

# Analyse de sensibilité des modèles de connectivité écologique

## Influence des scénarios de coût sur les chemins de moindre coût et les distances-coût

Paul Savary - Théma - Biogéosciences - ARP-Astrance

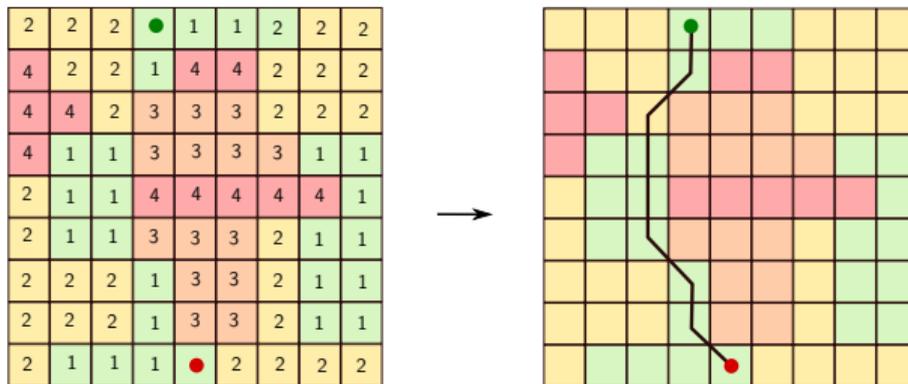
13/10/2021

# Modélisation de la connectivité écologique

## Méthode basée sur les chemins de moindre coût

Chemins censés minimiser le coût total de déplacement des espèces entre leurs taches d'habitat.

Adriaensen *et al.* (2003)

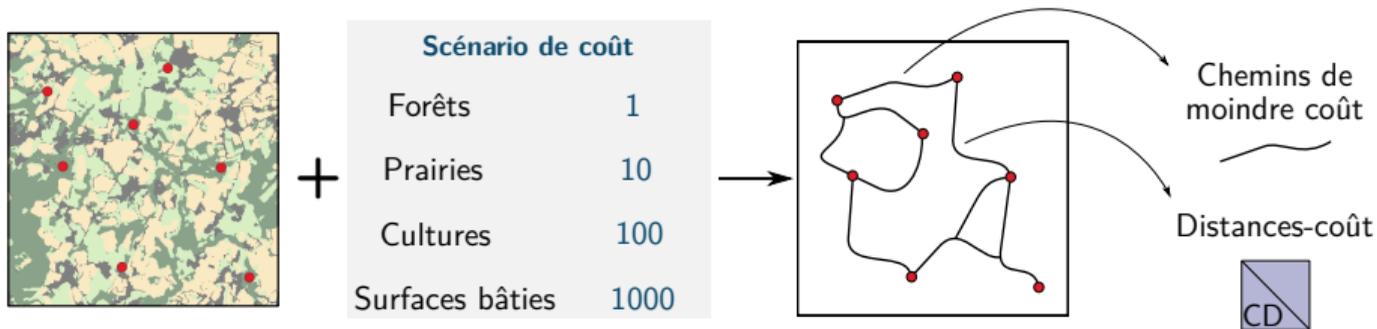


Applications : Beier *et al.* (2008); Balbi *et al.* (2019); Carroll *et al.* (2012); Mony *et al.* (2018); Sawyer *et al.* (2011)

## Méthode basée sur les chemins de moindre coût

### Un paysage, un scénario de coût et deux types de résultats :

- Chemins de moindre coût (LCPs)
- Distances-coût (CDs)





## Influence du paysage sur la sensibilité de la modélisation

### La structure du paysage détermine-t-elle la sensibilité des résultats aux différents scénarios ?

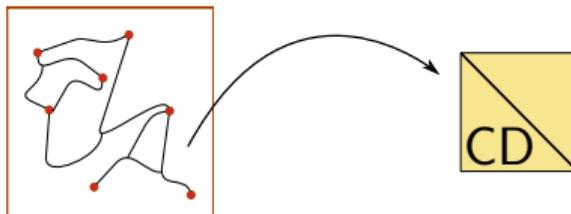
*Est-ce que modéliser la connectivité avec  $n$  scénarios dans le paysage B plutôt que dans le paysage A donnera des résultats aussi contrastés ? Pourquoi ?*

- Quelles variables paysagères (composition, configuration) influencent la sensibilité de la modélisation aux variations de scénarios ?

## Sensibilités relatives des LCPs et des CDs

**Localisation spatiale des LCPs et distribution statistique des CDs sont deux choses différentes.**

*Est-il possible que deux matrices de CD fortement corrélées soient associées à des LCPs spatialement distincts ?*



Chemins de moindre coût  
(LCPs)

Distances-coût  
(CDs)

## Analyses de sensibilité de la modélisation

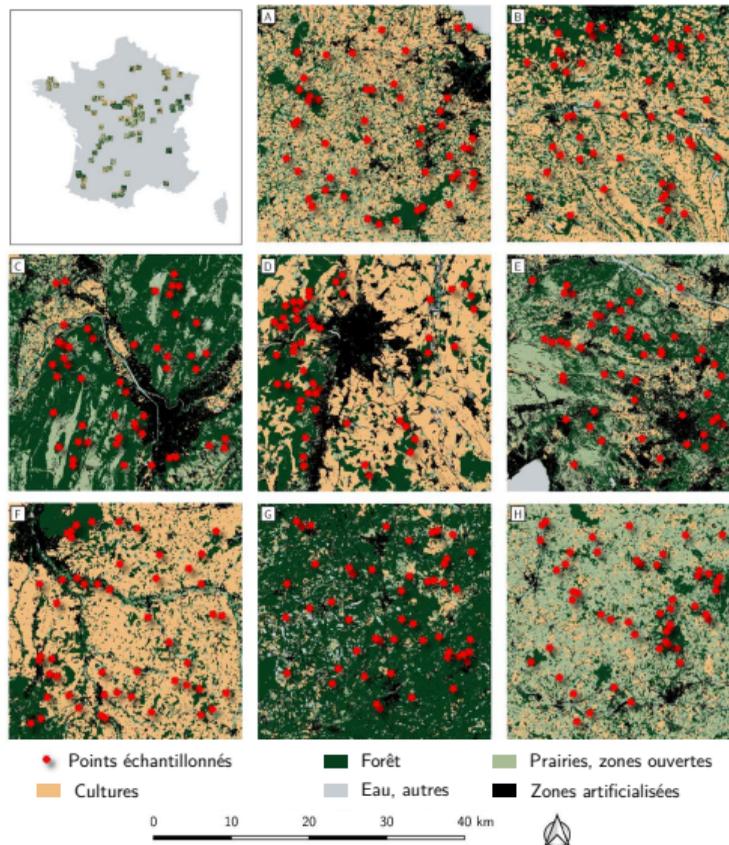
**Les analyses de sensibilité existantes** (Beier *et al.*, 2009; Gonzales et Gergel, 2007; Pullinger et Johnson, 2010; Rayfield *et al.*, 2010) **sont à compléter en considérant :**

- **Large gamme** de scénarios de coût
- Gradients de coût **discrets** (une valeur par type d'OS)
- Paysages **réels** contrastés
- Étude simultanée des **chemins de moindre coût (LCP)** et des **distances-coût (CD)**, et de leur relation

## Objectifs de notre étude

- Comparer la **sensibilité** des (i) **chemins de moindre coût** (LCPs) et (ii) des **distances-coût** (CDs) aux **variations de scénarios de coût**.
- Comprendre comment la **structure du paysage** et le **gradient des valeurs de coût** influencent ces deux résultats.

# Échantillonnage de paysages réels : données OSO (CESBIO), France



## Scénarios de coût

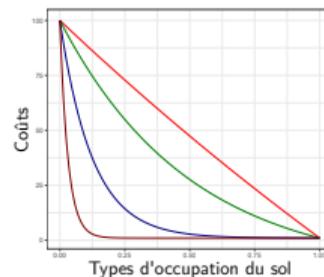
4 types d'occupation du sol



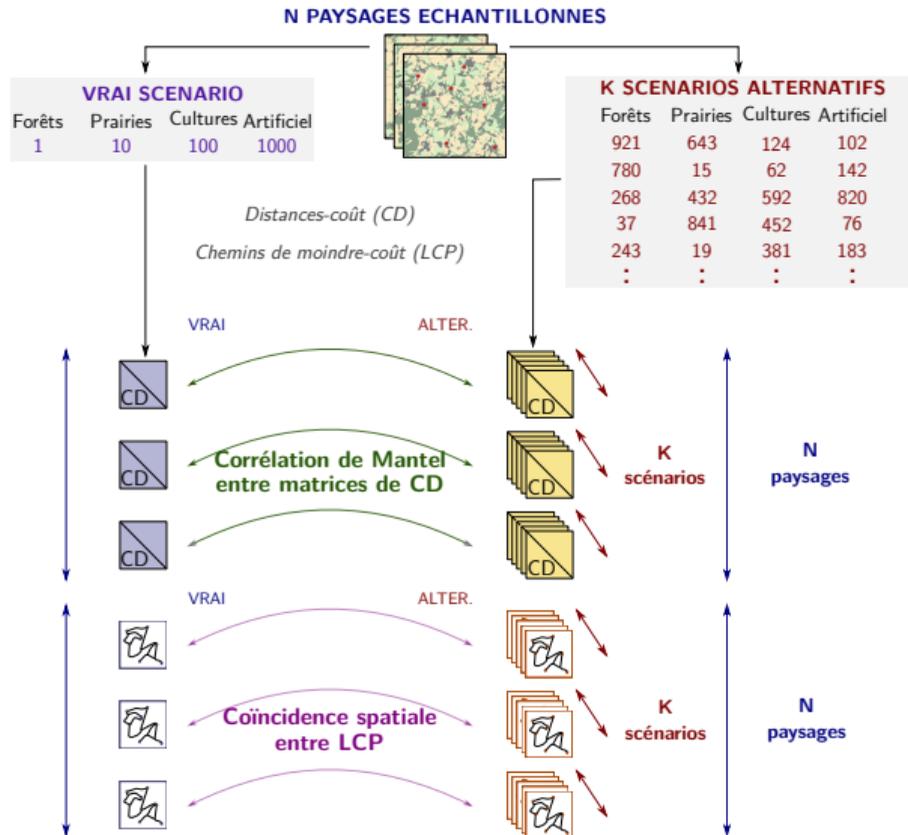
	Forêts	Prairies	Cultures	Artif.
<b>Scénario de référence (VRAI)</b>	 1	 10	 100	 1000
<b>100 scénarios alternatifs (ALTER.)</b>	 100	 11	 1000	 1
	250	750	500	1000
	63	317	1000	4
	100	1000	218	522

**100 scénarios alternatifs (ALTER.)**

*créés par  
combinaisons aléatoires*

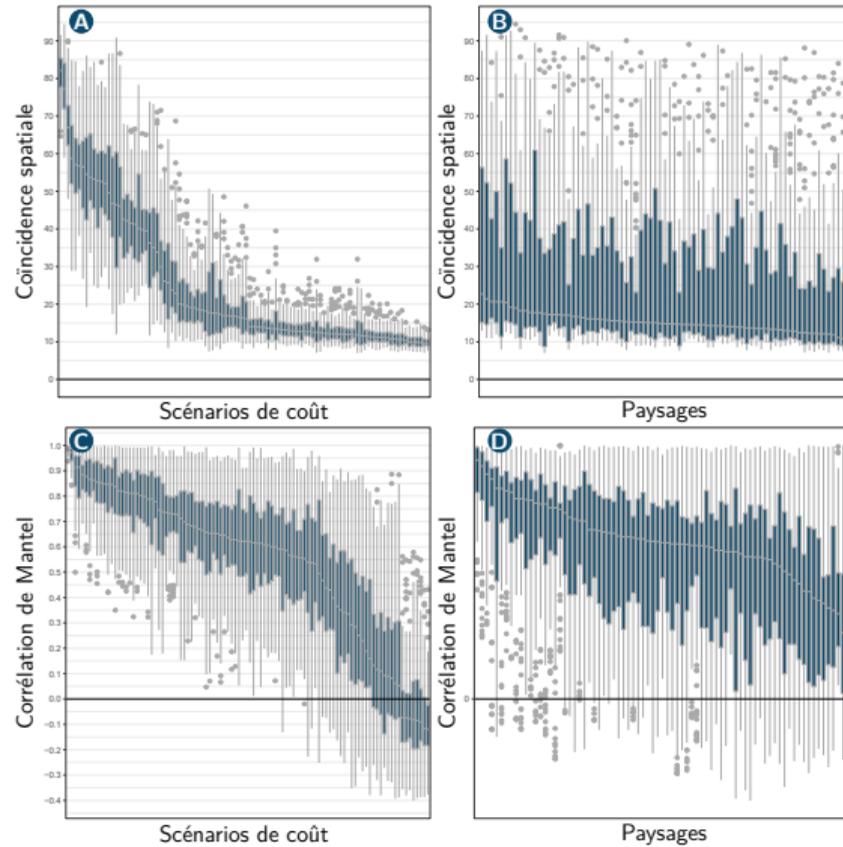


*4 gradients de valeurs  
de coûts entre  
1 et 1000*

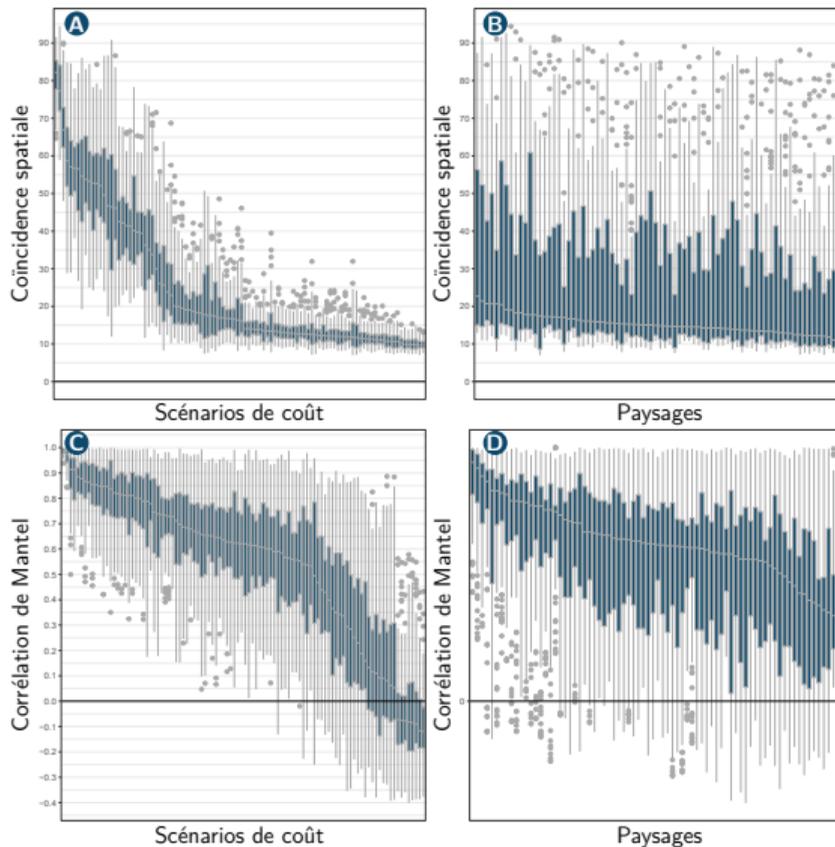


## Facteurs potentiels de la sensibilité aux variations de scénarios de coût

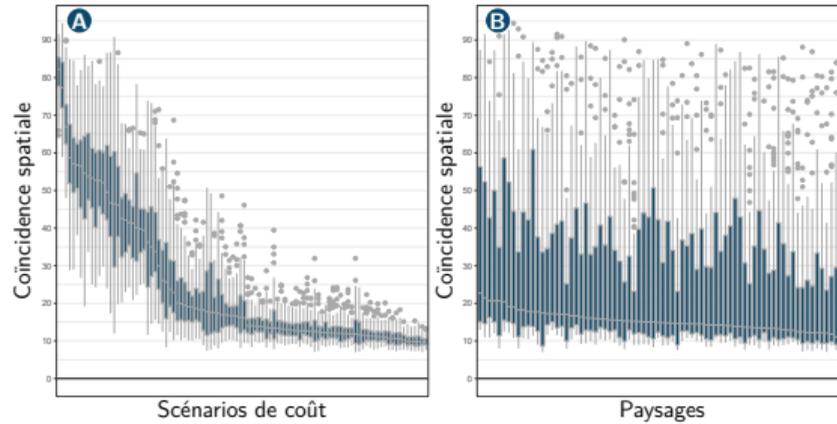
- **Caractéristiques des scénarios de coût en eux-mêmes :**
  - Gradient des valeurs
  - Ordre des types d'occupation du sol
- **Composition et configuration des paysages auxquels on les applique :**
  - Proportion de chaque type d'occupation du sol
  - Taille et nombre de taches, contiguïté
  - Coût total



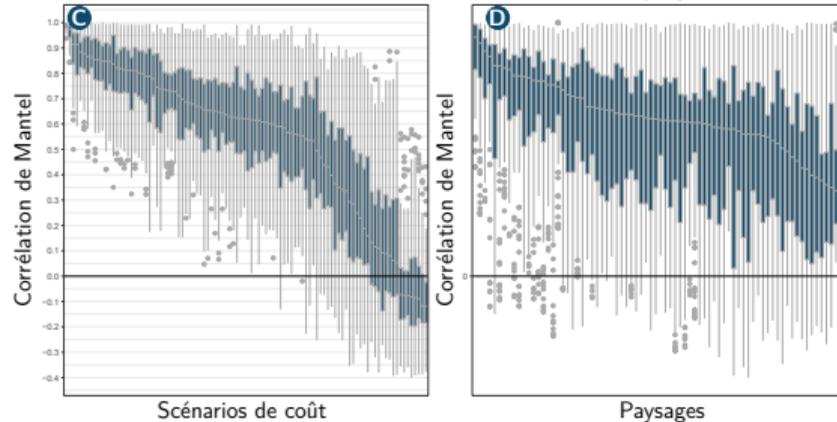
Peu de scénarios reproduisent les vrais LCPs



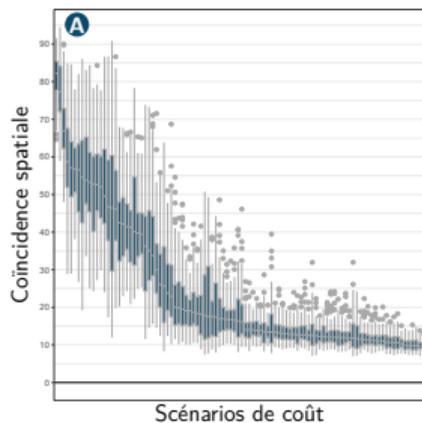
Peu de scénarios reproduisent les vrais LCPs



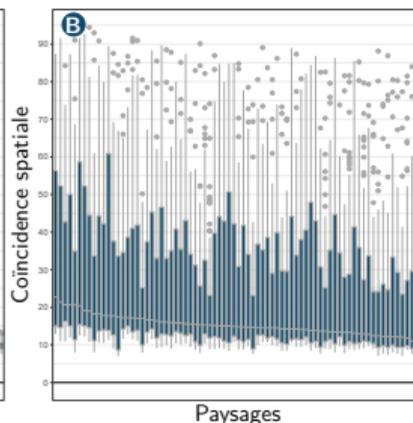
Beaucoup de scénarios produisent des matrices de CDs fortement corrélées à la vraie



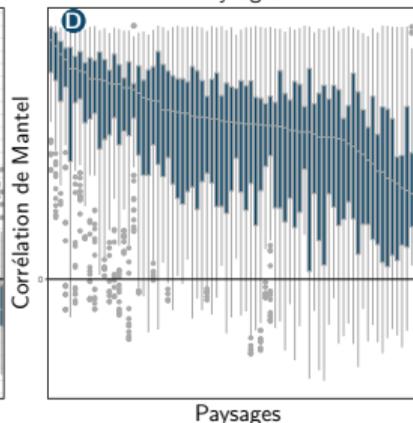
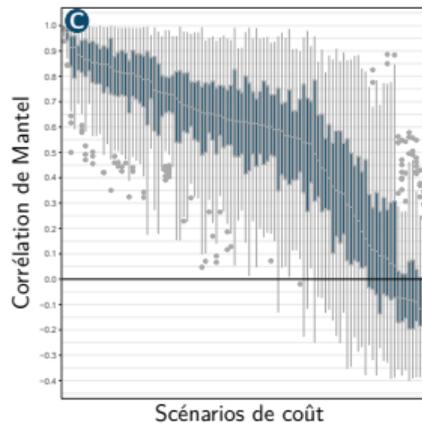
Peu de scénarios reproduisent les vrais LCPs



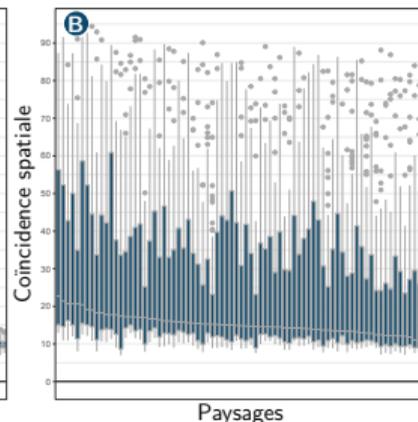
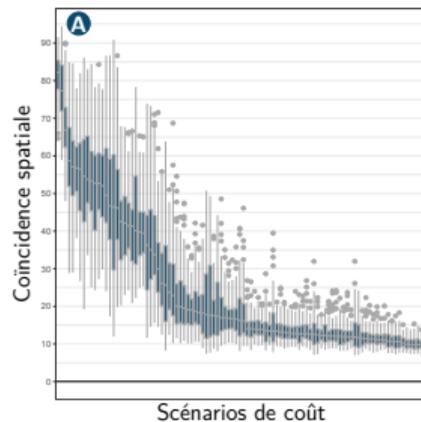
LCPs mieux reproduits dans certains paysages



Beaucoup de scénarios produisent des matrices de CDs fortement corrélées à la vraie

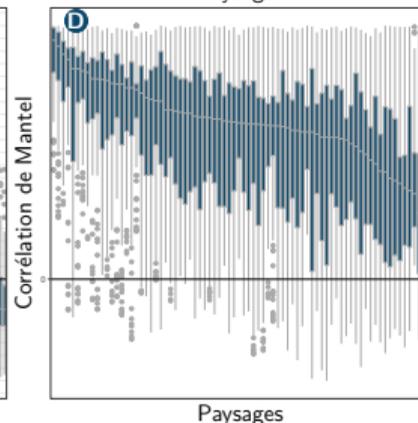
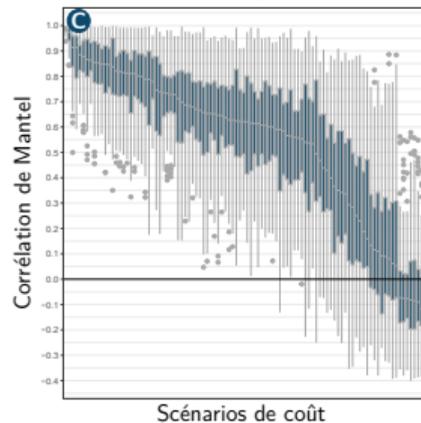


Peu de scénarios reproduisent les vrais LCPs

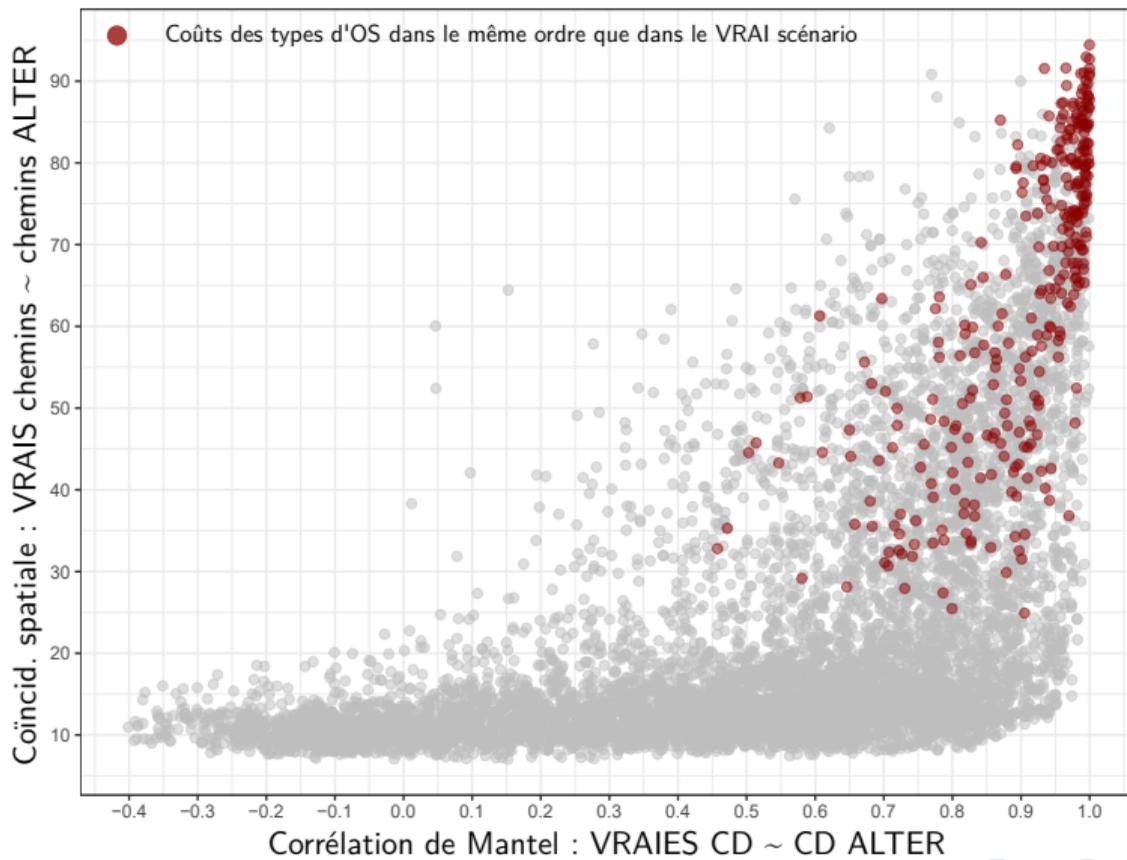


LCPs mieux reproduits dans certains paysages

Beaucoup de scénarios produisent des matrices de CDs fortement corrélées à la vraie



Matrices de CDs toujours corrélées fortement dans certains paysages



## Influence des propriétés des scénarios

### Différences entre scénarios de coût qui causent les plus fortes différences dans les résultats de modélisation :

- **Pour les chemins (LCPs) :** l'ordre des valeurs de coût est primordial, en particulier pour les types d'OS les moins résistants
- **Pour les distances-coût (CDs) :** l'amplitude et le contraste des valeurs de coût déterminent fortement la distribution statistique des CDs.

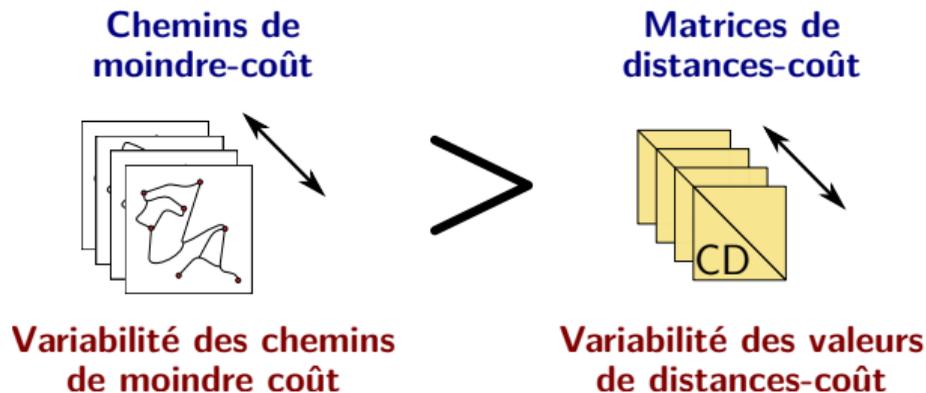
## Influence du paysage

### Caractéristiques des paysages dans lesquels la sensibilité de la modélisation est la plus forte :

- Coût total élevé
- Forte diversité d'occupation du sol (indice de Shannon élevé)
- Taches petites et subdivisées

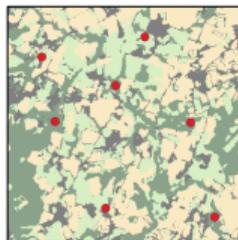
## Implications

- Les **chemins** de moindre coût sont **plus sensibles** aux scénarios de coût que les **matrices de distances-coût**.



## Implications

- Des **matrices de distances-coût très corrélées** entre elles peuvent correspondre à des scénarios de coût très différents

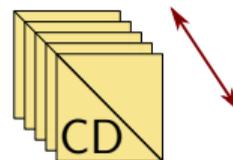


Grandes taches  
Paysage favorable

+

Forêts	Prairies	Cultures	Artificiel
921	643	124	102
780	15	62	142
268	432	592	820
37	841	452	76
243	19	381	183
⋮	⋮	⋮	⋮

Même avec des scénarios  
très différents

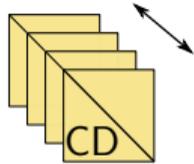


Matrices de distances-coût  
très corrélées

# Implications

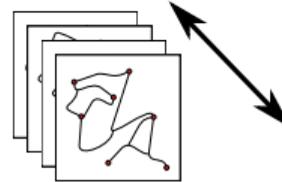
- Des **matrices de distances-coût très corrélées** entre elles peuvent correspondre à des **chemins de moindre coût très différents**.

**Matrices de distances-coût  
fortement corrélées**



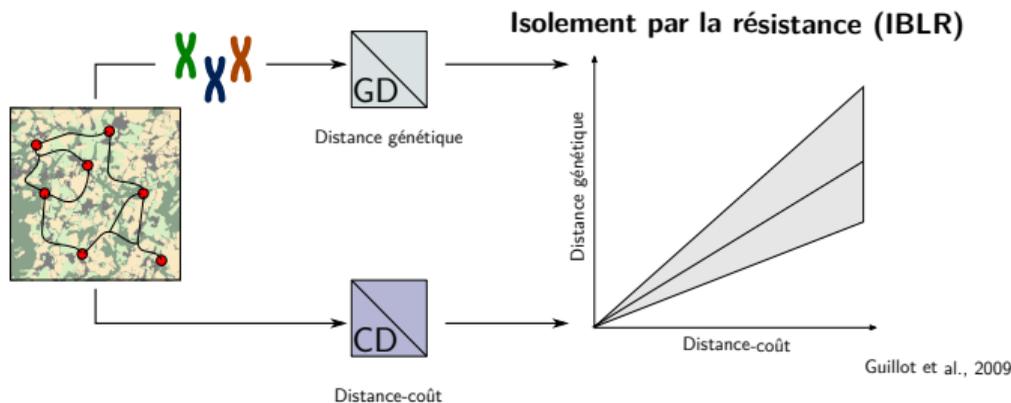
et

**Chemins de moindre-coût  
très différents**



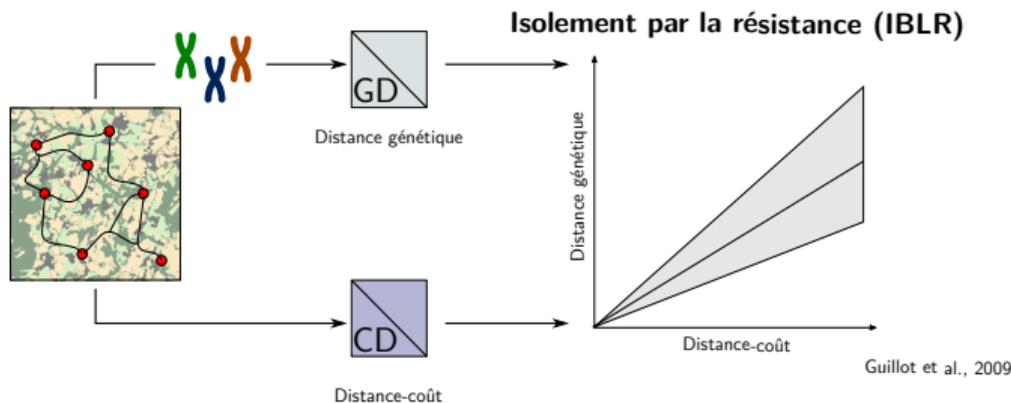
# Implications

**Pour renforcer le réalisme des scénarios de coût** : confrontation des CD à des distances génétiques et identification du scénario 'optimal'.



## Implications

**Pour renforcer le réalisme des scénarios de coût** : confrontation des CDs à des distances génétiques et identification du scénario 'optimal'.



La variabilité des matrices de distances-coût est **nécessaire pour l'inférence** des coûts : elle garantit la variabilité des hypothèses alternatives (Zeller *et al.*, 2016).

## Solutions potentielles

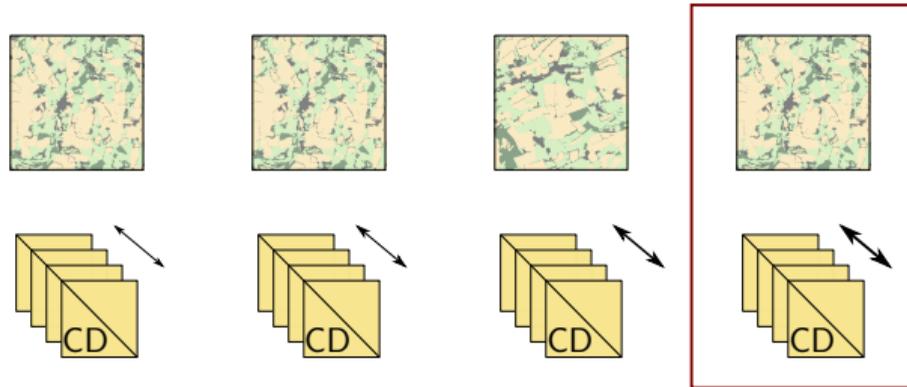
**Pour inférer des coûts à partir de données biologiques, tenir compte de la sensibilité de la modélisation des LCPs et CDs paraît indispensable :**

- En **aval** : précautions d'interprétation, intégration de plusieurs scénarios alternatifs très contrastés

## Solutions potentielles

**Pour inférer des coûts à partir de données biologiques, tenir compte de la sensibilité de la modélisation des LCPs et CD paraît indispensable :**

- En **amont** : choisir sa zone d'étude de manière à maximiser la variabilité des matrices de distances-coût



Variabilité  
maximale

## Solutions potentielles

**Pour inférer des coûts à partir de données biologiques, tenir compte de la sensibilité de la modélisation des LCPs et CDs paraît indispensable :**

- Pour reproduire ces analyses, inclusion de la fonction `link_compar()` dédiée à l'analyse de la variabilité des LCPs et CDs dans le package `graph4lg`.

Savary *et al.* (2021)

**Merci pour votre attention**

**Et un très grand merci à :**

**Jean-Christophe Foltête, Stéphane Garnier, Hervé Moal, Gilles Vuidel, et bien d'autres**



<p>1 <b>Corrél. de Mantel</b> <b>Coïncidence spatiale</b> <i>N x K obs.</i></p>	<p>~ <b>Scénarios de coût</b> + <b>Paysages</b> <i>K modalités</i>      <i>N modalités</i></p>	<p><i>ANOVA à deux facteurs</i></p>
<p>2 <b>Corrél. de Mantel</b> <b>Coïncidence spatiale</b> <i>N obs.</i></p>	<p>Moyenne, CV des <b>K scénarios</b> ~ <b>Variables paysagères</b> pour chaque <b>paysage</b> <i>N obs.</i></p>	<p><i>Régression PLS-R2</i></p>
<p>3 <b>Corrél. de Mantel</b> <b>Coïncidence spatiale</b> <i>K obs.</i></p>	<p>Moyenne des <b>N paysages</b> ~ <b>Caractéristiques des scénarios de coût</b> pour chaque <b>scénario</b> <i>K obs.</i></p>	<p><i>Arbre de régression</i></p>
<p>4 <b>Coïncidence spatiale</b> <i>N x K obs.</i></p>	<p>~ <b>Corrél. de Mantel</b> <i>N x K obs.</i></p>	<p><i>Nuage de points</i></p>

Quelles **variables paysagères** influencent la sensibilité aux scénarios de coût ?

**Corrél. de Mantel**

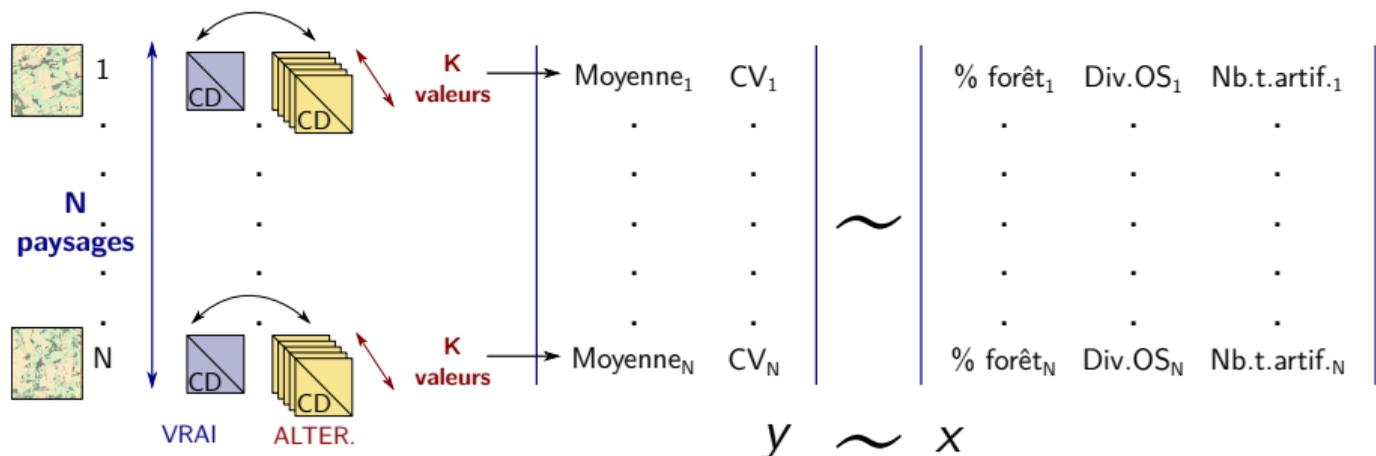
**Coïncidence spatiale**

*N obs.*

Moyenne, CV  
des **K scénarios**  
pour chaque **paysage**

**Variables paysagères**

*N obs.*



La **Corrél. de Mantel** / **Coïncidence spatiale** entre les scénarios VRAI et ALTER est-elle systématiquement forte dans les paysages ayant une certaine structure ?

Quelles **caractéristiques des scénarios** influencent la sensibilité à ces scénarios ?

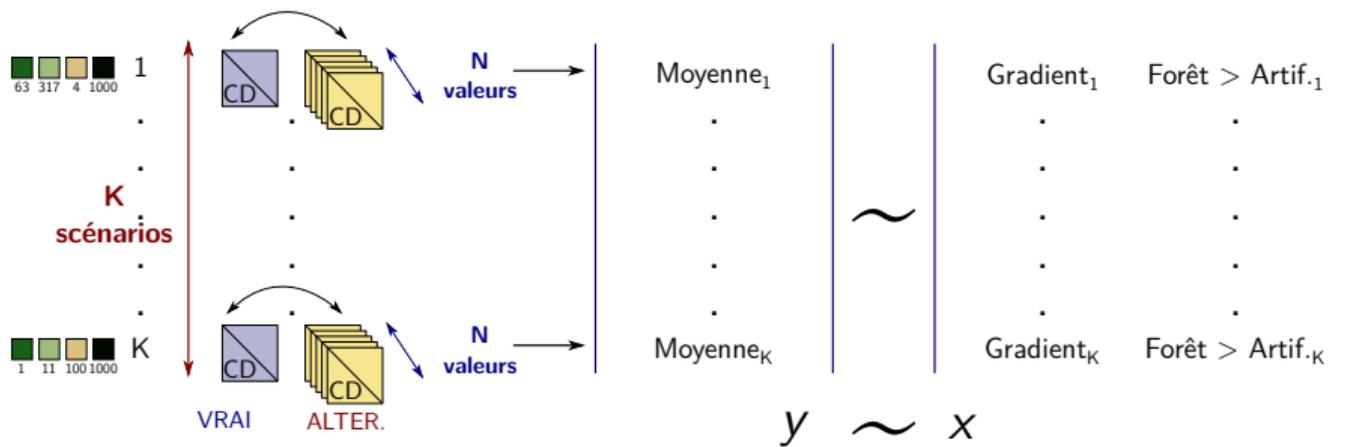
**Corrél. de Mantel**  
**Coincidence spatiale**

*K obs.*

Moyenne  
des **N paysages**  $\rightsquigarrow$   
pour chaque **scénario**

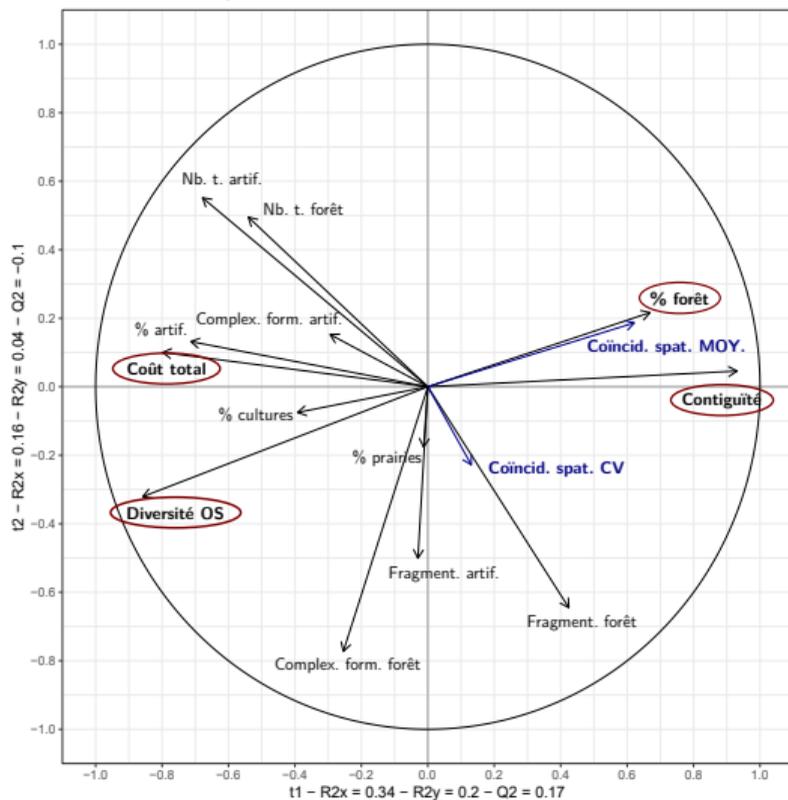
**Caractéristiques  
des scénarios de coût**

*K obs.*

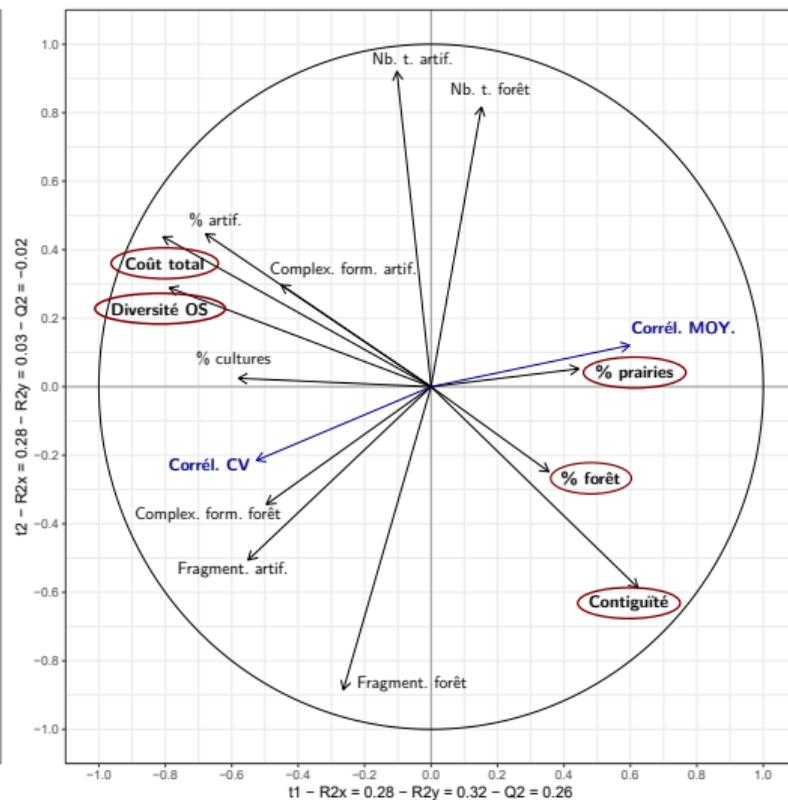


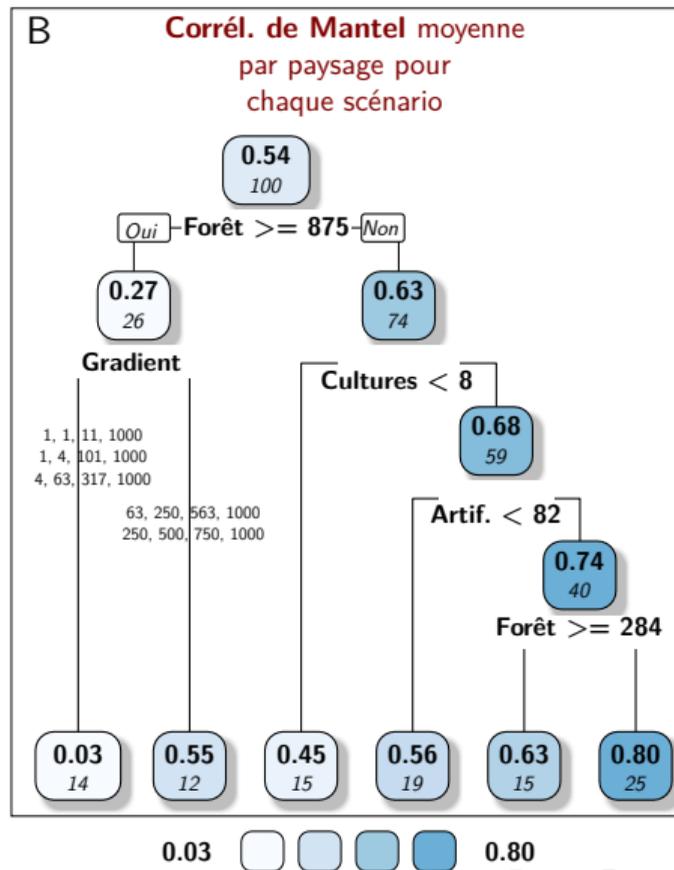
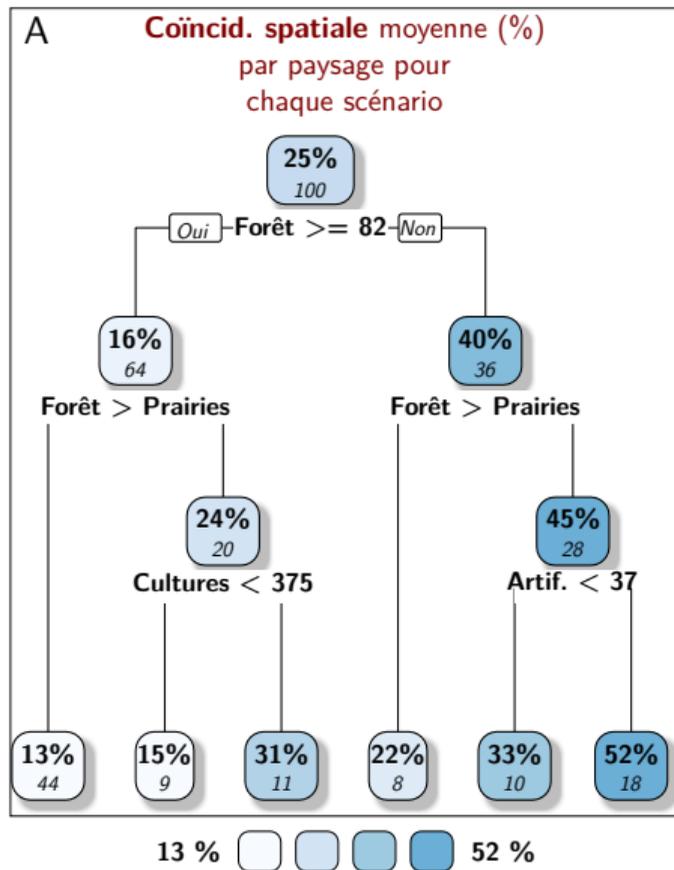
La **Corrél. de Mantel** / **Coincidence spatiale** entre les scénarios VRAI et ALTER est-elle systématiquement forte quand on paramètre les scénarios d'une certaine façon ?

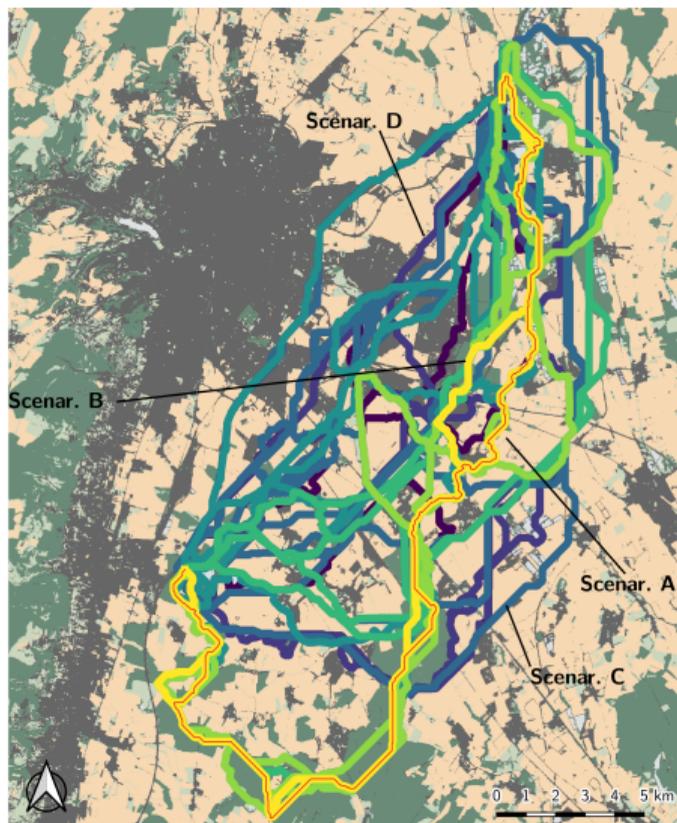
## Coincidence spatiale des chemins



## Corrélation de Mantel entre matrices de distances-côût







— True least cost path

Alternative least cost path

(Mantel correlation coefficient between all true LCP cost-distances and alternative LCP cost-distances)

■ -0,09 - 0,2

■ 0,2 - 0,5

■ 0,5 - 0,7

■ 0,7 - 0,8

■ 0,8 - 0,85

■ 0,85 - 0,9

■ 0,9 - 0,98

Land cover map (true cost value)

■ Forest (1)

■ Grassland (10)

■ Crops (100)

■ Artificial areas (1000)

■ Water, other (100)

Cost scenario	Forest	Grasslands	Crops	Artificial
A	1	4	101	1000
B	4	63	101	1000
C	11	1	1	1000
D	1000	11	1	1

## Sensibilité des modèles de connectivité aux scénarios de coût

Variable	Minimum	Median	Maximum
% forest (15 - 100)	15.61	28.57	79.16
% grasslands (5 - 100)	5.38	26.43	69.66
% crops (5 - 100)	5.08	21.97	59.98
% artificial areas (2 - 100)	2.04	8.42	24.65
Shannon div. index (0 - 1)	0.46	0.75	0.93
Frag. forest patches ('clumpy') (-1 - 1)	0.81	0.93	0.97
Frag. artif. patches ('clumpy') (-1 - 1)	0.67	0.79	0.91
Nb. forest patches (0 - $9 \times 10^6$ )	2467	6563	31918
Nb. artif. patches (0 - $9 \times 10^6$ )	7602	18610	48569
Shape complex. forest patches (>1)	1.24	1.39	1.49
Shape complex. artif. patches (>1)	1.29	1.36	1.43
Contagion (0 - 100)	46.24	58.29	74.60
Total cost ( $\times 10^9$ )(0.009 - 9)	0.41	1.09	2.34

## Sensibilité des modèles de connectivité aux scénarios de coût

Forest	Grasslands	Crops	Artif	For. <Grass.	Order	% overlap	Mantel r
1	4	101	1000	Yes	Same	<b>77.81</b>	<b>0.98</b>
4	63	317	1000	Yes	Same	<b>81.00</b>	<b>0.96</b>
1	4	1000	101	Yes	Diff.	<b>68.04</b>	<b>0.88</b>
4	1	101	1000	No	Diff.	25.78	<b>0.88</b>
4	317	63	1000	Yes	Diff.	<b>58.83</b>	<b>0.87</b>
1	1	11	1000	No	Diff.	36.86	<b>0.87</b>
63	250	563	1000	Yes	Same	<b>56.08</b>	<b>0.86</b>
63	563	1000	250	Yes	Diff.	<b>55.52</b>	<b>0.84</b>
63	563	250	1000	Yes	Diff.	<b>54.59</b>	<b>0.84</b>
1	101	4	1000	Yes	Diff.	<b>54.44</b>	<b>0.83</b>
63	1000	563	250	Yes	Diff.	52.25	0.83
63	1000	250	563	Yes	Diff.	51.60	0.83
1	11	1	1000	Yes	Diff.	45.86	0.81
4	317	1000	63	Yes	Diff.	<b>57.19</b>	0.81

## Sensibilité des modèles de connectivité aux scénarios de coût

### Compléments

- Les précédents résultats ne sont pas si contradictoires :
- **Beier *et al.* (2009) : forte coïncidence spatiale de corridors à faune en Californie :**
  - 1 seul lien étudié
  - Des scénarios tous réalistes et semblables
  - Un paysage simple à 3 types d'occupation du sol
- **Pullinger et Johnson (2010) : faible coïncidence spatiale entre des chemins et des traces GPS de caribous :**
  - Plusieurs liens
  - Plus grande variabilité des scénarios
  - Paysage complexe à 10 types d'occupation du sol

## La régression PLS-R2

### Principe de la régression PLS

- Alternative à la régression multiple et à la régression en composantes principales
- Adaptée aux cas où les variables explicatives sont colinéaires
- Permet d'expliquer plusieurs variables en même temps
- Maximise la variance de l'ensemble des variables à expliquer expliquée par l'espace factoriel créé à partir des variables explicatives
- Résultat testé par validation croisée (critère de significativité d'un axe basé sur  $Q^2 > 0.0975$ ) (Tenenhaus, 1998)

# Les arbres de régression

## Principe des arbres de régression

- Méthode de régression non linéaire
- Consiste à scinder l'espace des variables explicatives en compartiments (branches et feuilles)

- ADRIAENSEN, F., CHARDON, J., DE BLUST, G., SWINNEN, E., VILLALBA, S., GULINCK, H. et MATTHYSEN, E. (2003). The application of least-cost modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 64(4):233–247.
- BALBI, M., PETIT, E. J., CROCI, S., NABUCET, J., GEORGES, R., MADEC, L. et ERNOULT, A. (2019). Ecological relevance of least cost path analysis : An easy implementation method for landscape urban planning. *Journal of Environmental Management*, 244:61–68.
- BEIER, P., MAJKA, D. R. et NEWELL, S. L. (2009). Uncertainty analysis of least-cost modeling for designing wildlife linkages. *Ecological Applications*, 19(8):2067–2077.
- BEIER, P., MAJKA, D. R. et SPENCER, W. D. (2008). Forks in the road : choices in procedures for designing wildland linkages. *Conservation Biology*, 22(4):836–851.
- CARROLL, C., McRAE, B. et BROOKES, A. (2012). Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of gray wolf populations in western North America. *Conservation Biology*, 26(1):78–87.
- GONZALES, E. K. et GERGEL, S. E. (2007). Testing assumptions of cost surface analysis - a tool for invasive species management. *Landscape Ecology*, 22(8):1155–1168.
- MONY, C., ABADIE, J., GIL-TENA, A., BUREL, F. et ERNOULT, A. (2018). Effects of connectivity on animal-dispersed forest plant communities in agriculture-dominated landscapes. *Journal of Vegetation Science*, 29(2):167–178.
- PULLINGER, M. G. et JOHNSON, C. J. (2010). Maintaining or restoring connectivity of modified landscapes : evaluating the least-cost path model with multiple sources of ecological information. *Landscape Ecology*, 25(10):1547–1560.

- RAYFIELD, B., FORTIN, M.-J. et FALL, A. (2010). The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. *Landscape Ecology*, 25(4):519–532.
- SAVARY, P., FOLTÊTE, J.-C., MOAL, H., VUIDEL, G. et GARNIER, S. (2021). graph4lg : a package for constructing and analysing graphs for landscape genetics in R. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(3):539–547.
- SAWYER, S. C., EPPS, C. W. et BRASHARES, J. S. (2011). Placing linkages among fragmented habitats : do least-cost models reflect how animals use landscapes? *Journal of Applied Ecology*, 48(3):668–678.
- TENENHAUS, M. (1998). *La régression PLS : théorie et pratique*. Editions TECHNIP.
- ZELLER, K. A., CREECH, T. G., MILLETTE, K. L., CROWHURST, R. S., LONG, R. A., WAGNER, H. H., BALKENHOL, N. et LANDGUTH, E. L. (2016). Using simulations to evaluate Mantel-based methods for assessing landscape resistance to gene flow. *Ecology and Evolution*, 6(12):4115–4128.