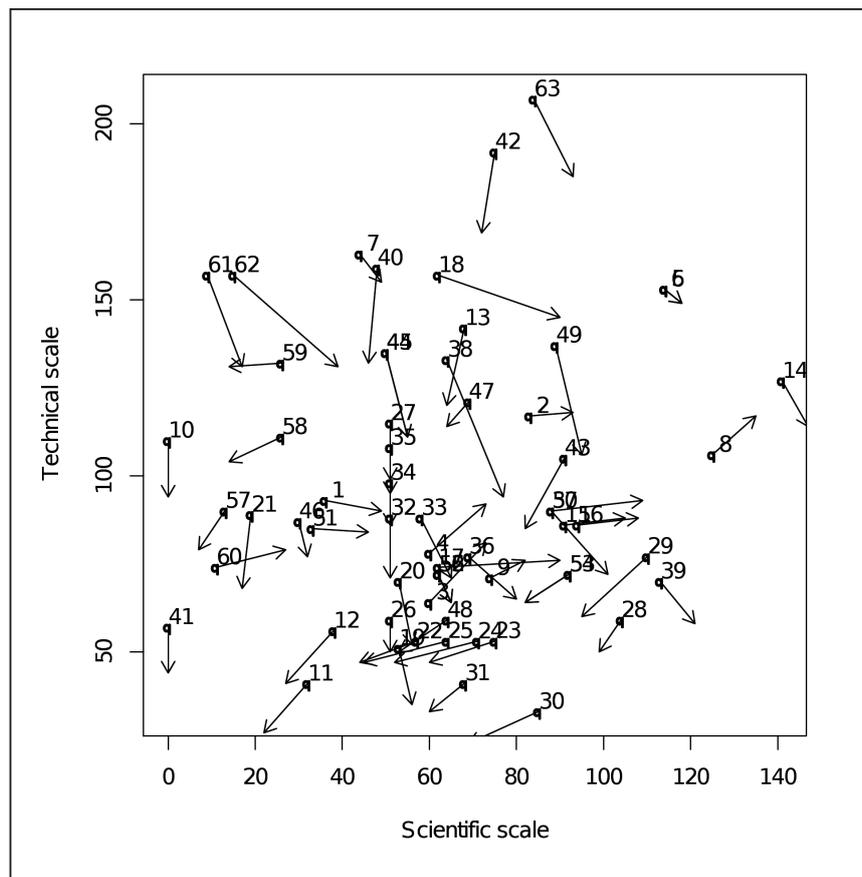
C1	C2	C3	Score	
f = 0	f = 0	f = 0	0	
		m = 1	1	
		d = 2	2	
	m = 2	f = 0	f = 0	2
			m = 1	3
			d = 3	5
		d = 5	f = 0	5
			m = 2	7
			d = 4	9
	m = 4	f = 0	f = 0	4
			m = 1	5
			d = 3	7
m = 3		f = 0	f = 0	7
			m = 2	9
			d = 4	11
		d = 6	f = 0	10
			m = 2	12
			d = 5	15
d = 8		f = 0	f = 0	8
			m = 2	10
			d = 4	12
	m = 3	f = 0	f = 0	11
			m = 2	13
			d = 5	16
		d = 7	f = 0	15
			m = 3	18
			d = 6	21

comparaison. Ainsi, pour chaque scénario choisi, correspondant à des hiérarchies différentes des critères scientifiques et techniques, il est possible de construire une carte SIRIS. Pour faciliter la comparaison des typologies obtenues avec le scénario sites et sols pollués (EDR) et celui de la surveillance de la qualité des sols (SQS), les deux cartes SIRIS ont été superposées (*figure 2*). Sur la *figure 2*, la position des indicateurs résultant du calcul des scores avec le scénario EDR est symbolisée par des points. Celle des indicateurs, obtenue en utilisant le scénario SQS, est représentée par les pointes des flèches. Plus une flèche est longue plus le passage d'un scénario à l'autre modifie la position du bioindicateur considéré. C'est le cas, par exemple, de l'indicateur n° 38 (bactéries totales (dénombrement par cytométrie en flux)). D'un point de vue pratique, la présence d'une flèche courte signifie que l'indicateur considéré est ubiquiste, sa position changeant peu d'un scénario à l'autre. Enfin, lorsque deux indicateurs ont des scores SIRIS identiques, ils apparaissent superposés.

D'une façon plus générale, les bioindicateurs situés en bas et à gauche de la carte SIRIS sont les plus intéressants d'un point

Figure 2: Evolution du positionnement des 63 bioindicateurs sur la carte SIRIS entre les scénarios EDR (points) et SQS (extrémités des flèches).

Figure 2: Evolution of the location of the 63 bioindicators on the SIRIS map from the EDR scenario (points) to the SQS scenario (top of the arrows).



de vue scientifique et technique alors que ceux localisés en bas et à droite ne sont pertinents que d'un point de vue technique. Les indicateurs localisés en haut et à gauche de la carte sont scientifiquement intéressants mais ils sont pénalisés par leurs caractères techniques. Enfin, les indicateurs situés en haut et à droite sont les moins intéressants. La *figure 2*, construite à partir d'une double échelle de scores, permet donc de sélectionner d'une façon optimale des bioindicateurs selon le ou les scénarios retenus. Cependant, l'inspection de cette figure montre que les typologies obtenues sont biaisées du fait des codages réalisés par certaines équipes qui ont conduit à un surclassement de leur(s) indicateur(s). C'est le cas par exemple de l'indicateur n° 10 (profil taxonomique communauté bactérienne (puce à ADN)) et n° 41 (activités enzymatiques) qui se retrouvent avec un score SIRIS égal à zéro sur l'échelle scientifique ce qui revient à les considérer comme scientifiquement parfaits. La pratique de la méthode SIRIS montre que cette situation ne doit normalement pas se rencontrer lorsque le codage a été convenablement réalisé c'est-à-dire lorsque que le caractère favorable (f) a été choisi avec discernement lors du codage des différents critères. Malgré l'existence d'un biais possible ou avéré pour les indicateurs situés dans cette partie de la carte SIRIS, ils n'en demeurent pas moins de bons candidats pour une sélection future car, soumis

à un codage moins subjectif, ils resteront quand même dans une zone intéressante de la carte. Le même type de raisonnement peut s'appliquer aux indicateurs situés à droite de la carte SIRIS (*figure 2*), comme par exemple l'indicateur n° 8 (capacité de germination des graines), le n° 14 (biomasse bactérienne vivante par fluorimétrie (LiveDead)) ou le n° 39 (bactéries cultivables). En effet, l'existence d'un biais éventuel lors du codage de ces indicateurs ne changerait pas beaucoup leur position sur la carte SIRIS. Par contre, l'existence d'un biais dans le codage des indicateurs situés dans la partie moyenne de la carte est plus lourde de conséquences car sa correction peut positionner l'indicateur soit dans la partie gauche de la carte ce qui peut conduire à sa sélection, soit dans la partie droite et dans ce cas-là entraîner son rejet éventuel. L'exemple des indicateurs BIOLOG (n° 17, 35 et 42) est intéressant à considérer. Leurs scores sur l'échelle scientifique les localisent dans le milieu de la carte SIRIS. Par contre, leurs scores techniques très différents les positionnent tout au long de l'échelle technique. Cet écart dans les scores peut être attribué aux différences de mise en œuvre par les trois équipes mais également au fait que les critères techniques ont été perçus différemment par ces dernières.

La typologie des 63 bioindicateurs obtenue par la méthode SIRIS a été confrontée à celle définie par une Analyse Factorielle

Figure 3: Plan factoriel F1F2 de l'AFCM des 63 bioindicateurs (carte en bas à droite) décrits par 10 critères scientifiques (S1 à S10 dans le *tableau 2*) et 11 critères techniques (T1 à T11 dans le *tableau 2*).

Figure 3: F1F2 factorial plan of the MCFA of the 63 bioindicators (right bottom map) described by 10 scientific criteria (S1 to S10 in table 2) and 11 technical criteria (T1 to T11 in table 2).

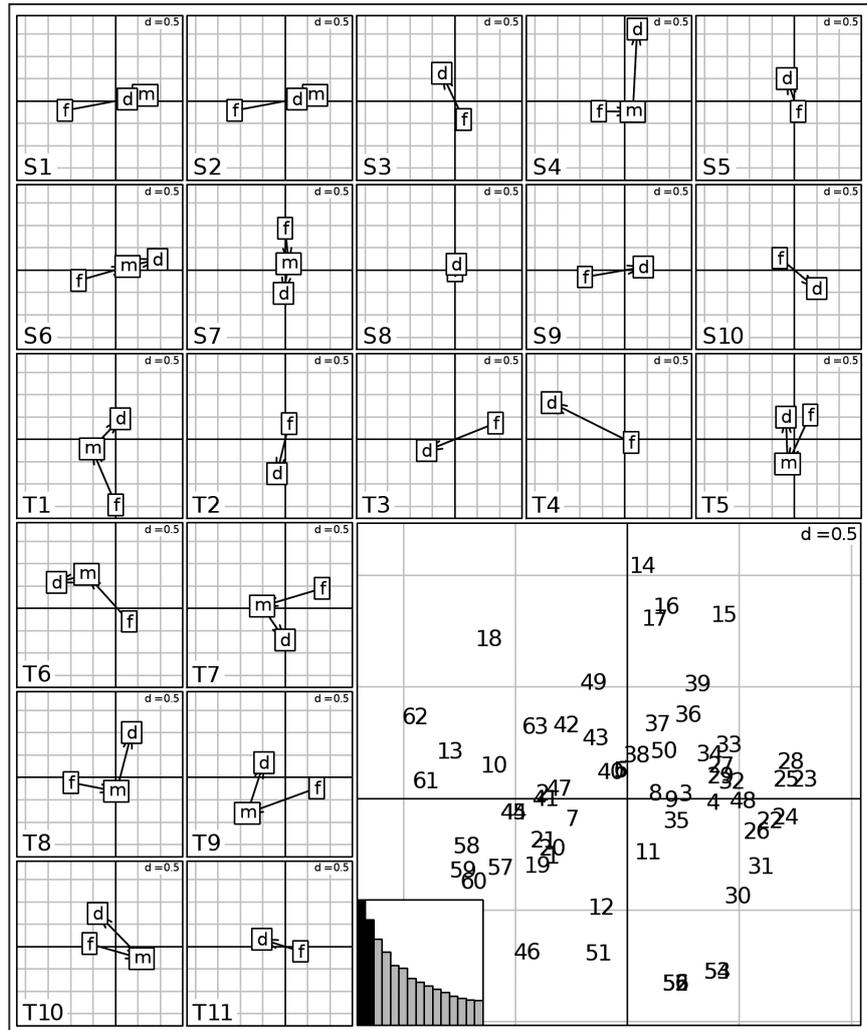
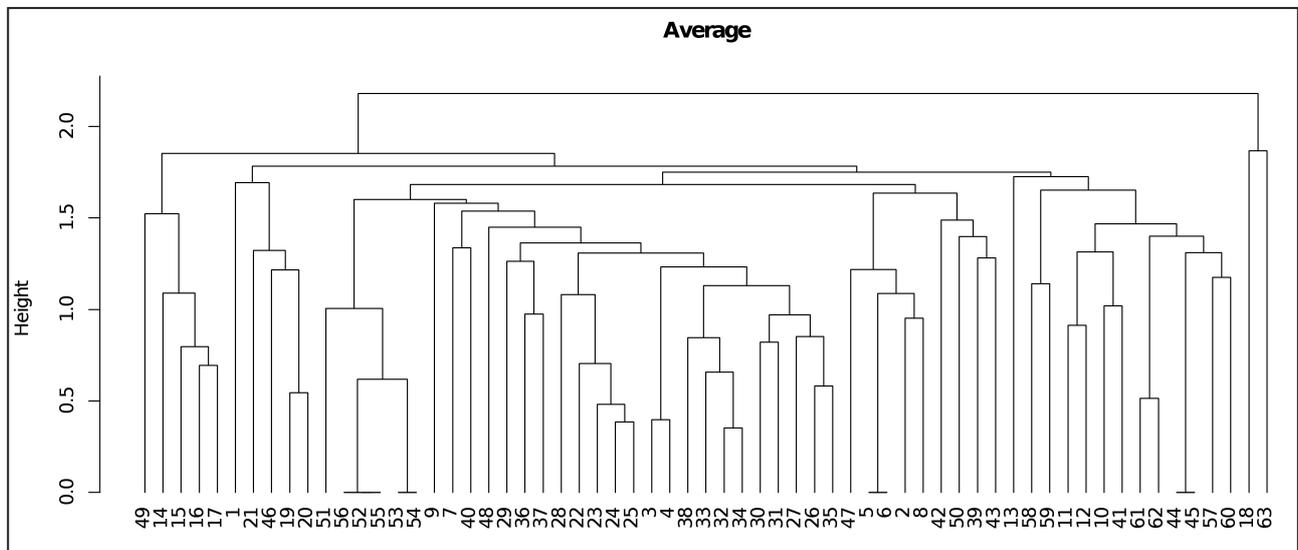


Figure 4: Dendrogramme des 20 premiers facteurs de l'AFCM.

Figure 4: Dendrogram of the 20 first factors of the MCFA.



des Correspondances multiples (AFCM) (Devillers et Karcher, 1991) après transformation de la matrice 63 x 21 (bioindicateurs x critères) en tableau disjonctif complet. Les analyses ont été effectuées avec ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997) sous R.

Le premier plan factoriel (F1F2) ne prend en compte que 23,8 % de la variance expliquée. C'est la raison pour laquelle l'espace des objets (*figure 3*, bas) montre une typologie des bioindicateurs assez différente de celle obtenue avec la méthode SIRIS. La position des bioindicateurs sur cette figure et la formation de clusters s'expliquent à partir de l'espace des variables (i.e. critères). Pour faciliter sa lecture, une collection de 21 graphes, un par variable (critère), a été réalisée. Chaque variable scientifique (S) ou technique (T) est représentée par un doublet (deux modalités) ou un triplet (trois modalités) de carrés orientés. Ainsi, il est possible d'expliquer la position relative de chaque bioindicateur à partir des modalités qui ont été attribuées aux 10 critères scientifiques et 11 critères techniques le caractérisant.

Avec 19,8 % de variance expliquée, le plan factoriel F2F3 (*figure non montrée*) apporte de l'information supplémentaire sur la typologie des différents indicateurs. Cependant, l'inspection du graphe des valeurs propres de la *figure 3* (histogramme en bâtons en bas) montre qu'il faudrait considérer d'autres plans factoriels pour extraire toute l'information contenue dans la matrice. Une autre solution consiste à réaliser une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les facteurs de l'AFCM (Devillers et Karcher, 1991). C'est ce que nous avons fait à partir des 20 premiers facteurs de l'AFCM ce qui représentait 92,6 % de la variance expliquée. Nous avons utilisé la distance Euclidienne et le lien moyen pour construire le dendrogramme (*figure 4*). L'inspection de la *figure 4* montre que les caractéristiques des classements SIRIS sont globalement respectées. Ainsi, par exemple, l'indicateur n° 63 (effet de voisinage, correspondant à des métriques de paysages) apparaît également comme un outlier. Il se trouve cependant faiblement lié à l'indicateur n° 18 (bactéries: diversité génétique (DGGE T-RFLP)). Les indicateurs n° 11 (biomasse microbienne (obtenue par fumigation)) et n° 12 (minéralisation du carbone) sont assez bien clustérisés sur la *figure 4* ce qui est également visible sur la carte SIRIS (*figure 2*). Il en est également de même des indicateurs n° 24 (activité β glucosidase) et n° 25 (activité N-acétyl- β -D glucosaminidase), n° 32 (ADN fongique (ADNr 18S)) et n° 34 ((ADNfong+ADNbact.)/Corg.), n° 61 (micromammifères: richesse spécifique et indices de diversité) et n° 62 (oiseaux: indice de condition corporelle (suivi populationnel et individuel)), etc. Enfin, on peut remarquer que les indicateurs n° 41 (activités enzymatiques) et n° 10 (profil taxonomique communauté bactérienne (puce à ADN)) forment un cluster (*figure 4*) alors qu'ils présentent une parenté par leur score SIRIS égal à zéro pour l'échelle scientifique (*figure 2*). Il est à noter qu'un dendrogramme à peu près semblable a été obtenu en utilisant le lien complet comme critère d'agrégation. D'une façon plus générale, les résultats obtenus avec la CAH confirment l'existence de biais dus à des problèmes de codage de certains indicateurs.

CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectif de proposer une approche méthodologique permettant de sélectionner une batterie optimale de bioindicateurs afin de caractériser la qualité des sols à partir de ceux développés dans le programme ADEME « Bioindicateurs de qualité des sols ». Cette sélection, qui a porté sur 63 bioindicateurs, s'est principalement appuyée sur l'utilisation de la méthode multicritère SIRIS (Vaillant *et al.*, 1995). Cette méthode a ainsi été appliquée pour les deux scénarios environnementaux suivants: « Evaluation des risques » (EDR) et « Surveillance de la Qualité des Sols » (SQS). Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux produits par l'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) après transformation de la matrice de base en tableau disjonctif complet suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces méthodes nécessitaient un codage préalable des 10 critères scientifiques et 11 critères techniques caractérisant chaque indicateur. Pour différentes raisons techniques et pratiques, en accord avec l'ADEME, ce codage a été confié aux différentes équipes impliquées dans le programme. Les résultats obtenus ont montré l'intérêt d'utiliser la méthode SIRIS couplée à des approches multivariées classiques pour effectuer une typologie des bioindicateurs. Ils confirment ainsi les résultats récemment obtenus pour la sélection d'une batterie optimale de tests écotoxicologiques (Devillers *et al.*, 2009). Par contre, des problèmes ont été relevés du fait de biais introduits par le codage individuel des bioindicateurs.

Toutefois, s'il n'a pas été possible de sélectionner une batterie aboutie de bioindicateurs du fait de cette incertitude sur le codage, il est néanmoins envisageable de réaliser un tri des bioindicateurs entre ceux qui présentent un intérêt certain et ceux qui, au stade actuel, ne peuvent répondre de façon satisfaisante aux deux scénarios retenus. Il n'existe, en effet, aucune ambiguïté sur les indicateurs mal classés. Ainsi, les bioindicateurs n° 5, 6, 8, 14, 39, 42 et 63 pourraient être d'ores et déjà éliminés compte tenu de leur positionnement sur la carte SIRIS (*figure 2*). A l'inverse, les bioindicateurs n° 1, 10, 11, 12, 21, 41, 46, 51, 57, 58 et 60 apparaissent comme de bons candidats à conserver. Les propositions faites pour ces indicateurs demandent à être confirmées. De la même façon, la position relative des indicateurs non cités dans ces deux listes doit également être déterminée. Pour cela, il serait indispensable de recommencer toutes les analyses en supprimant les biais introduits par le codage individuel. Dans ce but, il apparaît nécessaire de réviser le mode de codage des 63 bioindicateurs par la mise en place d'un consortium d'experts indépendants, non directement impliqués dans le programme et ses développements ultérieurs, afin de permettre une utilisation optimale de cette méthodologie de sélection *a priori* de bioindicateurs selon des critères scientifiques et techniques. Ce consortium se devra d'intégrer des experts des domaines couverts par le programme et jugera l'ensemble des bioindicateurs les uns par rapport aux autres.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme: Application de méthodes de sélection *a priori* de tests écotoxicologiques et de bioindicateurs de qualité des sols pour l'élaboration de batteries d'essais et d'indices intégrateurs dédiés à un scénario défini d'utilisation (Convention ADEME n° 07 75C 0043).

BIBLIOGRAPHIE

- Ayoko G.A., Morawska L., Kokot S. et Gilbert D., 2004 - Application of multicriteria decision making methods to air quality in the microenvironments of residential houses in Brisbane, Australia. *Environ Sci Technol*, 38, pp. 2609-2616.
- Bellehumeur C., Vasseur L., Ansseau C. et Marcos B., 1997 - Implementation of a multicriteria sewage sludge management model in the southern Québec municipality of Lac-Mégantic. Canada. *J Environ Manag*, 50, pp. 51-66.
- Critto A., Torresan S., Semenzin E., Giove S., Mesman M., Schouten A.J., Rutgers M. et Marcomini A., 2007 - Development of a site-specific ecological risk assessment for contaminated sites: Part I. A multi-criteria based system for the selection of ecotoxicological tests and ecological observations. *Sci Total Environ*, 379, pp. 16-33.
- Devillers J. et Karcher W., 1991 - *Applied Multivariate Analysis in SAR and Environmental Studies*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 530.
- Devillers J., Pandard P., Charissou A.M. et Bispo A., 2009 - Use of multicriteria analysis for selecting ecotoxicity tests. In: *Ecotoxicology Modeling*. J. Devillers (Ed.), Springer, New York, pp. 117-143.
- Guerbet M. et Jouany J.M., 2002 - Value of the SIRIS method for the classification of a series of 90 chemicals according to risk for the aquatic environment. *Environ Impact Assess Rev*, 22, pp. 377-391.
- Hermans C., Erickson J., Noordewier T., Sheldon A. et Kline M., 2007 - Collaborative environmental planning in river management: An application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont. *J Environ Manag*, 84, pp. 534-546.
- Joubert A., Stewart T.J. et Eberhard R., 2003 - Evaluation of water supply augmentation and water demand management options for the city of Cape Town. *J Multi-Crit Decis Anal*, 12, pp. 17-25.
- Kenyon W., 2007 - Evaluating flood risk management options in Scotland: A participant-led multi-criteria approach. *Ecol Econ*, 64, pp. 70-81.
- Linkov I., Satterstrom F.K., Steevens J., Ferguson E. et Pleus R.C., 2007 - Multi-criteria decision analysis and environmental risk assessment for nanomaterials. *J Nanoparticle Res*, 9, pp. 543-554.
- Promentilla M.A.B., Furuichi T., Ishii K. et Tanikawa N., 2008 - A fuzzy analytic network process for multi-criteria evaluation of contaminated site remedial countermeasures. *J Environ Manag*, 88, pp. 479-495.
- Raaijmakers R., Krywkow J. et van der Veen A., 2008 - Flood risk perceptions and spatial multi-criteria analysis: An exploratory research for hazard mitigation. *Nat Hazards*, 46, pp. 307-322.
- Rousis K., Moustakas K., Malamis S., Papadopoulos A. et Loizidou M., 2008 - Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus. *Waste Manage*, 28, pp. 1941-1954.
- Semenzin E., Critto A., Carlon C., Rutgers M. et Marcomini A., 2007 - Development of a site-specific ecological risk assessment for contaminated sites: Part II. A multi-criteria based system for the selection of bioavailability assessment tools. *Sci Total Environ*, 379, pp. 34-45.
- Semenzin E., Critto A., Rutgers M. et Marcomini A., 2008 - Integration of bioavailability, ecology and ecotoxicology by three lines of evidence into ecological risk indexes for contaminated soil assessment. *Sci Total Environ*, 389, pp. 71-86.
- Teng J.Y. et Tzeng G.H., 1994 - Multicriteria evaluation for strategies of improving and controlling air quality in the super city: a case study of Taipei city. *J Environ Manag*, 40, pp. 213-229.
- Thioulouse J., Chessel D., Dolédec S. et Olivier J.M., 1997 - ADE-4: A multivariate analysis and graphical display software. *Stat Comput*, 7, pp. 75-83.
- Vaillant M., Jouany J.M. et Devillers J., 1995 - A multicriteria estimation of the environmental risk of chemicals with the SIRIS method. *Toxicol Model*, 1, pp. 57-72.
- Vincent R., Bonthoux F. et Lamoise C., 2000 - Evaluation du risque chimique. Hiérarchisation des risques potentiels. *Cahiers Notes Doc Hyg Sec Travail*, 178, pp. 29-34.