

1 Titre de la communication : Indicateurs synthétiques de la qualité du sol

2 Titre courant: Indicateurs synthétiques de la qualité du sol

3 English title: Synthetic indicators of soil quality

4

5 Nuria RUIZ CAMACHO<sup>1</sup>, Elena VELASQUEZ<sup>2</sup>, Anne PANDO<sup>1</sup>, Thibaud DECAËNS<sup>3</sup>,

6 Florence DUBS<sup>1</sup>, Patrick LAVELLE<sup>4</sup>

7

8 1. UMR 211 Bioemco, Equipe IBIOS-IRD/Universités Paris VI et XII, 32, Av. Henri

9 Varagnat, 93143 Bondy Cedex

10 2. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Edificio 500

11 3. Laboratoire d'Ecologie, UPRES-EA 1293, UFR Sciences et Techniques, Université de

12 Rouen, F-76821 Mont Saint Aignan Cedex

13 4. Centro internacional de Agricultura Tropical (CIAT) Unidad Suelos ap aéreo 6713, Cali,

14 Colombie

15

16 Résumé : Deux indicateurs synthétiques de la qualité des sols ont été testés dans les sites de  
17 recherche du programme Bioindicateurs de l'ADEME. Six fenêtres paysagères de 1Km<sup>2</sup>  
18 chacune ont été choisies dans le Morvan et la Normandie, de façon à représenter un gradient  
19 de l'intensification de l'usage du sol, de la forêt naturelle vers les paysages mixtes agro sylvo  
20 pastoraux et les cultures intensives.

21 Les indicateurs s'adaptent parfaitement, permettant d'évaluer finement les divers éléments de  
22 la qualité des sols. Le GISQ analyse avec précision l'impact des usages du sol, donnant  
23 régulièrement des notes élevées à certains sols de pâturage, voire de culture, pour certains des  
24 indicateurs (chimique et physique en particulier). Une corrélation significative entre les  
25 métriques paysagères et les valeurs des divers indicateurs (coefficients de co-variation (RV)  
26 de respectivement 0.29 et 0.32 dans le Morvan et en Normandie ;  $p < 0.01$ ) montre qu'une part  
27 importante de la qualité du sol est déterminée par la structure même du paysage, et non pas  
28 uniquement par le mode d'usage du sol dans la parcelle.

29 L'IBQS se fonde sur la co-variation remarquable observée entre les paramètres chimiques du  
30 sol et la composition spécifique (en 195 espèces) de la communauté d'invertébrés édaphiques  
31 (RV exceptionnels de respectivement 0.83 pour les sites de Normandie et 0.84 pour le  
32 Morvan ; significatives au seuil  $p < 0.001$ ). Il sépare bien les milieux en fonction de la qualité  
33 de leur sol, les valeurs les plus logiques étant obtenues en utilisant une formule globale de  
34 l'indicateur (qui intègre les 27 sites étudiés antérieurement en France) plutôt qu'avec des  
35 indicateurs régionaux dont le référentiel est insuffisant.

36 Les indicateurs IBQS et GISQ sont liés et nous proposons de les utiliser dans une démarche  
37 en deux étapes : 1. évaluer les valeurs des divers indicateurs GISQ et 2. rechercher les  
38 groupes d'espèces indicatrices de différentes classes de valeur de chacun de ces indices pour  
39 constituer des IBQS pour chacun des 5 aspects de la qualité du sol distingués.

40 Mots clés : Indicateur synthétique, qualité du sol, macro-invertébré, paysage, espèce

41 indicatrice, utilisation du sol.

42

43 Resumen: Dos indicadores sintéticos de la calidad del suelo han sido sometidos a un test en  
44 los sitios de estudio del programa de investigación Bioindicadores de la ADEME. Seis  
45 ventanas de 1 Km<sup>2</sup> situadas en el paisaje fueron seleccionadas en el Morvan y en Normandia,  
46 de manera a representar un gradiente de intensificación en la utilización del suelo, desde el  
47 bosque natural hasta los paisajes mixtos agro silvo pastorales y los cultivos intensivos.  
48 Los indicadores se adaptan perfectamente, permitiendo la evaluación fina de los diferentes  
49 elementos que definen la calidad del suelo. El GISQ analiza con precisión el impacto de la  
50 utilización del suelo, dando notas altas a ciertos suelos de pastoreo o incluso a suelos  
51 cultivados para ciertos de los indicadores (químico y físico en particular). Una coincidencia  
52 significativa entre las métricas del paisaje y los valores de los diferentes indicadores  
53 (coeficientes RV de 0.29 y 0.32 respectivamente para el Morvan y Normandia ;  $p < 0.01$ )  
54 muestra que una parte importante de la calidad del suelo está determinada por la propia  
55 estructura del paisaje y no únicamente por el tipo de utilización del suelo en la parcela.  
56 El IBQS se basa en la covariación extraordinaria observada entre los parámetros químicos del  
57 suelo y la composición específica (en 195 especies) de la comunidad de invertebrados  
58 edáficos (RV excepcionales de 0.83 en los sitios de Normandia y de 0.84 en el Morvan ;  
59  $p < 0.001$ ). Separa bien los diferentes medios en función de la calidad de sus suelos, los  
60 valores más apropiados han sido obtenidos utilizando una fórmula global del indicador (que  
61 integra los 22 sitios estudiados con anterioridad en Francia) mientras que el cálculo de  
62 indicadores regionales ha puesto de manifiesto la existencia de un referente insuficiente.  
63 Los indicadores IBQS y GISQ están relacionados y proponemos que sean utilizados según un  
64 procedimiento formado por dos etapas : 1. evaluar los valores de los diferentes indicadores  
65 del GISQ y 2. identificar los grupos de especies indicadoras asociadas a los grupos de sitios  
66 con diferentes clases de valor de cada índice para constituir un IBQS para cada uno de los  
67 cinco aspectos de la calidad del suelo considerados.

68 Palabras clave : Indicador sintético, calidad del suelo, macro-invertebrado, paisaje, especie

69 indicadora, utilización del suelo.

70

71 Extended Summary: Two synthetic indicators of soil quality were tested in the study sites  
72 selected for the development of the Bioindicators research program of ADEME. Six  
73 landscape windows of 1 Km<sup>2</sup> each were selected in Morvan and Normandy in order to  
74 describe an intensification gradient of land uses, from natural forest to mixed landscapes of  
75 agro sylvo pastoral managements and intensive cultures.

76 Indicators were well adapted to different situations allowing the fine assessment of different  
77 elements of soil quality. GISQ analyzes the impact of land uses and regularly gives high  
78 values to some pastures or even cropped soils regarding certain indicators (chemical and  
79 physical particularly). A significant co-inertia between the landscape metrics and the values of  
80 different indicators (RV coefficients of 0.29 and 0.32 respectively to Morvan and Normandy;  
81  $p < 0.01$ ) showed that an important part of soil quality is determined by landscape structure and  
82 not only by soil management practices applied at the plot level.

83 IBQS is based on the remarkable co variation observed between soil chemical parameters and  
84 the specific composition (195 species) of soil macro-invertebrate communities (RV  
85 coefficients of 0.83 for Normandy and 0.84 for Morvan;  $p < 0.001$ ). The index was able to  
86 make a reliable separation of environments depending on their soil qualities, the best adapted  
87 values were obtained when using a global formula of the indicator (which take into account  
88 22 previously studied sites in France) rather than when using the insufficient regional dataset.

89 A relationship between the IBQS and GISQ exists and we suggest using them to follow a two  
90 steps procedure: 1. to assess the values obtained for the different GIQS indicators and 2. to  
91 identify the assemblages of indicator species associated to the groups of sites showing similar  
92 values for different GISQ indicators to compute a IBQS to each of the five different aspects of  
93 soil quality taken into account by GIQS.

94 Keywords : Synthetic indicator, soil quality, macro-invertebrate, landscape, indicator species,  
95 landuse.

96

97 Indicateurs synthétiques de la qualité du sol

98

99 Nuria Ruiz-Camacho, Elena Velasquez, Anne Pando, Thibaud Decaëns, Florence Dubs,

100 Patrick Lavelle

101

102 Introduction

103

104 La prise en compte croissante des biens et services produits par les écosystèmes, dans toute  
105 leur diversité, amène les chercheurs et les pouvoirs publics à changer leur appréhension du  
106 sol. Le MEA (Millenium Ecosystem Assessment) montre que le formidable développement  
107 de la production agricole dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle s'est fait largement aux  
108 dépends de l'ensemble des éléments qui font la qualité du sol, principalement leurs propriétés  
109 hydriques, leur capacité à stocker du C, et leur biodiversité (MEA, 2005). Tandis que les  
110 pratiques évoluent, la réglementation s'adapte en cherchant à promouvoir un usage du sol qui  
111 permette une production optimale tout en maintenant la qualité du sol.

112

113 La qualité du sol répond à de très nombreuses définitions. Nous la qualifierons dans ce travail  
114 comme l'état objectif des divers éléments physiques et biologiques qui composent le sol et la  
115 nature et l'intensité des processus qui s'y déroulent. La qualité du sol se définit ainsi par un  
116 très grand nombre de paramètres physiques, chimiques et biologiques dont les valeurs  
117 relatives permettent d'aborder la notion subjective de « bonne » ou « mauvaise » qualité.  
118 L'analyse objective montrera qu'il n'existe pas une qualité, mais des qualités, chimique,  
119 physique, biologique, qui peuvent ne pas co-varier dans le même sens.

120

121 Dans ce travail, nous abordons la qualité du sol dans l'acception la plus stricte, c'est-à-dire  
122 neutre, de ce terme. Nous ne choisirons pas un sol de référence qui aurait toutes les qualités  
123 souhaitables. Nous nous bornerons à comparer des sols entre eux par des méthodes d'analyse  
124 multivariée qui les classent les uns par rapport aux autres en fonction des différences  
125 mesurées. Si nous intégrons dans notre échantillonnage des systèmes forestiers « de  
126 référence », c'est seulement pour avoir dans l'échantillonnage la référence au système naturel.  
127 Le travail réalisé confirmera d'ailleurs que certains aspects de la qualité du sol peuvent être  
128 fortement améliorés par les pratiques humaines.

129

130 Nous avons appliqué deux indicateurs synthétiques, le GISQ (General Indicator of Soil  
131 Quality, Velasquez, 2004 ; Velasquez *et al.*, 2006) et l'IBQS (indicateur Biologique de la  
132 Qualité du sol (Ruiz Camacho, 2004) dans 12 fenêtres paysagères qui représentent des  
133 gradients d'intensification de l'usage du sol, en Normandie et dans le Morvan.

134

135 GISQ : l'indicateur général de qualité des sols

136

137 Le GISQ synthétise l'ensemble des variables qui décrivent les divers aspects, physique,  
138 chimique, morphologique, la matière organique et la biodiversité des sols en 5 sous-  
139 indicateurs correspondants dont les valeurs varient de 0.1 à 1.0. Un indicateur général  
140 combine ces 5 sous-indicateurs, donnant *in fine* une note unique à la fin de l'analyse, si c'est  
141 le souhait de l'utilisateur (Velasquez *et al.*, 2007). Il fut initialement conçu à partir d'un  
142 référentiel de 63 points disposés sur une grille régulière à maille de 200m dans un bassin  
143 versant du Nicaragua (Velasquez, 2006). Un ensemble de 54 variables décrivait  
144 respectivement l'état chimique (8 variables), physique (6), morphologique (13), la matière  
145 organique (11) et la biodiversité (16 ordres de la macrofaune du sol). Les analyses



146 multivariées permettent dans un premier temps de classer les sites suivant des axes qui  
147 reflètent les variations dans le type de qualité (physique, chimique...) sélectionné et  
148 d'éliminer les variables dont le pouvoir discriminant est faible. On combine ensuite les  
149 variables les plus discriminantes dans des formules qui tiennent compte de la valeur de la  
150 variable (intensité) et de son poids sur les axes factoriels 1 et 2 retenus pour la construction de  
151 l'indicateur et de la proportion de variance expliquée par ces facteurs.

152

153 La formule d'un sous-indicateur est typiquement de la forme :

154  $I(a) = F_1(a_1v_1 + b_1v_1 + c_1v_1) + F_2(a_2v_1 + b_2v_2 + c_2v_2) + \dots$  où  $F_1$  et  $F_2$  sont les % de variance  
155 expliquée par les facteurs 1 et 2 respectivement,  $a_1, b_1, \dots$  sont les contributions relatives  
156 respectives des variables  $a, b$ , aux facteurs 1 et 2, et  $v_1, v_2, \dots$  les valeurs des variables  $V_1, V_2$   
157 réduites par transformation homothétique pour varier dans un intervalle compris entre 0,1 et  
158 1,0.

159 L'analyse multivariée classe les variables et les sites depuis des valeurs négatives jusqu'à des  
160 valeurs positives sur les axes. De par la nature même de l'ACP, la position du côté plus ou  
161 moins est définie aléatoirement dans la procédure de calcul. Il est donc important à cette étape  
162 de prendre en compte le sens alloué aux axes et d'intervenir pour que les variables  
163 caractérisant la bonne qualité du sol (suivant l'appréciation de l'expert) soient toujours  
164 considérées comme positives (Lavelle *et al.*, 2009).

165

166 Le seuil de contribution décidant de l'inclusion ou du rejet d'une variable est aussi une  
167 décision de l'opérateur. Dans le travail initial, les variables retenues avaient une contribution  
168 au moins égale à 50% de celle de la variable la plus « lourde ». Cette sélection est uniquement  
169 destinée à produire un indicateur mesurable avec le plus petit nombre de variables possible.

170 Quand le jeu de données comporte peu de variables, ou quand l'acquisition des données n'est  
171 pas un problème, on peut aussi bien inclure toutes les variables dans la formule.

172 La formule prend ainsi en compte de façon objective :

173 1. les principaux facteurs de variations des variables indicatrices extraits par l'analyse  
174 multivariée sous forme de facteurs 1 et 2 ; ceci nous assure que les sites seront comparés en  
175 fonction des principaux effets observés ;

176 2. la contribution relative des différentes variables à la définition de ces facteurs,  
177 permettant de réduire considérablement le nombre de paramètres utilisés et ainsi de réduire les  
178 coûts d'analyse ;

179 3. l'appréciation de l'expert sur la qualité du sol, un attribut en partie subjectif, qui  
180 dépend en particulier des usages envisagés.

181

182 La même procédure est utilisée pour réunir les 5-sous indicateurs en un seul indicateur  
183 général qui résume toute l'information.

184

185 Une fois conçues ces formules, elles peuvent être utilisées dans l'espace délimité par les sites  
186 du référentiel et dans le temps. Le nombre de variables à mesurer est alors considérablement  
187 réduit. L'expérimentateur peut de plus choisir parmi les variables celles qui sont les plus  
188 faciles et les moins coûteuses à mesurer (Velasquez, 2007).

189 La méthode GISQ appliquée dans diverses régions du monde (LiuLi, 2007 ; Velasquez *et al.*,  
190 NP ; Cecillion, 2009 ; Xhu, 2009) a montré son aptitude à détecter des variations dans la  
191 qualité des sols en fonction des types d'utilisation du sol.

192

193

194

195

196

197 L'IBQS

198

199 L'Indicateur Biologique de la Qualité des Sols basé sur le concept d'espèces indicatrices est  
200 construit à partir des relevés de macro invertébrés du sol identifiés au niveau de l'espèce. Le  
201 peuplement de macro invertébrés du sol, en France, compte une richesse potentielle de  
202 plusieurs centaines d'espèces. La grande diversité de leurs habitats, de leurs régimes  
203 alimentaires et de leur tolérance envers les conditions climatiques, physiques et chimiques du  
204 milieu font de ce peuplement un indicateur très précis des conditions du milieu (Lavelle *et al.*,  
205 2006 ; Decaëns, sous presse).

206

207 L'IBQS se construit à partir d'un référentiel, c'est-à-dire un ensemble de sites qui  
208 représenteront l'essentiel de la diversité d'une région. Un échantillonnage en grille régulière  
209 assurera l'expérimentateur que son échantillonnage tient compte de la proportion et la  
210 richesse des types d'utilisation dans le paysage ; d'autres stratégies d'échantillonnage  
211 (stratifié) peuvent aussi fonctionner.

212

213 Les sols échantillonnés sont caractérisés grâce à un ensemble de mesures physiques,  
214 chimiques et autres utilisées couramment pour évaluer la qualité du sol. Ils sont ensuite  
215 groupés en fonction de leur similarité d'un point de vue physico-chimique. La méthode  
216 développée dans le GISQ, qui transforme l'information contenue dans la cinquantaine de  
217 variables pertinentes en 5 sous-indicateurs qui varient de 0.1 à 1.0, peut permettre de  
218 synthétiser l'information qu'ils contiennent. Une autre approche consiste à appliquer à ces

219 données une analyse hiérarchique (cluster analysis) qui répartira les sites d'échantillonnage en  
220 groupes de qualité homogène.

221 Les sites sont ainsi classés en fonction de leur appartenance à un groupe, cluster isolé par  
222 analyse hiérarchique ou ensemble de sites ayant des valeurs comparables des indicateurs  
223 GISQ.

224

225 La méthode IndVal (Dufrêne et Legendre, 1997) permet ensuite d'identifier, dans le grand  
226 nombre d'espèces de macro-invertébrés récoltées, celles qui ont une valeur indicatrice  
227 significative pour tel ou tel groupe de sites. Une formule simple réunit ces données et évalue  
228 la qualité du sol dans un intervalle de 0 à 20 :

229

230

$$231 \quad \text{IBQS} = \sum_{i=1}^n \ln(D_i+1) \times S_i$$

232 où **Di** est la densité moyenne de l'espèce *i* dans un site et **Si** la valeur indicatrice du taxon.

233 Cette expression utilise la transformation logarithmique des abondances des macro-  
234 invertébrés afin de mieux souligner les différences entre les sites d'étude. Les deux critères  
235 utilisés pour le calcul de l'IBQS (*Di* et *Si*) permettront ainsi de réaliser une évaluation plus  
236 pertinente de l'état du sol que le seul critère de la diversité des taxons indicateurs, par  
237 exemple. La densité des peuplements du sol peut être fortement modifiée par l'intensité des  
238 pratiques de gestion. Tenir compte de ce paramètre a un intérêt écologique important qui peut  
239 s'avérer essentiel quand on compare par exemple des milieux avec des niveaux de  
240 productivité différents.

241 Cette formule intègre que le nombre d'espèces indicatrices et leurs densités diminuent avec la  
242 dégradation du milieu. C'est ce qu'on observe effectivement dans un ensemble de 22 sites  
243 français dont l'échantillonnage a servi de base à la mise au point initiale de la méthode.

244

245 L'évaluation faite par l'IBQS peut être utilisée pour octroyer une note globale de qualité au  
246 sol et le classer par rapport à un référentiel de départ ou bien pour faire une interprétation de  
247 l'état écologique du sol grâce à l'analyse des espèces indicatrices présentes et leur mode de  
248 vie. Une augmentation de la note octroyée par l'indice indiquant une amélioration de la  
249 qualité du milieu.

250

251 Sites d'étude

252

253 Les sites d'étude sont localisés en Haute-Normandie et en Bourgogne (dans le  
254 Morvan). Dans chaque région, 6 fenêtres paysagères de 1 Km<sup>2</sup> représentant un gradient dans  
255 l'intensification de l'usage de la terre ont été délimitées.

256

257 *Morvan*

258 Localisé dans le nord du parc naturel régional du Morvan (Figure 1), ce site présente  
259 un gradient d'intensification depuis des paysages dominés par les forêts de feuillus, vers les  
260 forêts de conifères, une mosaïque agricole dominée par les boisements, une mosaïque agricole  
261 mixte, une mosaïque agricole prairiale et une mosaïque agricole céréalière qui représente le  
262 niveau d'intensification maximal.

263

264

265 *Normandie*

266 Les différents niveaux d'intensification agricole sont également représentés  
267 dans cette région avec des fenêtres paysagères forestières (feuillus ou résineux), le bocage et  
268 des paysages dominés par les cultures intensives.

269 L'ensemble du dispositif permet d'étudier les modifications de la structure du paysage  
270 consécutives à l'intensification de l'agriculture ou à la déprise agricole sur les trois grandes  
271 unités paysagères caractéristiques de la Seine Maritime : la pleine alluviale et les coteaux  
272 calcaires de la Basse Vallée de la Seine ainsi que les plateaux limoneux de la région  
273 rouennaise.

274

275

### 276 **Echantillonnage des sols et de la macrofaune du sol**

277 Le prélèvement des échantillons a eu lieu pendant les mois d'avril et de mai 2005.  
278 L'échantillonnage des macro-invertébrés du sol (25x25x20cm) ainsi que le prélèvement de sol  
279 pour la réalisation d'analyses physico-chimiques (sur les 20 premiers centimètres du sol), le  
280 prélèvement pour l'analyse de la micromorphologie (bloc de 5cm d'arête) et des mesures de  
281 résistance du sol, ont été réalisés à l'échelle du paysage et à l'échelle parcellaire (Tableau 1).

282 Au **niveau du paysage**, une grille de 200m de pas a été positionnée sur chaque  
283 fenêtre. A chacun des 16 points d'intersection de la grille, trois prélèvements de macro-  
284 invertébrés disposés en triangle et espacés de 10m ont été réalisés en utilisant la méthode  
285 TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility ; Lavelle, 1988 ; Anderson & Ingram, 1993). Un  
286 cube de sol de 5cm d'arête a été prélevé au centre du triangle pour l'analyse morphologique  
287 du sol suivant la méthode de Velasquez *et al.* (2007) dérivée de la technique de Topoliantz et  
288 Ponge (2000). Un échantillon composite de 500g de sol a par ailleurs été préparé en  
289 mélangeant du sol prélevé à côté de chaque point TSBF pour l'analyse des propriétés physico-  
290 chimiques.

291 A côté de chaque point de prélèvement de macro-invertébrés, la résistance tangentielle  
292 à la coupe et la pénétrométrie a été mesurée *in situ* avec des appareils de terrain.

293

294 A l'échelle de la parcelle, un échantillonnage un peu plus conséquent a été réalisé pour  
295 assurer une bonne représentation des espèces de macro-invertébrés présentes dans chaque site  
296 nécessaire au développement de la méthode IBQS. Quatre milieux représentatifs des gradients  
297 d'intensification repérés ont été sélectionnés dans le Parc Naturel Régional du Morvan et en  
298 Normandie. Une évaluation des peuplements de macro-invertébrés du sol a ainsi été réalisée  
299 dans des forêts de feuillus représentatives des milieux les plus préservés, dans des forêts de  
300 résineux gérées de manière plus intensive, dans des milieux prairiaux et dans des champs  
301 cultivés correspondant aux milieux les plus intensivement exploités.

302

303 Chaque milieu est choisi dans la fenêtre paysagère où il est dominant. Trois parcelles sont  
304 choisies et, dans chacune d'entre elles, 10 relevés TSBF disposés tous les 20m sur deux  
305 transects parallèles sont effectués. A côté de trois des dix points, un échantillon de sol est  
306 prélevé pour caractérisation physico-chimique et un bloc de sol de 5cm d'arête est extrait pour  
307 l'analyse morphologique et des mesures de résistance tangentielle à la coupe et de  
308 pénétrométrie sont réalisées. En Normandie, cependant, une seule valeur par parcelle a été  
309 obtenue.

310

## 311 Résultats

312

### 313 **Caractérisation physique, chimique et biologique des sols étudiés**

314

315 Les données d'analyse et les diverses mesures ont été publiées par ailleurs (Ruiz Camacho *et*  
316 *al.*, 2008). Ces données ont été traitées par des analyses en composantes principales dont nous  
317 rappelons les principaux résultats.

318

319 Paramètres chimiques

320 Les paramètres analysés ici sont le pH, les cations (K, Ca, Mg), la CEC, le P assimilable et le  
321 Na.

322 Dans les deux régions étudiées, les sols des fenêtres les plus intensivement exploitées sont  
323 caractérisés par des pH plus élevés et des teneurs plus élevées en bases, Ca et Mg  
324 principalement (Figure 2). Dans le Morvan, ces sols présentent aussi des teneurs plus  
325 importantes en phosphore assimilable. Dans les deux régions, la séparation des points en  
326 fonction du degré d'intensification de la fenêtre à laquelle ils appartiennent est significative  
327 (test de permutation des coordonnées sur les axes ;  $p < 0.01$  dans les deux cas).

328

329 Paramètres physiques

330 L'état physique du sol est apprécié dans cette étude par la mesure de la densité apparente, de  
331 la résistance tangentielle à la coupe, la résistance à la pénétration, la pente et la teneur en eau  
332 du sol au moment des prélèvements. Dans le Morvan, un gradient très net peut être observé le  
333 long de l'axe 2 de l'ACP. Il correspond au gradient d'intensification décrit par les fenêtres et  
334 oppose les fenêtres 1 et 2 à la fenêtre 6 qui se situe de l'autre côté de l'axe (Figure 3).

335 En Normandie, les fenêtres se répartissent selon trois groupes. Le premier groupe est  
336 constitué par les fenêtres 1, 3 et 4 situées sur la moitié supérieure du graphique. Sur la moitié  
337 inférieure, les fenêtres 2 et 6 sont proches et se situent sur l'extrémité gauche de l'axe 1 face à  
338 la fenêtre 5 qui se trouve du côté droit de ce même axe. Il faut cependant noter que seules la  
339 pente et la résistance tangentielle avait été mesurées sur les sites de Normandie.

340

341

342 Morphologie



343 La méthode d'analyse morphologique sépare le sol en 11 éléments différents : des agrégats  
344 physiques petits (<1cm), moyens (1 à 3 cm) et grands (> 3 cm), agrégats racinaires de petite  
345 taille, moyenne et grande, agrégats « biogéniques » (le plus souvent, des turricules de vers de  
346 terre) petits, moyens et grands, cailloux, racines, bois, feuilles, tiges, graines et invertébrés.

347 Les ACP réalisées sur le jeu de données morphologiques montrent un effet significatif  
348 des types d'usage et du niveau d'intensification indiqué par les numéros des fenêtres  
349 paysagères. En Normandie, trois groupes de types d'utilisation se distinguent, les cultures, les  
350 prairies et les forêts (Figure 4). Les cultures sont caractérisées par la dominance des agrégats  
351 physiques et biogéniques petits et grands alors que les agrégats biogéniques de petite taille  
352 sont plus abondants dans les milieux forestiers. Les sols de prairies sont quant à eux plus  
353 riches en agrégats d'origine racinaire. Dans le Morvan, les sols cultivés sont caractérisés  
354 surtout par l'abondance des agrégats physiques, alors que les sols prairiaux et les forêts  
355 présentent une plus grande quantité d'agrégats biogéniques et racinaires.

356 L'ordination des fenêtres paysagères suit la même tendance observée pour les utilisations du  
357 sol. Les fenêtres où le paysage est dominé par les forêts apparaissent groupées et clairement  
358 détachées de celles dominées par les cultures et les prairies ainsi que d'un troisième groupe  
359 constitué par les fenêtres à paysage plus fragmenté où aucune utilisation du sol ne domine. En  
360 Normandie, les fenêtres 1, 2 et 3 moins fragmentées sont groupées sur la moitié inférieure de  
361 l'axe 2 et les fenêtres 4, 5 et 6 se situent à proximité mais sur la moitié supérieure de l'axe.

362

363 Matière organique

364 L'état de la matière organique des sols est mesuré par 7 variables : teneurs totales en C  
365 et N, respirations cumulées du sol après 7, 14 et 21 jours en conditions de laboratoire, teneurs  
366 en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. La distribution des fenêtres paysagères selon la teneur en matière  
367 organique du sol montre des différences entre les deux régions étudiées. En Normandie, les

368 sols forestiers des fenêtres 1 et 2 apparaissent groupés avec les sols cultivés de la fenêtre 6  
369 ainsi qu'avec la fenêtre 4 et caractérisés par des teneurs en  $\text{NH}_4^+$  élevées. Les sols de la  
370 fenêtre 3 sont les plus riches en matière organique et d'une manière générale ce sont ces sols  
371 et ceux de la fenêtre 5 qui présentent la plus forte activité respiratoire (Figure 5). Dans le  
372 Morvan, les sols au sein des fenêtres présentent une plus forte hétérogénéité et certains points  
373 avec des valeurs particulièrement importantes tirent les axes ne permettant pas une  
374 discrimination claire des fenêtres sur le plan factoriel décrit par l'ACP. Toutefois, on peut  
375 observer le long de l'axe 2 de l'analyse le gradient d'intensification représenté par les  
376 fenêtres.

377

#### 378 Macrofaune du sol

379 La méthode TSBF d'échantillonnage de la macrofaune du sol a permis une extraction simple  
380 et rapide des espèces appartenant aux 17 groupes d'invertébrés rencontrés dans le sol : Vers  
381 de terre ; Limaces ; Isopodes ; Diplopodes Chilopodes ; Pseudoscorpions ; Opilions ;  
382 Araignées ; Blattes ; Dermaptères ; Hémiptères ; Diptère (larves) ; Lépidoptère (larves) ;  
383 Orthoptères ; Coléoptères (adultes et larves séparés), Fourmis.

384

385 Le travail réalisé dans les deux régions confirme l'extrême sensibilité de cette faune aux  
386 conditions créées par la gestion des sols, chaque groupe répondant de manière autonome en  
387 fonction de son écologie. Il en résulte des variations assez grandes dans l'abondance et la  
388 composition des peuplements, avec des effets significatifs à l'échelle des parcelles du type  
389 d'utilisation du sol et, à l'échelle des fenêtres, de l'intensification (Figure 6A et 6B).  
390 L'analyse de la diversité et de l'abondance de la macrofaune du sol au niveau des fenêtres  
391 paysagères (Figure 6A) permet de mettre en évidence le même gradient d'intensification  
392 décrit par les critères paysagers utilisés lors de leur sélection. La fenêtre 1 (paysage le moins

393 intensifié) est séparée des autres fenêtres qui se suivent en décrivant un gradient selon lequel  
394 les fenêtres 2 et 3 se retrouvent en position centrale suivies des fenêtres 4, 5 et 6 qui  
395 représentent l'extrême opposé. Si l'on s'intéresse à l'ordination des utilisations du sol (Figure  
396 6B) on observe que, parmi les dix utilisations du sol présentes sur le site du Morvan, les  
397 milieux « feuillus » représentés par les forêts secondaires des feuillus et les forêts à végétation  
398 arbustive en mutation sont séparés des autres utilisations du sol considérées. Il est intéressant  
399 aussi de noter qu'on observe une différence des peuplements de macro-invertébrés entre les  
400 cultures annuelles destinées au pâturage ou celles qui viennent juste d'être mises en culture  
401 après des années en prairie destinée à la fauche et les cultures annuelles conventionnelles. Les  
402 deux premiers types d'utilisation du sol se rapprochent plus des peuplements de macrofaune  
403 retrouvés dans les prairies qu'elles soient temporaires ou bien permanentes. Le rapport  
404 complet détaille l'ensemble des résultats (Ruiz Camacho *et al.*, 2008).

405

#### 406 **Le GISQ (General Index of Soil Quality)**

407 La formule du GISQ a été établie séparément pour chaque région avant d'être calculée  
408 pour chaque point d'intersection de la grille dans les 6 fenêtres paysagères du Morvan et de la  
409 Normandie (Tableaux 2 et 3). Au total, les 5 sous-indicateurs et l'indicateur général ont été  
410 calculés pour 192 points (tableau complet des valeurs dans Ruiz Camacho *et al.*, 2008).

411

412 En Normandie la formule du GISQ est la suivante :

413

$$414 \text{ GISQ} = 1,74 \text{ Ph} - 1,51 \text{ Ch} + 1,49 \text{ Fa} - 0,54 \text{ Mi} - 0,10 \text{ MO}$$

415

416 où :

417 **Ph** : Sous-indicateur physique

418           **Ch** : Sous-indicateur chimique  
419           **Fa** : Sous-indicateur faunistique  
420           **Mi** : Sous-indicateur micromorphologique  
421           **Mo** : Sous-indicateur matière organique

422

423 Dans le Morvan, le calcul du GISQ a été réalisé selon la formule :

$$424 \text{ GISQ} = 1,96 \text{ Ph} + 1,93 \text{ Ch} + 1,30 \text{ Mo\_Ph} - 0,15 \text{ MO}$$

425

426 La valeur octroyée du GISQ est variable au sein d'un même type d'utilisation du sol montrant  
427 que l'état du sol ne dépend pas uniquement de la pratique de gestion mais aussi des milieux  
428 environnants.

429           Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les valeurs des sous-  
430 indicateurs et du GISQ pour le Morvan (Figure 7) et la Normandie (Figure 8). Dans le  
431 Morvan, le gradient d'intensification se retrouve très nettement le long de l'axe 1 où les  
432 fenêtres moins fragmentées et dominées par les sols sous forêt à régénération naturelle sont  
433 opposées aux fenêtres où les sols sont exploités d'une manière plus intensive. Cela montre  
434 qu'au-delà de l'hétérogénéité des sols et des couvertures végétales présents au sein de chaque  
435 fenêtre, le GISQ est sensible à l'intensification dans l'utilisation du sol sans estomper pour  
436 autant l'information des différences présentes au niveau de chaque point de la grille. Les sols  
437 des fenêtres 1 et 2 à dominante forestière obtiennent des valeurs plus importantes du sous-  
438 indicateur physique alors qu'à l'opposé les sols sous culture intensive sont caractérisés par les  
439 valeurs les plus élevées des sous-indicateurs chimique et de matière organique.

440

441 En Normandie, les fenêtres forestières 1 et 2 se distinguent également des fenêtres 3, 4, 5 et 6  
442 (Figure 8). La fenêtre 5 (prairies) présente des valeurs plus élevées du sous-indicateur matière

443 organique. La fenêtre 6 (grande culture) est également caractérisée par des fortes valeurs du  
444 sous-indicateur chimique et les forêts ont des valeurs du sous-indicateur physique plus  
445 importantes.

446

447 L'effet de la composition et de la structure du paysage sur la qualité du sol est vérifié  
448 par l'existence de coinerties significatives entre les métriques qui décrivent le paysage et les  
449 valeurs de l'IGQS en chaque point, avec des coefficients de co-variation (RV) de  
450 respectivement 0.29 et 0.32 dans le Morvan et en Normandie ( $p < 0.01$ ) (F.Dubs *et al.*, données  
451 non publiées).

452

### 453 **L'IBQS**

454

455 L'Indice Biologique de la Qualité du Sol (IBQS) a été calculé séparément pour chaque  
456 région, sur un jeu de données totales qui regroupe non seulement les données récoltées dans le  
457 cadre de ce projet mais aussi les données recueillies jusqu'à ce jour en France sur les  
458 peuplements de macro-invertébrés du sol. Les données récoltées dans le cadre de ce projet ont  
459 ainsi permis d'ajouter 37 espèces et 8 sites à la base de données déjà existante. Le référentiel  
460 est aujourd'hui composé de 30 sites différents et des 189 taxons les plus abondants  
461 (abondance supérieure à 5 individus).

462 Une analyse complémentaire montre la conséquence de l'utilisation de niveaux  
463 taxonomiques plus grossiers que l'espèce sur la sensibilité de l'outil.

464

465 Mesure de l'IBQS dans les sites du Morvan et de la Normandie

466

467 L'analyse des covariations entre les peuplements de macro-invertébrés du sol et les  
468 paramètres physiques, chimiques, morphologiques et la matière organique du sol montre des  
469 coefficients de covariation RV exceptionnels de, respectivement, 0.83 pour les sites de  
470 Normandie et 0.84 pour le Morvan. Ces relations sont significatives au seuil  $p < 0.001$ .

471

## 472 **L'IBQS Total**

473

474 Les données recueillies grâce à ce projet de recherche ont été ajoutées à celles  
475 collectées jusqu'à ce jour en France afin d'enrichir la base de données existante et pouvoir  
476 recalculer l'IBQS avec un plus grand nombre d'observations.

477 Le jeu de données faunistiques est composé de 189 taxons identifiés pour la plupart au  
478 niveau de l'espèce et 30 situations différentes localisées dans cinq régions en France  
479 (Auvergne, Ile-de-France, Bourgogne, Centre et Normandie ; Tableau 3).

480 Les 30 sites ont été groupés en fonction de leur similitude vis-à-vis des valeurs de 10  
481 paramètres chimiques (C et N total, pH, phosphore biodisponible, cations échangeables, CEC  
482 et C/N). Certaines mesures qui n'ont pas été effectuées dans tous les sites n'ont pas été prises  
483 en compte pour l'établissement de la typologie.

484 Ces paramètres classent les sites en trois groupes principaux : 1) un groupe qui  
485 rassemble la plupart des sols cultivés exceptés ceux du Morvan et de Normandie qui se  
486 positionnent chacun dans un groupe différent et composé d'un mélange de forêts et prairies  
487 soumises à différentes pratiques de gestion (Figure 9), 2) un groupe qui réunit les forêts de  
488 feuillus du Morvan et de Normandie et celle de la région d'Auvergne avec la forêt de résineux  
489 du Morvan et la culture annuelle et la prairie permanente de Normandie et 3) un troisième  
490 groupe qui réunit le restant des forêts et des prairies avec les sols sous culture annuelle du  
491 Morvan.

492 27 taxons indicateurs d'une valeur indicatrice supérieure à 40 ont été identifiés pour  
493 les différents groupements de sites. La plupart des cultures annuelles sont caractérisées par un  
494 assemblage d'espèces composé de petits coléoptères des familles Carabidae et Staphylinidae,  
495 de plusieurs espèces d'araignées des familles Linyphiidae et Theridiidae ainsi que par le  
496 diplopode *Polydesmus testaceus*.

497 Les deux autres groupes de sols sont bien différenciés dans la typologie malgré le fait  
498 que tous les deux possèdent des forêts, des prairies et des cultures. Le cortège d'espèces qui y  
499 sont associées est aussi très différent. Un des deux groupes réunit la quasi-totalité des sols de  
500 prairie. Il est caractérisé par des espèces de coléoptères des familles Staphylinidae et  
501 Carabidae, de chilopodes prédateurs, les espèces de fourmi *Myrmica ruginodis* et *Lasius*  
502 *flavus*, des araignées, de décomposeurs représentés par *Polydesmus angustus* et l'escargot  
503 *Discus rotundatus*. Les taxons indicateurs associés au dernier groupe de sites sont la limace  
504 *Arion distinctus*, les diplopodes de la famille Polydesmidae, le vers de terre endogé  
505 *Aporrectodea caliginosa*, des hétéroptères de la famille Anthocoridae et les staphylins du  
506 genre *Stenus sp.*

507 Les notes obtenues après le calcul de l'IBQS à partir de cette nouvelle liste de taxons  
508 indicateurs (Figure 9) présentent une certaine hétérogénéité au sein des différents groupes de  
509 sites. Les paramètres chimiques ne suffisent pas à eux seuls à expliquer la présence d'un  
510 certain nombre de taxons indicateurs. Comme le montrent les résultats d'analyse du GISQ, la  
511 caractérisation complète de l'état du sol est nécessaire.

512

## 513 **Discussion**

514 L'évaluation de la qualité des sols est une tâche nécessaire pour mesurer l'impact de  
515 son usage sur ses fonctions écologiques et les services écosystémiques qu'il rend. Il existe un  
516 consensus quasi général pour récuser l'usage de très longues listes d'indicateurs non reliés,

517 dont la mesure est coûteuse et l'interprétation difficile. La tendance actuelle est donc à  
518 l'identification de jeux de données minimaux qui rendent compte de l'essentiel des variations.  
519 Ces ensemble de données sont ensuite convertis en indices qui condensent l'énorme  
520 complexité du sol (Andrews *et al.*, 2002; Sena *et al.*, 2002 ; Seybold *et al.*, 2004 ; Schjonning  
521 *et al.*, 2004).

522 Au-delà de ce consensus, les avis divergent sur la manière de choisir les éléments de  
523 ce « minimum data set » et sur la façon éventuelle de les combiner dans des indices  
524 synthétiques.

525 L'approche du BISQ hollandais (Schouten *et al.*, 1997), par exemple, consiste à faire  
526 des représentations visuelles des variables avec des diagrammes en étoiles. Les limites du  
527 graphe sont représentées par les valeurs optimales. Dans ce cas, un sol de référence de  
528 « bonne » qualité est choisi.

529 La bonne ou la mauvaise qualité des sols est en grande partie subjective et nécessite de  
530 ce fait d'être définie à chaque fois. On voit ainsi dans notre travail que les valeurs de l'IBQS  
531 basé sur les peuplements de macro invertébrés sont systématiquement maximales dans les  
532 forêts non perturbées où se trouve la plus grande biodiversité. Le GISQ confirme cette  
533 tendance à travers l'indicateur général qui a la plus forte valeur moyenne en milieu forestier.  
534 Cette valeur globale cache cependant des valeurs plutôt médiocres de la qualité chimique  
535 (0,17 à 0,26 ; cf Tableau 2), des valeurs assez variables de l'agrégation (indice  
536 morphologique) de 0,12 à 0,82 et des valeurs de MO assez moyennes (0,23 à 0,55). A  
537 l'inverse, des sols soumis à des pratiques même relativement intensives peuvent avoir de très  
538 bonnes valeurs de certains indices de qualité (par exemple indice de micromorphologie pour  
539 les sols labourés ; cf Tableau 2). Il y a donc bien des sols avec divers types de qualités. Ces  
540 différences de qualité proviennent en grande partie des types d'utilisation, mais aussi de la  
541 configuration du paysage et du niveau d'intensification de l'usage des terres. Il est



542 particulièrement remarquable d'observer une covariation significative entre les métriques qui  
543 décrivent la structure et la composition du paysage et les valeurs des indicateurs de qualité du  
544 sol.

545 L'indicateur IBQS représente probablement l'étape suivante de la démarche, celle qui  
546 consiste à trouver des indicateurs biologiques des états du sol. Le travail effectué montre à  
547 quel point le peuplement du sol est le reflet fidèle de cet environnement, avec une valeur de  
548 coefficient de covariation supérieure à 0,80, exceptionnelle dans les études écologiques. Il  
549 reste à le développer encore plus, peut-être en sélectionnant les invertébrés parmi les groupes  
550 les plus facilement identifiables et en vérifiant quel niveau taxonomique est le plus pertinent.  
551 Le travail d'identification est en effet bien plus facile à mesure qu'on choisit des unités plus  
552 larges.

553 Finalement, après avoir montré dans diverses études que ces deux indicateurs  
554 permettent de rendre compte fidèlement de l'état physique, chimique et biologique des sols, il  
555 reste à analyser leur sensibilité et à optimiser leur conception mathématique par des  
556 simulations qui analysent l'impact de diverses décisions d'expert lors de leur élaboration  
557 (GISQ et IBQS) ou de l'intensité de l'échantillonnage requis (IBQS).

558

## 559 **6. Conclusion générale**

560 • Le travail effectué a montré que les indicateurs IBQS et GISQ sont opérationnels. Ils  
561 ont pu être mesurés dans tous les sites d'étude permettant d'obtenir des résultats  
562 globalement en accord avec ce qui était attendu d'après l'historique et la  
563 caractérisation des sites.

564

565 • Il est aussi apparu que la précision des indicateurs augmente avec l'importance du  
566 référentiel utilisé pour les calculer. L'IBQS français basé sur le plus large référentiel

567            donne en effet des valeurs plus logiques que l'IBQS régional mis au point pour le  
568            Morvan. Les valeurs obtenues après la mise au point d'un IBQS régional pour le  
569            Morvan montrent le besoin de s'appuyer sur une base de données large permettant de  
570            minimiser les particularités locales.

571

572            • Les valeurs les plus élevées ne sont pas toujours obtenues en milieu « naturel ». On  
573            voit que l'agriculture pratiquée dans certaines conditions peut maintenir à un niveau  
574            élevé des paramètres décisifs de la qualité du sol y compris la biodiversité.

575

576            • L'utilisation des indicateurs permet de réduire considérablement le nombre de  
577            variables à mesurer (une quarantaine de taxons indicateurs sur 150 possibles pour  
578            l'IBQS et une douzaine de variables du sol pour le GISQ sur les 40 initiales).

579

580            • La composition et la structure du paysage peuvent exercer une forte influence sur la  
581            qualité du sol. Il serait intéressant de calculer un sous-indicateur « paysager » pour en  
582            tenir compte dans le calcul du GISQ.

583

584            • Ce projet a permis de montrer que l'IBQS et le GISQ sont très probablement en  
585            relation et notamment en ce qui concerne les valeurs des sous-indicateurs et de  
586            l'IBQS. Il serait très intéressant d'augmenter le nombre d'observations communes à  
587            ces deux indices afin d'étudier la nature de ce lien et de fixer le degré auquel l'IBQS  
588            peut prédire l'état des compartiments physiques, chimiques, morphologiques ou de  
589            matière organique dans le sol.

590

591

592

593

594 Références

- 595 Anderson J.M. et Ingram J.S.I., 1993 Tropical Soil Biology and Fertility. A handbook of  
596 methods. 2nd edition. CAB International.
- 597 Andrews, S.S., Karlen, D.L., 2004. "The soil management assessment framework: a  
598 quantitative soil quality evaluation method." Soil Science Society of America Journal 68 (6):  
599 1945-1962.
- 600 Cecillon, L., Cassagne, N., Czarnes, S., Gros, R., Vennetier, M., Brun, J.J., 2009. Predicting  
601 soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Journal of the*  
602 *Total Environment*, sous presse
- 603 Decaens, T., 2009. Macroecological patterns in soil communities. *Global Ecology and*  
604 *Biogeography*. In press
- 605 Dufrière, M., Legendre, P., 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a  
606 flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67, 3, pp. 345-366.
- 607 Lavelle P., 1988. Earthworm activities and the soil system. *Biol Fertil Soils*, 6: 237-251
- 608 Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie F., Mora P. et  
609 Rossi J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*,  
610 42 : 3-15.
- 611 Lavelle P., Velasquez E. & Andrade M., 2009. Indicating soil quality and the GIS: Reply to  
612 the comments by Rossi et al. *Soil Biol. Biochem.*, 41: 446-447.
- 613 Liu L., 2007. Mise au point et calibration d'indicateurs de la qualité de sols agricoles du Sud  
614 de la Chine. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Science de la Vie, Bondy  
615 194 pp.

616 Ruiz-Camacho N., 2004. Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol base  
617 sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6,  
618 Spécialité Science de la Vie, 14 septembre 2004, Bondy:327 pp

619 MEA, 2005. MEAweb.org

620 Ruiz Camacho, N., Decaëns, T., Dubs, F., Lavelle, P. et Velasquez, E., 2008. Developpement  
621 de bio-indicateurs permettant de caractériser l'état du sol et son état biologique. Rapport  
622 scientifique final du programme ADEME Bioindicateurs. 103 pp.

623 Schjonning P., Elmholt S., Christensen B.T., 2004. Soil quality management. Concepts and  
624 terms. In: Schjonning P., Elmholt S. and Christensen B.T. (eds.). Challenges in modern  
625 agriculture. CAB International. pp 1-15.

626 Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H., Burger, J.A., 2000. A review of chemical and physical  
627 properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. Forest Ecology  
628 and Management,. 138 (1/3): 335-356.

629 Schouten, A.J., Brussaard, L., De Ruiter, P.C., Siepel, H., Van Straalen, N.M., 1997. An  
630 indicator system for life support functions of the soil related to biodiversity. Report  
631 712910005, RIVM, Bilthoven.

632 Sena, M.M., Frighetto, R.T.S Valarini, O.J. Tokeshi H. and Poppi, R.J., 2002. Discrimination  
633 of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a  
634 multivariate analysis case study, Soil Till. Res., 67: 171-181.

635 Seybold CA, Grossman RB, Hoper H, Muckel G, Karlen DL, 2004. Soil quality  
636 morphological index measured in the 1996 NRI Pilot Study. Soil Survey Horizon, 43(3): 86-  
637 95.

638 Topoliantz S., Ponge J.F. et Viaux P., 2000. Earthworm and enchytraeid activity under  
639 different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. *Plant And Soil*, 225 :  
640 39-51.

641 Velasquez E., 2004. Bioindicadores de calidad del suelo basados en comunidades de  
642 macrofauna y su relación con variables físicas y químicas del suelo. Thèse de Doctorat de la  
643 Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Spécialité Agronomie, 250 pp.

644 Velasquez E., Lavelle P. et Andrade M., 2007. GIQS: a multifunctional indicator of soil  
645 quality. *Soil Biol. Biochem.*, 39: 3066-3080.

646 Velasquez E., Pelosi C., Brunet D., Grimaldi M., Martins M., Rendeiro A.C., Barrios E. et  
647 Lavelle P., 2006. This ped is my ped: visual separation and NIRS spectra allow determination  
648 of the origins of soil macro-aggregates. *Pedobiologia*, 51 (1): 75-87.

649 Zhu X., Chen Y.Y. et Li D.L., 2008. An Integrated Indicator-based System for Soil  
650 Environmental Quality Assessment in Sustainable Rehabilitation of Mine Waste Area.  
651 *Applied and Computational Mathematics, 2nd Edition*, 303-308.

652

653 Liste des Tableaux

654

	<b>Morvan</b>		<b>Normandie</b>	
	Paysage	Parcelle	Paysage	Parcelle
Echantillons macro-faune du sol	288	120	288	120
Echantillons sol	96	36	96	0
Echantillons micromorphologie	96	36	96	36
Mesure de résistance du sol	288	36	288	0

655

656

657

Tableau 1 : Récapitulatif de l'échantillonnage et des mesures de terrain

REGION	Pratique de gestion	Sous-Indicateurs					GISQ
		Faune	Chimique	MO	Morphologie	Physique	
NORMANDIE	forêt secondaire gérée	0.52 (0.18)	0.17 (0.03)	0.35 (0.12)	0.45 (0.21)	0.59 (0.19)	0.73 (0.11)
	forêt gérée (coupe claire)	0.47 (0.14)	0.20 (0.09)	0.23 (0)	0.74 (0.09)	0.65 (0.05)	0.67 (0.01)
	taillis	0.29 (0.03)	0.69 (0.1)	0.39 (0)	0.8 (0.1)	0.6 (0.03)	0.43 (0.04)
	pâturage	0.28 (0.09)	0.57 (0.16)	0.54 (0.2)	0.75 (0.14)	0.52 (0.18)	0.44 (0.12)
	labour	0.26 (0.07)	0.58 (0.1)	0.25 (0.1)	0.84 (0.07)	0.55 (0.06)	0.43 (0.04)
	fauche	0.3 (0.09)	0.51 (0.27)	0.56 (0.28)	0.76 (0.2)	0.46 (0.34)	0.44 (0.09)
MORVAN		Faune	Chimique	MO	Morpho_Physi	GISQ	
	régénération semi-naturelle	0.21 (0.06)	0.25 (0.08)	0.24 (0.07)	0.5 (0.16)	0.24 (0.08)	
	coupe claire	0.29 (0.08)	0.35 (0.1)	0.3 (0.11)	0.42 (0.18)	0.32 (0.09)	
	pâturage	0.43 (0.14)	0.61 (0.11)	0.41 (0.2)	0.54 (0.21)	0.64 (0.21)	
	labour	0.37 (0.09)	0.61 (0.14)	0.31 (0.1)	0.24 (0.07)	0.47 (0.15)	
	labour et pâturage à l'automne	0.62 (0.08)	0.61 (0.06)	0.31 (0.07)	0.32 (0.2)	0.68 (0.11)	
	fauche	0.47 (0.2)	0.62 (0.01)	0.3 (0.04)	0.52 (0.2)	0.67 (0.2)	
taillis	0.39 (0.2)	0.4 (0.13)	0.22 (0.1)	0.4 (0.03)	0.42 (0.16)		

658  
659  
660  
661  
662

Tableau 2 : Valeurs moyennes et écarts-types des sous-indicateurs et du GISQ pour chacune des pratiques de gestion présentes dans les 6 fenêtres paysagères en Normandie et dans le Morvan.





<b>Code Site</b>	<b>Description</b>	<b>Région</b>
P1	prairie permanente avec pâturage extensif	Auvergne
P2	prairie permanente avec pâturage extensif	Auvergne
P5	prairie pâturée	Morvan
P6	prairie pâturée	Centre
MP	Prairie permanente	Morvan
NP	Prairie permanente	Normandie
F1	Forêt de feuillus	Auvergne
F2	Forêt de feuillus	Ile-de-France
F3	Forêt de feuillus	Morvan
F4	Forêt de résineux	Morvan
F5	Forêt de feuillus	Centre
NR	Forêt de résineux	Normandie
MF	Forêt de feuillus	Morvan
MR	Forêt de résineux	Morvan
NF	Forêt de feuillus	Normandie
NC	Culture annuelle	Normandie
MC	Culture annuelle	Morvan
C1	Culture annuelle apport de compost de déchets verts et azote minéral	Ile-de-France
C2	Culture annuelle apport de compost de déchets verts	Ile-de-France
C3	Culture annuelle avec apport de fumier de bovins et azote minéral	Ile-de-France
C4	Culture annuelle avec apport de fumier de bovins	Ile-de-France
C5	Culture annuelle avec apport de compost de la fraction fermentiscible des ordures ménagères et azote minéral	Ile-de-France
C6	Culture annuelle avec apport de compost de la fraction fermentiscible des ordures ménagères	Ile-de-France
C7	Culture annuelle avec apport de compost d'ordures ménagères grises et azote minéral	Ile-de-France
C8	Culture annuelle avec apport de compost d'ordures ménagères grises	Ile-de-France
C9	Culture annuelle conventionnelle avec apport d'azote minéral	Ile-de-France
C10	Culture annuelle	Ile-de-France

	conventionnelle	
C11	Culture annuelle	Morvan
C12	Culture conventionnelle	Centre
C13	Culture semis direct	Centre

664

665

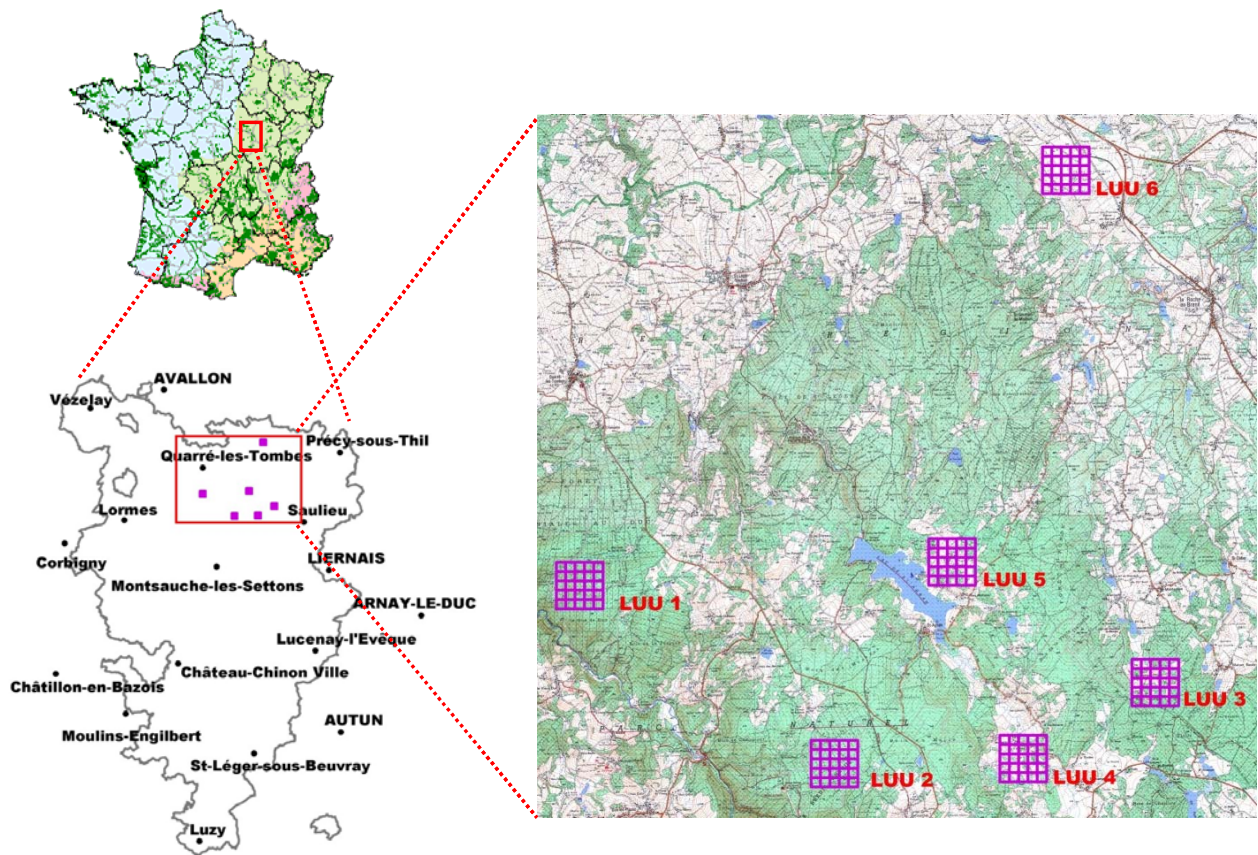
666

Tableau 3 : Liste des sites en France utilisés pour le calcul de l'IBQS.

667

## Liste de Figures

668



669

670 Figure 1 : Localisation des 6 fenêtres paysagères du site du Morvan. LUU1 : forêt de feuillus, LUU2 :  
671 forêt de conifère, LUU3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, LUU4 : une  
672 mosaïque agricole mixte, LUU5 : mosaïque agricole prairiale et LUU6 : mosaïque agricole  
673 céréalière.

674

675  
 676  
 677  
 678  
 679  
 680  
 681  
 682  
 683  
 684  
 685  
 686  
 687  
 688  
 689  
 690  
 691  
 692  
 693  
 694  
 695  
 696  
 697  
 698  
 699  
 700  
 701  
 702  
 703  
 704  
 705  
 706  
 707  
 708

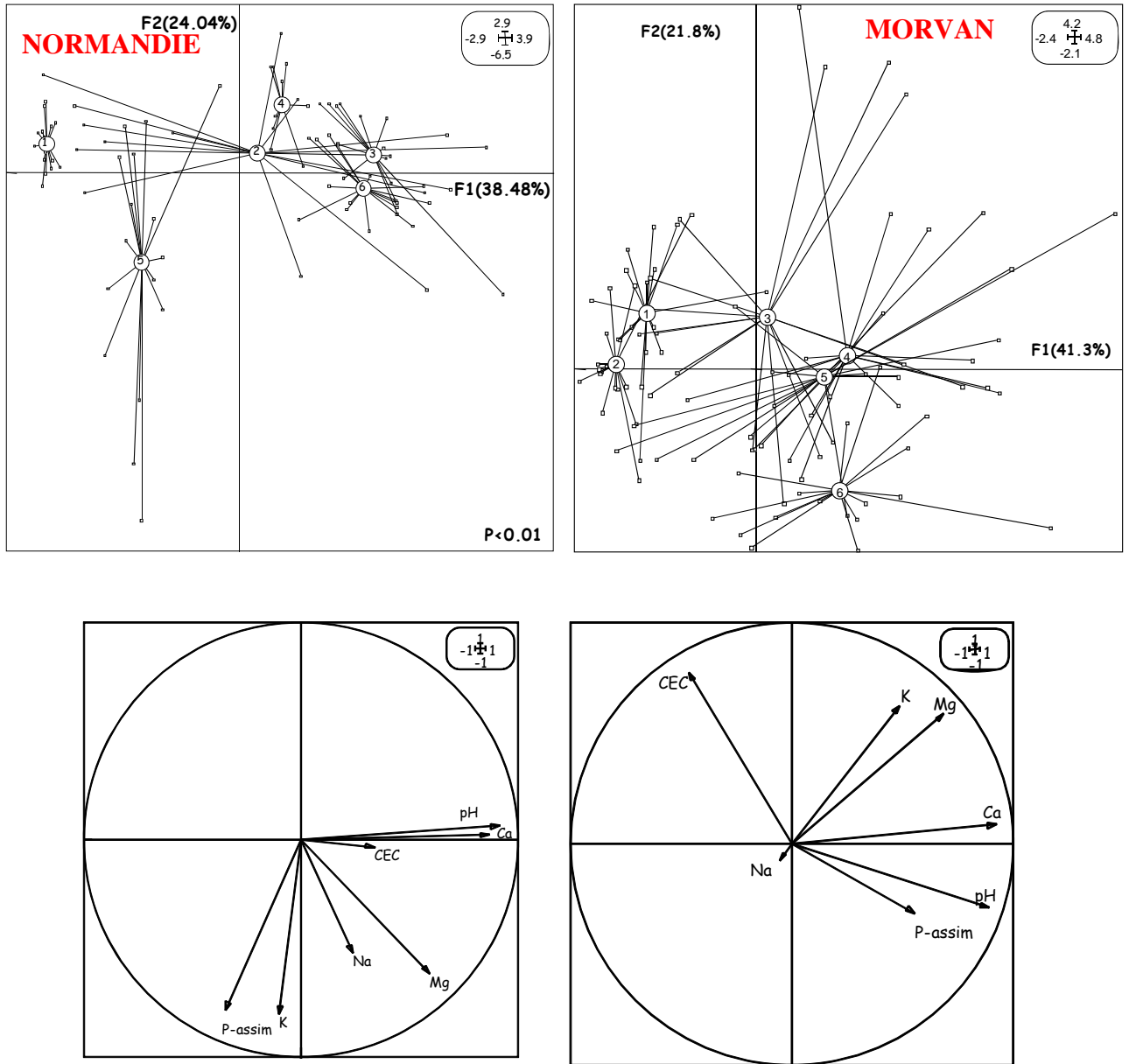


Figure 2: Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) et dans le Morvan (à droite) le long des deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ( $p < 0.001$ ) à partir des paramètres chimiques. 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt de conifères, 3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, 4 : une mosaïque agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ( $p < 0.001$ ). Le cercle de corrélations avec l'ordination des variables pour chacun des sites peut être observé sous chacun des graphiques.

709  
 710  
 711  
 712  
 713  
 714  
 715  
 716  
 717  
 718  
 719  
 720  
 721  
 722  
 723  
 724  
 725  
 726  
 727  
 728  
 729  
 730  
 731  
 732  
 733  
 734  
 735  
 736  
 737  
 738  
 739

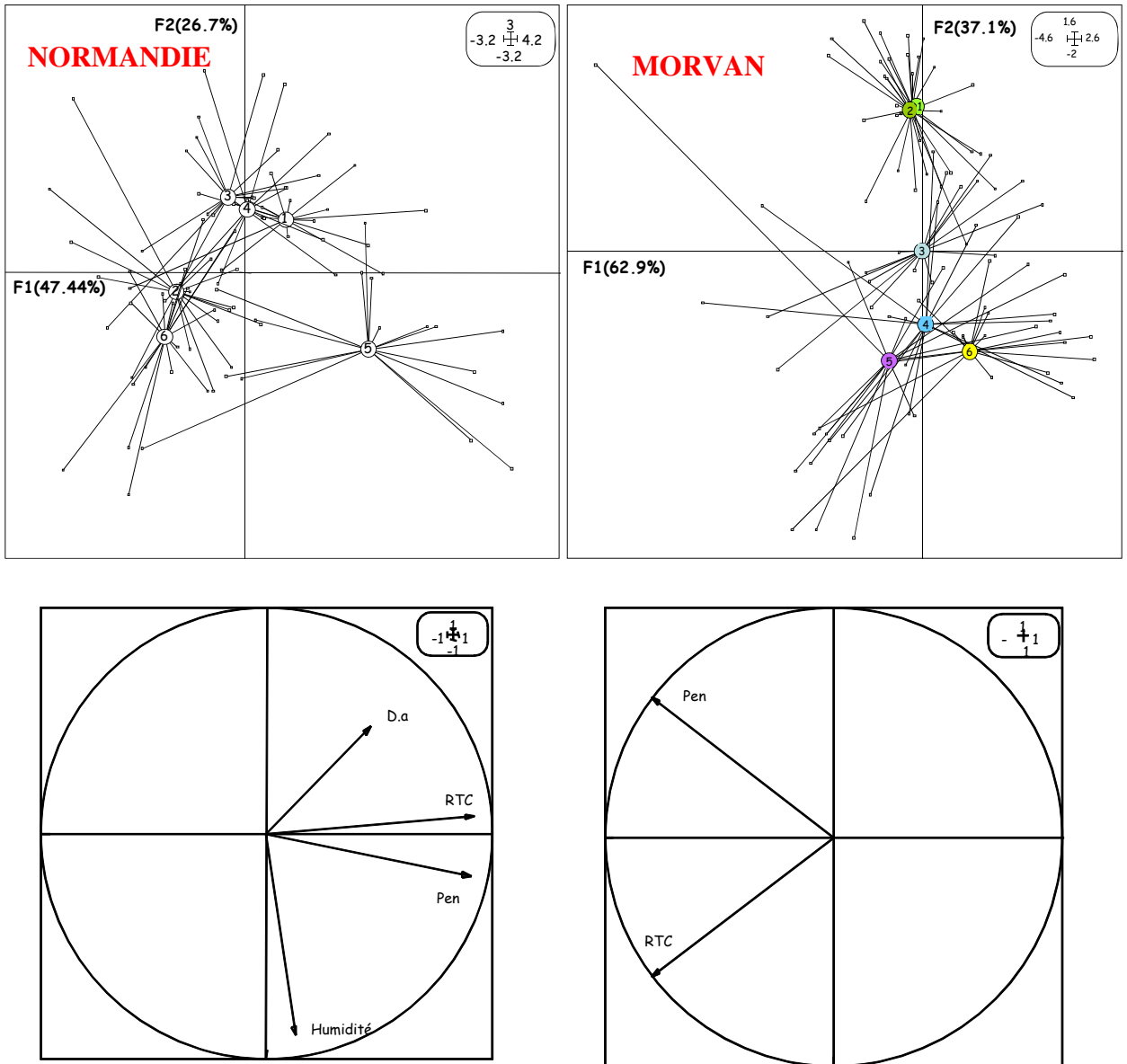
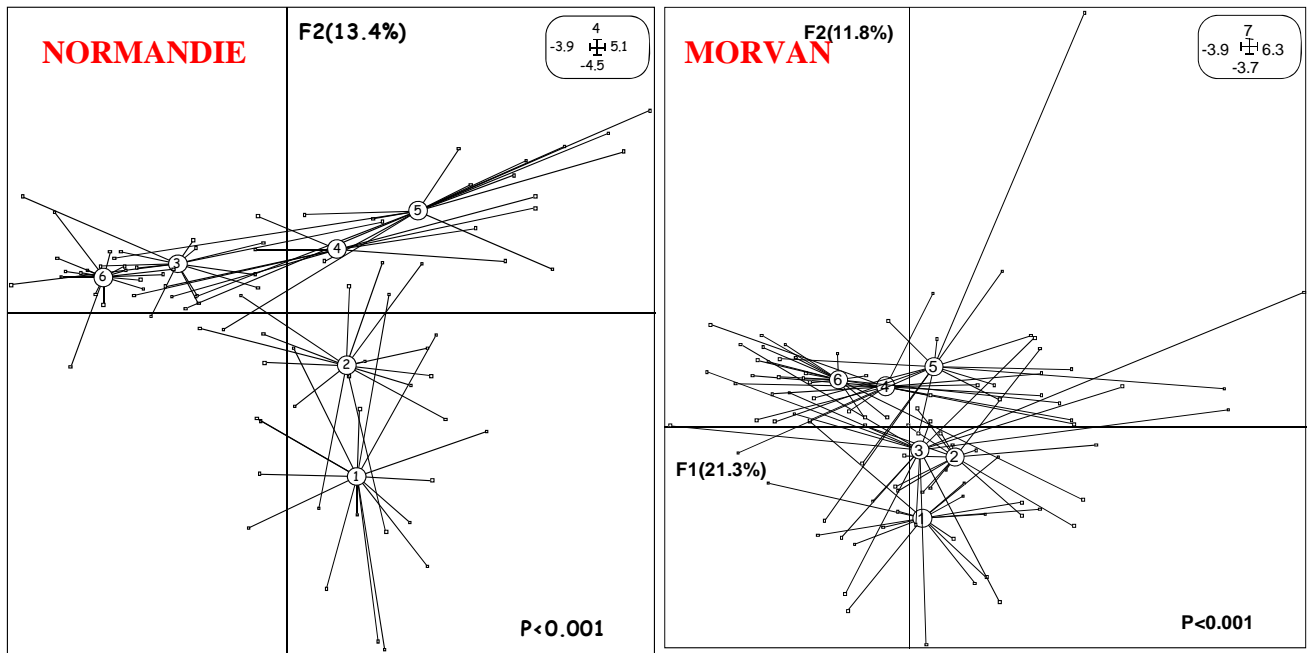


Figure 3: Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) et dans le Morvan (à droite) le long des deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ( $p < 0.001$ ) à partir des paramètres physiques. 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt de conifères, 3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, 4 : une mosaïque agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ( $p < 0.001$ ). Le cercle de corrélations avec l'ordination des variables pour chacun des sites peut être observé sous chacun des graphiques. D.a : densité apparente ; RTC : Résistance tangentielle à la coupe ; Pen : Pénétrométrie



740

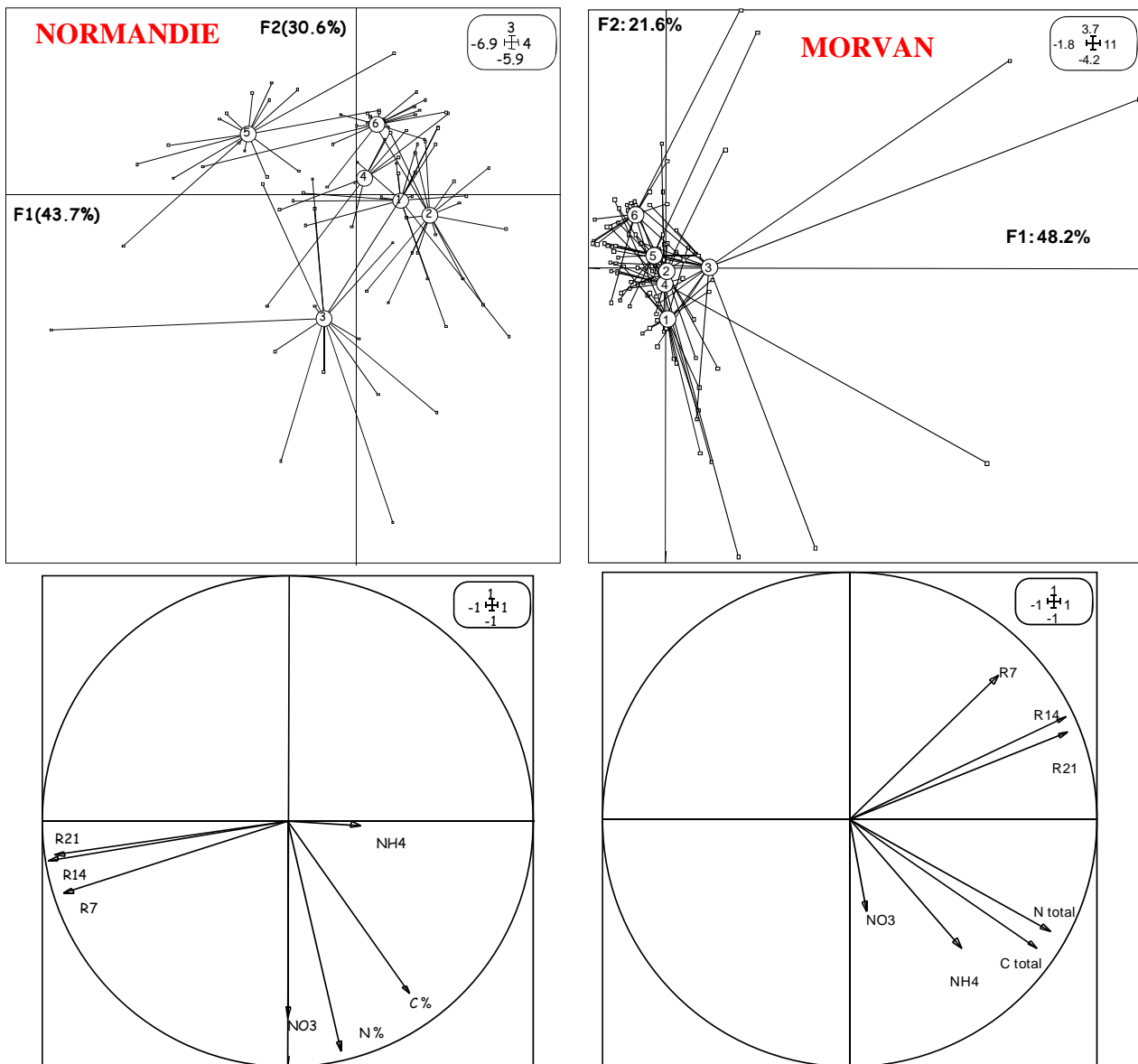
741 Figure 4: Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) le long des  
 742 deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ( $p < 0.001$ ) à partir des  
 743 données de micromorphologie et dans le Morvan (à droite). 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt  
 744 agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test  
 745 sur les groupes significatif ( $p < 0.001$ ).

745

746

747

748



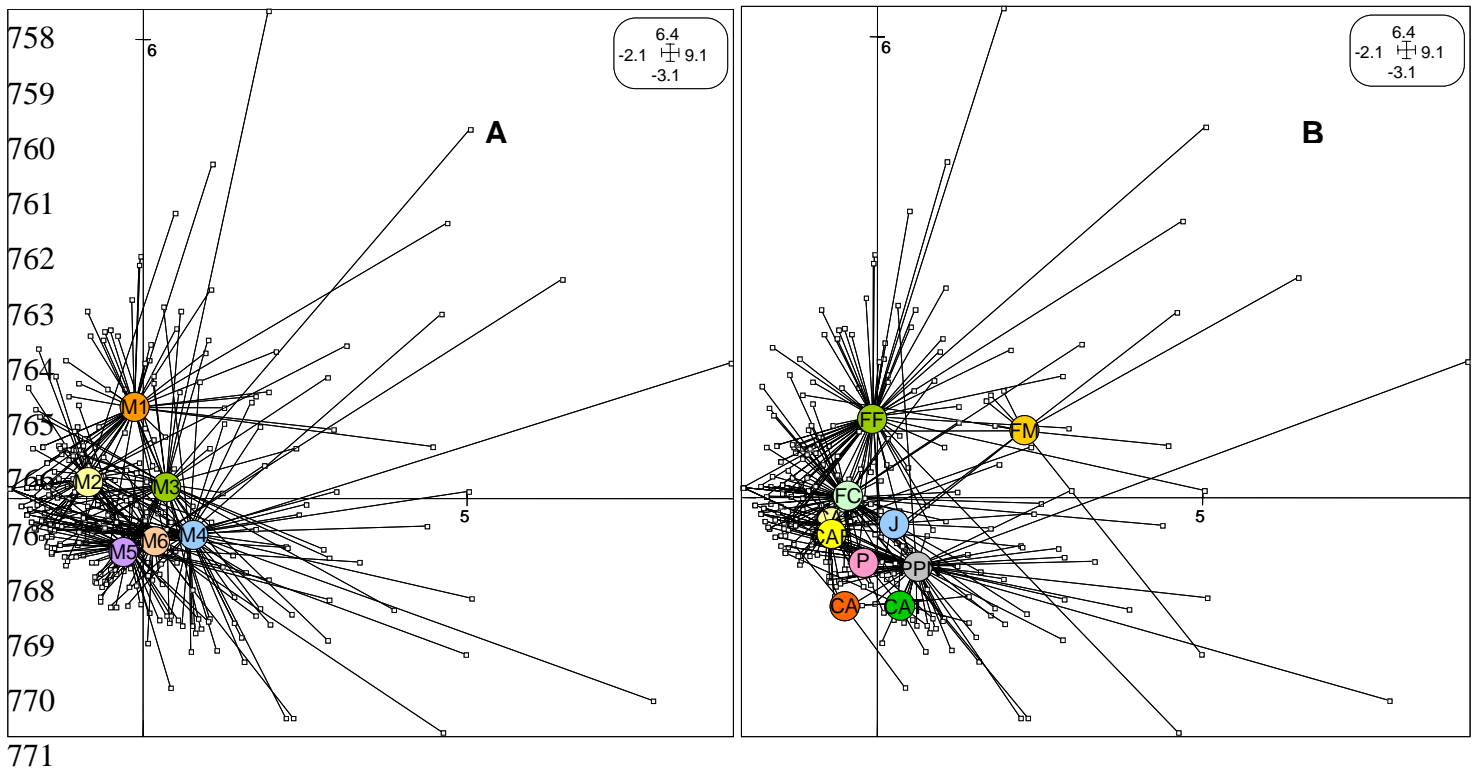
750

751 Figure 5: Ordination des six fenêtres paysagères en Normandie (à gauche) le long des  
 752 deux premiers facteurs de l'Analyse en Composantes Principales ( $p < 0.001$ ) à partir des  
 753 données de matière organique et dans le Morvan (à droite). 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt  
 754 de conifères, 3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, 4 : une mosaïque  
 755 agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test  
 sur les groupes significatif ( $p < 0.001$ ). Le cercle de corrélations avec l'ordination des  
 variables pour chacun des sites peut être observé sous chacun des graphiques.

756

757

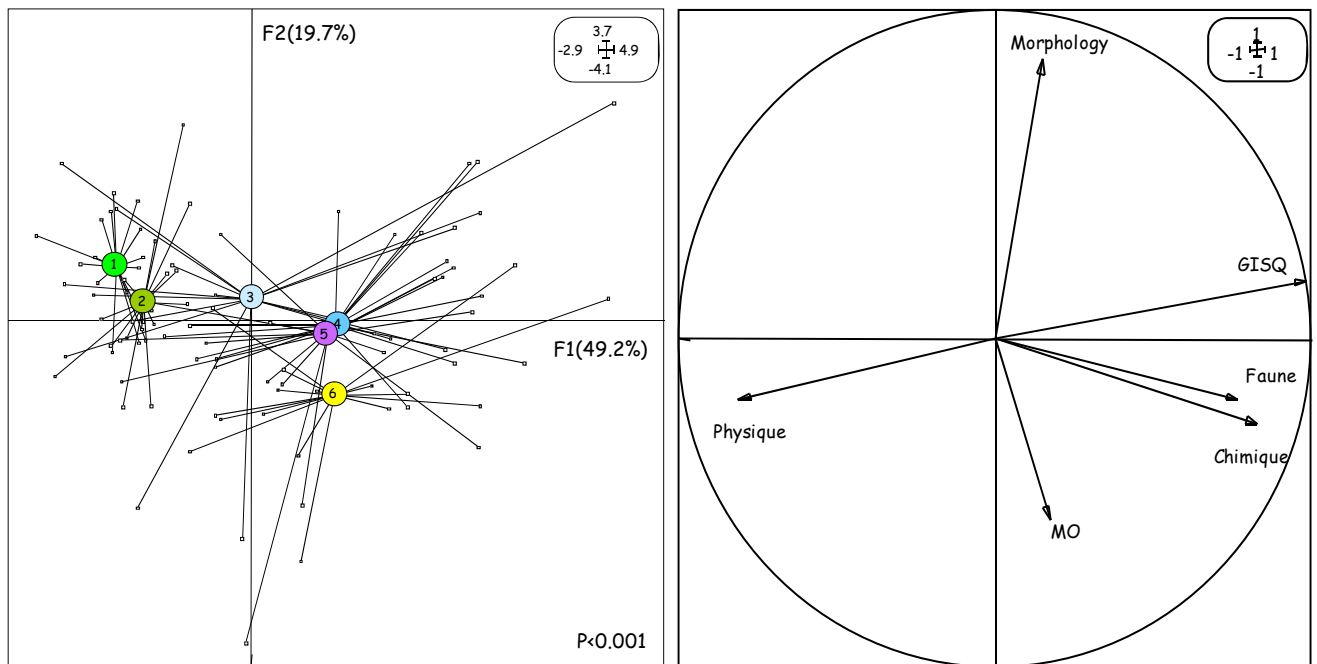




772 Figure 6A : Analyse en Composantes principales réalisée sur les données faunistiques. Ordination des six  
 773 fenêtres paysagères. F1 : 16.5% ; F2 : 9.1% ; M1 : forêt de feuillus, M2 : forêt de conifères, M3 :  
 774 mosaïque agricole dominée par les boisements, M4 : une mosaïque agricole mixte, M5 : mosaïque  
 agricole prairiale et M6 : mosaïque agricole céréalière. Test sur les groupes significatif ( $p < 0.001$ )

775 Figure 6B : Analyse en Composantes Principales sur les données faunistiques. Ordination des utilisations du  
 776 sol. F1 : 16.5% ; F2 : 9.1% ; FF : Forêt de feuillus ; FC : Forêt de conifères ; FM : Forêt et végétation  
 777 arbustive en mutation ; CAC : Culture annuelle céréalière ; CAE : Culture annuelle en rotation de  
 778 céréál puis colza ; J ; Jachère ; P : Prairie ; PPN : Pelouses et pâturages naturels ; CA : Culture  
 779 annuelle; CAT : Culture annuelle trèfle. Test sur les groupes significatif ( $p < 0.001$ )

778  
 779  
 780  
 781  
 782  
 783  
 784  
 785



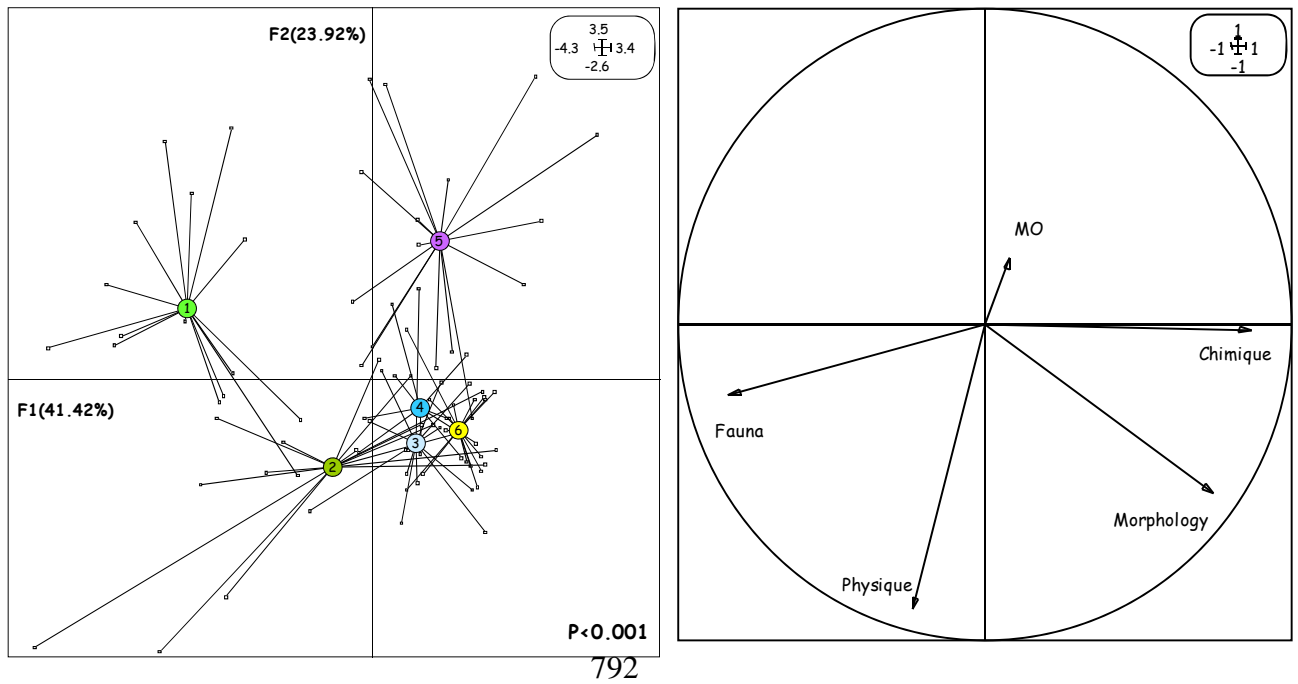
787

788

789

Figure 7 : Ordination des fenêtres paysagères du Morvan sur le plan factoriel décrit par les deux premiers axes d'une analyse en composantes principales réalisée sur les valeurs des sous-indicateurs et du GISQ. 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt de conifères, 3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, 4 : une mosaïque agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test sur les fenêtres significatif ( $p < 0.001$ ).

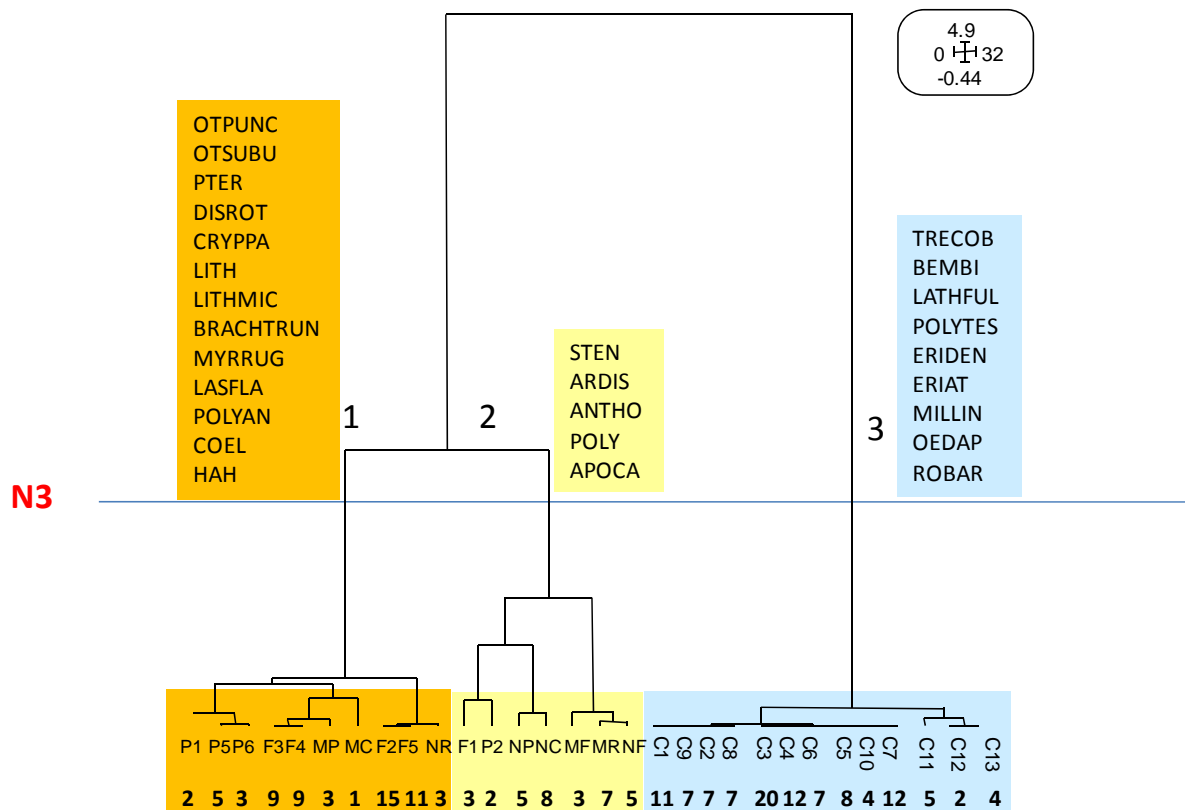
790  
791



792

793  
794  
795  
796  
797  
798

Figure 8 : Ordination des fenêtres paysagères en Normandie sur le plan factoriel décrit par les deux premiers axes d'une analyse en composantes principales réalisée sur les valeurs des sous-indicateurs et du GISQ. 1 : forêt de feuillus, 2 : forêt de conifères, 3 : mosaïque agricole dominée par les boisements, 4 : une mosaïque agricole mixte, 5 : mosaïque agricole prairiale et 6 : mosaïque agricole céréalière. Test sur les fenêtres significatif ( $p < 0.001$ ).



799

800

801 Figure 9 : Dendrogramme réalisé à partir des valeurs des 10 paramètres chimiques  
 802 communs à tous les sites.

802

803

