Modélisation des changements d'usage de sol: approches actuelles et prospectives futures

Marta Debolini

marta.debolini@paca.inra.fr

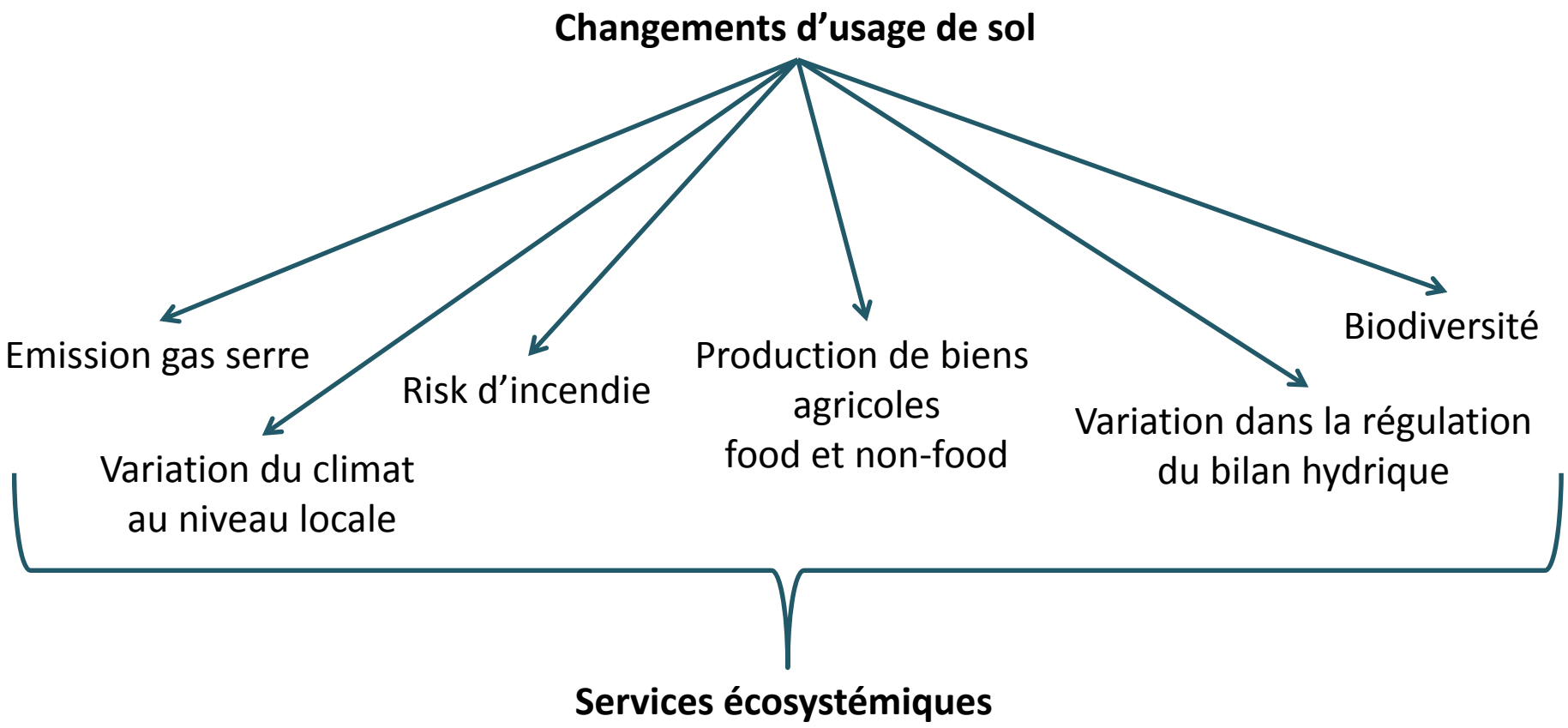
Aix en Provence, Formation Modélisation ECCOREV, session 2: 7 – 8 octobre 2014

Outline

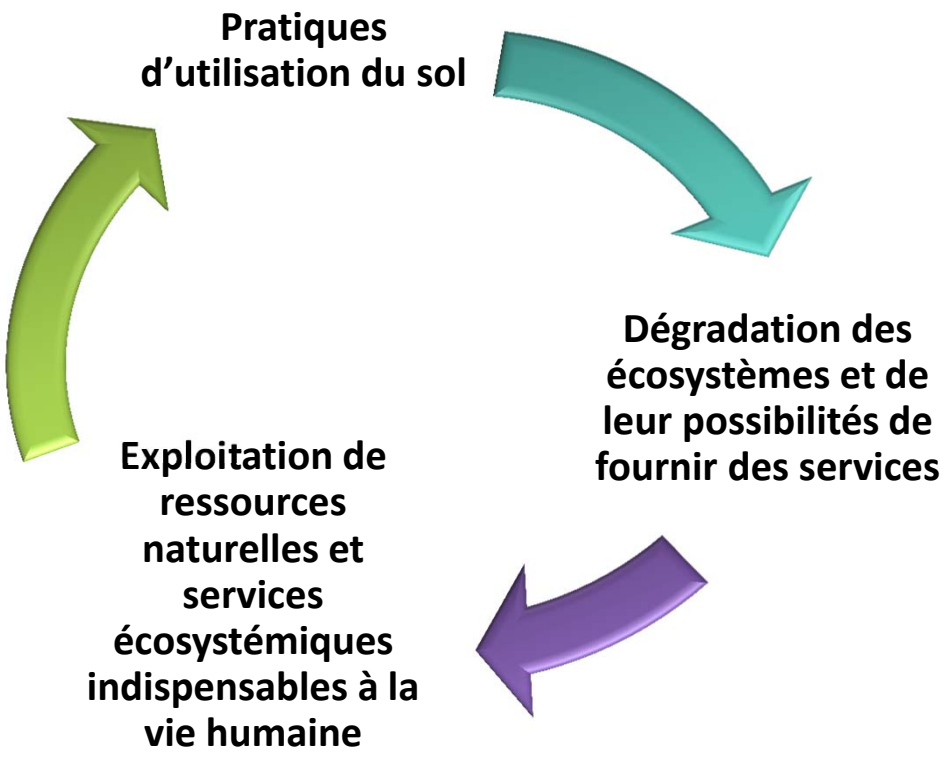
- Pourquoi modéliser les changements d'usage de sol?
- Quelque définition préliminaire
  - Du land cover au land system
- Modèles conceptuels de la relation entre déterminants et changements d'usage de sol
- Quels approches de modélisation?
- Quelque exemple d'application:
  - Les modèles multi-agents
  - Le modèle CLUE
- Les changements d'usage de sol agricole

Pourquoi modéliser les changements d'usage de sol?

Les usages du sol (et donc ses changement) sont à la base de la plupart des processus de surface et de l'interaction surface – souterraine - atmosphère



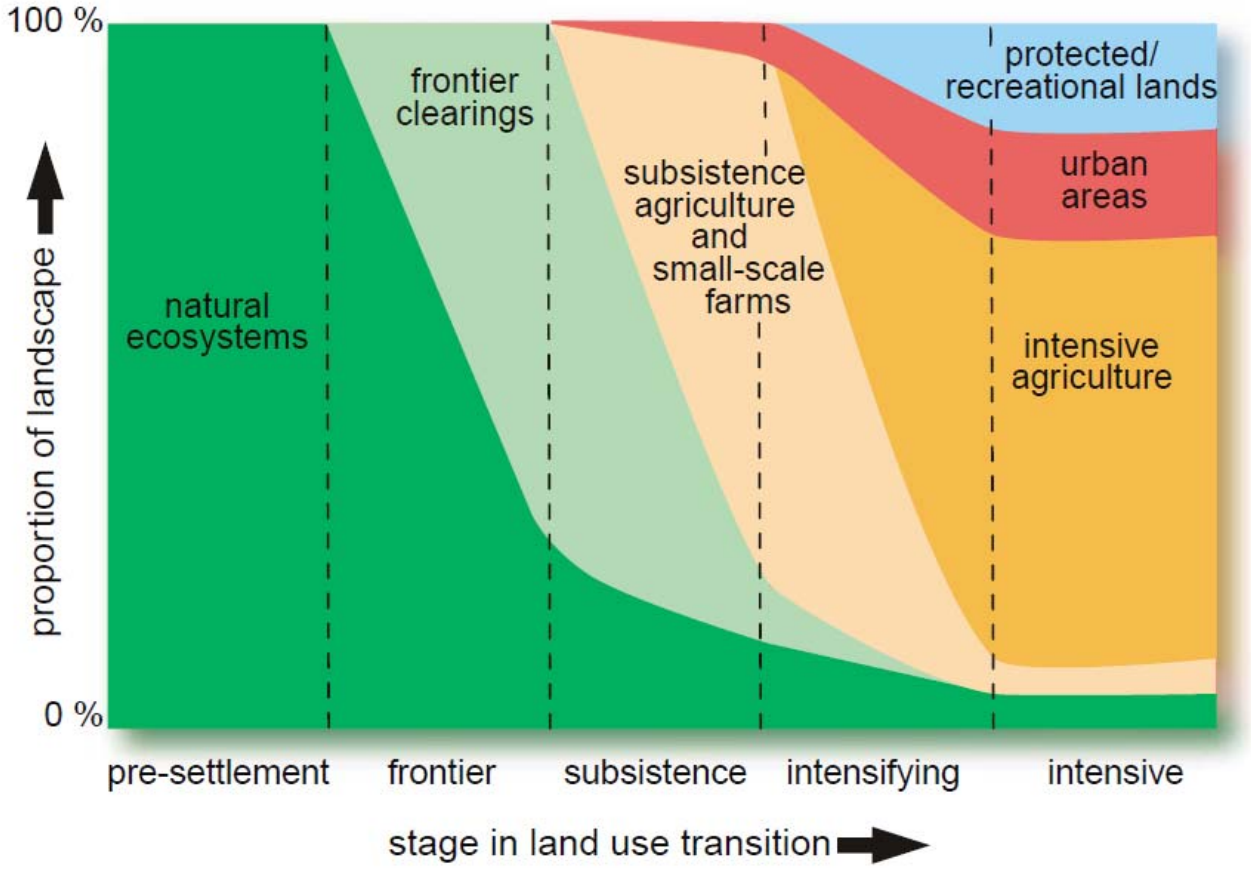
Pourquoi modéliser les changements d'usage de sol?



"We face the challenge of managing trade-offs between immediate human needs and maintaining the capacity of the biosphere to provide goods and services in the long term"

Foley et al., Science, 2005

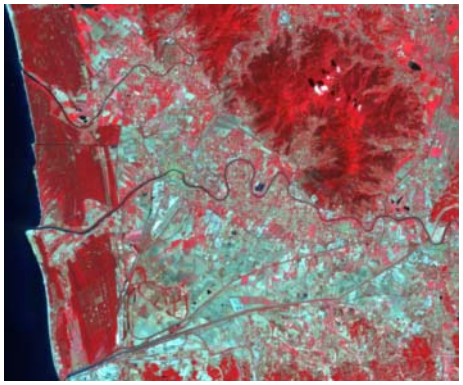
Séquence des différents « régimes » d'usage du sol



Les transitions d'usage du sol peuvent être identifié par une série de passage similaire partout: sociétés différents ont les mêmes séquences, mais pas touts les régions ont des passages linéaires être les phases.

Foley et al., Science, 2005

Quelque définition préliminaire



- Pour **Land Cover (LC),** nous entendons ce qui concerne les caractéristiques physiques de la surface de la terre avec la distribution spatiale de la végétation, eau, glace, déserts et d'autres caractéristiques physiques induits par les activités humaines telles que les infrastructures et les établissements.

- Ainsi, la **couverture du sol** correspond à la couverture physique des terrains tant qu'il est directement visible ou détectable par télédétection, y compris la végétation naturelle et artificielle et les bâtiments humains.

- **L'utilisation du sol (LU)** est tout ce qui dépende de l'utilisation des terres par l'homme.

- Ainsi, **l'utilisation du sol** dépend de la finalité pour laquelle il est utilisé. Une classe de LU peut être définie comme un ensemble d'activités amenées pour produire un ou plusieurs types de biens ou de services. Une utilisation des terres donnée peut être présent dans un ou plusieurs zones différents et des différentes catégories de LU peuvent être présents simultanément dans la même portion de terre.

LC est lié à la nature physique de l'entité qui couvre la surface de la terre, tandis que LU est dépendant de la fonction socio-économique et environnementale de l'entité.

L’approche Land system

- Les changements au niveau «systémique» - dans les systèmes agricoles ou dans les systèmes territoriaux en général ont des impacts directs sur la structure environnemental et productif / socio-économique des paysages.

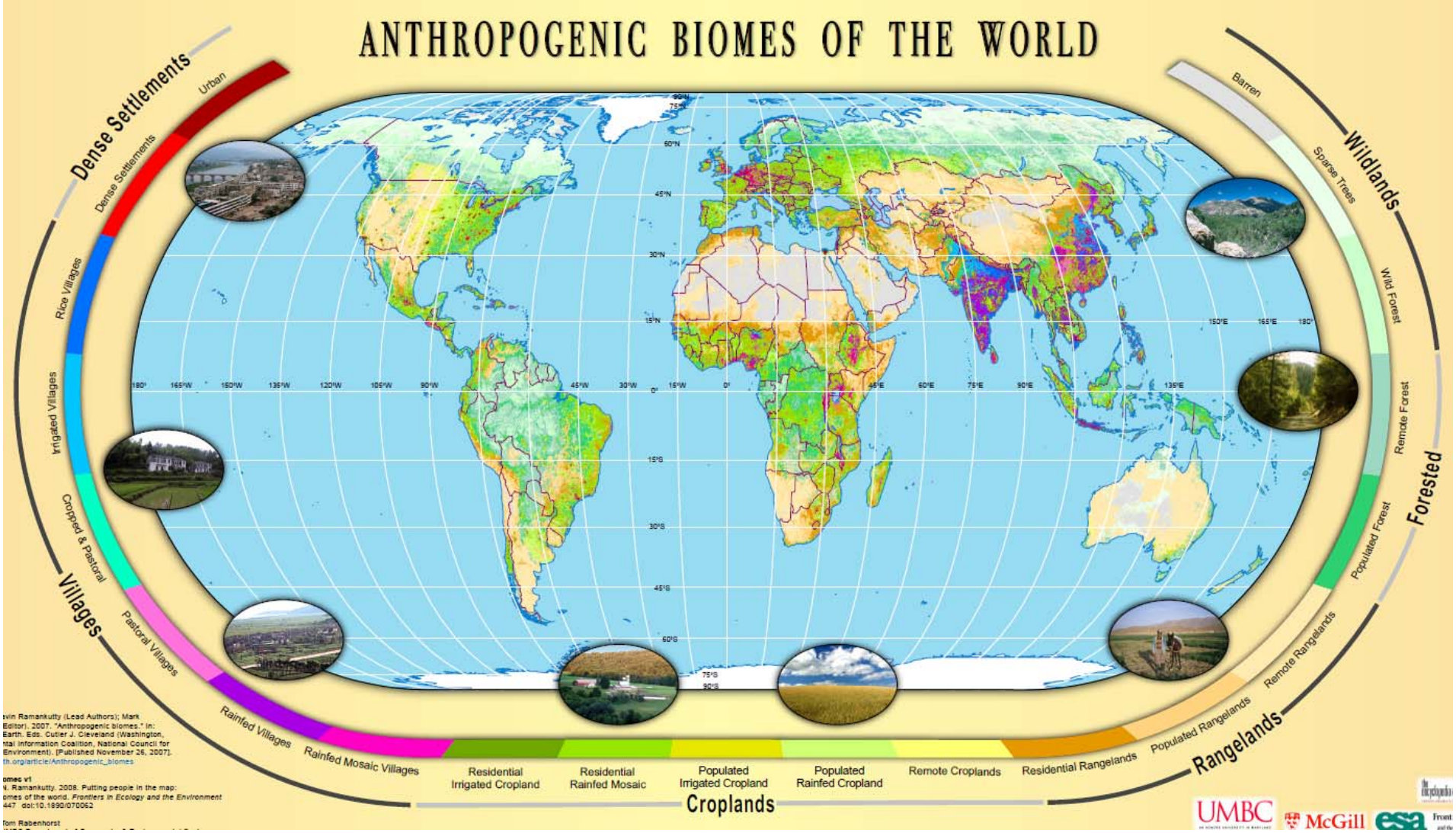
- Les mêmes types d’usage de sol, mais gérés avec des pratiques différentes ont des effets différents:
  - systèmes de production intensive ou extensive, irriguées ou non, labourés ou non, urbanisation compacts ou dispersés…

- Prendre en compte à la fois la couverture du sol, l'hétérogénéité des pratiques de gestion et leur intensité

- Intégrer la couverture du sol avec des paramètres de gestion, production et planification peut améliorer la capacité de modéliser les interactions de ces systèmes avec l'environnement

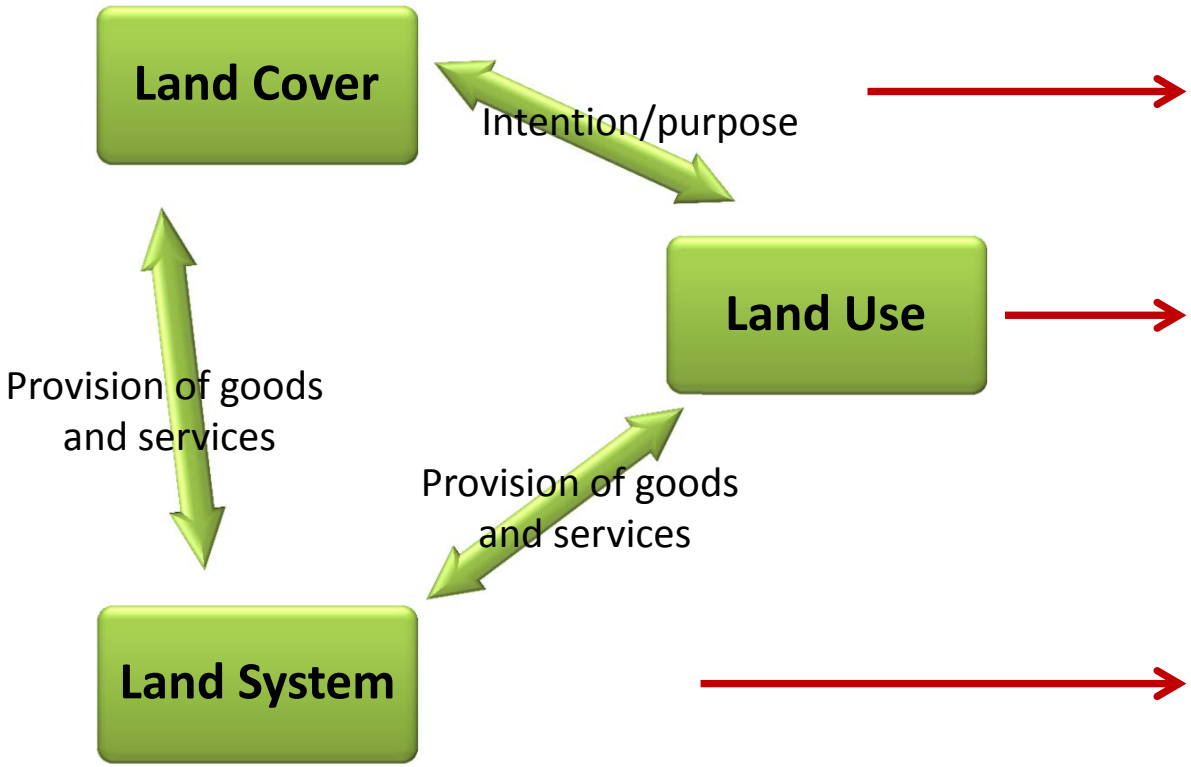
- Ces nouveaux types de classification peuvent être comparés avec les "biomes anthropiques» proposées par Ellis et Ramankutty (2008).

L'approche Land system



Quelque définition préliminaire

Interactions among land representation systems



Needed and available data

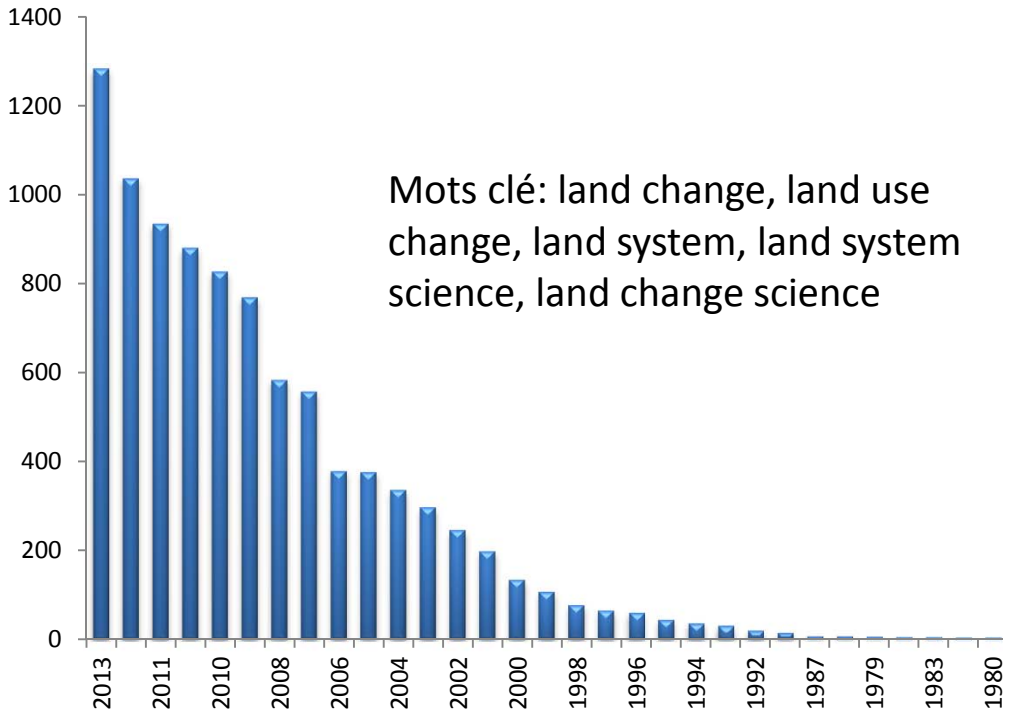
Remote sensing, Aerial photos, thematic cartography

Land Use maps with field validation, census data

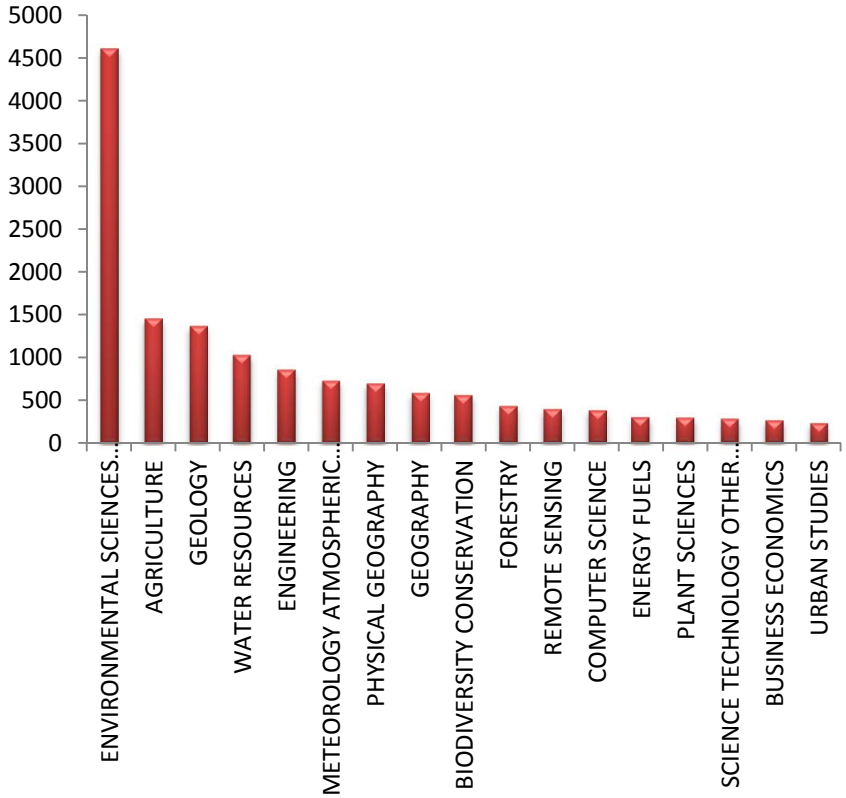
Quantification or valuation of goods and services, analysis of the socio-economic and environmental context

Adapted from Verburg et al., 2009

Développement de la thématique



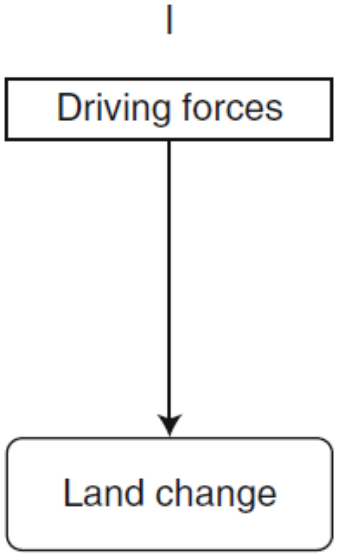
Mots clé: land change, land use change, land system, land system science, land change science



« The aim of land change science is to understand the biophysical and human causes of land use and land cover change, and the land use and land cover patterns and dynamics affecting the structure and function of the earth system » Hesperger et al., 2010

Les modèles de changement d'usage du sol sont les outils à utiliser pour analyser les causes et les conséquences des changements

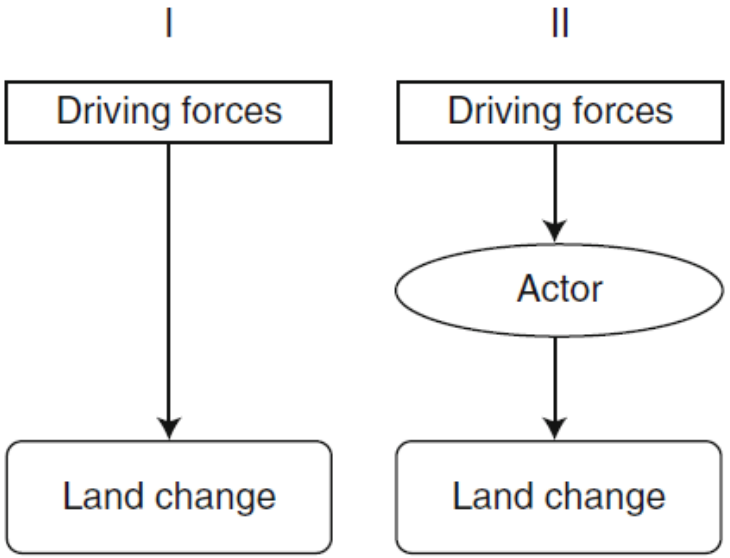
Modèles conceptuels de la relation entre déterminants et changements d'usage de sol



I. Relation directe entre facteurs déterminants et changements, détectable à travers analyse empirique/statistique spatiale.
   - Es: relation distance des routes vs déforestation, disponibilité d'eau vs maraichage…
   - Le processus de décision qui se trouve entre les déterminants et l'usage de sol est implicite et n'est pas analysé.
   - La modélisation est fait par statistique spatiale ou les zones de changement sont la variable dépendant et les déterminants la variable indépendant.

Hersperger et al. (2010)
Verburg , 2014

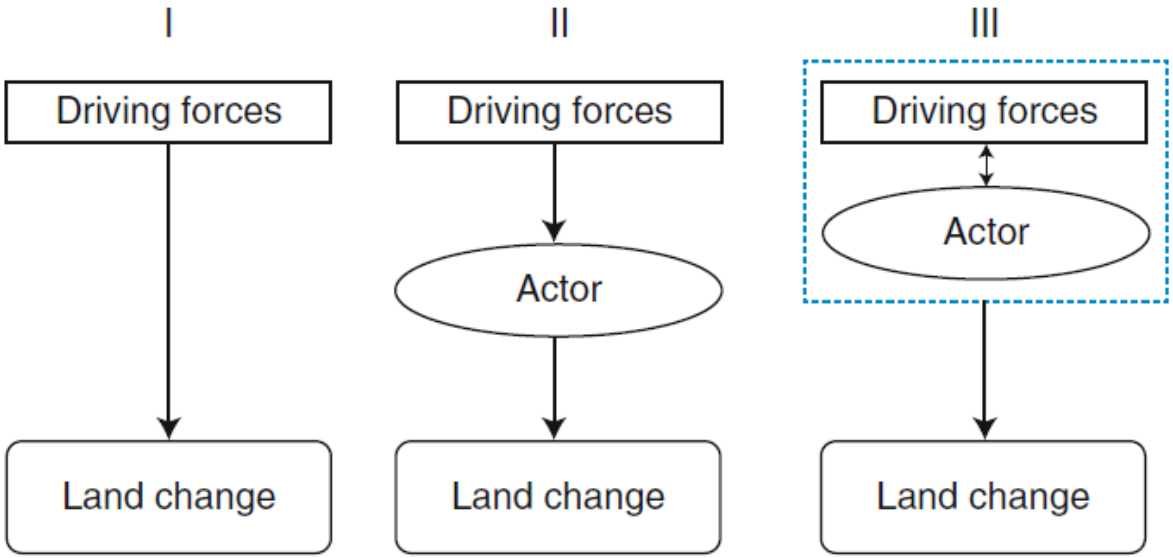
Modèles conceptuels de la relation entre déterminants et changements d'usage de sol



II. Les acteurs ont un rôle explicit dans les changements, mais le processus de décision est considéré comme homogène.
   - Les déterminants sont assumés indépendants des acteurs
   - L'hypothèse est d'un processus de pris de décision uniforme en reponse au même driver
   - Cas des modèles économiques, ou les acteurs se comportent selon un modèle de choix rationnel uniforme

Hersperger et al. (2010)
Verburg , 2014

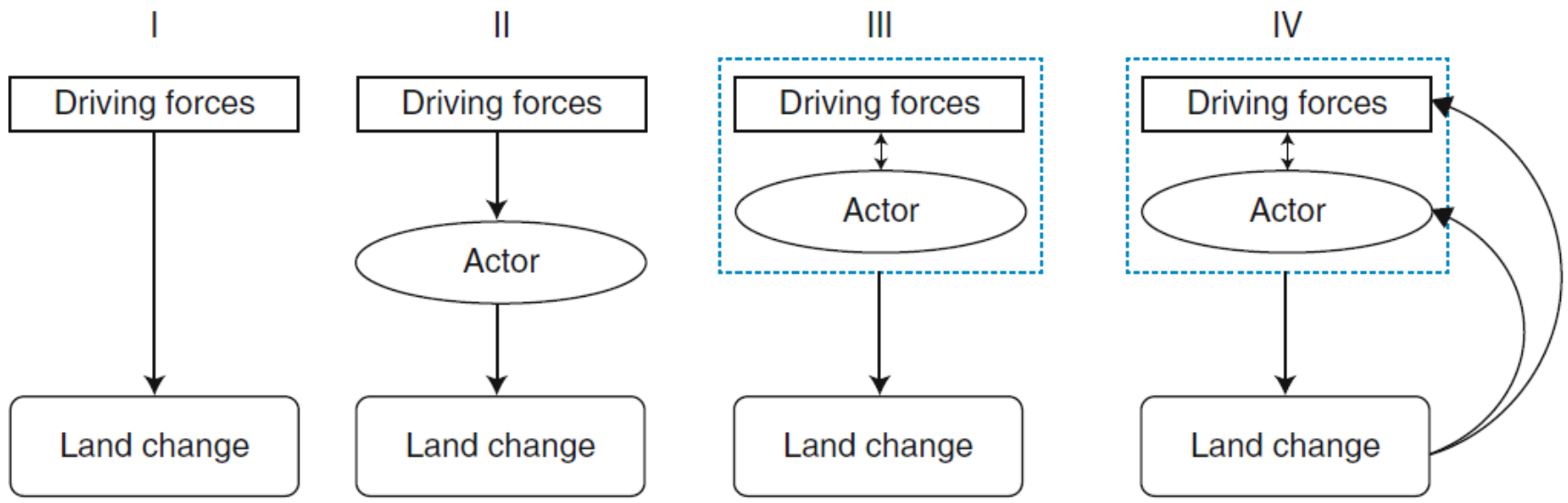
Modèles conceptuels de la relation entre déterminants et changements d'usage de sol



III. Le processus de prise de décision est explicitement pris en compte dans le sens que le même facteur déterminant peut conduire à un changement de sol différente en fonction des variations dans le processus de prise de décision
   - modèles multi-agents, ou les différents groups « de décision » sont représentés par des typologies d'agent diffèrent (es: agriculteurs innovant vs agriculteur traditionel).

Hersperger et al. (2010)
Verburg , 2014

Modèles conceptuels de la relation entre déterminants et changements d'usage de sol



IV. Rétroaction explicit des changements d'usage de sol vers les acteurs et les déterminants
- impact des changements sur les facteurs de changement ou modifications des processus de décision comme résultat d'un procès d'apprentissage
- Es: changements d'usage de sol causé par des conditions pédoclimatiques particuliers, mais qui peuvent à la fois causer des impact sur le climat future.
- Pas beaucoup d'études de ce type pour les difficultés dans l'observation et dans la quantification des effets rétroactifs.

Hersperger et al. (2010)
Verburg , 2014

Comment choisir entre les différents approches

	DF-C	DF-A-C	DFA-C	A-C
Study aim	Exploration	Understanding causal chain driving forces-actors-change	Interactions among actors and drivers of land change, including feedbacks	Actor behavior and decision making resulting in land change
	Generation of hypotheses	Identifying specific combinations of driving forces and actors that lead to change	Policy analysis and intervention	Interactions among actors of land change, including feedbacks
				Policy analysis and intervention
	Estimation of parameters for theoretical models			Social learning
Geographical extent	Small to large	Small to medium	Small to medium	Small
Number of land covers and land uses	Few to many	Few to many	Only the ones that are directly affected by one driving forces-actor system	Only the ones that are directly affected by the actors' groups considered in the A-C model (e.g., farmers)
			Generally few similar ones	Generally few similar ones (e.g., crops)
Type of data	Potential drivers	Potential drivers	Potential drivers	Actors' behavior and interaction
	Land change data	Land change data	Actors' behavior and actor interaction	Land change data
		General characteristics of actors	Land change data	

Hersperger et al. (2010)

Quels approches de modélisation?

- Trois méthodologies ont été appliquées aux cas d'étude des changements agricole:

1. **Markov chain et automate cellulaires**: ils modélisent une transition d'un état à un autre. Il s'agit d'un processus aléatoire sans mémoire: l'état suivant ne dépend que de l'état actuel et non sur la séquence des événements qui l'ont précédée. (ex. Mignolet et al., 2007; Schaller et al., 2011). Dans les automates cellulaires le paysage est représenté par une grille discret ou chaque pixel est influencé par le comportement de son voisin (règles de proximité/voisinage). (ex. Metronamica http://www.metronamica.nl/models_landuse.php)

2. **Agent based model** (modèle multi-agents): ils simulent les actions et interactions des agents autonomes pour évaluer leurs effets sur le système dans son ensemble (ex. Valbuena et al., 2010)

3. **Modèles empirique de statistique spatiale**: Ils sont basés sur l'évaluation de la probabilité d'avoir un certain usage du sol dans une certain position en conséquence d'une série de déterminants choisis et des relations statistiques entre les usages de sol et les déterminants sélectionnés (ex. Letourneau et al., 2012)

Quels approches de modélisation?

Markov chain / automate cellulaires

+ Modélisation de détail pour les systèmes de cultures et les rotations/associations culturales + Echelle de détaille (jusqu'à la parcelle) + Très connecté avec les comportements des agriculteurs et leur gestion	- Pas applicable pour changements de long terme - La méthode peux modéliser les rotations culturales mais pas vraiment les changements d'usage - C'est pas possible de mettre en relation les dynamiques observées avec des drivers

Quels approches de modélisation?

Modèles empiriques/de statistique spatiale/econometriques

+ Ils peuvent être appliqués à différents échelles temporales et spatiales (de la nation à la parcelle)	- Nécessité de caractériser les conditions actuels, les drivers et les dynamiques en acte
+ Ils sont directement adapté au cas d'étude (approche empirique)	- Possibles difficulté dans les processus d'élaboration statistique
+ Possibilité d'intégrer information d'aménagement	- Pris en compte implicite des processus de décision des acteurs
+ Possibilité d'intégrer diffèrent types de drivers	
+ Corrélation entre la configuration spatiale et les drivers	

Quels approches de modélisation?

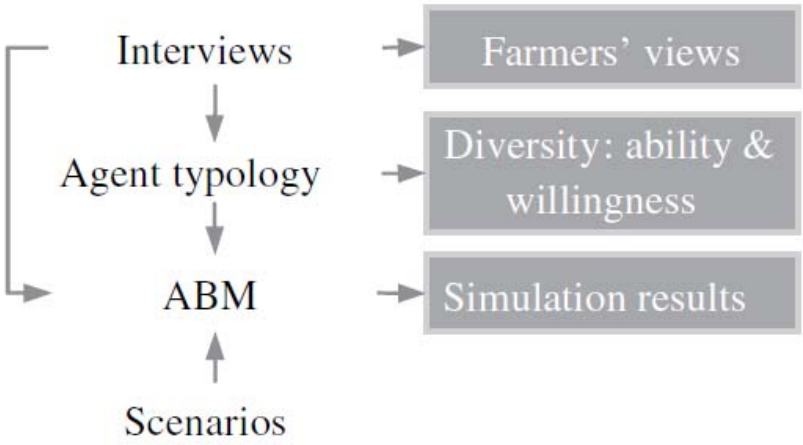
Modèles multiagents

+ Ils sont nés comme applications aux comportements économiques et ils peuvent considérer plusieurs variables dans le processus d'analyse + Ils permettent d'intégrer les pratiques agricoles dans les choix des agriculteurs + Possibilité de considérer différents typologies d'aménagement du territoire	- Nécessité de bien définir les comportements des typologies d'agriculteurs - Il faut supposer que les comportements ne varient pas dans le temps considéré - Difficulté de bien mettre en relation les drivers avec le comportements modélisés - échelle d'application locale

Quelques exemple d'application: les modèles multi-agents

Agent based model (modèle multi-agents): ils simulent les actions et interactions des agents autonomes pour évaluer leurs effets sur le système dans son ensemble

1. Description des différents processus de prise de décision des agriculteurs à travers entretiens pour comprendre quoi détermine la capacité et la volonté de l'exploitant à prendre certains décision (expansion de l'exploitation, utilisation des ressources, intensification des pratiques agricoles)



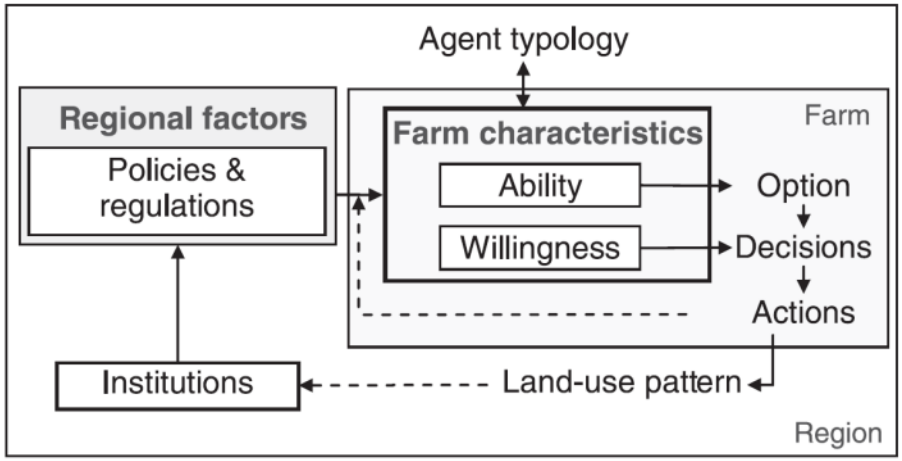
2. Implémentation du cadre de référence sur une modèle agent-based: classification des agents par typologies pour simplifier la diversité des caractéristiques du processus de pris de décision.

Valbuena et al., 2010

Quelques exemple d'application: les modèles multi-agents

3. Application et paramétrisation du modèle agent-based dans le cas d'étude
   - 5 types d'agents: (1) hobby, (2) conventionnel, (3) diversificateur, (4) expansionniste conv, (5) expansionniste div;
   - 4 types d'usage de sol: (1) urbain, (2) semi-naturel, (3) surface d'eau, (4) terres agricoles
   - 3 types de décision possibles: (1) cessation de l'activité agricole, (2) expansion, (3) diversification des pratiques agricoles

4. Proposition of alternative scenarios
   - Trend scenario: poursuite des changements observés dans les derniers 10 années
   - Réponse des agriculteurs à une majeur libéralisation du marché
   - Réponse des agriculteurs à une majeur régionalisation de la gouvernance



5. Analyse de l'évolution de la structure du paysage suite aux décisions des agriculteurs
   - deux variables spatiales sont calculées pour évaluer les effets des décisions des agriculteurs: (1) proportion des zones semi-naturelles autour, (2) densité des éléments « paysagères » autour

6. Validation expert du modèle

Valbuena et al., 2010

Quelques exemple d’application: les modèles statistiques

Modèles empirique de statistique spatiale: Ils sont basés sur l’évaluation de la probabilité d’avoir un certain usage du sol dans une certain position en conséquence d’une série de déterminants choisis et des relations statistiques entre les usages de sol et les déterminants sélectionnés

Echelle locale - régionale

Echelle régionale - globale

Le modèle CLUE (CLUE-S) (Veldkamp and Fresco, 1996; Verburg et al., 1999)

- CLUE est **the Convertion of Land Use and its Effects modelling framework**

- C'est un modèle hybride statistique/automate cellulaire

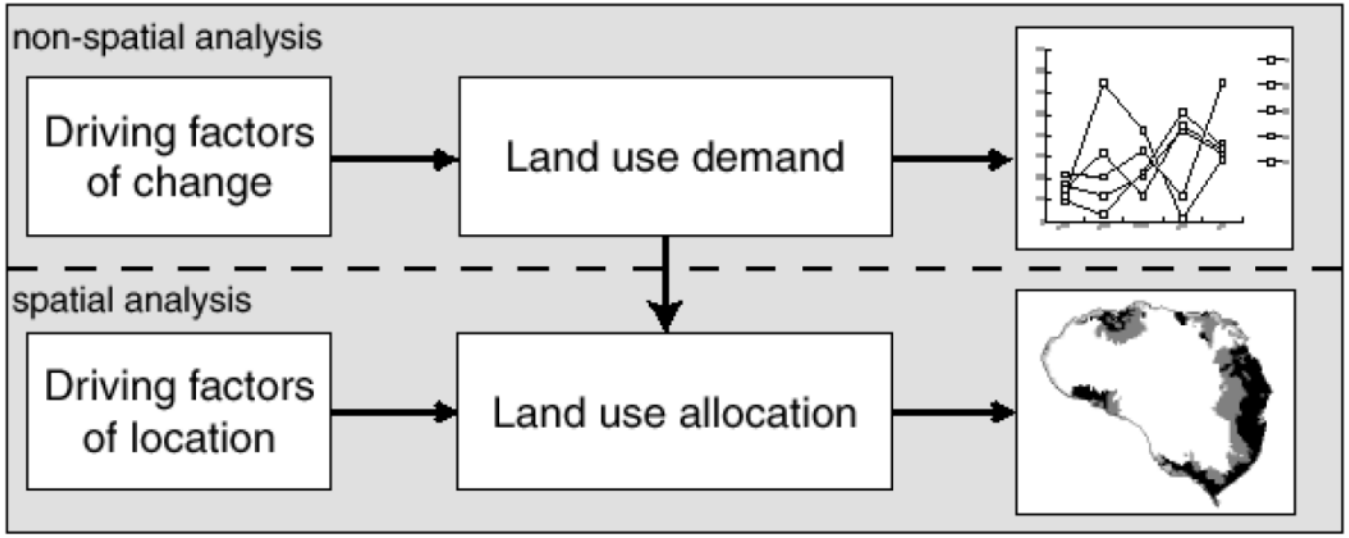
- Le but du modèle est de simuler les changements d'usage de sol à travers une série de **relations statistiques** dérivées **d'observations empiriques** entre l'occupation du sol e sa distribution spatiale et le facteurs déterminants.

- Les automates cellulaires sont utilisés pour modéliser les **conflits éventuels** entre différents typologie d'usage de sol dans la même unité spatiale

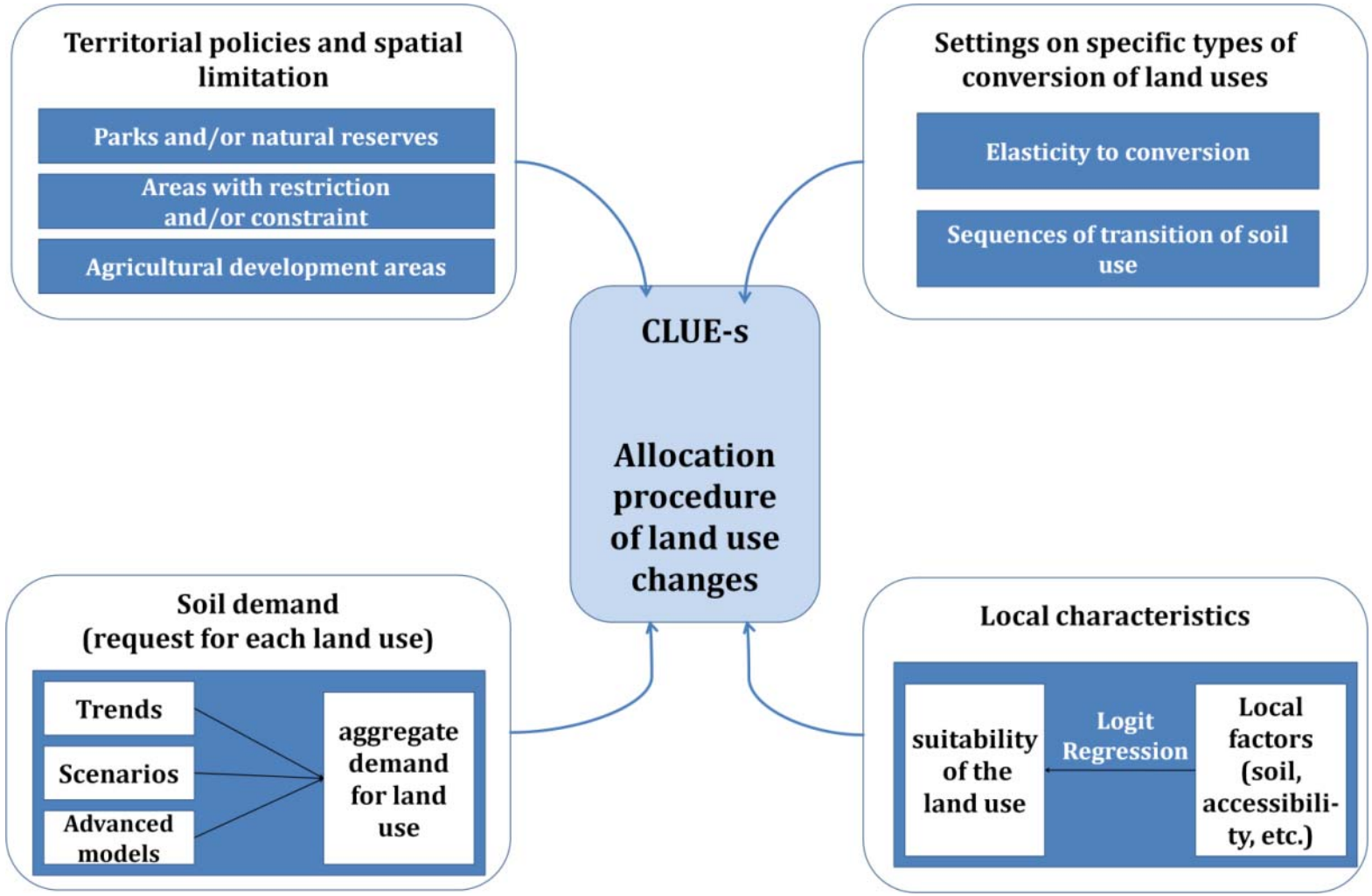
- Le modèle initiale CLUE a été modifié en CLUE-S (**the Convertion of Land Use and its Effects at Small regional extent)** pour pouvoir appliquer le modèle aussi à des échelles locales ou régionales

Les modules de CLUE-S

- CLUE est composé par deux parties: un module non spatiale pour l'evaluation de la demande d'usage de sol et un module spatiale pour l'allocation des usages.



Le modèle CLUE



Estimation des «préférences» de localisation des usages de sol

- L'hypothèse à la base de l'allocation des changements d'usage de sol est que ces changements ont lieu avec une probabilité majeur dans une certain localisation avec la plus forte « préférence » pour un spécifique usage de sol.

- Cette préférence représente l 'effet des interactions entre les acteurs locaux et les processus de décision sur les configurations spatiales

- Dans le cas de CLUE, la préférence de localisation est calculée sur la base des relations empiriques spatiales entre les usages du sols et les déterminants choisis, selon la formule:

$$R_{ki} = a_k X_{1i} + b_k X_{2i} + \ldots$$

  - R = preference pour une certain localisation i du land use k
  - X = valeur des déterminants dans la localisation i
  - a,b,… = impact relatives des déterminants dans la preference pour le land use k

Modèle statistique de changement

- Les relations obtenues entre les déterminants et les localisation des usages du sol sont utilisées pour développer un modèle statistique binomiale avec deux choix: changer la localisation i vers l'usage du sol k ou non.

- Depuis que la préférence R_{ki} ne peut pas être directement calculée, il faut évaluer la probabilité qu'une certain localisation soit ou non occupée par un certain usage du sol, sur la base de la relation suivante:

$$Log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + ... + \beta_n X_{ni}$$

  - P = probabilité que un pixel i soit occupé par un certain usage du sol
  - X = valeur des déterminants dans la localisation i
  - β = coefficients calculés par les régression statistiques

Procédure d'allocation des usages de sol

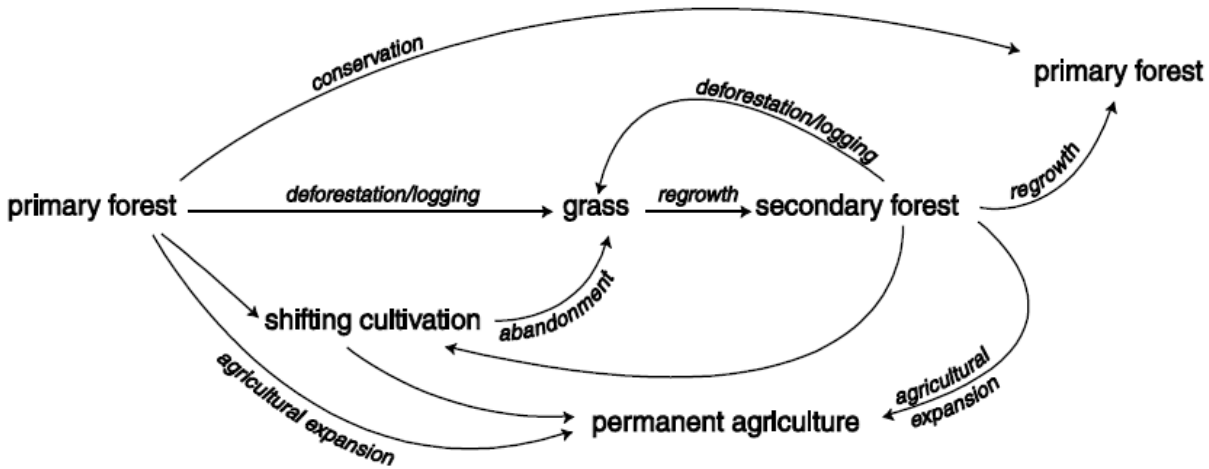
1. Détermination des pixels ou les changements sont possibles: touts les pixels ou il y a des zones de protection ou qui ont un usage de sol qui ne peut pas changer sont mis à part pour les analyses suivantes

2. Pour les pixels (i) qui restent, la probabilité total est calculée pour chaque classe de land use (u) selon la formule:

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u$$

- P = probabilité d'avoir la classe u d'usage de sol dans le pixel u, calculé avec les régressions spatiales
- ELAS = élasticité à la conversion pour l'usage de sol u
- ITER = variable itérative spécifique pour chaque usage de sol qui indique la compétitivité relative de l'usage de sol u. La première allocation est fait avec un valeur égal de ITER pour chaque LU. Apres, si les allocation ne correspondent pas à la demande d'usage de sol, le valeur de ITER change automatiquement.

Transitions des usages de sol



Land use conversion matrix

future land use → / present land use ↓	Forest	Agriculture	Grassland
Forest	+	+(a)	+(b)
Agriculture	-	+	+(d)
Grassland	-	+(e)	+

+ conversion possible
- conversion not possible

Types de données généralement utilisées dans la modélisation d'usage de sol

Parameter

General land use/cover:
Cultivated land
Temporary crops
Permanent crops
Grassland
Forest
Other use

Specific crops (sown area and yields):
Grains (rice, maize wheat etc.)
Cash crops (coffee, tea, cotton, banana's etc.)
Legumes (beans, peas etc.)
Tuber crops (potatoes, cassava, yam, etc)
Oil crops (oil palms, groundnut etc.)
Vegetables (melons, etc.)

Animal husbandry:
Number of cattle (meat and milk)
Number of pigs
Number of poultry
Number of sheep/goat
Prawn ponds

Demographic data:
Population density
Rural population density
Urban population density
Total labour force
Agricultural labour force

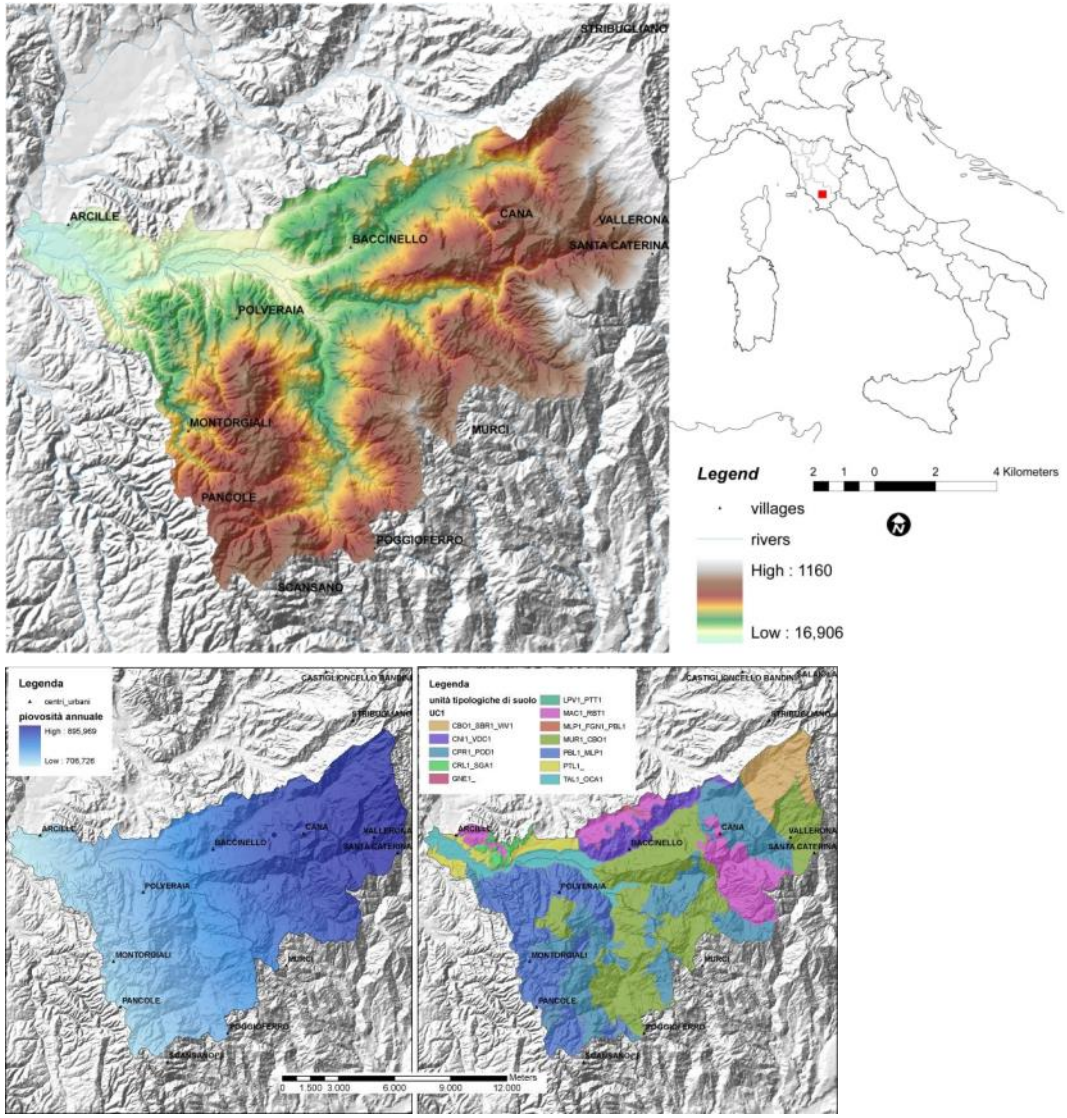
Socio-economic data:
Illiteracy
Income or GDP

Management data:
Irrigated area
Cropping index
Fertilizer use (per crop)
Mechanization

Geographic data:
Distance from city
Distance from major roads of river

Biophysical data:
DEM (altitude)
Relief
Geology/geomorphology
Soil fertility
Soil physical properties
Soil erosion susceptibility
Water logging
Precipitation
Temperature
Number of dry months

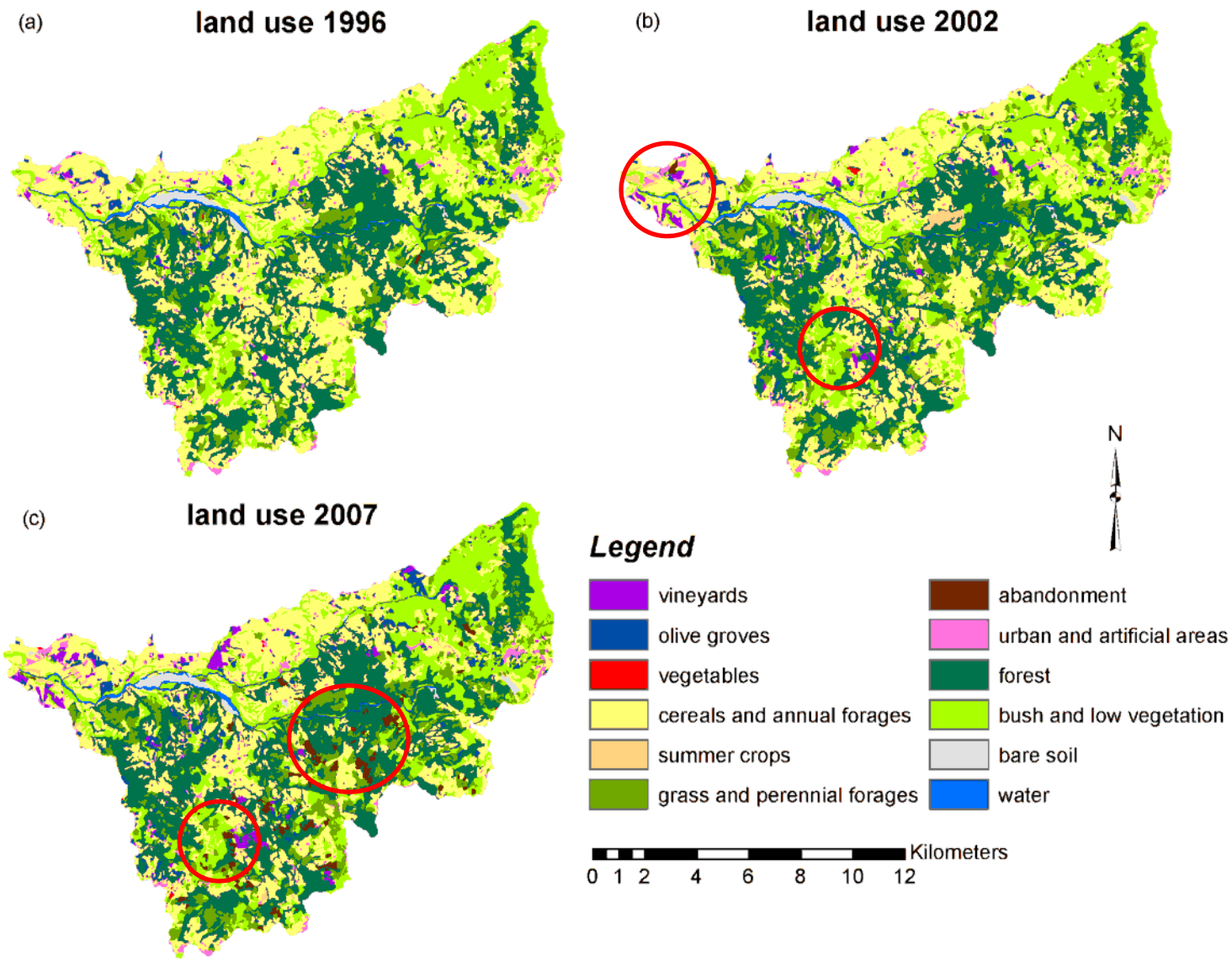
Un exemple d'application du modèle CLUE



- **Study area around 17.000 ha**
- **Complex morphology: from 16 to 1160 meters asl**
- **Caracterized by a high agricultural structure with strong modifications in the last years**

Debolini et al., 2013

Un exemple d'application du modèle CLUE

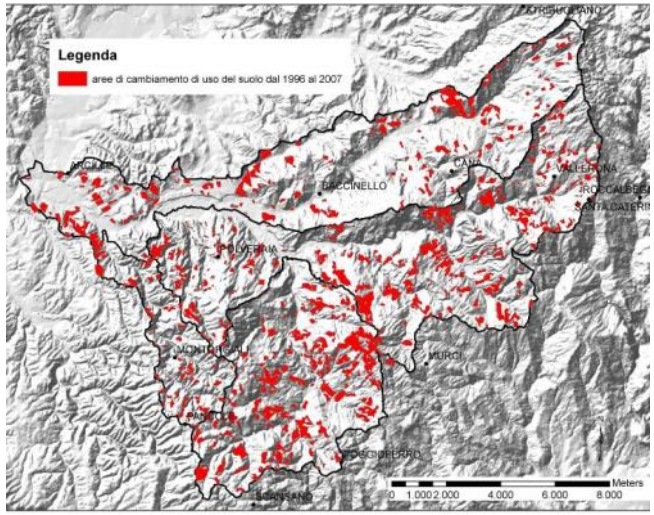


Debolini et al., 2013

Un exemple d'application du modèle CLUE

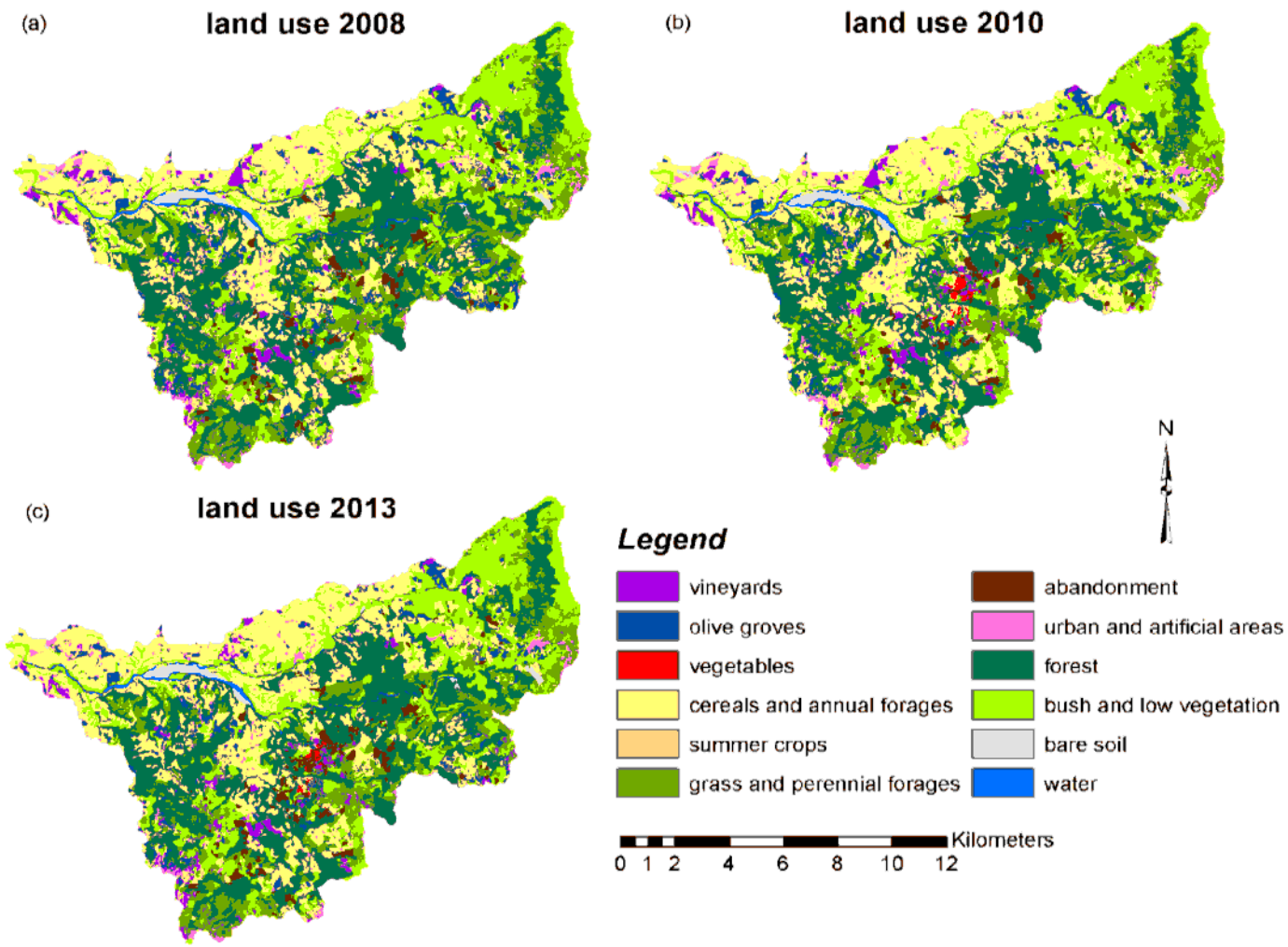
Classi di uso del suolo	1996 (ha)	1996 (%)	2002 (ha)	2002 (%)	2007 (ha)	2007 (%)	difference % 1996/2002	difference % 2002/2007	difference % 1996/2007
Vineyards	83	0,98	177,5	2,08	308,8	3,63	113,9	74,0	272,0
Olive groves	337,5	3,96	459,6	5,4	583,9	6,86	36,2	27,0	73,0
Vegetables	6,5	0,08	11,1	0,13	11,3	0,13	70,8	1,8	73,8
Cereals and annual forages	6839,4	80,34	5923,4	69,57	5207,1	61,16	-13,4	-12,1	-23,9
Summer crops	0,1	0	203,9	2,4	110,2	1,29	203800,0	-46,0	110100,0
Permanent pasture and forage	1235,3	14,51	1657,2	19,47	1859,1	21,84	34,2	12,2	50,5
Abandonment	11,7	0,14	17,4	0,2	336,6	3,95	48,7	1834,5	2776,9
Others	0	0	63,4	0,75	96,4	1,13			

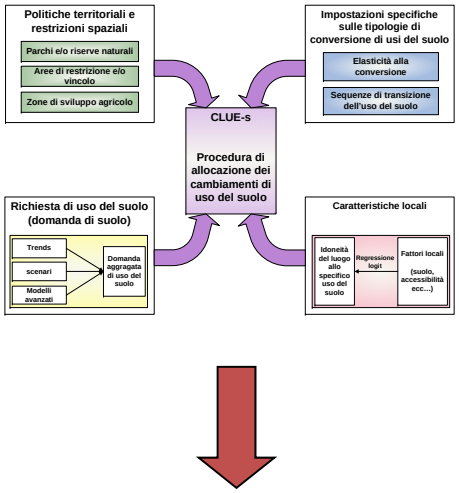
Land Use Change areas



Debolini et al., 2013

Un exemple d'application du modèle CLUE





Socio-economic drivers	Biophysical drivers
Route distance	Soil clay content
City distance	Water body distance
	Digital terrain model
	Rainfall
	Slope
	Available water capacity (AWC)

Debolini et al., 2013

Quelques exemple d'application: les modèles statistiques

Relevant LUSs

1 Cropland systems
- Accessible rainfed croplands
- Rainfed croplands with intensive livestock breeding
- Remote rainfed croplands
- Partly irrigated croplands with intensive livestock breeding
- Partly irrigated croplands with extensive livestock breeding
- Irrigated croplands with extensive livestock breeding
- Irrigated croplands with intensive bovines breeding

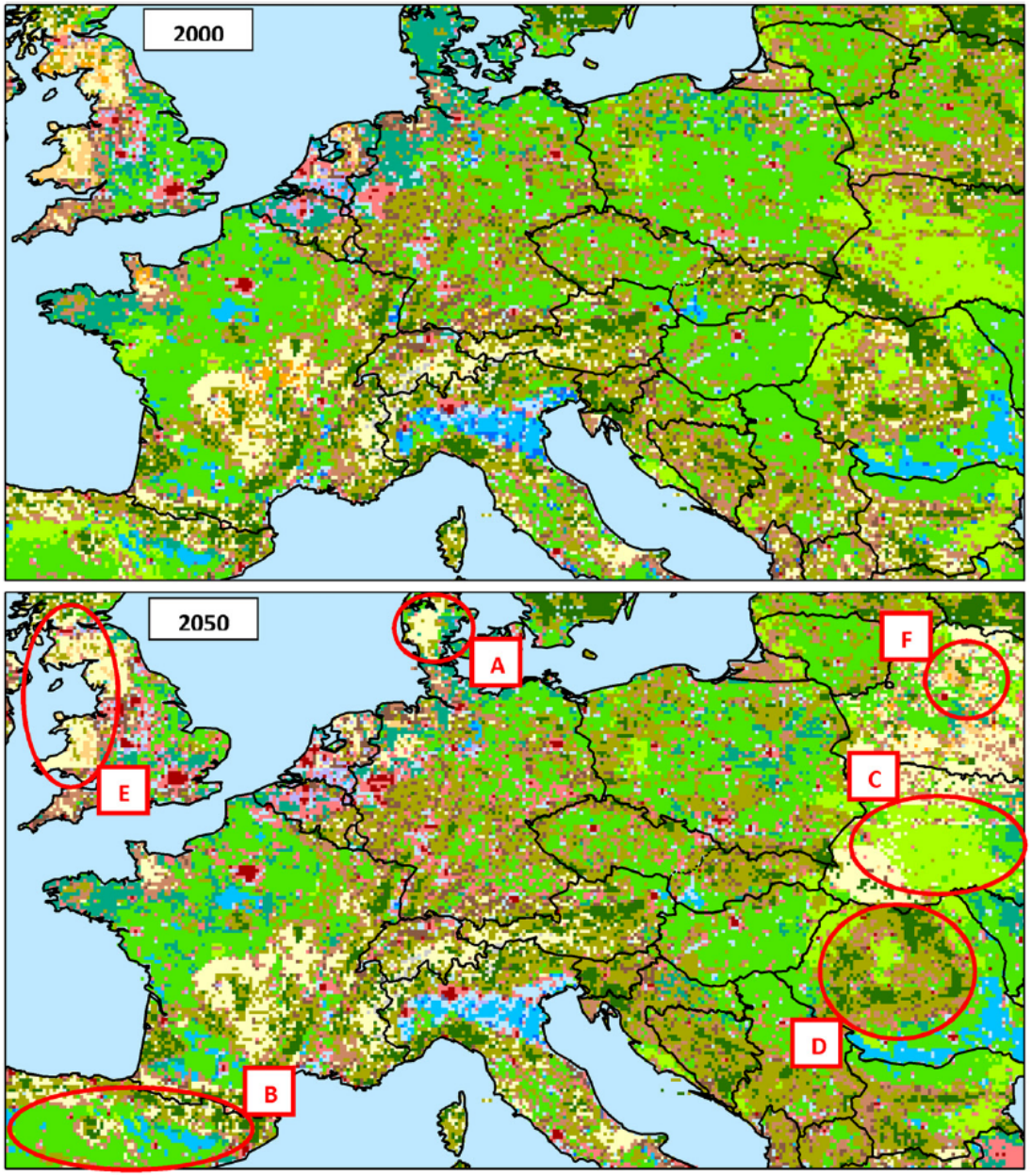
2 Pastoral systems
- Extensive pastures
- Intensive pastures with bovines and small ruminants
- Intensive pastures with bovines

3 Densely populated systems
- Urban areas
- Villages or peri-urban area
- Villages and rice croplands
- Villages and irrigated croplands

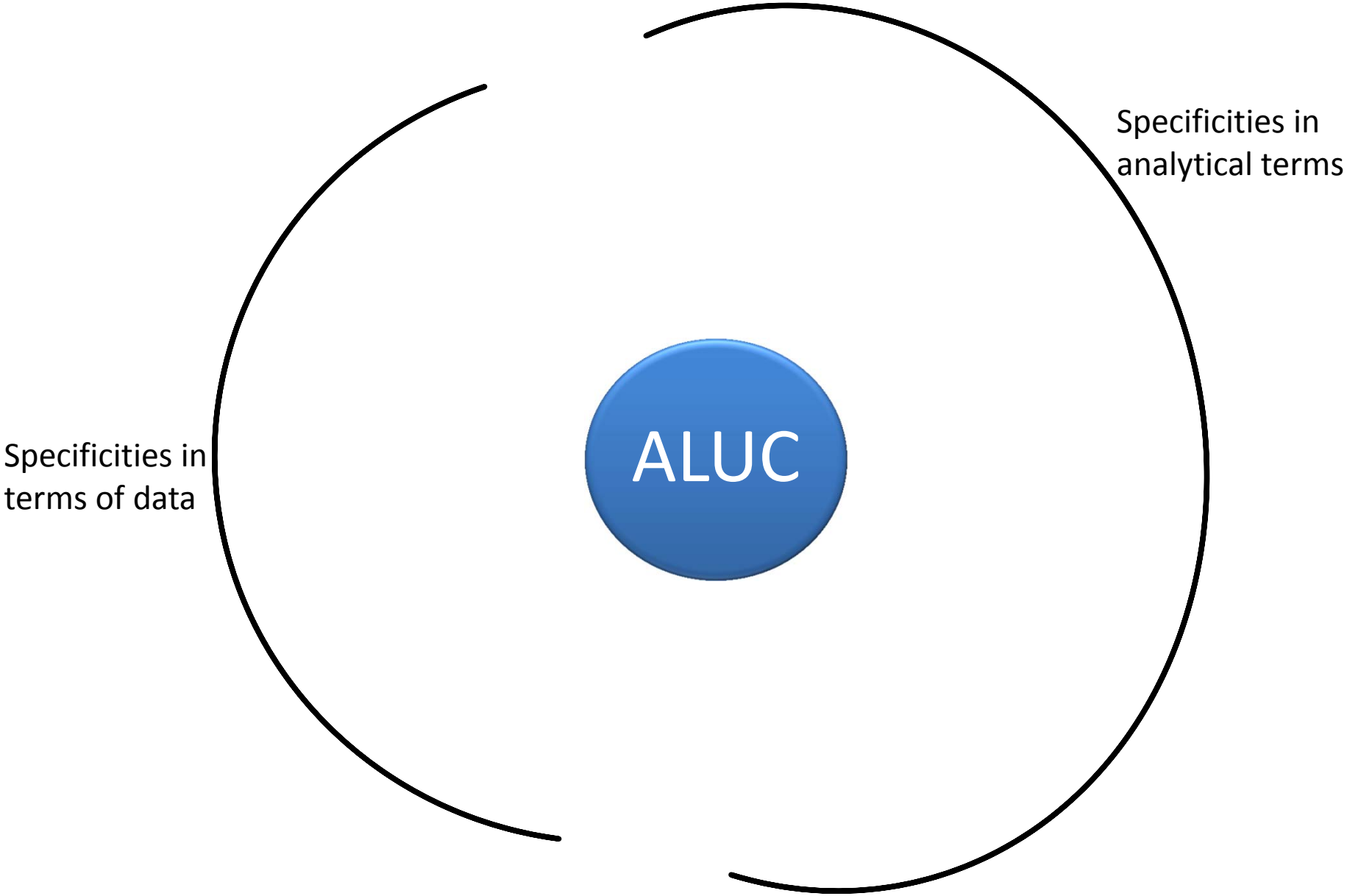
4 Mosaic systems
- Mosaic landscape
- Populated areas mosaic landscape

5 Forest
- Populated areas with forests
- Remote forests

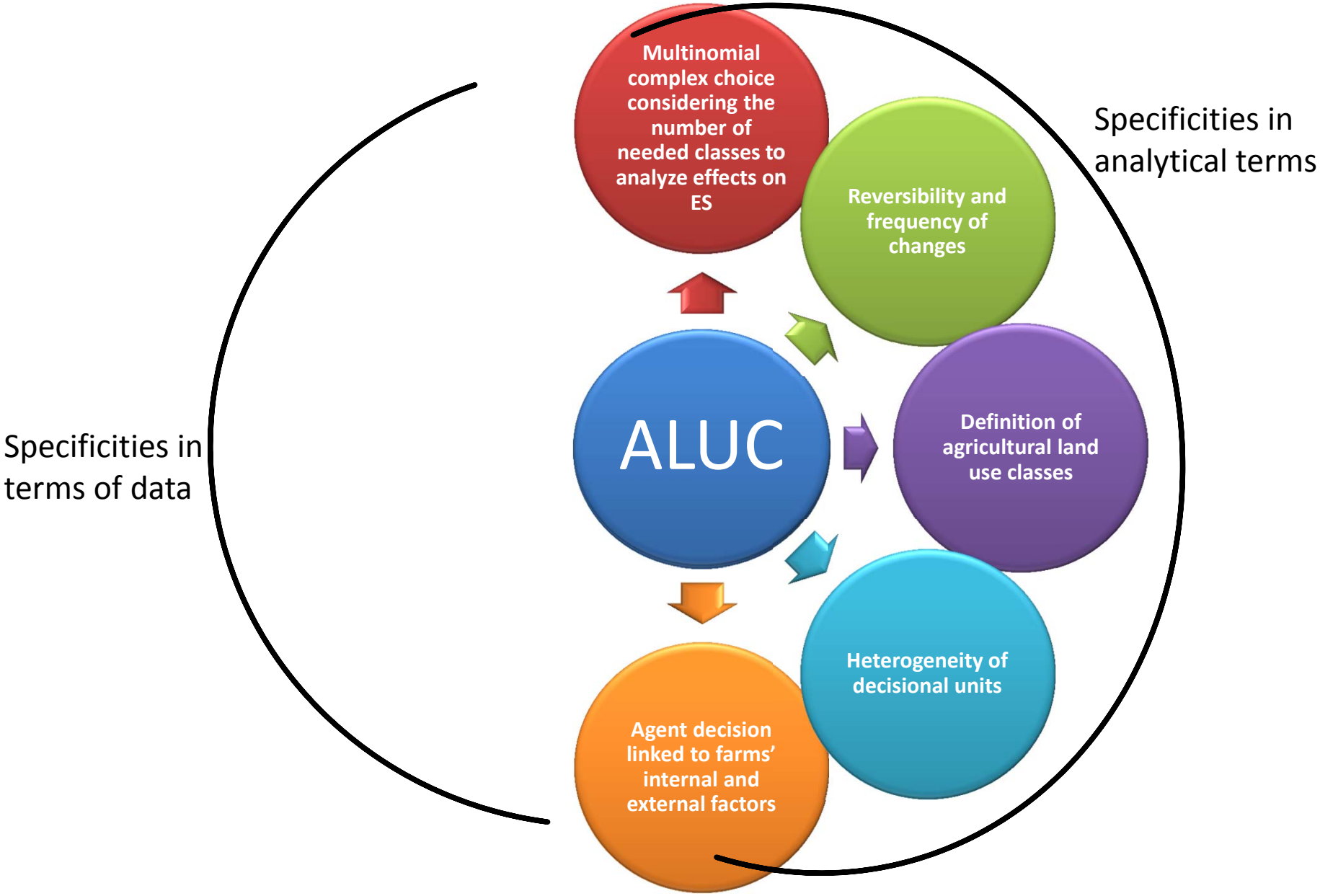
6 Bare soils
- Accessible bare soils



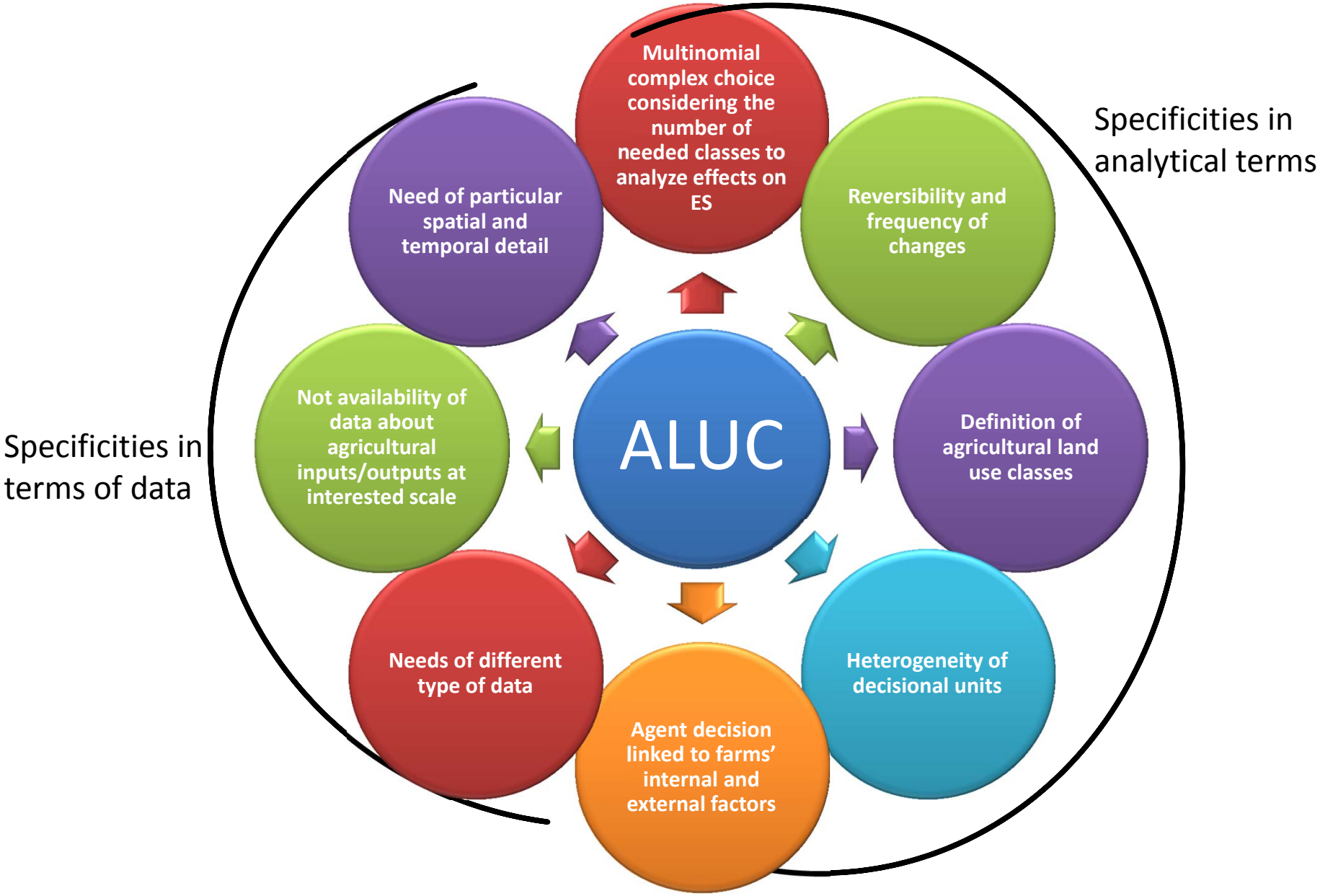
Les changements d'usage de sol agricole



Les changements d'usage de sol agricole



Les changements d'usage de sol agricole



Les changements d'usage de sol agricole

Typologie d'exploitation (Land System)

Land Cover
- Type de culture

Land Management
- Assolement
- Nombre de cultures
- Diversité d'usage
- Age de l'exploitant
- Chiffre d'affaire
- Pourcentage de surface irriguée
- (Itinéraires techniques)

Land Structure
- Surface de l'exploitation
- Surface des parcelles
- Nombre total de parcelle

Déterminants des dynamiques

Géographiques
- Distance de la ville
- Distance des routes
- Pente, exposition

Ecolo/agronomiques
- Disponibilité d'eau
- Type de sol
- Caractéristiques climatiques
- Potentiel de production

Socio-économiques
- Prix des produits
- Structure de la filière

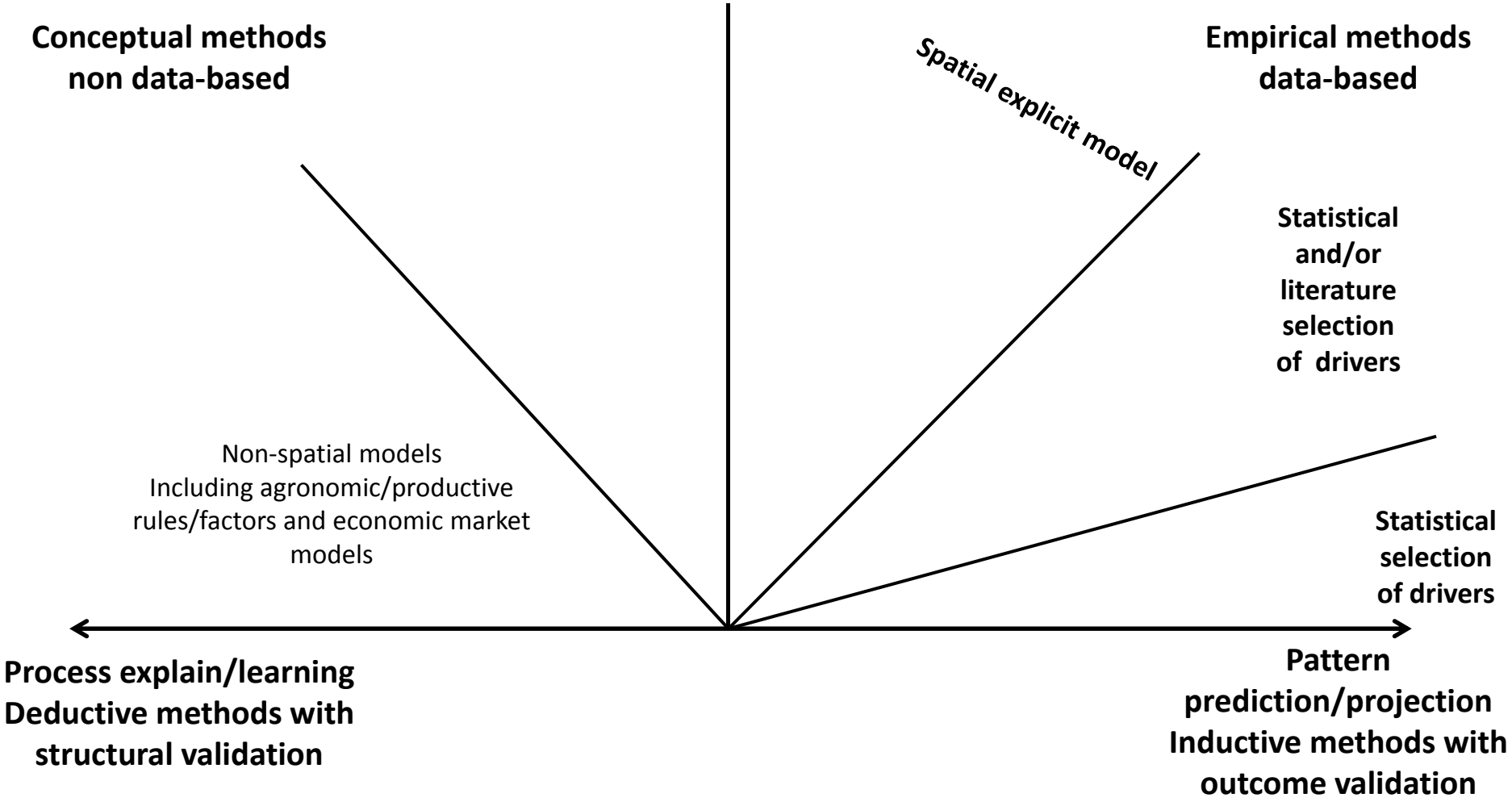
Réglementaires
- Zones protégées,…

Trajectoires de changement

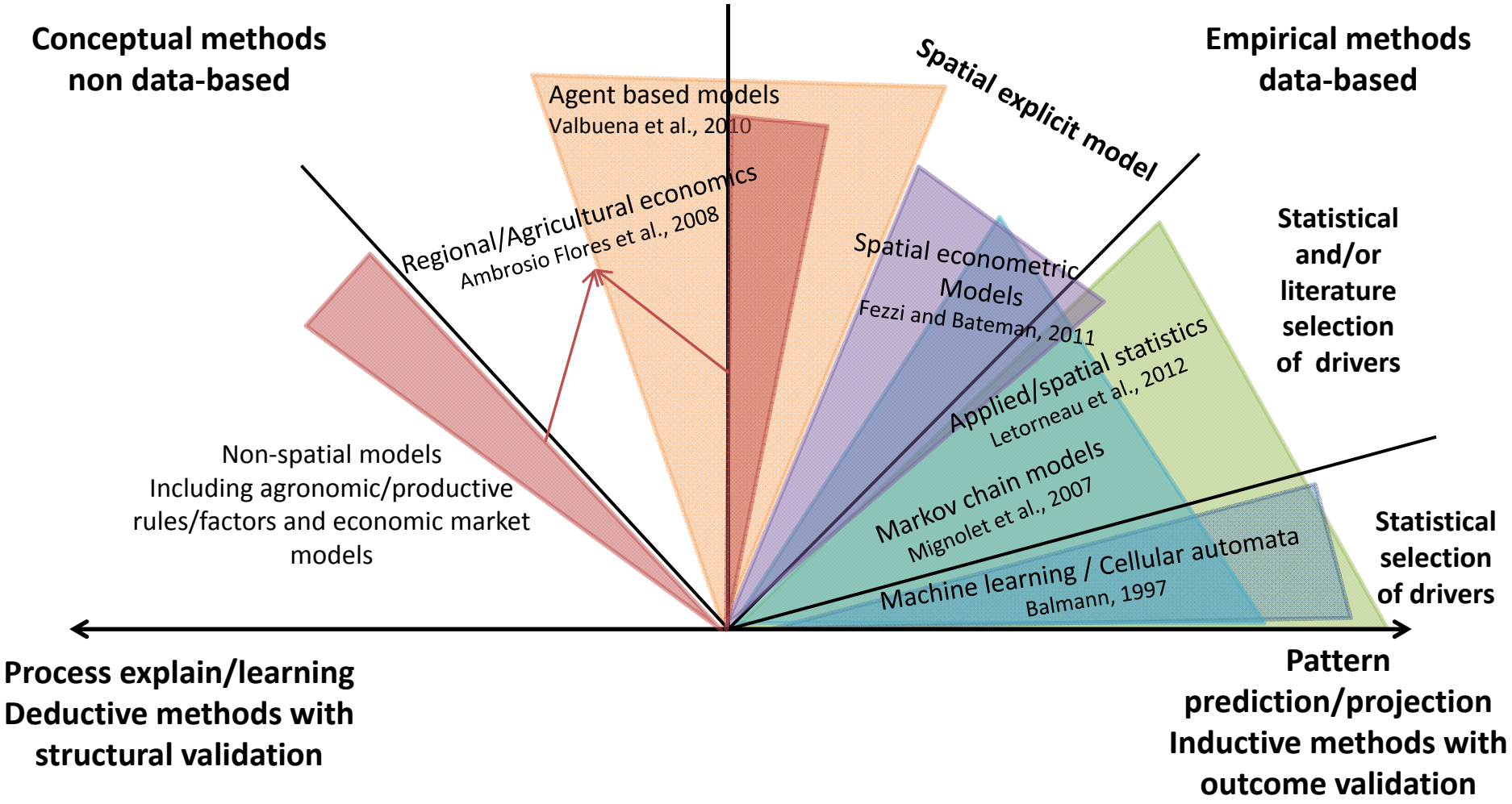
- Intensification de la production
- Evolution de la surface irriguée
- Passage à des cultures plus spécialisées
- Evolution de la diversité
- Changements des itinéraires techniques
- Extensification
- Passage à des cultures extensives
- Evolution de la surface moyenne des parcelles
- Evolution du nombre des parcelles
- Marginalisation
- Diminution de la rentabilité
- Evolution de la surface de l'exploitation
- Evolution de l'âge moyen de l'agriculteur

Analyse diachronique

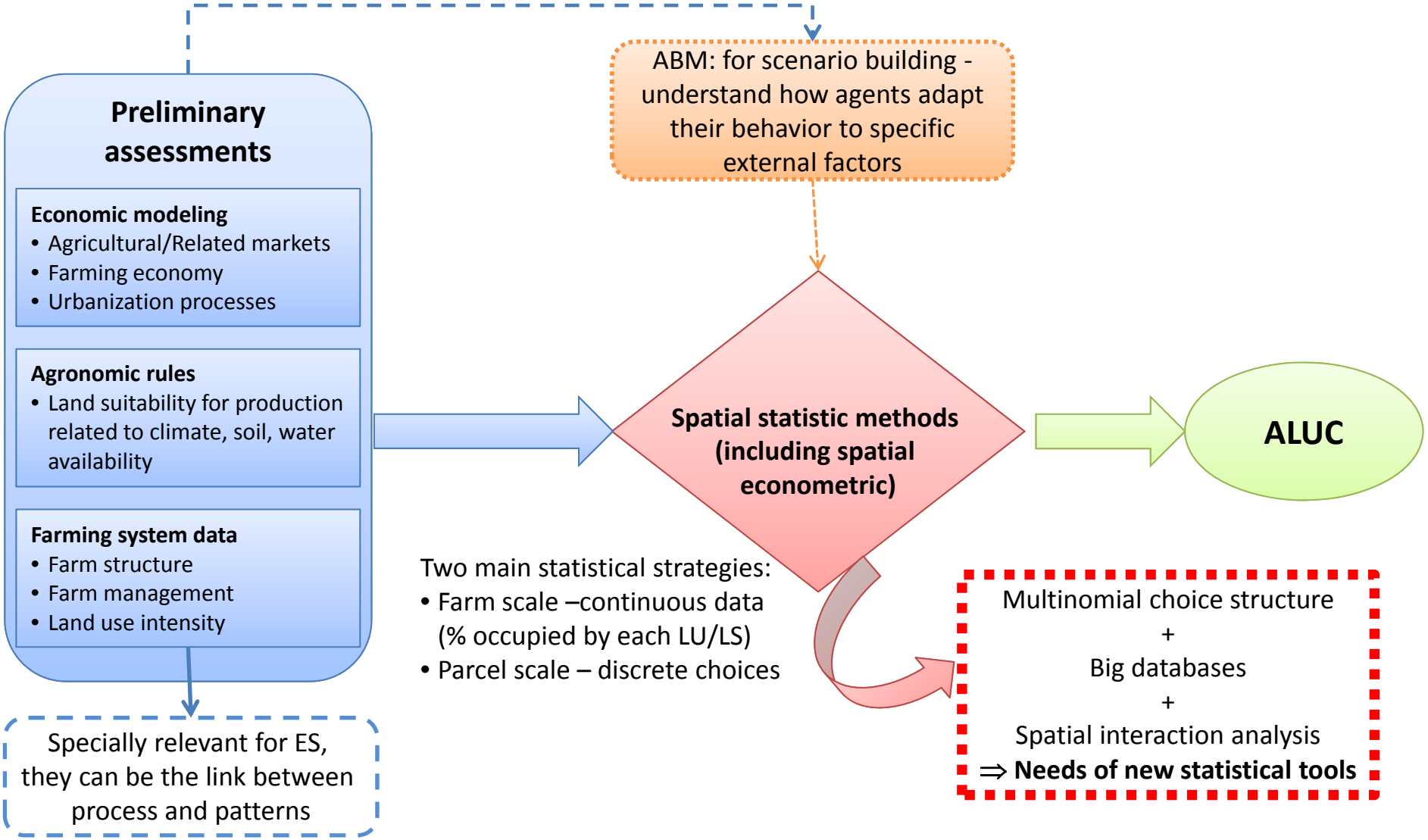
Les approches méthodologiques aux changements agricoles



Les approches méthodologiques aux changements agricoles



Possibles développements: couplage de modèles / hybridation



References

- Debolini M., Schoorl J.M., Temme A.J.A.M., Galli M., Bonari E., (2013). Changes in agricultural land use will affect future soil patterns: a case study in southern Tuscany (Italy). Land Degradation and Development. DOI: 10.1002/ldr.2217.
- Ellis, E.C., Ramankutty, N., 2008. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. Frontiers in Ecology and the Environment 6 (8), 439-447.
- Foley J.A. et al., 2005. Global Consequences of Land Use. Science 309, 570.
- Hesperger A.M., Gennaio MP, Verburg PH, Burgi M., 2010. Linking land change with driving forces and actors: four conceptual models. Ecology and Society, 15(4), 1.
- Letourneau, A., Verburg, P.H., Stehfest, E., 2012. A land-use systems approach to represent land-use dynamics at continental and global scales. Environmental Modelling and Software 33, 61-79.
- Mignolet, C., Schott, C., Benoit, M., 2007. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: methods for agronomic approaches on a regional scale. Sci Total Environ 375, 13-32.
- Schaller, N., Lazrak, E.G., Martin, P., Mari, J.-F., Aubry, C., Benoît, M., 2011. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. Landscape Ecology 27, 433-446.
- Valbuena, D., Verburg, P.H., Veldkamp, a., Bregt, A.K., Ligtenberg, A., 2010. Effects of farmer' decisions on the landscape structure of a Dutch rural region: An agent-based approach. Landscape and Urban Planning 97, 98-110.
- Veldkamp A, Fresco LO, 1996. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. Ecol Model 91
- Verburg, P.H. and Overmars, K.P., 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. Landscape Ecology 24(9): 1167-1181.
- Verburg, P.H., van de Steeg, J., Veldkamp, A., Willemen, L., 2009. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. Journal of Environmental Management 90, 1327-1335.
- Verburg P.H., 2014 The representation of human-environment interactions in land change research and modelling. In: Understanding Society and Natural Resources. Ed: Michael J. Manfredo, Jerry J. Vaske, Andreas Rechkemmer, Esther A. Duke. Part III, pag: 161-177.

Merci de votre attention

Marta Debolini – UMR EMMAH
marta.debolini@paca.inra.fr