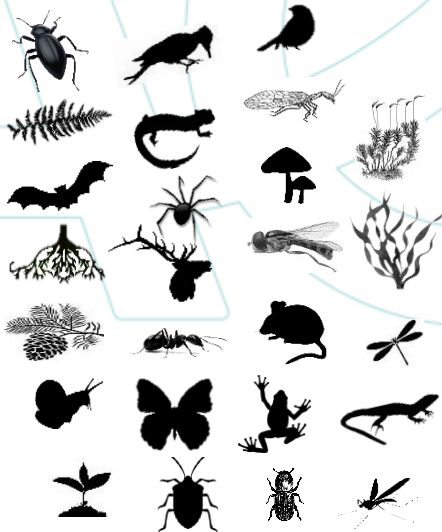




Quels taxons suivre ?



Christophe BOUGET

Hélène LE BORGNE

Aristide CHAUVEAU

Antoine LÉVÊQUE

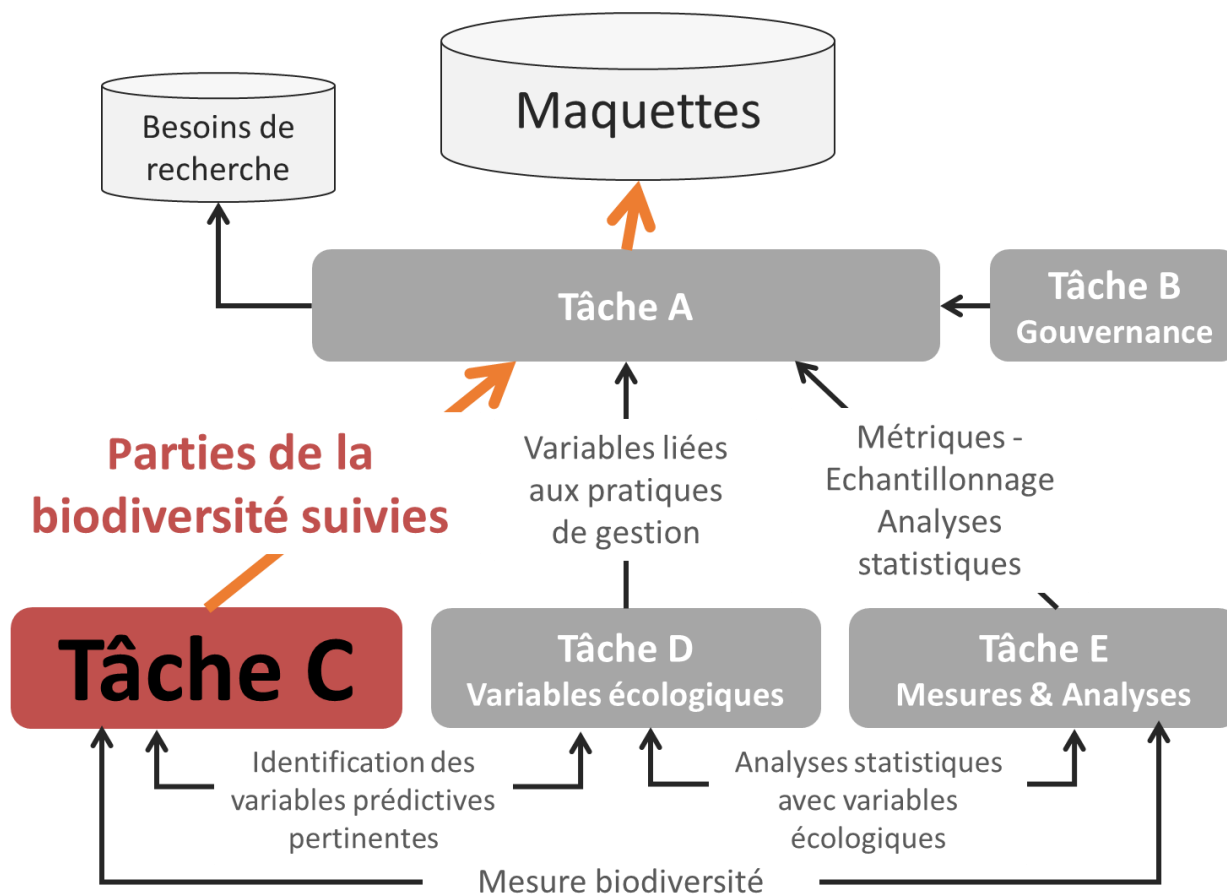
INRAE EFNO / OFB Patrinat

PASSIFOR-2

Phase 2 du Projet :

"Proposition d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière "

ÉLABORATION DE MAQUETTES DE SUIVI DE LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE



➤ Objectif

Identifier une **combinaison** opérationnelle et écologiquement pertinente de **groupes taxinomiques cibles** de la biodiversité forestière, qui sont **réactifs** (à la GF, à l'abandon de la GF, au CC...), **représentatifs** (des autres groupes non sélectionnés), **complémentaires** (des autres groupes sélectionnés), en considérant les **intérêts** et les **contraintes écologiques, taxinomiques, pratiques** et financières

La complémentarité écologique et méthodologique (interférences ou combinaison) entre les suivis directs et les mesures d'indicateurs indirects (cf tâche D) n'a pas été examinée en tâche C

➤ Livrables Passifor2-C

Livable 1

Tableau panoramique quantitatif du nombre d'espèces forestières

Livable 2

Synthèses bibliographiques sur les nouveaux modes d'échantillonnage et d'identification taxinomique : 3 fiches distinctes sur 3 types d'outils pour l'automatisation de l'échantillonnage

méthodes (i) **acoustiques**, (ii) **optiques** ou (iii) **génétiques**, et usage du **deep learning** pour l'automatisation de la reconnaissance des espèces dans les échantillons

Livable 3

Analyse multi-critères PROMETHEE de sélection des groupes taxinomiques cibles

➤ Méthodes

➤ Imiter ? S'inspirer des systèmes de suivi existants

Suisse *	Alberta *
Plantes vasculaires Mousses Mollusques Papillons diurnes Oiseaux nicheurs	Mammifères Oiseaux Acariens Oribates Plantes vasculaires Bryophytes Lichens
Nouvelle-Zélande *	Hesse (All.) – forêts
Plantes vasculaires Bryophytes Mammifères Lichens Chiroptères Oiseaux	Flore Coleoptera Macrolepidoptera Annelida Aculeata Araneae Heteroptera Oiseaux nicheurs
Suède*	
Plantes vasculaires (dont arbres) Bryophytes Lichens Champignons du sol Micromammifères	* Tous milieux

➤ Choix méthodologique : MCDA Prométhée

Analyse décisionnelle multicritères (MCDA, multicriteria decision analysis)

Choisir entre diverses alternatives (ici les taxons) à travers leur classification sur la base de multiples critères parfois contradictoires et de poids contrastés

Outil d'aide à la décision fournissant la meilleure des options complexes en fonction de compromis



Brans et al., 1984 (Service de Mathématique de Gestion de l'Université Libre de Belgique)

 UNIVERSITÉ LIBRE DE BR

P R O M E T H E E
M E T H O D S

Pourquoi **PROMETHEE** ?

- Méthodologie éprouvée
 - 30 années de développement
 - Plus de 550 références scientifiques
- « Simplicité »
- Outils visuels uniques
- Interactivité
- Logiciel **Visual PROMETHEE**

➤ Etape 1 : Construire la grille multi-critères

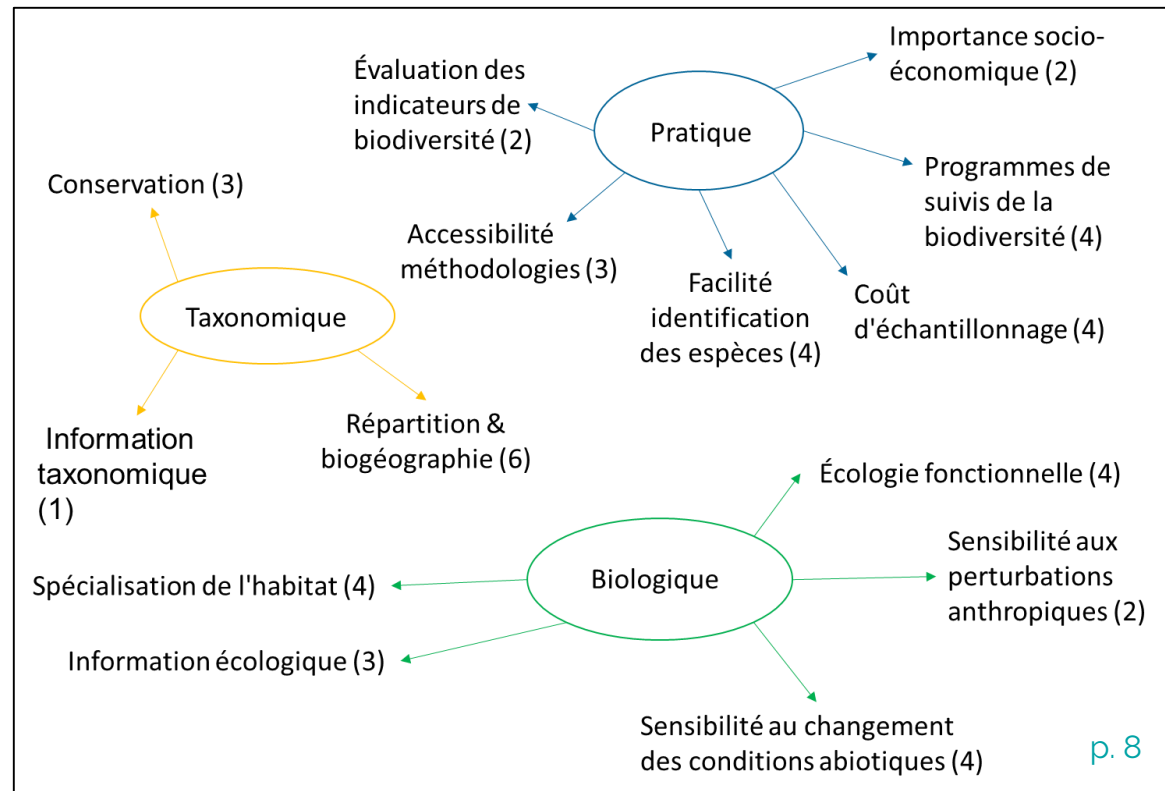
Cf littérature de référence sur les critères de sélection d'indicateurs de biodiversité (e.g. *Pearson, 1994; Faith & Walker, 1996; Hermy & Cornelis, 2000; Hilty & Merenlender, 2000; Büchs, 2003; Juutinen & Mönkkönen, 2004; Heink & Kowarik, 2010; Gao et al. 2015; Larrieu et al. 2018*).

Liste initiale de **61** critères d'évaluation, binaires, quantitatifs ou qualitatifs

- liste des modalités encodables par critère (cadre Prométhée)
- 14 ensembles de critères

Liste finale de **46** critères classés en 3 méta-critères :

Taxonomique (n=10),
Pratique (n=19),
Biologique (n=17)



➤ Etape 2 : établir la liste des groupes taxonomiques ou taxo-écologiques expertisables

Liste des groupes candidats à l'analyse comparative :

- Tableau panoramique de la biodiversité forestière française (Passifor2C)
- Analyse bibliométrique des groupes taxinomiques ou taxo-écologiques les plus utilisés comme indicateurs de réponse en écologie forestière

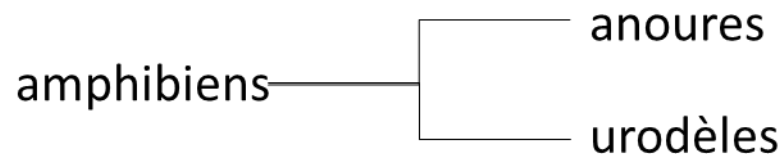
80 groupes au départ

- certains groupes écartés ou redéfinis selon disponibilité des experts > certains groupes majeurs (e.g. champignons) sous-explorés

62 groupes finalement retenus, >60 experts consultés

2 tableaux multi-groupes selon la profondeur de résolution taxinomique:

SUPRA (e.g. 'Amphibien') vs **INFRA** (e.g. 'Anoures' et 'Urodèles')



➤ Groupes taxonomiques ou taxo-écologiques expertisés

Taxon	Expert	Taxon	Expert
Acarii Phytoseiidae	M.S. Tixier avec S. Kreiter	Annélides Enchytréides	C. Pelosi
Acarii Tetranychidae	M.S. Tixier avec S. Kreiter	Annélides lombrics	T. Decaëns + M. Hedde
Araneae	J. Pétilion + C. Jacquet	Gasteropodes.aquatiques	O. Gargominy
Coleoptera Carabidae	C. Bouget	Gastéropodes.terrestres	O. Gargominy
Coleoptera coprophages	P. Jay-Robert	Nématodes	J. Trap
Coleoptera saproxyliques	C. Bouget	Rotifères	W. de Smet
Coleoptera Scolytinae	G. Parmain	Ectomycorhiziens	M. Roy
Collembola	J. Cortet	Hydnes Bankeraceae	P.A. Moreau
Crustacea Isopoda	F. Noël	Lichens	R. Poncet
Diptera Ceratopogonidae	D. Augot	Myxomycetes	M. Meyer
Diptera Syrphidae	C. Dussaix	Pezizales	N. Van Vooren
Diptera Tipuloidea	C. Quindroit	Polyporoides	G. Corriol
Ephemeroptera	M. Brulin	Algues	S. Hamlaoui avec C. Bernard
Hemiptera	J.C. Streito	Algues Bacillariophyta	S. Hamlaoui avec C. Bernard
Hymenoptera Apoidea	S. Gadoum	Algues Charophyta	S. Hamlaoui avec C. Bernard
Hymenoptera Braconidae	Y. Braet	Algues Chlorophyta	S. Hamlaoui avec C. Bernard
Hymenoptera Chalcidoidea	JY Rasplus	Bryophytes	M. Gosselin
Hymenoptera Formicidae	B. Kaufmann + C. Galkowski	Flore.vasculaire	R. Chevalier
Hymenoptera Parasitica	C. Villemant	Phanérogames	S. Cadet
Hymenoptera Symphyta	T. Noblecourt	Arbres	L. Larrieu
Lepidoptera	A. Lévêque	Pteridophytes	R. Chevalier
Lepidoptera Hétérocères	A. Lévêque	Amphibiens	JC De Massary
Lepidoptera Rhopalocères	A. Lévêque	Anoures	JC De Massary
Mecoptera	P. Tillier	Chiroptères	L. Barbaro
Myriapoda Chilopoda	E. Iorio	Micromammifères	L. Tillon
Myriapoda Diplopoda	J.-J. Geoffroy	Oiseaux	F. Archaux
Neuropterida	P. Tillier	Ongules	C. Baltzinger
Odonata	J.L. Pratz	Picidae	L. Barbaro
Opiliones	E. Delfosse	Reptiles	C. Baudran
Orthoptera	C. Lemoine	Urodèles	JC De Massary
Plecoptera	M. Brulin		
Raphidioptera	P. Tillier		

➤ Etape 3 : renseigner et standardiser la matrice multi-critères multi-groupes

Matrice 46 critères * 62 groupes

Dialogue avec les experts

- clarifier la définition des modalités contrastées pour chaque critère
- éviter l'excès de modalités intermédiaires (cf hétérogénéité interne des groupes)
- réduire le nombre de données manquantes par défaut de renseignement (<5% de NA)

Standardisation inter-groupes (inter-experts)

➤ Etape 4 : Appliquer l'analyse multicritères multi-groupes

Suivre l'état et la dynamique de la biodiversité forestière : plusieurs objectifs :

Objectif 1 (générique)

Objectif 2: en forêt exploitée versus en forêt non-exploitée

Objectif 3: en réponse à des modes de gestion ou d'une politique forestière

Objectif 5: en lien avec le changement climatique

- (i) chaque objectif = pondération relative variable des critères d'évaluation (cf atelier multi-experts)
- (ii) chaque objectif peut exiger un sens de variation différent par critère (maximiser/minimiser)

1. Critères **pénalisants** $\Phi(-)$ ou **surclassants** $\Phi(+)$
!! **Indépendants du poids** !!

2. Groupes

- Indice de préférence Φ = flux net de surclassement
- **Rang**

3. Partition des groupes en **clusters** ($k=5$) avec la méthode de clustering PAM selon les valeurs des métriques Φ



➤ Résultats

➤ Classement intégral des groupes très similaire pour chaque objectif de suivi

	Rang Obj1	Rang Obj2	Rang Obj3
Rang Obj1			
Rang Obj2	0,98		
Rang Obj3	0,98	1,00	
Rang Obj5	0,96	0,96	0,96

Pas d'effet des variations de pondération des critères

	obj1	obj2	obj3
Picidae	1	1	1
Pteridophytes	2	2	2
Arbres	3	5	5
Chiroptères	4	3	3
Ectomycorhiziens	5	7	7
Phanerogames	6	4	4
Gastéropodes_ter	7	6	6
Bryophytes	8	8	8
Orthoptères	9	14	12
Odonates	10	9	9
Urodèles	11	16	17
Reptiles	12	18	18
Rhopalocères	13	13	13
Formicidae	14	15	16
Hydnes	15	11	11
Epheméroptères	16	12	14
Syrphidae	17	17	15
Anura	18	20	21
Lombricidae	19	19	19
Micromamifères	20	22	22
Lichens	21	10	10
Araneae	22	24	24
Ongulés	23	25	26
Polypores	24	21	20
Carabidae	25	23	23
bacillariophyta	26	29	29
Nematodes	27	26	25
Scolytidae	28	27	27
Charophyta	29	30	31
Chlorophyta	29	30	31
Phytoseiidae	31	33	30
Chilopodes	32	28	28
Myxomycètes	33	34	34
Collemboles	34	35	35
Plecopteres	35	32	33
Coprophages	36	36	39
Opiliones	37	41	40
Tetranychidae	38	39	37
Cerambycidae	39	38	36
Heteroptera	40	40	41
Apoidea	41	37	38
Pezizes	42	42	42
Isopodes	43	45	45
Diplopodes	44	43	43
Rotifères	45	48	48
Neuroptères	46	46	47
Braconidae	47	44	44
Chalcidiens	48	50	49
Symphytes	49	53	52
Gastéropodes_aqua	50	49	50
Raphidioptères	51	51	51
Enchytraeides	52	47	46
Mecoptères	53	55	55
Hemiptères	54	52	53
Tipulidae	55	54	54

➤ Consensus dans le haut du classement



taxo	rk_obj1	pam	rk_obj2	pam	rk_obj3	pam
Oiseaux	1	A	1	A	1	A
Flore	2	A	2	A	2	A
Chiroptères	3	A	3	A	3	A
Ectomycorhiziens	4	A	5	A	5	A
Gastérop.terr.	5	B	4	A	4	A
Bryophytes	6	B	6	A	6	A
Orthoptères	7	B	11	B	10	B
Odonates	8	B	7	B	7	B
Reptiles	9	B	14	B	14	B
Formicidae	10	B	12	B	13	B



	obj1	pam_obj1	Obj2	pam_obj2	obj3	pam_obj3
Picidae	1	1	1	1	1	1
Pteridophytes	2	1	2	1	2	1
Arbres	3	1	5	1	5	1
Chiroptères	4	1	3	1	3	1
Ectomycorhiziens	5	1	7	1	7	1
Phanerogames	6	1	4	1	4	1
Gastéropodes_ter	7	2	6	1	6	1
Bryophytes	8	2	8	1	8	1
Orthoptères	9	2	14	2	12	2
Odonates	10	2	9	2	9	2

Bryophytes, Gastéropodes terrestres exclus du cluster de tête dans l'objectif 1 (SUPRA et INFRA)

➤ Mais des effets évaluateurs sous-jacents...



		Rang			
		ref	inter-experts		
			Min-Max	Moyenne	CV.%
oiseaux n=8	Base	1	1-4	2.1	39.3
	Bio	5	5-14	9.3	33.6
	Pratique	1	2-3	2.1	16.6
	Taxo	3	1-6	2.6	64.2
flore n=10	Base	2	1-8	3.5	60.6
	Bio	10	6-29	11.9	61.6
	Pratique	2	1-7	3.1	57.8
	Taxo	5	1-27	10.2	69.3

L'effet opérateur sur la position d'un groupe taxo-écologique dans le classement global est non-négligeable

La variance du rang est plus forte pour la flore vasculaire que pour les oiseaux, et plus forte quand l'analyse est concentrée sur les critères pratiques

➤ Critères surclassants des taxons sélectionnés

Top6 rang	oiseaux	flore_vasculaire	chiropteres	ectomycorhiziens	gasteropode_terr	bryophyte
1	Experts taxo	Experts taxo	Experts taxo	Automatisation	Automatisation	Substitution taxon
2	Couts en temps	Couts en temps	Automatisation	Traits Hist Vie	Traits Hist Vie	Indicateur Gestion
3	Automatisation	Automatisation	Substitution taxon	Librairie ADN	Liste rouge	Structure
4	Substitution taxon	Substitution taxon	Traits Hist Vie	Liste rouge	Identifiabilité	Interêt économique
5	Librairie ADN	Traits Hist Vie	Librairie ADN	Identifiabilité	Indicateur Gestion	Composition
6	Traits Hist Vie	Liste rouge	Liste rouge	Structure	Structure	Indic litt

Seulement 4 critères pénalisants sur 46

Critères les plus **surclassants** :

- existence d'une **base de données** sur les **traits d'histoire de vie**
- existence d'une librairie de **codes-barres ADN**
- existence d'un **processus automatique** d'aide à l'identification des espèces
- grande taille de la **communauté d'experts** taxonomiques disponibles en France
- **faible coût** associé au temps nécessaire pour échantillonner et identifier
- capacité à **représenter** la diversité d'autres groupes



➤ Critères pénalisants/handicapants

Arthropodes : 51% des taxons évalués mais **aucun** dans le cluster 1 !

Pénalisés par un grand nombre de critères
(22 sur 46)

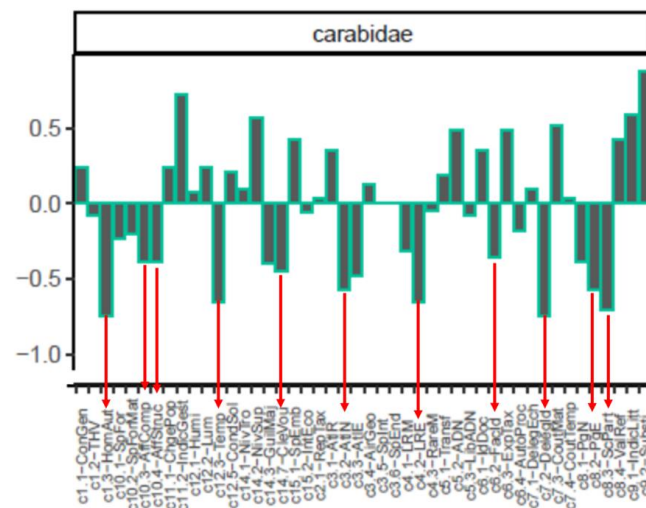
Critères les plus **pénalisants** :

- (i) difficulté à déléguer l'identification à un bureau d'étude ou à des professionnels institutionnels
- (ii) absence de données provenant des sciences citoyennes,
- (iii) absence de liste rouge
- (iv) absence de programme de suivi dans les pays limitrophes
- (v) caractère écologiquement hétérogène du groupe, également peu sensible aux conditions de température

Critères les plus **surclassants** :

- (i) utilisation fréquente comme indicateur de biodiversité ou de réponse aux conditions forestières
- (ii) taille de la communauté d'experts taxonomiques disponibles en France
- (iii) faible coût associé au matériel nécessaire pour échantillonner et identifier
- (iv) position supérieure du groupe dans les réseaux trophiques
- (v) capacité à représenter la diversité d'autres groupes

Coléoptères
Carabidae



➤ MCDA globale vs MCDA sur sélection de métacritères

Variations de classement

Corrélation maximale : classement omniscritères vs classement pratique

- **Poids** accordé aux critères **pratiques** dans notre analyse globale

Corrélations minimales : classement biologique vs autres

- **Originalité** de l'apport des critères **biologiques**

<i>Obj1 / SUPRA</i>	<i>Taxonomiques</i>	<i>Biologiques</i>	<i>Pratiques</i>
<i>Tous</i>	0.760	0.657	0.897
<i>Taxonomiques</i>			
<i>Biologiques</i>	0.310		
<i>Pratiques</i>	0.609	0.365	

➤ MCDA globale vs MCDA sur sélection de métacritères

Variations de classement



rank_obj1

Omnicritères

critères_taxonomiques

critères_biologiques

critères_pratiques

1	oiseaux	reptiles	colsaprox	oiseaux
2	flore_vasculaire	amphibiens	chiropteres	flore_vasculaire
3	chiropteres	oiseaux	nématode	ongules
4	ectomycorhiziens	odonata	gasteropode_terr	chiropteres
5	gasteropode_terr	flore_vasculaire	oiseaux	ectomycorhiziens
6	bryophyte	ephemeroptera	ectomycorhiziens	formicidae

➤ Compléments d'analyse

➤ MCDA séquentielle

MCDA1 : uniquement critères **taxonomiques** et **biologiques** > sélection des taxons des clusters 1 et 2

MCDA2 sur sélection : uniquement critères **pratiques**



Rang	INFRA	SUPRA
1	picidae	oiseaux
2	pteridophytes	flore_vasculaire
3	Arbres	chiropteres
4	chiropteres	ectomycorhiziens
5	formicidae **	orthoptera **
6	ectomycorhiziens	bryophyte
7	orthoptera **	gasteropode_terr
8	rhopalocera **	reptiles
9	gasteropode_terr	ephemeroptera
10	bryophyte	syrphidae
11	odonata	lombric
12	araneae	bankeraceae
13	bankeraceae	lichen
14	chilopode	saproxylique
15	bacillariophyta	plecopteres
15	charophyta	
15	chlorophyta	
18	myxomycetes	

➤ MCDA partielle et post-traitement

MCDA1 : uniquement critère
taxonomiques et **biologiques**

Sélection 2 sur seuil de score
de coût



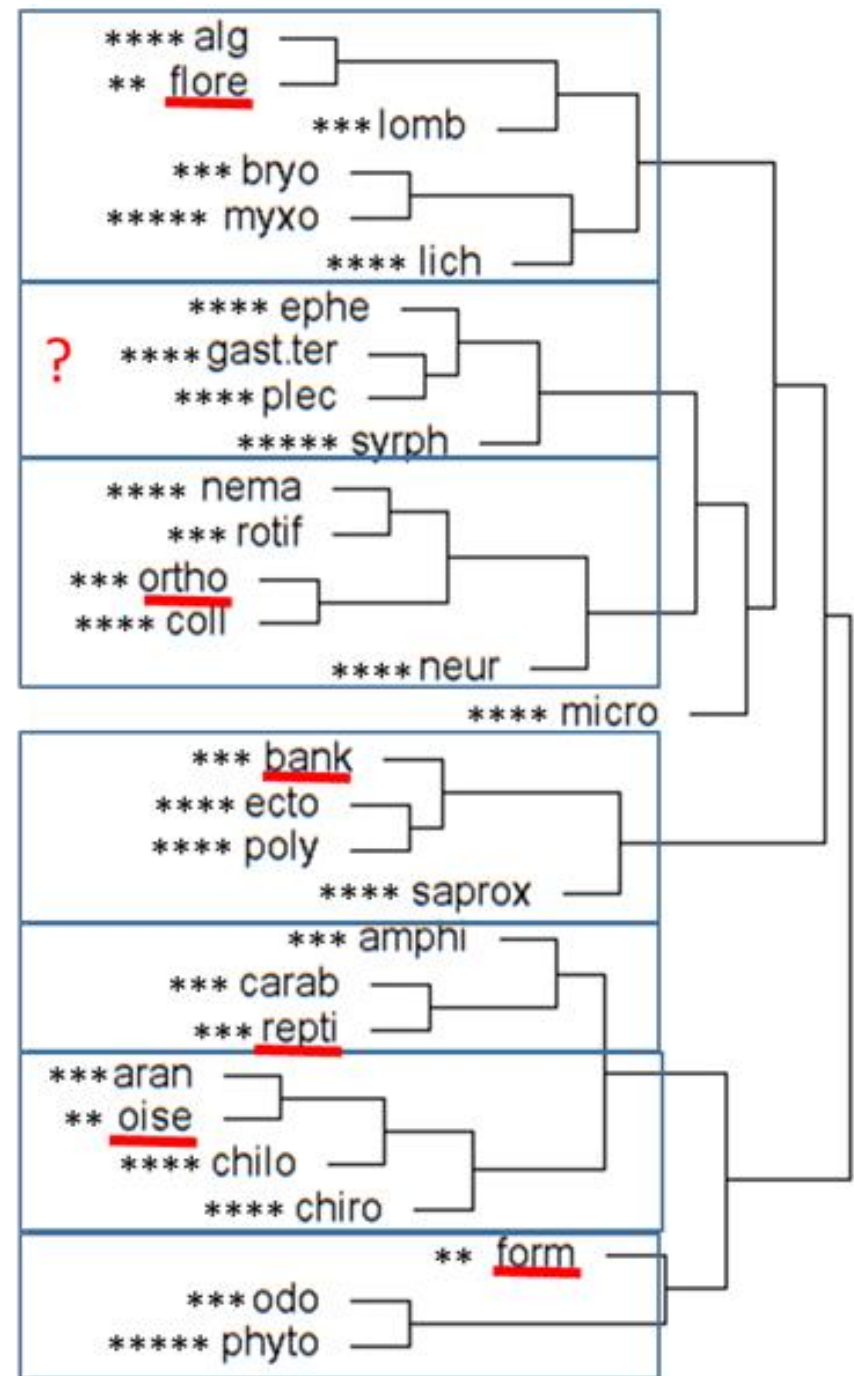
<i>Rang_obj1_taxobio</i>	Taxo	couttot
1	<u>oiseaux</u>	2
2	chiropteres	4
3	ectomycorhiziens	4
4	<u>flore_vasculaire</u>	2
5	gasteropode_terr	4
6	saproxylique	4
7	<u>bryophyte</u>	3
8	<u>bankeraceae</u>	3
9	<u>orthoptera</u>	3
10	lichen	4
11	syrphidae	5
12	<u>reptiles</u>	3
13	<u>odonata</u>	3
14	algues	4

➤ MCDA partielle et post-traitement

MCDA1 : uniquement critères **taxonomiques** et **biologiques**

Sélection 2 sur complémentarité écologique puis seuil de score de coût

*** = score de coût cumulé (humain et matériel)



➤ Synthèse des résultats

Objectif 1, résolution SUPRA	Type d'analyse			
	MCDA complète	MCDA séquentielle	MCDA sur critères taxoécologiques	
			post-traitement sur coûts	post-traitement sur complémentarité écologique + coûts
Rang				
1	oiseaux	oiseaux	oiseaux	flore vasculaire
2	flore vasculaire	flore vasculaire	flore vasculaire	orthoptères ** 
3	chiroptères	chiroptères	bryophytes	champignons Hydnes ** 
4	Champignons ectomycorhiziens	Champignons ectomycorhiziens	orthoptères ** 	reptiles ** 
5	Gastéropodes terrestres	orthoptères ** 	Champignons Hydnes ** 	oiseaux
6	bryophytes	bryophytes	reptiles ** 	formicidae ** 
7	orthoptères ** 	Gastéropodes terrestres	odonates ** 	Gastéropodes terrestres
8	odonates	reptiles	Lombrics	
9	reptiles	ephemeroptera	Araignées	
10	formicidae	syrphidae	formicidae	

➤ Groupes additionnels ?

		Sélection brute ©Prométhée	Compléments
Habitats occupés	Sol	Gastéropodes terrestres Champ. Ectomycorhiziens	Lombrics   
	Milieux ouverts	Flore vasculaire	Orthoptères, Reptiles
	Milieux aquatiques associés	Oiseaux	Ephéméroptères, Odonates  
	Bois mort	Bryophytes, Picidae	Champ. Hydnes 
	Vieux arbres	Chiroptères, Picidae	
Catégorie taxinomique	Arthropodes		Ephéméroptères, Orthoptères, Fourmis  
	autres Invertébrés	Gastéropodes terrestres	Lombrics 
	Vertébrés	Oiseaux, Chiroptères, Picidae	
	Végétaux	Flore vasculaire, Arbres, Phanérogames, Ptéridophytes, Bryophytes	
	Champignons	Champ. Ectomycorhiziens	Champ. Hydnes 

➤ Perspectives

Du choix des taxons aux protocoles taxons – méthodes

Taxon

X

Méthodes d'échantillonnage

- Pièges d'interception classiques (attractifs ou non) avec capture des spécimens : pièges entomos, tours d'aspiration...
- Piège d'interception photographique
- Prélèvements-échantillonnage manuel de substrats
- Prélèvements-échantillonnage manuel de spécimens
- Inventaire visuel
- Enregistreurs acoustiques

X

Méthodes de dépouillement des échantillons

- Identification morphologique manuelle classique (expert)
- Métabarcoding/ADNe
- Identification morphologique/acoustique automatique (IA)



➤ Remerciements

- à Hervé Jactel (formation ©Prométhée)
- aux participants de l'atelier de pondération
- à plus de 80 naturalistes/taxinomistes spécialistes

A. Lévêque, B. Kaufmann, C. Galkowski, C. Baltzinger, C. Baudran, C. Dussaix, C. Lemoine, C. Pelosi, C. Quindroit, C. Villemant, D. Augot, E. Delfosse, E. Iorio, F. Archaux, F. Noël, G. Corriol, G. Parmain, J. Cortet, J. Pétillon, C. Jacquet, J. Trap, J.C. Streito, J.-J. Geoffroy, J.L. Pratz, JC De Massary, JY Rasplus, L. Barbaro, L. Tillon, M. Brulin, M. Gosselin, M. Meyer, M. Roy, M.S. Tixier, S. Kreiter, N. Van Vooren, O. Gargominy, P. Jay-Robert, P. Tillier, P.A. Moreau, R. Chevalier, R. Poncet, S. Cadet, S. Gadoum, S. Hamlaoui, C. Bernard, T. Decaëns, M. Hedde, T. Noblecourt, W. de Smet, Y. Braet, O. Bardet, E. Langlois, P. Denis, J. Cordier, F. Gillet, J.Y. Barnagaud, B. Castagneyrol, E. Corcket, G. Decocq, J.L. Dupouey, B. Frochot, R. Julliard, A. Lalanne, J. Lenoir, J.P. Siblet, L. Larrieu, F. Gosselin, M. Bernard, B. Benet, L. Sire, J. Orensanz, R. Rougerie, G. Gigot, P. Dupont, S. Wroza, G. Delvare, J.P. Sarthou, L. Péru, P. Noël, Y. Dumas