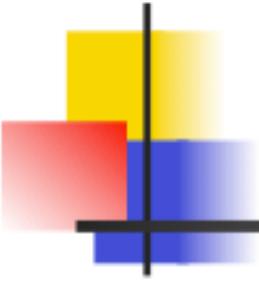


Une brève histoire du développement de l'*Écologie numérique*

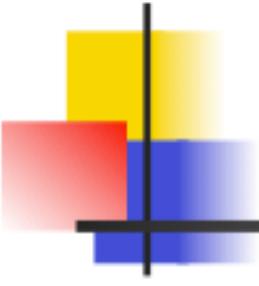
Pierre Legendre
Département de sciences biologiques
Université de Montréal
<http://www.NumericalEcology.com/>

Leçon de clôture, 19 avril 2024



Plan de la présentation

1. Qu'est-ce que l'Écologie numérique?
2. Les pionniers de la recherche en écologie numérique
3. Les manuels fondateurs
4. La fondation de l'Écologie numérique en 1975
5. Les manuels d'Écologie numérique
6. Un manuel R en 2011 et ses éditions en plusieurs langues
7. Quelques articles importants au fil des années
8. Paquets R pour l'écologie des communautés
9. Réseau des chercheurs qui ont contribué à l'Écologie numérique
10. L'interaction enseignement-recherche
11. Cours intensifs d'écologie numérique autour de la planète
12. Références



1. Qu'est-ce que l'*Écologie numérique*?

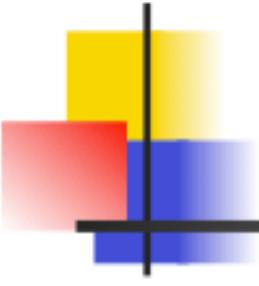
L'*Écologie numérique* est le domaine de l'écologie quantitative qui s'occupe de l'analyse numérique des données écologiques, en particulier des données de composition des communautés naturelles.

Les écologistes des communautés, dont les données sont multivariées (nombreuses espèces, nombreuses variables environnementales), sont les premiers utilisateurs de ces méthodes.

L'écologie numérique forme une section de l'écologie, pas de la statistique ou d'une autre discipline mathématique.

En *écologie numérique*, le spécialiste, l'écogiste, choisit ses méthodes pour répondre à des questions et tester des hypothèses écologiques en utilisant ses données.

Les tests statistiques, lorsqu'ils sont nécessaires, doivent être applicables à des données multivariées à distribution non normale.



2. Les pionniers de la recherche

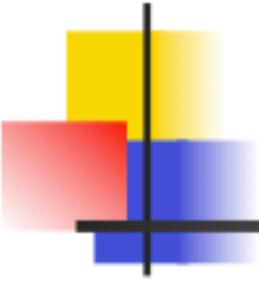
L'*Écologie numérique* est fondée sur le travail d'un grand nombre de chercheurs. Les pionniers qui ont développé des concepts importants et des méthodes avancées d'analyse de données écologiques incluent :

- Paul Jaccard (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich);
 - David Goodall (fin de carrière à Edith Cowan Univ., W. Australia);
 - Robert R. Sokal (State University of New York, Stony Brook, USA);
 - John Gower (Rothamsted Experimental Station, Angleterre);
 - Robert H. Whittaker (Cornell University, USA);
 - Cajo J. F. ter Braak (Wageningen University, Pays-Bas);
- et d'autres chercheurs cités dans les manuels d'*Écologie numérique*.

Le domaine de l'*Écologie numérique* s'est aussi développé grâce au travail d'écologistes qui ont produit des logiciels d'analyse de données. En particulier:

- Cajo J. F. ter Braak a écrit le programme *Canoco*, le premier grand logiciel d'ordination pour les données écologiques multivariées;
- Plusieurs développeurs de paquets de fonctions pour l'écologie numérique en langage R dont nous reparlerons plus loin.

Ces personnes étaient et sont encore souvent des écologistes qui ont appris, dans bien des cas en autodidactes, les méthodes statistiques d'analyse des données ainsi que l'art de la programmation.



3. Manuels fondateurs

Evelyn Christine Pielou, Queens' University, Kingston

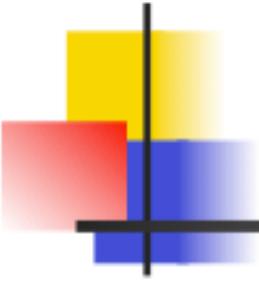
- Pielou, E. C. 1969. *An introduction to mathematical ecology*. John Wiley & Sons, New York.

László Orlóci, University of Western Ontario (Dép. de botanique)

- Orlóci, L. 1975. *Multivariate analysis in vegetation research*. Dr. W. Junk B. V., The Hague.

Roger Green, University of Western Ontario (Zoologie)

- Green, R. H. 1979. *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. John Wiley & Sons, New York.

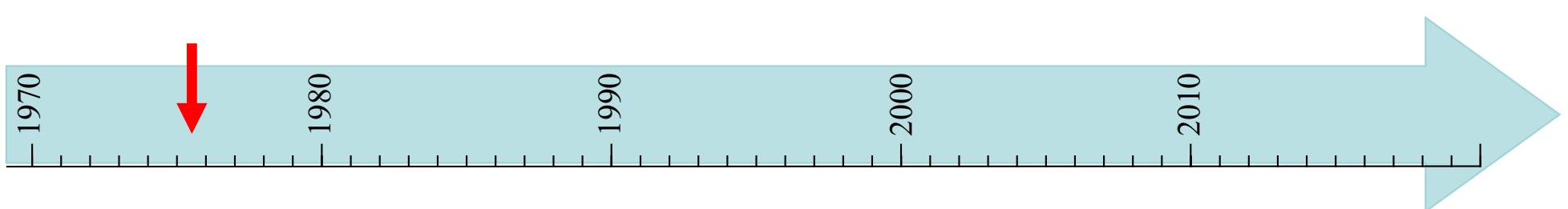


4. La fondation de l'Écologie numérique

Séminaire de mathématiques appliquées à l'océanographie biologique,
Station marine de Villefranche-sur-Mer, Université Pierre et Marie Curie
(maintenant Sorbonne Université), France.

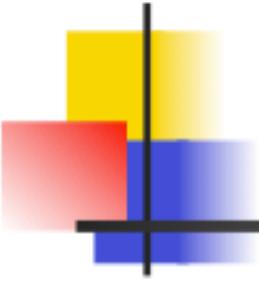
En mai 1975, une douzaine d'écologistes, marins pour la plupart, se réunirent pendant trois jours dans une salle de classe de la Station marine de Villefranche-sur-Mer, à quelques mètres de la Méditerranée, pour discuter d'un développement récent dans la littérature écologique : l'analyse statistique des données écologiques multivariables.

Louis Legendre (océanographe, Université Laval) et moi-même (écogiste des communautés, Université du Québec à Montréal) avions été invités indépendamment à participer à ce séminaire.





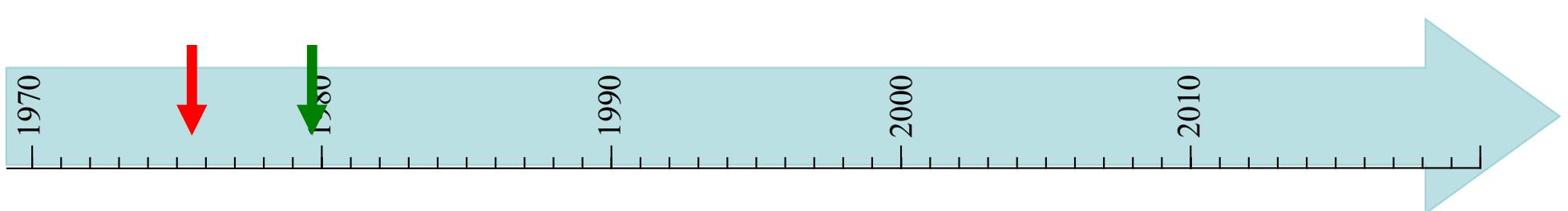
Laboratoire océanographique de Villefranche (LOV), Sorbonne Université, Villefranche-sur-Mer, France. (Photo: Google Earth)



5. Les manuels d'*Écologie numérique*

Au soir de la clôture de la réunion, assis à la terrasse d'un restaurant avec vue sur la rade de Villefranche, Louis et moi avons écrit, sur un napperon en papier, une liste de sujets...

... qui allait devenir la table des matières d'un livre sur une nouvelle sous-discipline de l'écologie, livre qui a été publié en 1979, en français, sous le titre *Écologie numérique*.



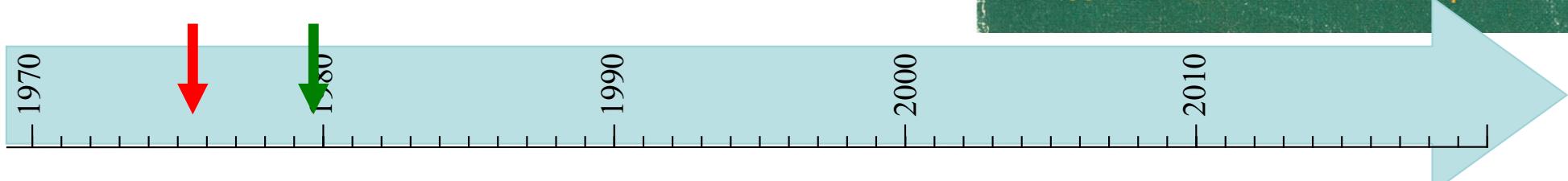
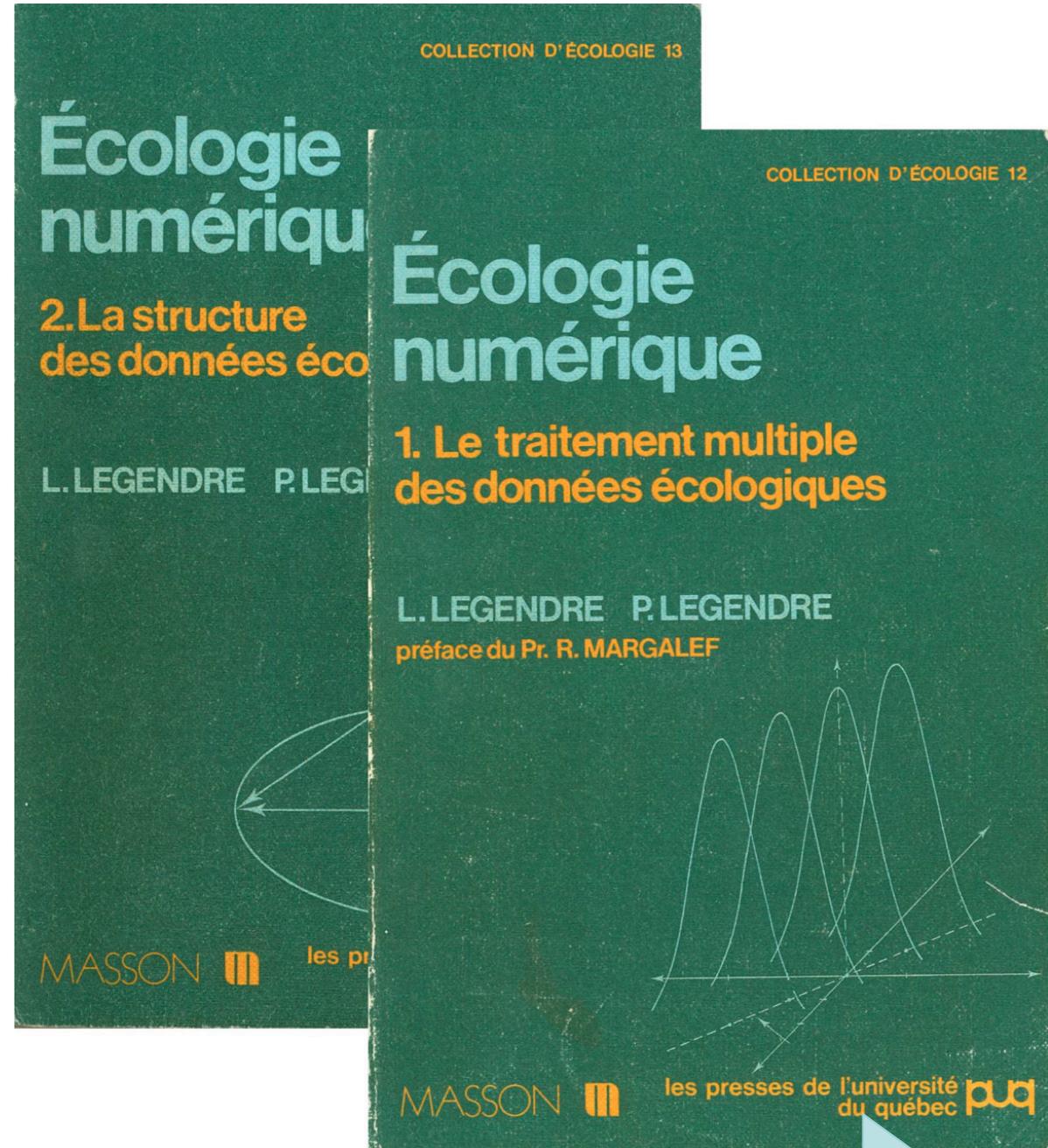
Legendre, L. & P. Legendre.
1979. *Écologie numérique*.

Tome 1: *Le traitement multiple des données écologiques*.

Tome 2: *La structure des données écologiques*.

Masson, Paris et les Presses de l'Université du Québec.

Total 2 tomes: 473 pages

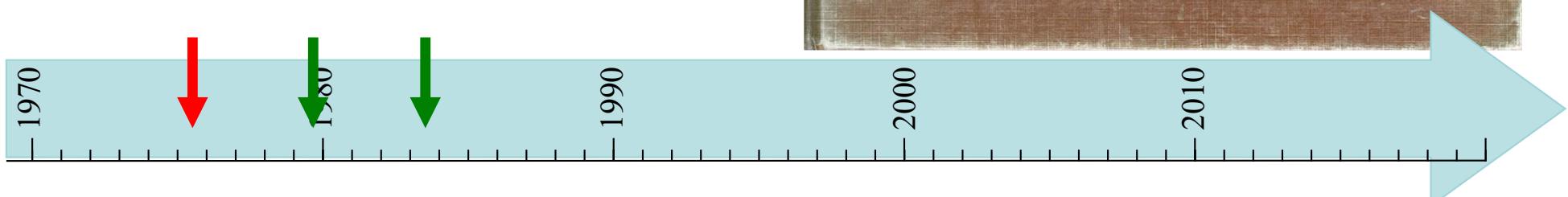
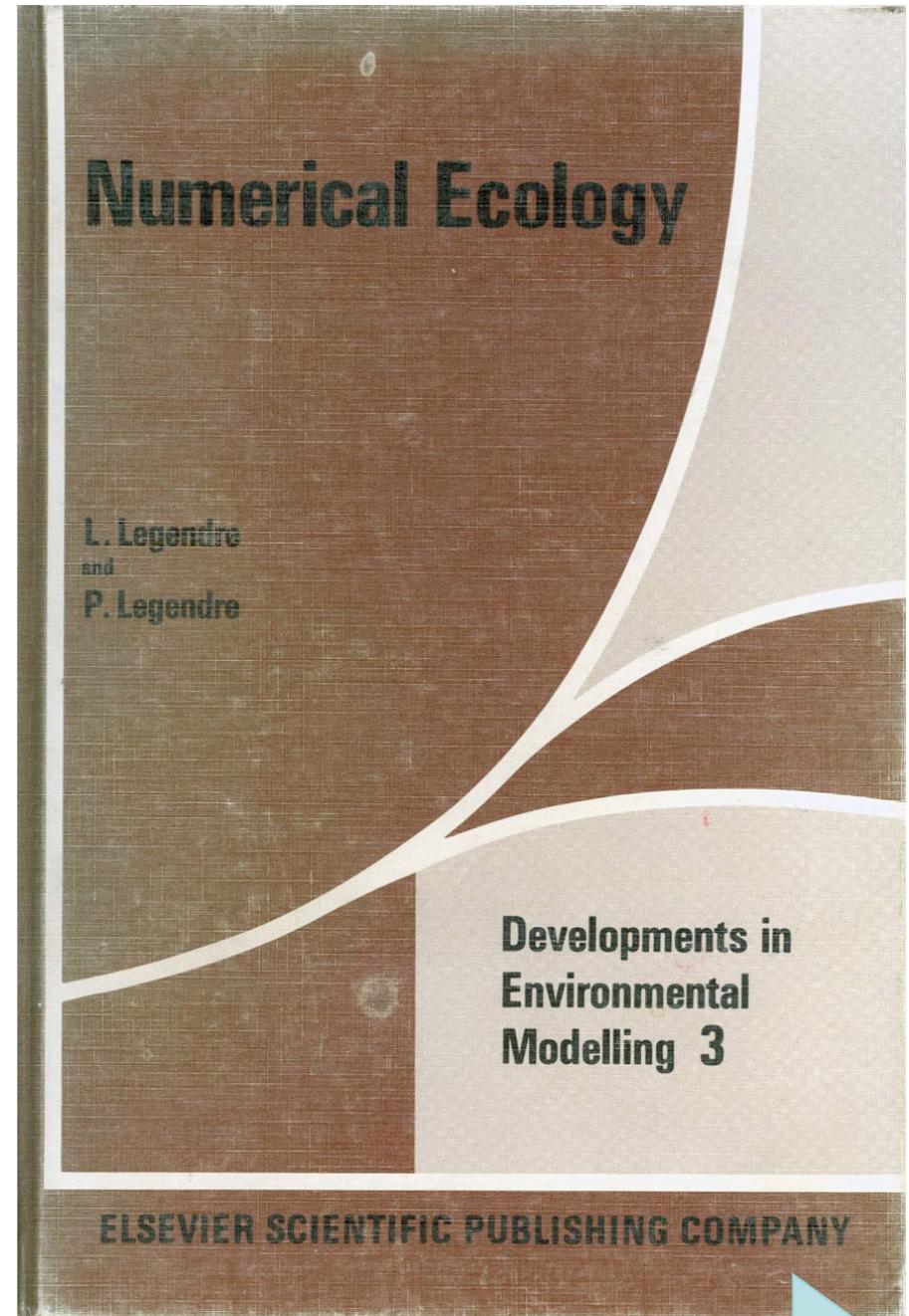


Legendre, L. & P. Legendre.
1983.

Numerical Ecology.
Developments in
environmental modelling, 3.

Elsevier Scientific Publ. Co.,
Amsterdam Netherlands.

xvi + 419 pages



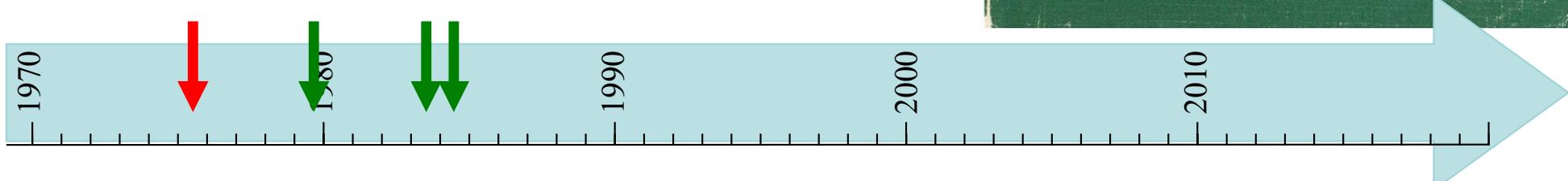
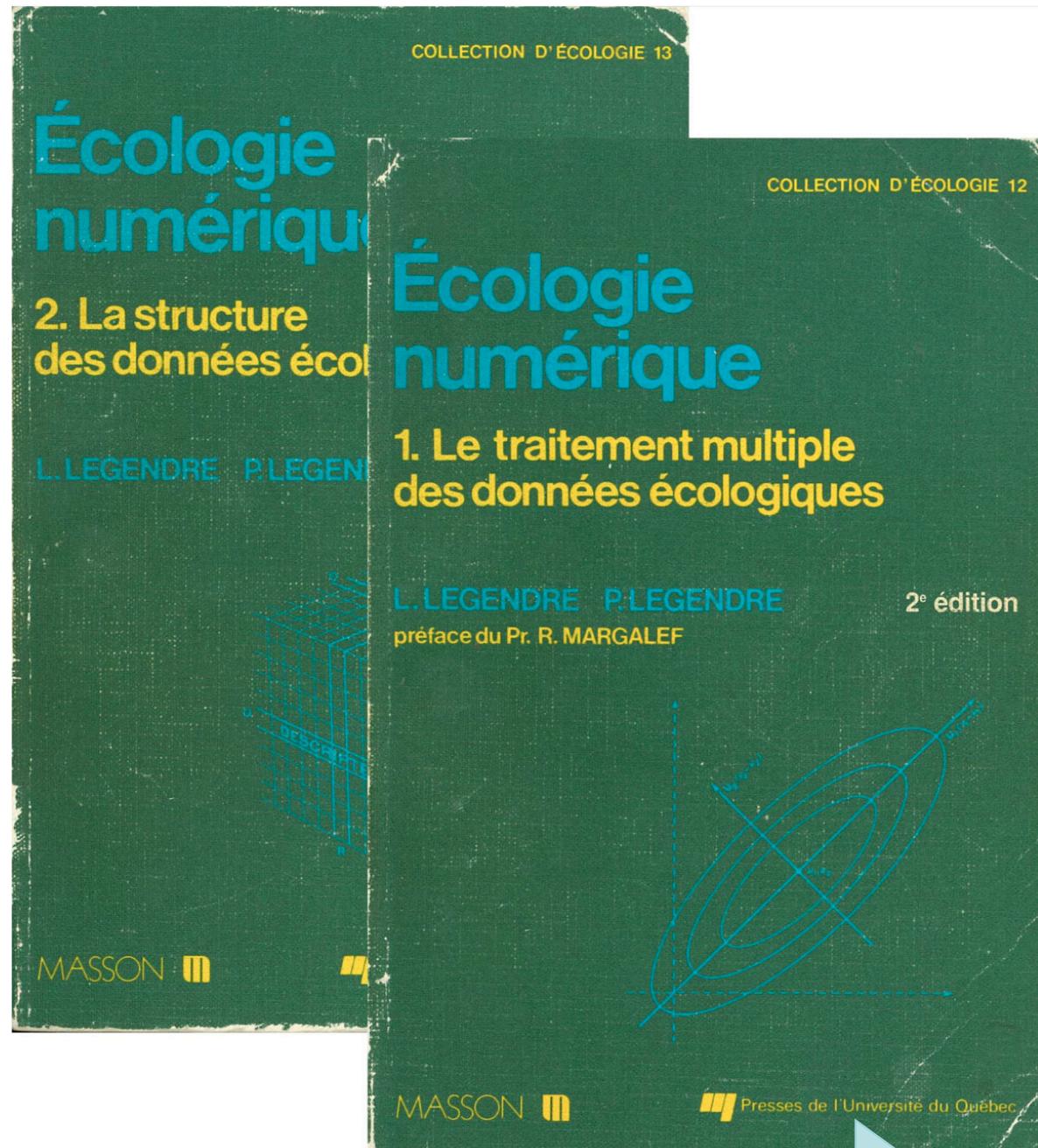
Legendre, L. & P. Legendre.
1984. *Écologie numérique*,
deuxième édition revue et
augmentée.

Tome 1: *Le traitement
multiple des données
écologiques*.

Tome 2: *La structure des
données écologiques*.

Masson, Paris et les Presses
de l'Université du Québec.

Total 2 tomes: 618 pages



Les auteurs pendant une entrevue à l'Université de Montréal en 1986 –

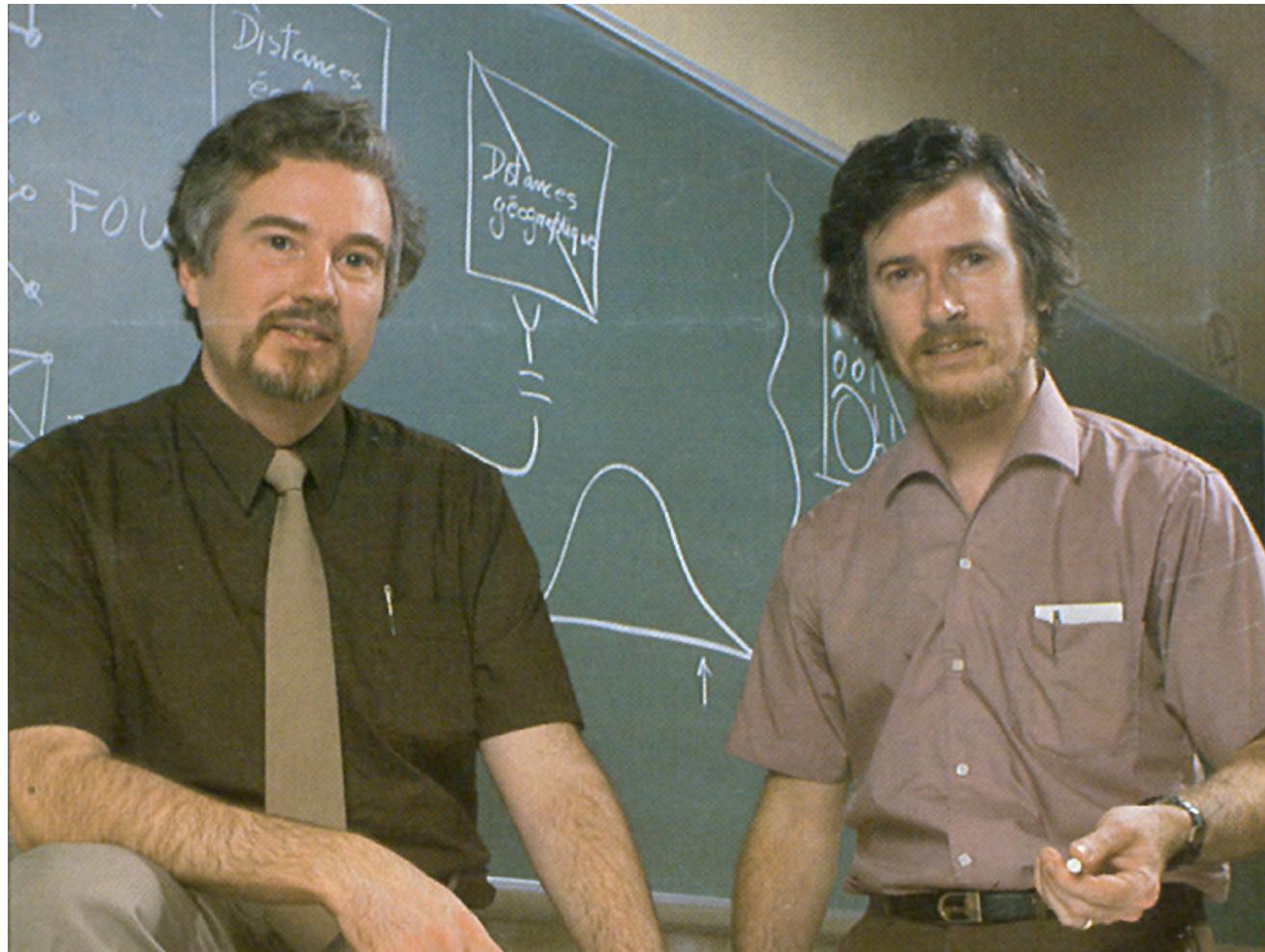
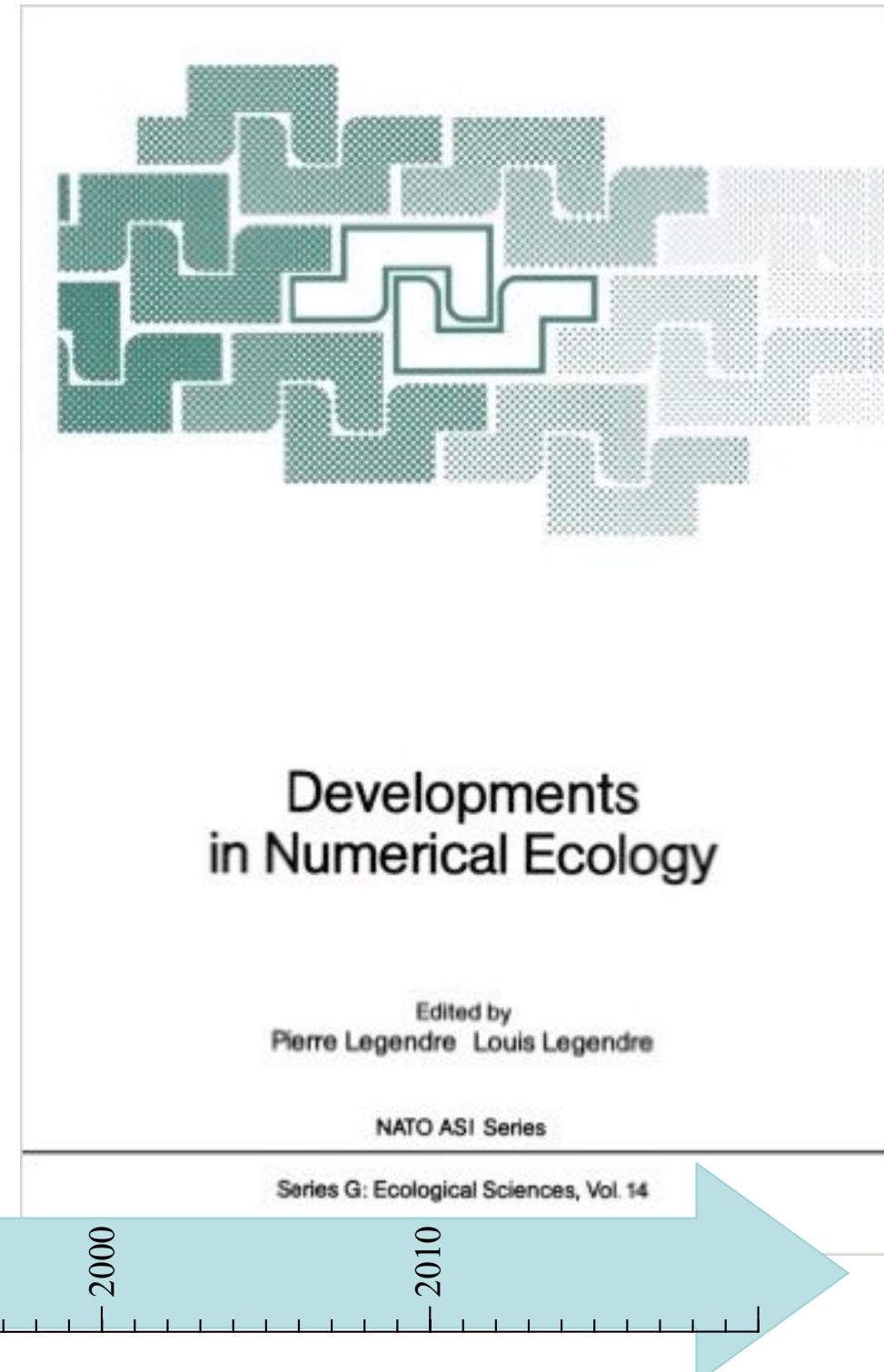
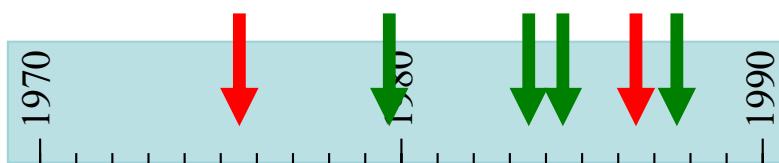


Photo: *Interface*, Acfas, 1986

Du 3 au 11 juin 1986, Louis et moi, assistés par Marie-Josée Fortin (maintenant Professeure à Uni. of Toronto), avons organisé un *NATO Advanced Study Workshop on Numerical Ecology* qui a réuni 52 chercheurs à la Station marine de Roscoff en Bretagne (France).

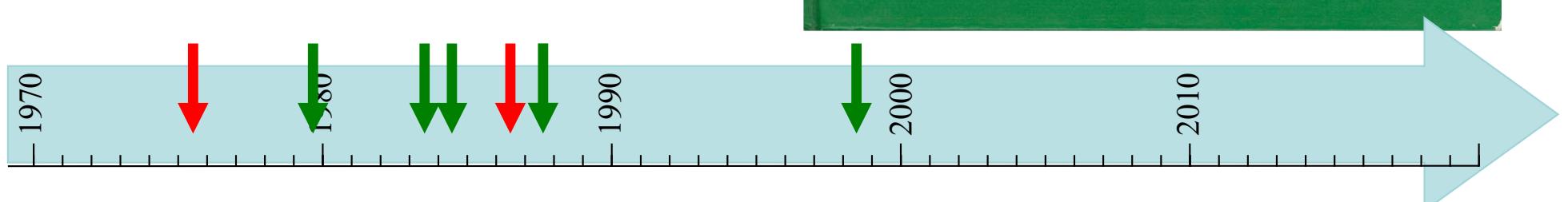
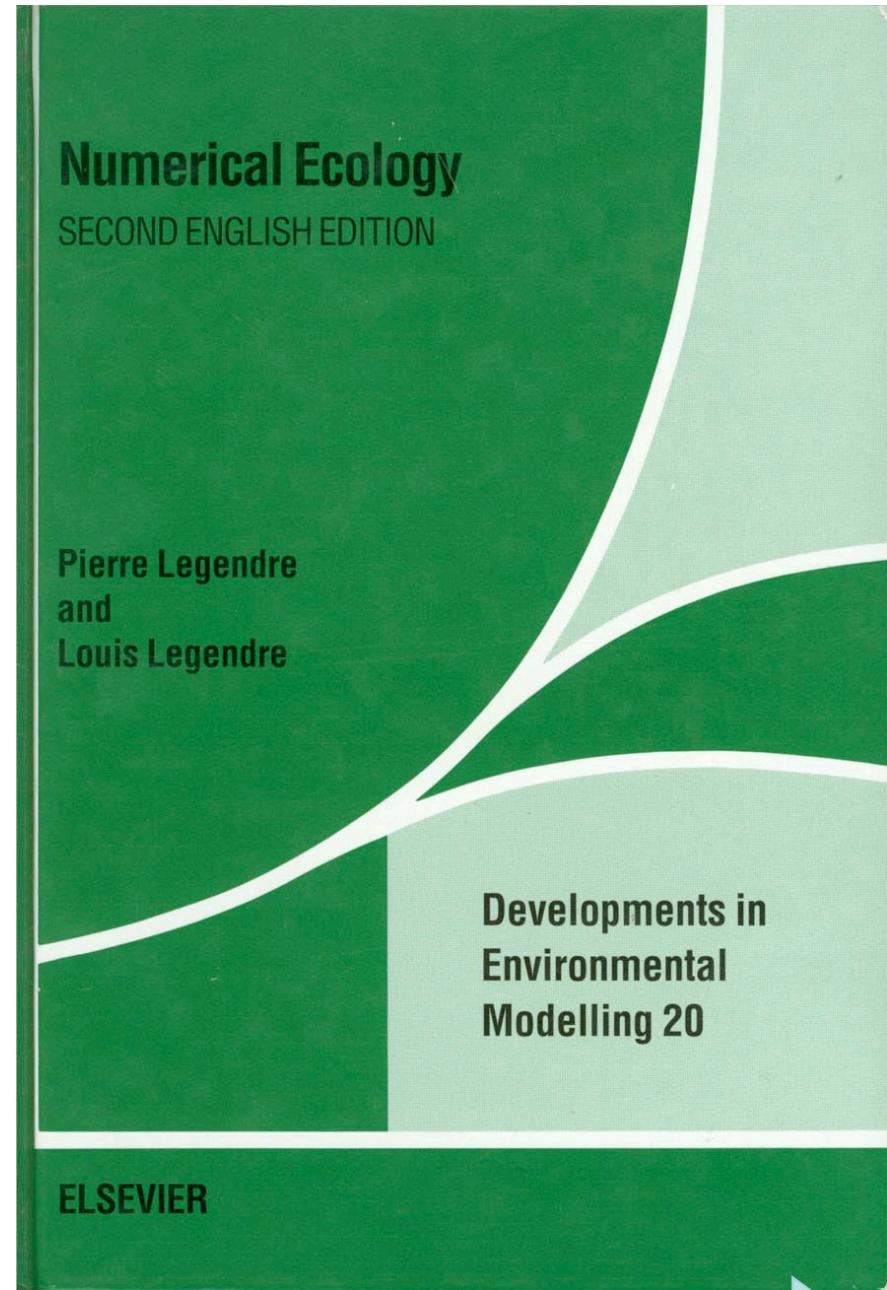
Des présentations de méthodes statistiques par des méthodologistes étaient suivies de discussions de leur application à l'analyse des données par des groupes d'écologistes.

Le livre des Actes de la réunion fut publié par *Springer-Verlag* en 1987.

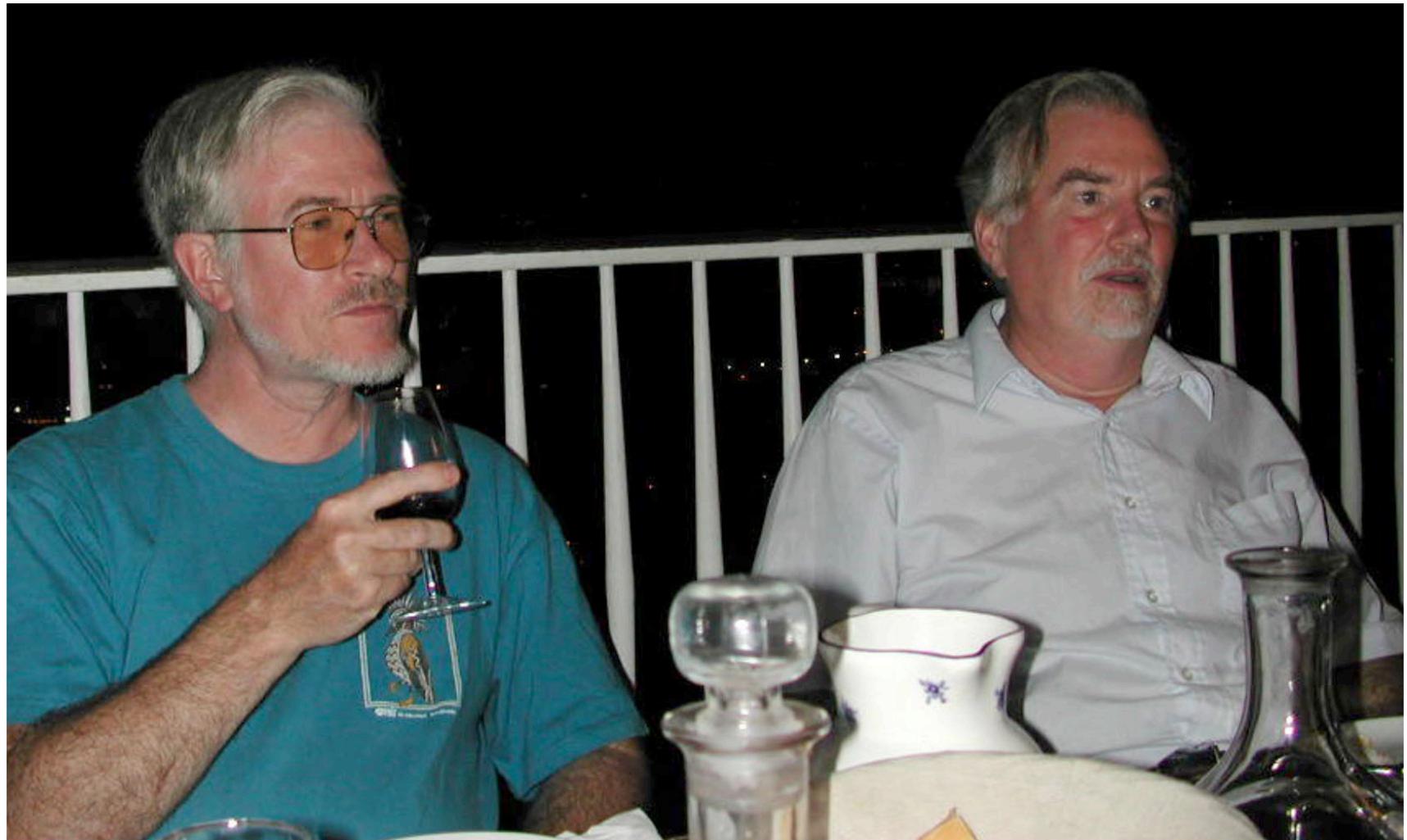


Legendre, P. & L. Legendre.
1998. *Numerical Ecology*,
2nd English edition.
Elsevier Science BV,
Amsterdam.

xv + 853 pages



Les auteurs à Nice en 2002, en discussion sur les développements de l'écologie numérique et la prochaine édition du manuel (qui parut en 2012) –

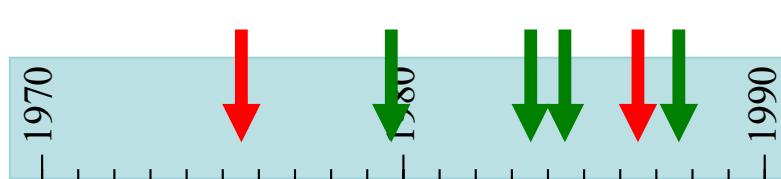
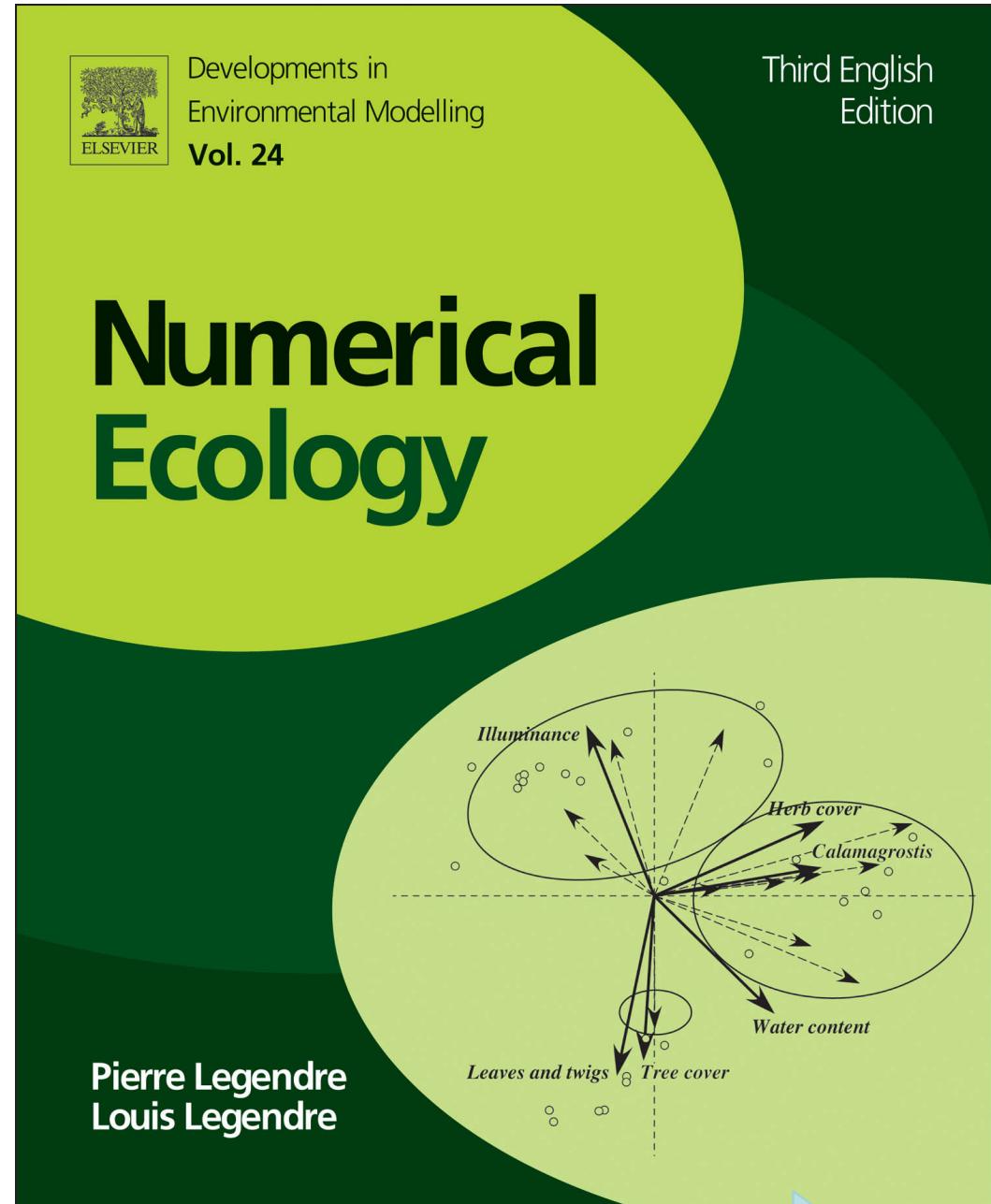


Legendre, P. & L. Legendre.
2012. *Numerical Ecology*,
3rd English edition.

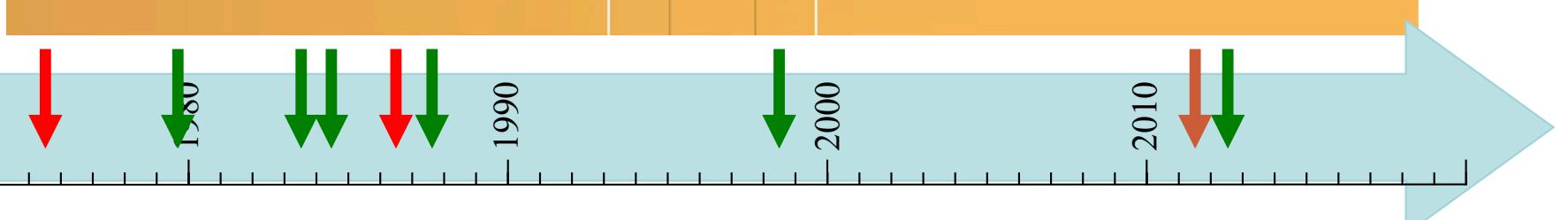
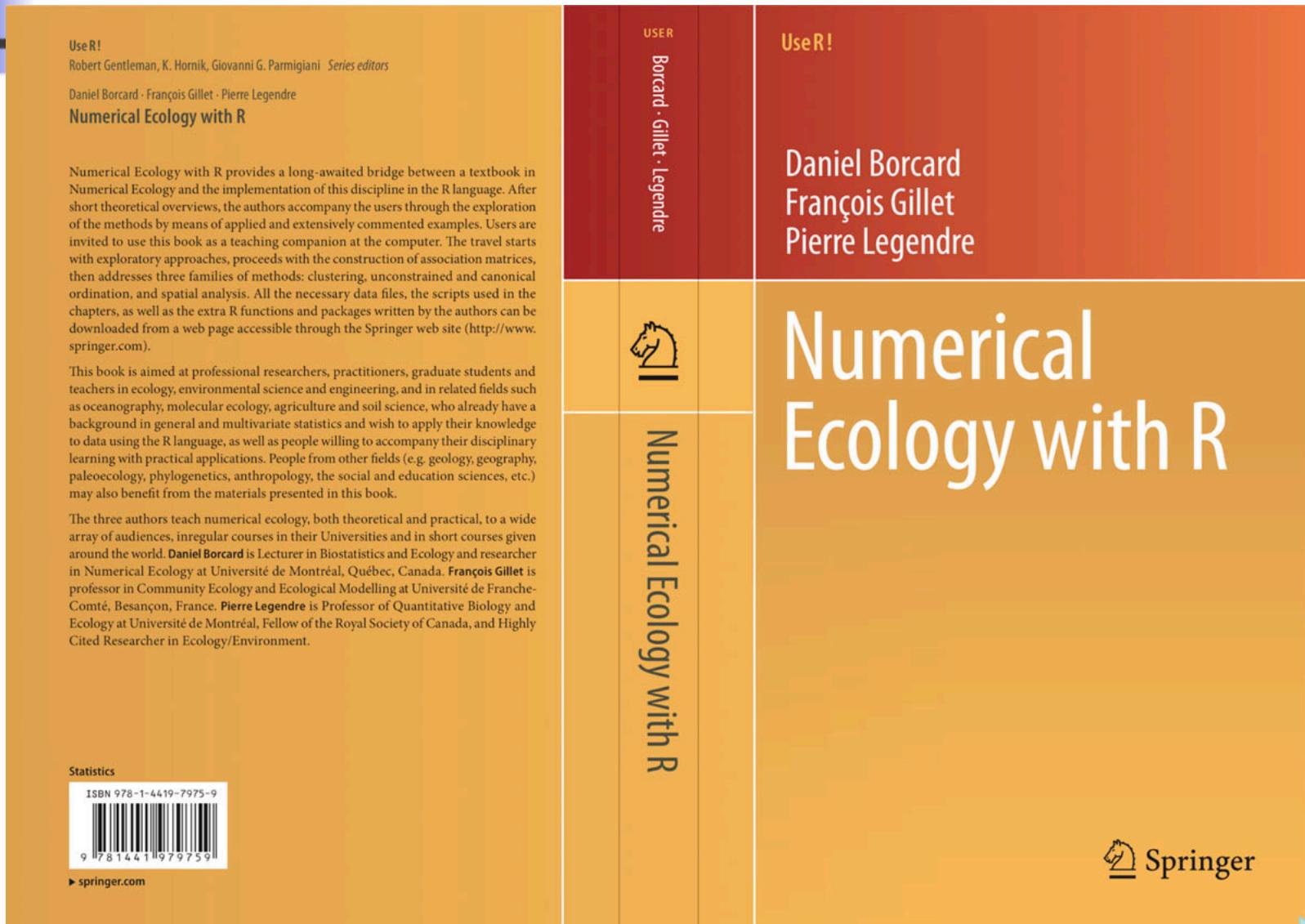
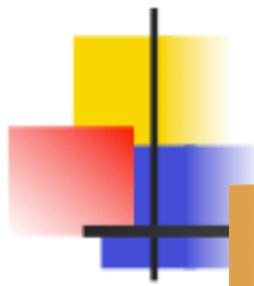
Elsevier Science BV,
Amsterdam.

xvi + 990 pages

Nombre de citations du
manuel *d'Écologie numérique*
(toutes les éditions) > 23 300
(Google Scholars, fév. 2022)



6. Un manuel R en 2011



Les auteurs –

Daniel Borcard

U de M



François Gillet

U de Franche-Comté



Pierre Legendre

U de M



Borcard, D., F. Gillet and P. Legendre. 2011. *Numerical Ecology with R*. Use R! series, Springer Science, New York. xi + 306 pages.

adn.biol.umontreal.ca/~numericalecology/numecolR/ Lecteur

Apple Signets PL Google Maps YouTube Wikipédia Informations Divers Météo Montréal Synchro, UdeM

Biologie,... Numerical... Labo Accueil | ... R CRAN UdeM Google M... Sans titre +

Numerical Ecology with R

A practical guide to Numerical Ecology using the R language

Links to the authors' web pages

[Daniel Borcard](#)

[François Gillet](#)

[Pierre Legendre](#)

This page provides the data sets, R scripts, R functions and several useful links related to the book entitled "Numerical Ecology with R". The R code is provided for PC and Macintosh.

Original material (as in the book)

This material includes a script to install the necessary packages, the data sets, the R scripts for all chapters (for PC and Mac computers) and several R functions. MVPARTwrap, a wrapper for package mpart, is now available on CRAN for OS X, Windows and Linux. To install it, proceed as for any CRAN package.

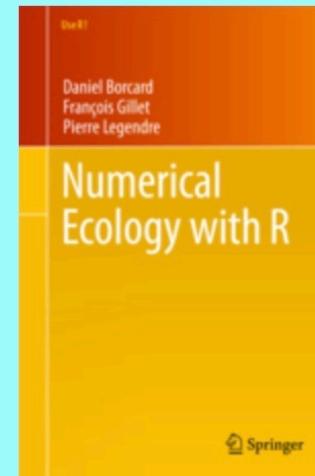
[Original material](#)

Updated material, August 2012, tested with R 2.15.1

[Updated material - R 2.15.1](#)

Updated material, February 2017, tested with R 3.3.2 and including changes in the installation scripts and data sets.

[Updated material R 3.3.2](#)



[Springer web page of the book](#)

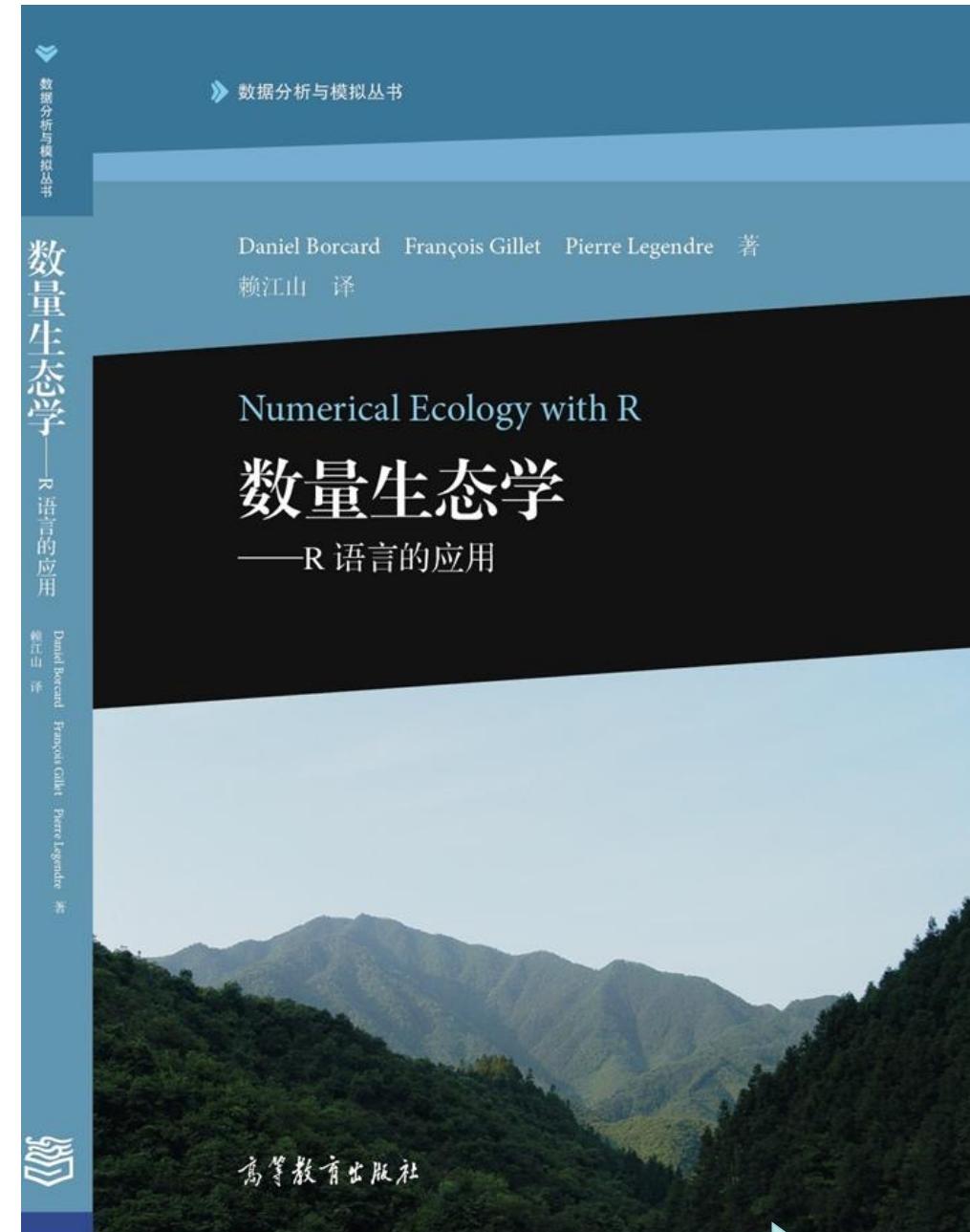
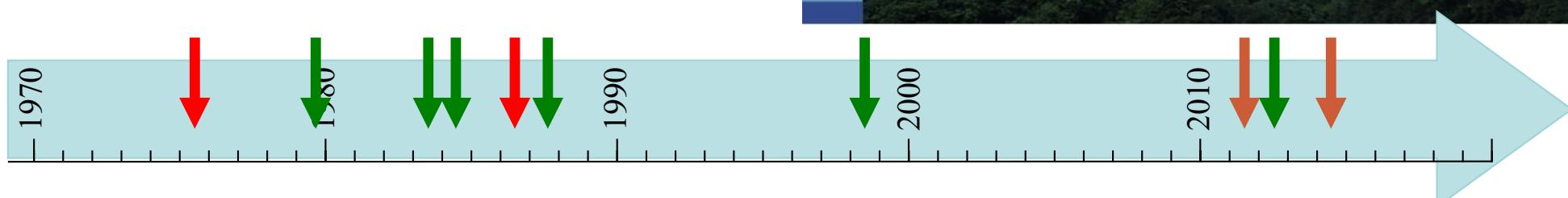
Édition en chinois mandarin, 2014

Borcard, D., F. Gillet and P. Legendre. 2014.

*Numerical Ecology with R,
Chinese edition.*

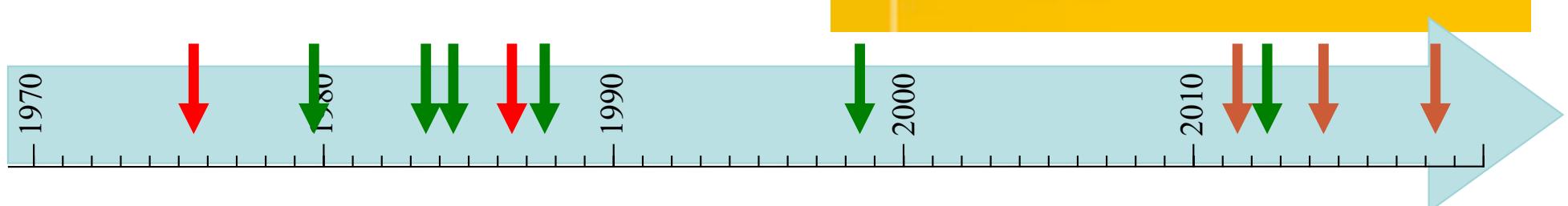
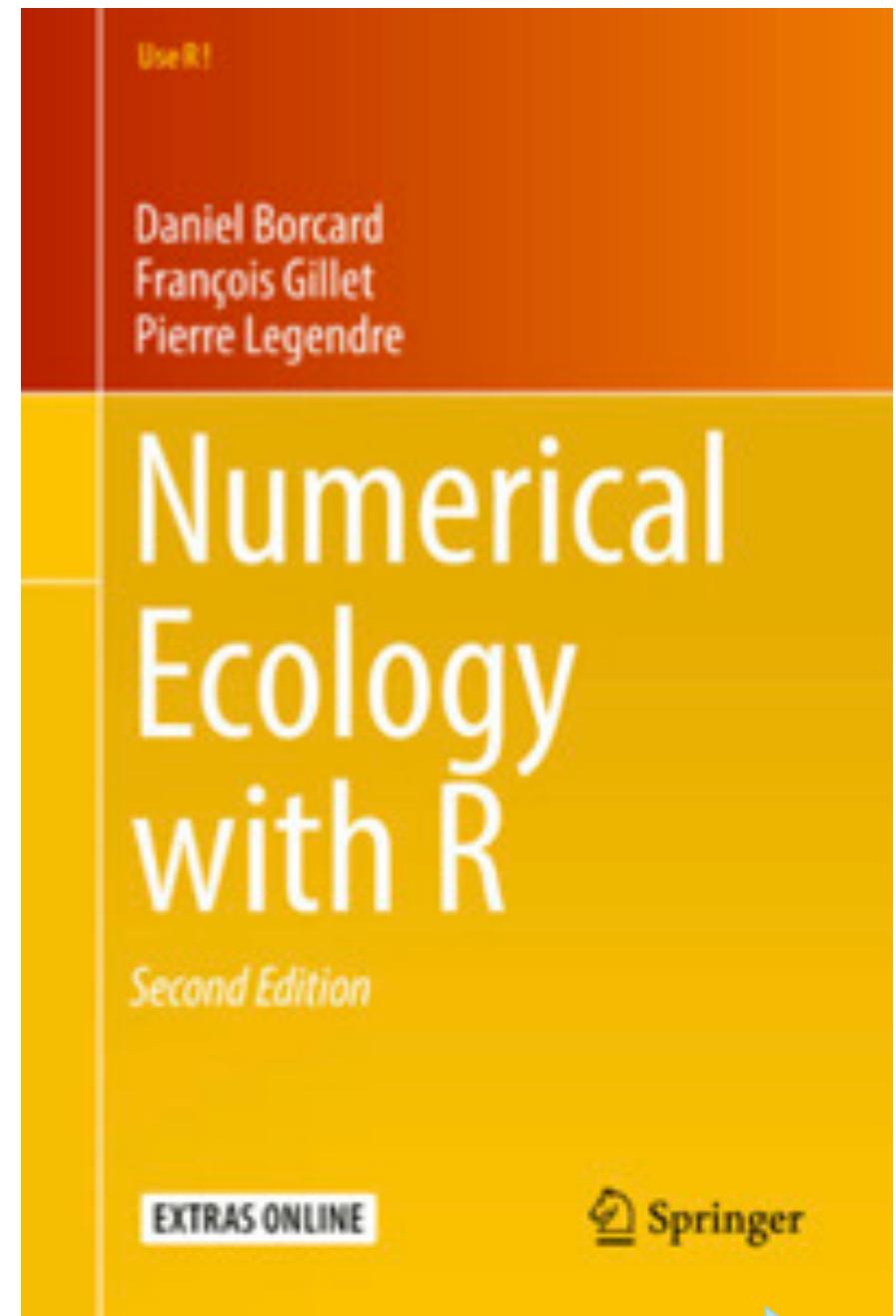
(Tranduction : J. Lai, Institute
of Botany, Chinese Academy
of Sciences.)

Higher Education Press,
Beijing. 280 pages.

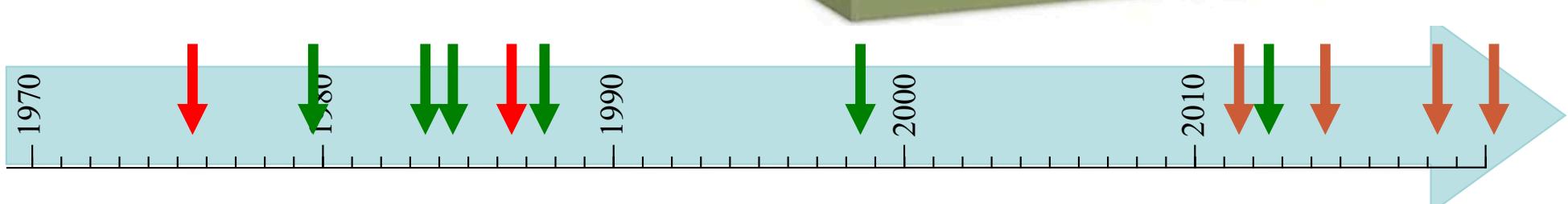
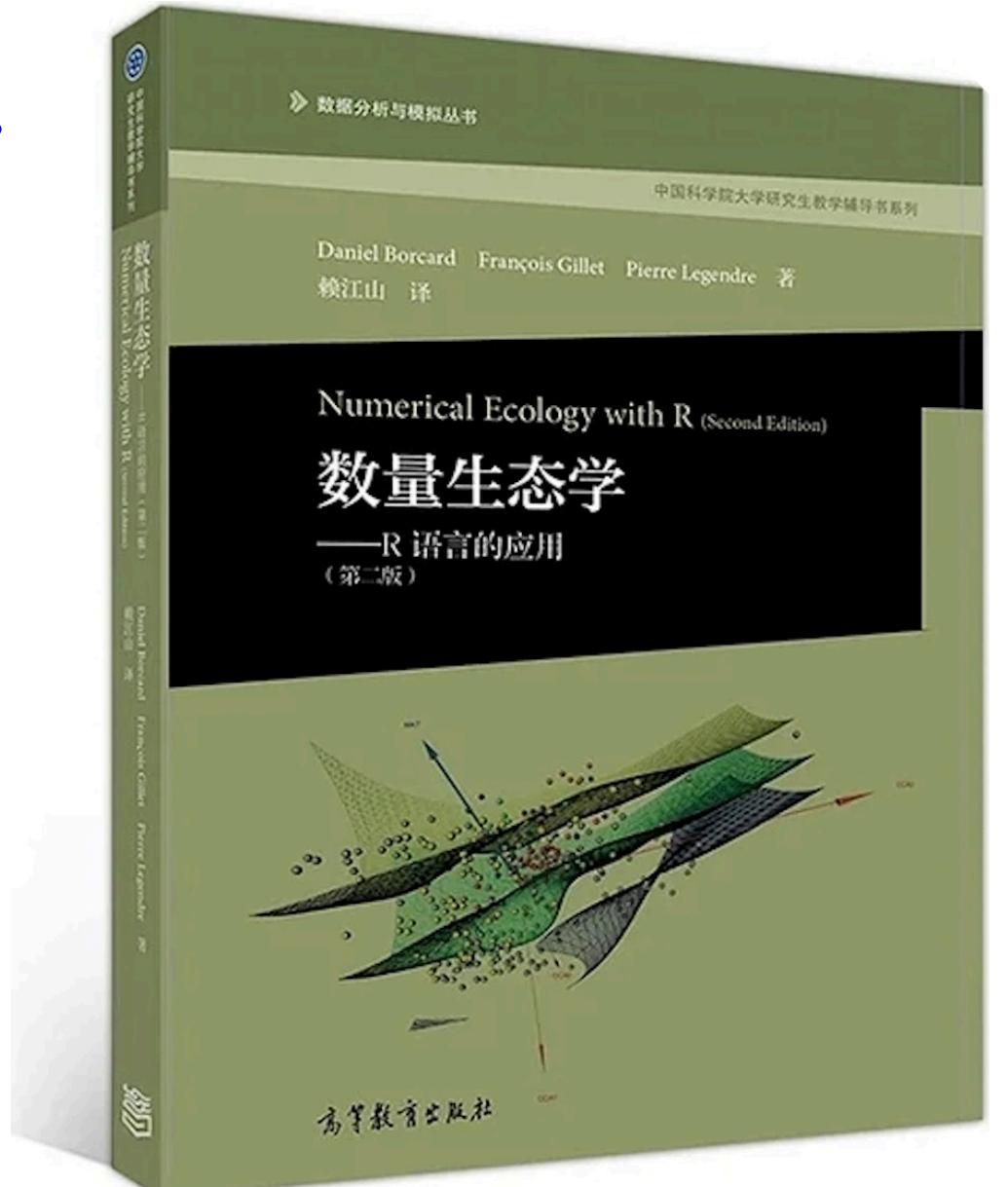


*Seconde édition anglaise
publiée en mars 2018*

(xv + 435 pages)



*Seconde édition chinoise
publiée en mars 2020
(xviii + 432 pages)*

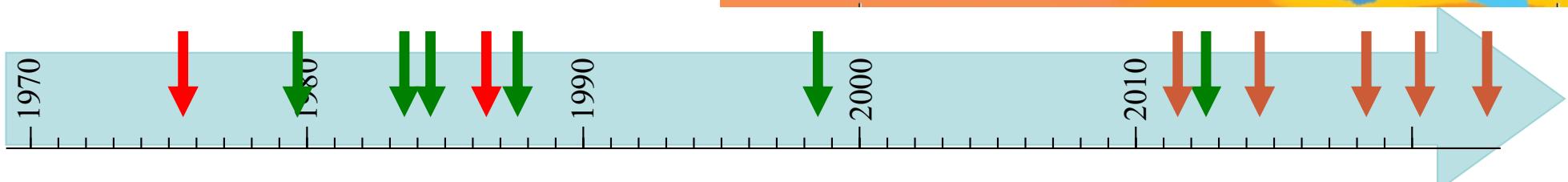


*Édition en japonais,
février 2023*

Borcard, D., F. Gillet and
P. Legendre. 2023.

Numerical Ecology with R
(Rによる数値生態学),
Japanese edition.

Kyoritsu Shuppan Co. Ltd,
Tokyo. xvi + 494 pages.

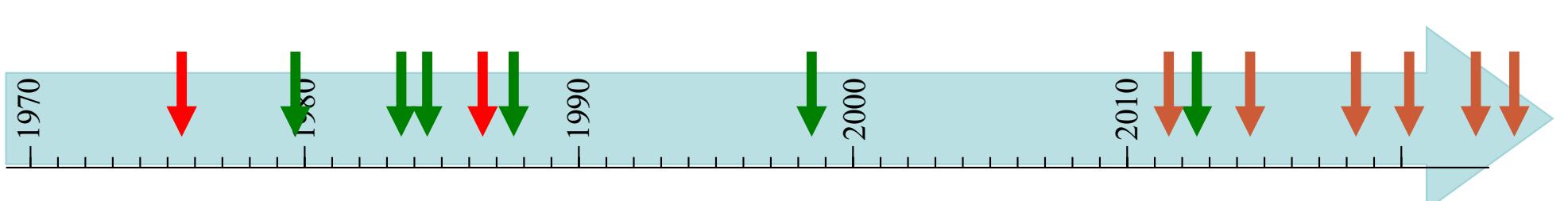
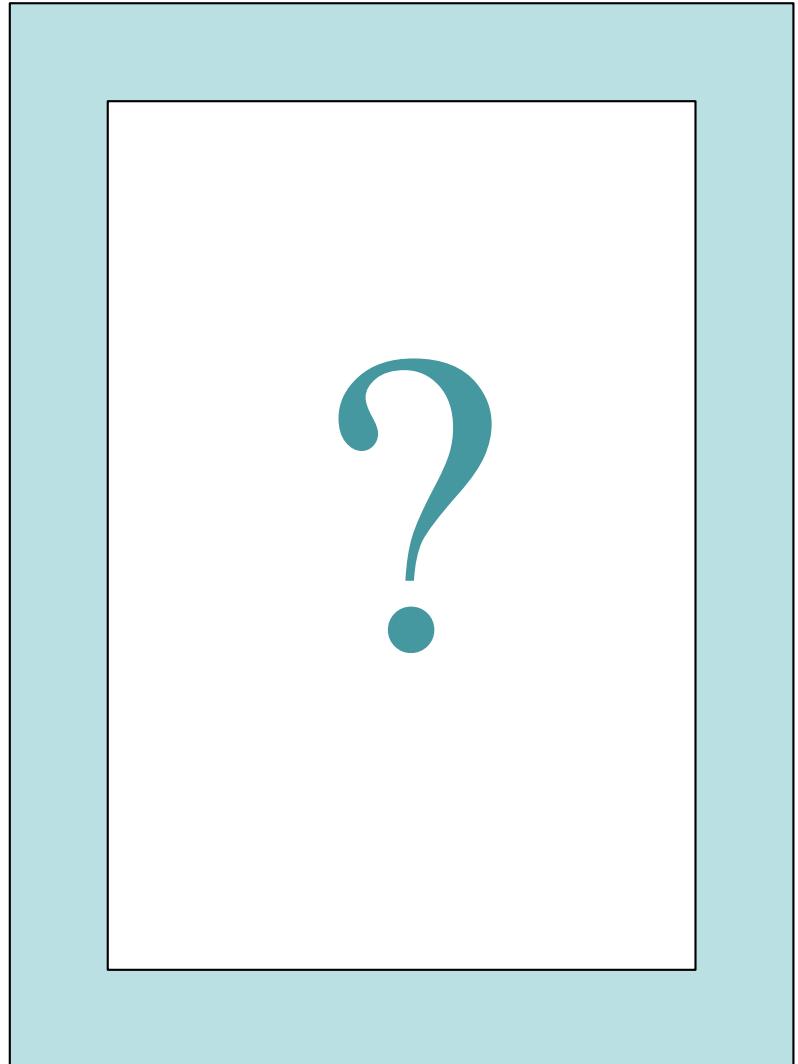


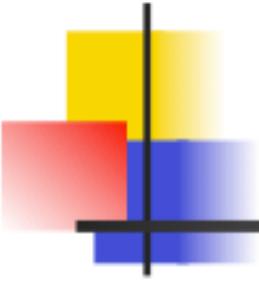
Édition française, en préparation (2024 ?)

Borcard, D., F. Gillet et P. Legendre.

*L'écologie numérique en R,
Édition française, en
préparation.*

Les Presses de l'Université de Montréal.





7. Quelques articles importants

Les utilisateurs de méthodes numériques et les étudiants diplômés se demandent souvent d'où proviennent les idées de base des méthodes que nous utilisons couramment et comment elles ont été développées.

Cette section présente une sélection d'articles qui ont changé la façon avec laquelle les écologistes ont analysé leurs données multivariées au cours des 50 dernières années ...

... et l'enseignement de l'écologie numérique aux étudiants diplômés dans les universités.

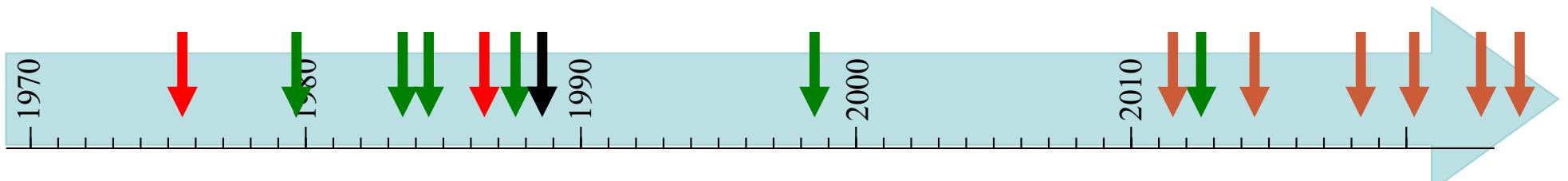
Pour les années 2000+, j'insisterai sur les contributions de mon laboratoire. La liste présentée ici n'est évidemment pas exhaustive.

Les années 1960 et 1970

- Développement de l'analyse canonique de redondance (ACR, *RDA*) : *composantes principales de variables instrumentales*, Rao (1964); *analyse de redondance*, Wollenberg (1977)
- Analyse en coordonnées principales : Gower (1966)
- Concepts de diversité alpha, bêta et gamma : Whittaker (1972)
- Groupement avec contrainte de contiguïté temporelle : Gordon & Birks (1972, 1974)

1980–1989

- Groupement avec contrainte de contiguïté spatiale : Lefkovitch (1978); P. Legendre & V. Legendre (1984)
- Propriétés métriques et euclidiennes des coefficients de dissimilarité : Gower & Legendre (1986)
- Analyse canonique des correspondances (ACC, CCA) : ter Braak (1986, 1987)
- Distribution grand public de la première version de Canoco, v.2.1, "*to analyze species-environment relationships*" : ter Braak (1988)



1990–1999

- Le partitionnement de la variation : Borcard et al. (1992)
- L'autocorrelation spatiale, un nouveau paradigme pour l'écologie. Levin (1992), Legendre (1993)
- L'analyse de coinertie : Doledec & Chessel (1994)
- L'analyse des espèces indicatrices : Dufrêne & Legendre (1997)
- L'analyse RLQ, Dolédec et al. (1996)
- L'analyse du 4ème coin : Legendre et al. (1997), Dray & Legendre (2008), Dray et al. (2014)
- L'analyse de redondance basée sur une matrice de dissimilarités (dbRDA) : Legendre & Anderson (1999)

2000–2009

- Transformations pour les données de communauté utilisées en ACP (tbPCA) et en ACR (tbRDA): Legendre & Gallagher (2001)
- Analyse par vecteurs propres spatiaux –
 - Cartes de vecteurs propres de Moran (MEM): Borcard & Legendre (2002), Dray et al. (2006)
 - Cartes de vecteurs propres asymétriques (AEM): Blanchet et al. (2008)
- Analyse de concordance pour identifier les associations d'espèces : Legendre (2005)
- L'estimation de la diversité bêta par la variance de la matrice des communautés, $Var(Y)$: Legendre et al. (2005)
- Développements en analyse des espèces indicatrices : De Cáceres et Legendre (2009), De Cáceres et al. (2010)

2010–present

- Comment tester l’interaction espace-temps dans les études de communautés : Legendre, De Cáceres & Borcard (2010)
- La construction et l’utilisation des vecteurs propres phylogénétiques pour modéliser les propriétés des espèces : Guénard et al. (2013).
- L’analyse de codépendance multi-échelle : Guénard et al. (2010). Généralisation pour les données-réponse multivariables : Guénard & Legendre (2017)
- Test de signification des axes canoniques en analyse de redondance : Legendre, Oksanen & ter Braak (2011)
- Partitionnement de la diversité bêta en indices LCBD et SCBD : Legendre & De Cáceres (2013), Legendre (2014)
- Analyse temporelle et spatio-temporelle de la diversité bêta : Legendre & Gauthier (2014)

- Analyse des trajectoires des communautés au cours du temps dans l'espace multivariable des espèces : De Cáceres et al. (2019)
- Etude de la diversité bêta temporelle : Legendre & Salvat (2015), Legendre (2019), Legendre & Condit (2019)

L'écologie numérique est le fruit de la collaboration entre de nombreux chercheurs pendant plusieurs années.

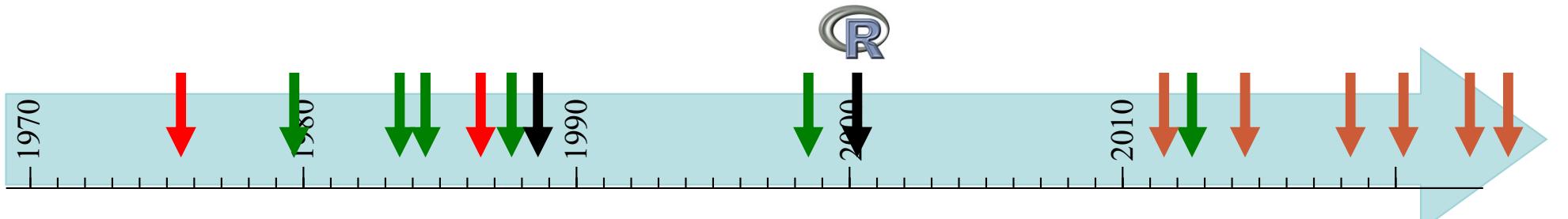


Un nuage des principaux collaborateurs ayant travaillé avec P. Legendre (<http://www.wordle.net/>)

8. Paquets R pour l'écologie des communautés

L'écologie numérique a fait de grands progrès pendant l'ère informatique grâce au dévouement de nombreux développeurs de progiciels statistiques, notamment en langage R, qui ont écrit des fonctions conçues pour analyser les données écologiques.

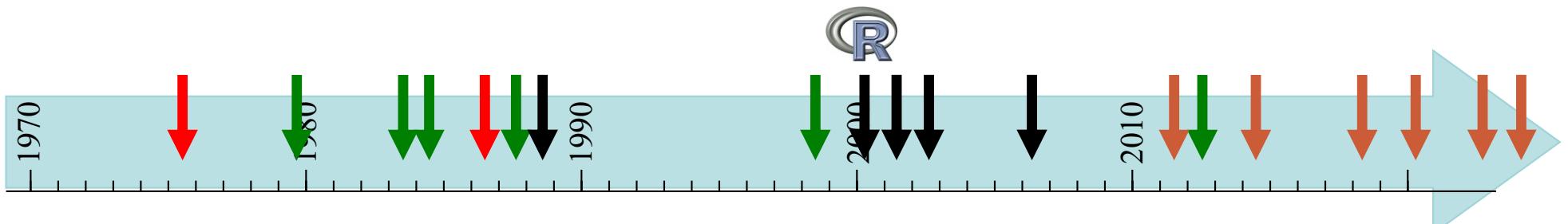
Le langage statistique R, créé en 1990 par Ross Ihaca et Robert Gentleman à l'Université d'Auckland, est un projet international de coopération scientifique. Il est devenu un projet international en 1995. Le langage R est distribué sur le site *Comprehensive R Archive Network* (CRAN). La première version stable (R 1.0) est apparue sur le site CRAN **le 29 février 2000** (année bissextile).

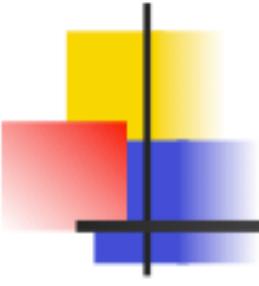


Parmi les plus de 20 000 paquets de fonctions R développés par des scientifiques qui sont disponibles sur CRAN, trois revêtent une importance particulière pour l'écologie des communautés :

- **vegan** (créateur et responsable : J. Oksanen, Université d'Oulu, Finlande). [Paquet R disponible sur le CRAN en 2001](#).
- **ade4** (D. Chessel et coauteurs, Université Lyon I ; responsable : S. Dray, University Lyon I. [Paquet R sur le CRAN en 2002](#).
- **FactoMineR** (responsable : F. Husson, Agrocampus-Ouest, Rennes). [Paquet R sur le CRAN en 2006](#).

Un autre paquet R important pour l'écologie des communautés est décrit dans les prochaines diapositives.



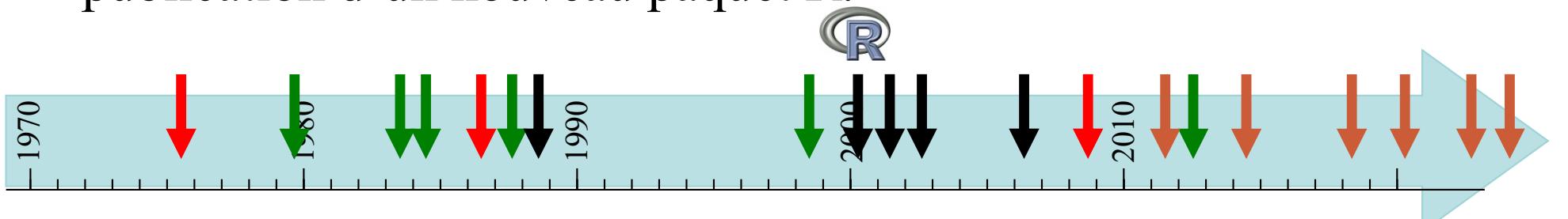


The SEDAR conference (2008)

Les 26-28 mai 2008, un atelier de travail s'est tenu à l'Université Claude Bernard de Lyon, organisé par Stéphane Dray –



pour coordonner les efforts des chercheurs développant l'analyse spatiale des données écologiques et planifier la publication d'un nouveau paquet R.



Plusieurs participants étaient des développeurs de paquets R –

M. De Cáceres



S. Dray



Histoire de l'Écologie numérique

A photograph of two men sitting at a table, looking down at something on it. The man in the foreground is wearing glasses and a light-colored checkered shirt. The man behind him is wearing a striped shirt and glasses. There are cups on the table.

Pedro Peres-Neto

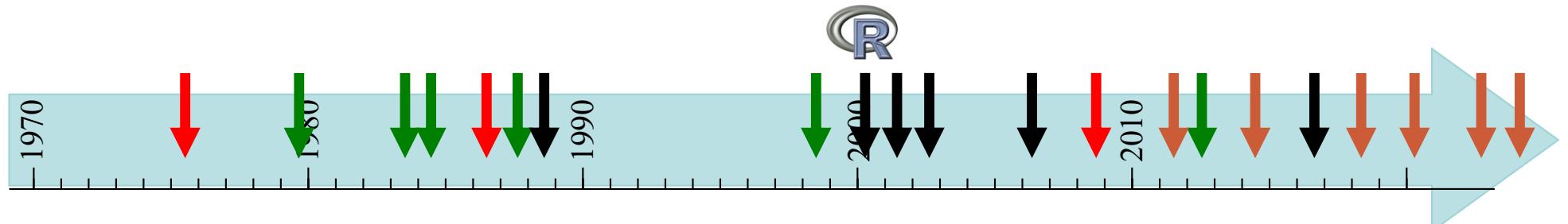
Jari Oksanen

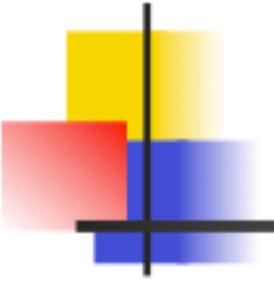
Cet atelier a produit un nouveau paquet R, [adespatial](#), pour l'analyse spatiale et chronologique des données de communautés.

Sous la direction de Stéphane Dray, le paquet adespatial est apparu sur le site CRAN [le 06 juin 2016](#).

Depuis cette date, de nouvelles fonctions sont régulièrement ajoutées à ce paquet R.

En avril 2024, ce paquet R est rendu à la version 0.3-23 sur le site CRAN.

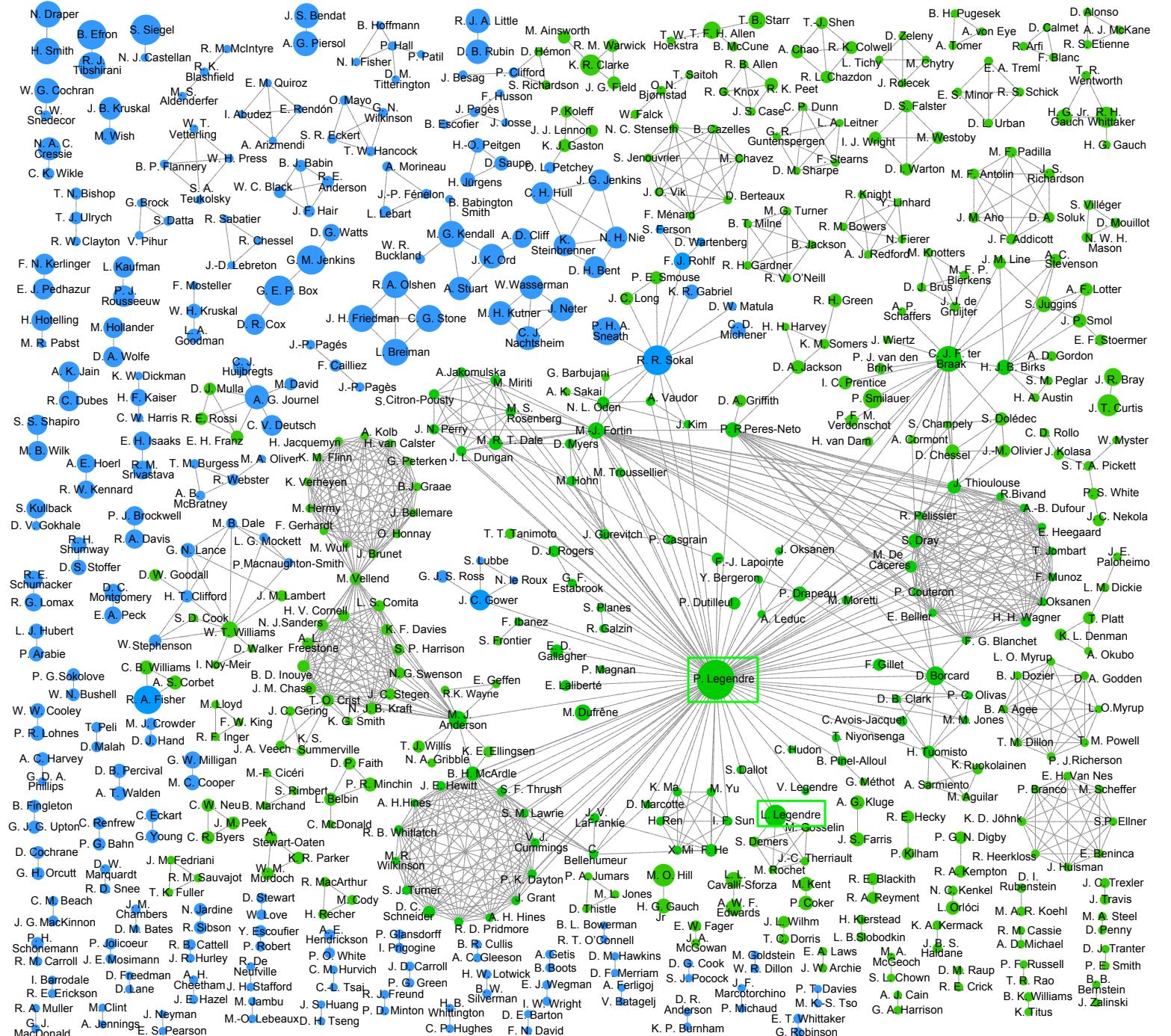




9. Réseau des chercheurs qui ont contribué à l'*Écologie numérique*

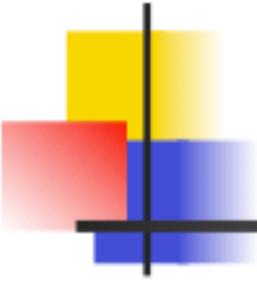
La figure de la diapositive suivante décrit le réseau de chercheurs qui ont produit les références citées dans l'édition 2012 du manuel *Numerical Ecology*. Les références du livre signées par un seul auteur ont été exclues de l'analyse.

Le réseau a été calculé et gracieusement fourni par le Prof. V. Makarenkov, Département d'informatique, Université du Québec à Montréal, Canada. Il a été publié dans l'article d'encyclopédie de Legendre (2019), cité dans la liste des références.



Réseau des contributeurs à l'écologie numérique

Bien que la liste des références à la fin d'un manuel soit certainement biaisée en faveur de ses auteurs, ce réseau atteste du fait que le développement des méthodes d'analyse de données disponibles aux écologistes est le résultat d'une collaboration large et fructueuse entre de nombreux scientifiques.



10. L'interaction enseignement-recherche

La recherche est efficace dans les universités entre autres parce que les chercheurs peuvent tester leurs développements de la pensée scientifique en classe avec des étudiants diplômés.

Enseignement ➔



⬅ Recherche

La recherche et l'enseignement universitaire forment deux aspects complémentaires d'une même activité intellectuelle qui vise au développement des connaissances ainsi que leur transmission à des personnes qui pourront, à leur tour, faire avancer la pensée dans le domaine d'étude. Cette interaction forme le binôme enseignement-recherche.

Dans les années 1970, j'occupais un poste de chercheur dans un centre de recherche en sciences de l'environnement à l'UQAM. Je suis devenu professeur au Département de physique de l'UQAM en 1980.

- En 1976, j'ai enseigné l'écologie numérique pour la première fois à l'UQAM : 12 heures + travaux pratiques dans le cours ENV8020 *Modèles d'analyse de données écologiques* du programme de M.Sc. en sciences de l'environnement.
- En 1978, j'ai donné un cours complet d'un semestre à l'UQAM, PHY8499 *Analyse quantitative des données écologiques*. J'ai donné et perfectionné ce cours de 1978 à 1980.
- De plus, je donnais de 3 à 6 heures de cours par an (1975, 1977, 1979) du cours BIO61691 offert par Louis Legendre à l'Université Laval.
- J'ai déménagé au Département de sciences biologiques de l'Université de Montréal en septembre 1980. J'y ai apporté l'enseignement de l'écologie numérique. Le cours à l'UdeM s'appelait Bio6075z *Analyse quantitative des données biologiques*, de 1982 à 1993, puis Bio6077 de 1995 à l'automne 2023 (même titre).

L'enseignement de l'écologie numérique dans les universités

L'enseignement de ce cours m'a incité à développer des explications claires des concepts écologiques et statistiques formant l'ossature de l'écologie numérique.

Dans ce cours, les étudiants diplômés devaient produire un rapport de recherche et d'analyse de données à la fin du cours (travail de session). Les discussions avec eux ont fait naître des idées de nouvelles méthodes et des améliorations aux méthodes existantes pour répondre aux questions écologiques des étudiants.

Certains étudiants ont développé de nouvelles méthodes dans le cadre de leur travail de session du cours et ont publié leur méthode.

La plupart des autres étudiants ont incorporé les résultats de leur travail de session dans leur mémoire ou leur thèse et ils les ont publiés dans des articles scientifiques.

Dernière heure – Un cours en ligne

J'ai développé un cours en ligne intitulé

L'écologie numérique en 8 leçons

Le cours consiste en une série de huit leçons, présentées dans 18 enregistrements vidéo, sur les sujets généraux et spécialisés suivants en écologie numérique.

Leçon 1: Ordination en espace réduit

Leçon 2: Dissimilitarités et transformations

Leçon 3: Tests de signification statistique

Leçon 4: Régression linéaire

Leçon 5: Analyse canonique

Leçon 6: Diversité bêta

Leçon 7: Modélisation spatiale

Leçon 8: Le test de Mantel en analyse spatiale

Ces enregistrements vidéo totalisent 17.4 heures d'écoute.

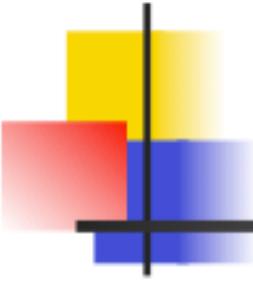
Le cours en français sera mis en ligne au cours des prochains jours. Il sera diffusé par le site PRAXIS de la Faculté des arts et des sciences de l'Université de Montréal. Les vidéos du cours seront à la disposition de mes collègues qui voudraient relancer le cours Bio6077 ou utiliser certaines parties du cours dans leur propre enseignement.

Une version du cours en anglais, intitulée *Numerical Ecology in 8 lessons*, est en ligne depuis juin 2021 sur le site PRAXIS :

The screenshot shows the PRAXIS course landing page. At the top, there is a navigation bar with the Université de Montréal logo, input fields for 'Nom d'utilisateur' and 'Mot de passe', a 'Me connecter' button with a lock icon, a 'Mot de passe oublié ?' link, a 'Retour' button with a back arrow, and a 'Français (Canac)' language switch. The main title 'Écologie numérique en 8 leçons/Numerical Ecology in 8 lessons' is displayed prominently in white text against a dark blue background featuring abstract network diagrams. Below the title, there are icons for 'À distance' (distance learning), 'English' (language), and '35h00 Heures' (duration). The bottom section contains the PRAXIS logo and text, along with program details in French and English.



**PROGRAMME DE FORMATION
CONTINUE EN LIGNE/ONLINE
CONTINUING EDUCATION PROGR
ASYNCHRONE/ASYNCHRONOUS
DURÉE ESTIMÉE : 30-35 heures/ESTIMATED
DURATION: 30-35 hours**



11. Des cours intensifs autour de la planète

De 1980 à 2023, j'ai présenté 87 cours intensifs d'*Écologie numérique* à 56 universités et instituts de recherche, dans 19 pays de par le monde.

Ces cours intensifs m'ont fourni l'occasion de discuter de leurs recherches avec des collègues et des étudiants diplômés de différents pays, de construire des collaborations internationales, de découvrir de nouvelles données et questions écologiques et enfin d'élaborer de nouvelles méthodes statistiques pour répondre à ces questions.

Ces activités ont contribué de façon significative au développement du domaine de l'écologie numérique, tout en me permettant d'améliorer mon enseignement à l'Université de Montréal.

*Australie et
Nouvelle-Calédonie
(6 cours)*

- 1 cours
- 2 cours
- 3 > 2 cours



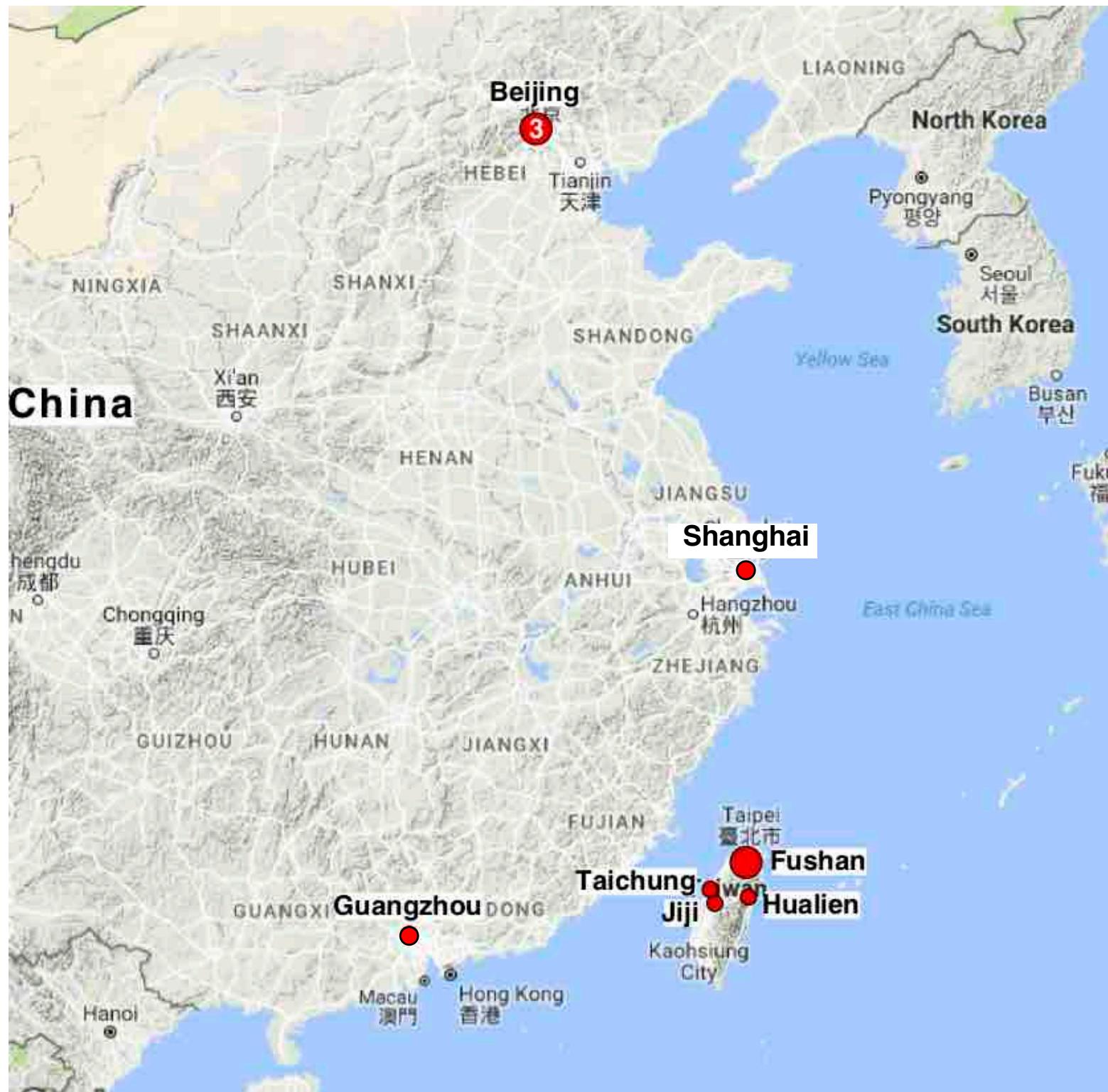
Europe (28 cours)

- 1 cours
- 2 cours
- 3 > 2 cours



Asie (10 cours)

- 1 cours
- 2 cours
- 3 > 2 cours



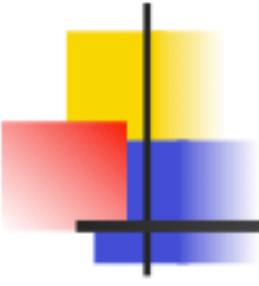
Canada et USA (27 cours)

- 1 cours
- 2 cours
- 3 > 2 cours



Les Amériques (Nord-Centrale-Sud) et les Caraïbes (14 cours)





12. Références

- Blanchet, F. G., P. Legendre & D. Borcard. 2008. Modelling directional spatial processes in ecological data. *Ecological Modelling* 215: 325-336.
- Borcard, D., F. Gillet & P. Legendre. 2011, 2018. *Numerical ecology with R*. Use R! series, Springer Science, New York.
- Borcard, D., F. Gillet & P. Legendre. 2014, 2020. *Numerical ecology with R, Chinese editions* (translation: J. Lai). Higher Education Press, Beijing.
- Borcard, D. & P. Legendre. 2002. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices. *Ecological Modelling* 153: 51-68.
- Borcard, D., P. Legendre & P. Drapeau. 1992. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology* 73: 1045-1055.
- De Cáceres, M. & P. Legendre. 2009. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. *Ecology* 90: 3566-3574.
- De Cáceres, M., P. Legendre & M. Moretti. 2010. Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos* 119: 1674-1684.
- De Cáceres, M., L. Coll, P. Legendre, R. Allen, S. Wiser, M.-J. Fortin, R. Condit & S. Hubbell. 2019. Trajectory analysis in community ecology. *Ecological Monographs* 89: e01350.

- Dolédec, S. & D. Chessel. 1994. Co-inertia analysis: an alternative method for studying species-environment relationships. *Freshwater Biology* 31: 277-294.
- Dolédec, S., D. Chessel, C. J. F. ter Braak & S. Champely. 1996. Matching species traits to environmental variables: a new three-table ordination method. *Environmental and Ecological Statistics* 3: 143-166.
- Dray, S., G. Blanchet, D. Borcard, S. Clappe, G. Guénard, T. Jombart, G. Larocque, P. Legendre, N. Madi & H. H. Wagner. 2018. *adespatial: Multivariate multiscale spatial analysis*. R package version 0.1-1. <https://cran.r-project.org/package=adespatial>. [2018-01-16]
- Dray, S., P. Choler, S. Dolédec, P. R. Peres-Neto, W. Thuiller, S. Pavoine & C. J. F. ter Braak. 2014. Combining the fourth-corner and the RLQ methods for assessing trait responses to environmental variation. *Ecology* 95: 14-21.
- Dray, S., A.-B. Dufour and J. Thioulouse, with contributions from T. Jombart, S. Pavoine, J. R. Lobry, S. Ollier, D. Borcard, P. Legendre & A. Siberchicot. 2017. *ade4: Analysis of ecological data: Exploratory and Euclidean methods in environmental sciences*. R package version 1.7-10. <https://cran.r-project.org/package=ade4>. [2017-12-15]
- Dray, S. & P. Legendre. 2008. Testing the species traits-environment relationships: the fourth-corner problem revisited. *Ecology* 89: 3400-3412.
- Dray, S., P. Legendre & P. R. Peres-Neto. 2006. Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM). *Ecological Modelling* 196: 483-493.

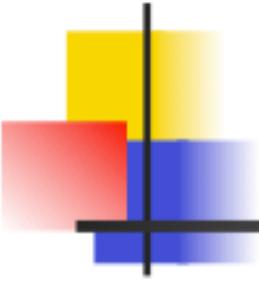
- Dufrêne, M. & P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67: 345-366.
- Gordon, A. D. & H. J. B. Birks. 1972. Numerical methods in Quaternary palaeoecology. I. Zonation of pollen diagrams. *New Phytologist* 71: 961-979.
- Gordon, A. D. & H. J. B. Birks. 1974. Numerical methods in Quaternary palaeoecology. II. Comparison of pollen diagrams. *New Phytologist* 73: 221-249.
- Gower, J. C. 1966. Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika* 53: 325-338.
- Gower, J. C. & P. Legendre. 1986. Metric and Euclidean properties of dissimilarity coefficients. *Journal of Classification* 3: 5-48.
- Green, R. H. 1979. *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. John Wiley & Sons, New York.
- Guénard, G. & P. Legendre. 2018. Bringing multivariate support to multiscale codependence analysis: assessing the drivers of community structure across spatial scales. *Methods in Ecology and Evolution* 9: 292–304.
- Guénard, G., P. Legendre, D. Boisclair & M. Bilodeau. 2010. Multiscale codependence analysis: an integrated approach to analyze relationships across scales. *Ecology* 91: 2952-2964.
- Husson, F., J. Josse, S. Le & J. Mazet. 2012. *FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining with R*. R package version 1.39. <http://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/>. [2017-11-10]

- Lefkovitch, L. P. 1978. Cluster generation and grouping using mathematical programming. *Mathematical Biosciences* 41: 91-110.
- Legendre, L. & P. Legendre. 1979, 1984. *Écologie numérique*. Masson, Paris et les Presses de l'Université du Québec.
- Legendre, P. 1993. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology* 74: 1659-1673.
- Legendre, P. 2005. Species associations: the Kendall coefficient of concordance revisited. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 10: 226-245.
- Legendre, P. 2014. Interpreting the replacement and richness difference components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography* 23: 1324-1334.
- Legendre, P. 2019. Numerical ecology. In: *Encyclopedia of Ecology, 2nd edition* (B. Fath, Editor-in-Chief). Volume: *Earth systems and environmental sciences*. Elsevier Ltd, Oxford, England.
- Legendre, P. 2019. A temporal beta-diversity index to identify sites that have changed in exceptional ways in space-time surveys. *Ecology and Evolution* 9: 3500–3514.
- Legendre, P. & M. J. Anderson. 1999. Distance-based redundancy analysis: testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments. *Ecological Monographs* 69: 1-24.
- Legendre, P., D. Borcard & P. R. Peres-Neto. 2005. Analyzing beta diversity: partitioning the spatial variation of community composition data. *Ecological Monographs* 75: 435-450.
- Legendre, P. & M. De Cáceres. 2013. Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology Letters* 16: 951-963.

- Legendre, P., M. De Cáceres & D. Borcard. 2010. Community surveys through space and time: testing the space-time interaction in the absence of replication. *Ecology* 91: 262-272.
- Legendre, P. & M.-J. Fortin. 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 80: 107-138.
- Legendre, P. & M.-J. Fortin. 2010. Comparison of the Mantel test and alternative approaches for detecting complex multivariate relationships in the spatial analysis of genetic data. *Molecular Ecology Resources* 10: 831-844.
- Legendre, P., M.-J. Fortin & D. Borcard. 2015. Should the Mantel test be used in spatial analysis? *Methods in Ecology and Evolution* 6: 1239-1247.
- Legendre. P. & E. D. Gallagher. 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* 129: 271-280.
- Legendre, P., R. Galzin & M. L. Harmelin-Vivien. 1997. Relating behavior to habitat: solutions to the fourth-corner problem. *Ecology* 78: 547-562.
- Legendre, P. & O. Gauthier. 2014. Statistical methods for temporal and space-time analysis of community composition data. *Proceedings of the Royal Society B* 281: 20132728.
- Legendre, P. & L. Legendre. 1983, 1998, 2012. *Numerical ecology*. Elsevier Science BV, Amsterdam.
- Legendre, P. & L. Legendre [eds.] 1987. *Developments in numerical ecology*. NATO ASI series, Vol. G-14. Springer-Verlag, Berlin. Legendre, Oksanen & ter Braak (2011)

- Legendre, P. & V. Legendre. 1984. Postglacial dispersal of freshwater fishes in the Québec peninsula. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 41: 1781-1802.
- Legendre, P., J. Oksanen & C. J. F. ter Braak. 2011. Testing the significance of canonical axes in redundancy analysis. *Methods in Ecology and Evolution* 2: 269-277.
- Legendre, P. & B. Salvat. 2015. Thirty-year recovery of mollusc communities after nuclear experimentations on Fangataufa atoll (Tuamotu, French Polynesia). *Proceedings of the Royal Society B* 282: 20150750.
- Legendre, P. 2019. Numerical ecology. In: *Encyclopedia of Ecology*, 2nd edition (B. Fath, Editor-in-Chief). Volume: Earth systems and environmental sciences, pp. 487–493. Elsevier Inc., Oxford, England. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10595-0>
- Levin, S. A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* 73: 1943-1967.
- Oksanen, J., G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlinn, P. R. Minchin, R. B. O'Hara, G. L. Simpson, P. Solymos, M. H. H. Stevens, E. Szoecs & H. Wagner. 2018. *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.4-6. <https://cran.r-project.org/package=vegan>. [2018-01-24]
- Orlóci, L. 1975. *Multivariate analysis in vegetation research*. Dr. W. Junk B. V., The Hague.
- Pielou, E. C. 1969. *An introduction to mathematical ecology*. John Wiley & Sons, New York.
- R Core Team. 2017. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Rao, C. R. 1964. The use and interpretation of principal component analysis in applied research. *Sankhyaá, Series A* 26: 329-358.
- ter Braak, C. J. F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67: 1167-1179.
- ter Braak, C. J. F. 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio* 69: 69-77.
- ter Braak, C. J. F. 1988. *CANOCO – a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [detrended] [canonical] correspondence analysis, principal component analysis and redundancy analysis (version 2.1)*. Agricultural Mathematics Group, Ministry of Agriculture and Fisheries, Wageningen.
- Whittaker, R. H. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* 21: 213-251.
- Wollenberg, A. L. van den. 1977. Redundancy analysis. An alternative for canonical correlation analysis. *Psychometrika* 42: 207-219.



Fin de la présentation