

# DÉTERMINANTS DU CHANGEMENT DU COUVERT FORESTIER DEPUIS 1860 DANS LE PARC NATUREL RÉGIONAL DU LUBERON ET IMPLICATIONS POUR LA RÉPARTITION DES FORÊTS ACTUELLES

JULIET ABADIE<sup>a</sup> – JEAN-LUC DUPOUEY<sup>b</sup> – CATHERINE AVON – XAVIER ROCHEL<sup>c</sup> –  
ALINE SALVAUDON – THIERRY TATONI<sup>d</sup> – LAURENT BERGÈS<sup>e</sup>

À la suite de la dernière glaciation, la forêt est progressivement devenue prédominante dans les paysages d'Europe (Kaplan *et al.*, 2016) pour ensuite diminuer au profit de l'agriculture depuis le Néolithique (Barbier *et al.*, 2010). Après des siècles de diminution en France, la couverture forestière a subi une rapide augmentation au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Cette transition forestière est principalement causée par un exode rural, une augmentation des rendements agricoles et le développement des infrastructures de transport, tout cela réduisant le besoin en terres agricoles et de subsistance locale (Cinotti, 1996 ; Koerner *et al.*, 2000).

À une échelle globale, les modifications d'usage des terres induisent une perte de biodiversité liée à la destruction des habitats et à une homogénéisation du paysage (Foley *et al.*, 2005 ; Lambin et Geist, 2006). Bien que l'homme reste à l'origine des modifications majeures des occupations du sol, ses actions sont contraintes ou facilitées par des facteurs externes (Bürgi *et al.*, 2004), généralement regroupés en deux catégories : les facteurs biophysiques (climat, topographie, sol) et les facteurs socioéconomiques (taille de la population, réseau d'infrastructures, etc.) (Mitsuda et Ito, 2011). Les principaux facteurs liés à l'abandon des terres agricoles et à la reconquête forestière sont la pente, la productivité des sols, la distance aux routes et la distance aux forêts préexistantes : la reconquête forestière se produit sur des sols plus pentus et moins productifs, loin des routes et plus près des forêts préexistantes (Flinn *et al.*, 2005 ; Wulf *et al.*, 2010 ; Mitsuda et Ito, 2011). Distinguer les poids respectifs de ces différents facteurs permet de mieux comprendre les mécanismes et l'implication de ces changements d'usage (Van Doorn et Bakker, 2007).

Notre étude se situe en région méditerranéenne, caractérisée par de fortes contraintes biophysiques, limitant les ressources en eau (étés chauds et secs, substrat calcaire dur contenant beaucoup de gros cailloux) et induisant un système de production agricole adapté, composé notamment de vignes, oliveraies et lavandaies. Le relief a par ailleurs contraint les paysans à s'adapter aux terrains en pente : cultures en terrasses et pâturage extensif caractérisent le paysage méditerranéen traditionnel. L'étude des paysages méditerranéens est donc particulièrement intéressante

a Irstea, UR RECOVER, F-13000 Aix-en-Provence, France

b Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR Silva, F-54000 Nancy, France

c Université de Lorraine, LOTERR, F-54000 Nancy, France

d Aix Marseille Université, Avignon Université, CNRS, IRD, IMBE, F-13000 Marseille, France

e Université Grenoble Alpes, Irstea, UR LESSEM, F-38402 Saint-Martin-d'Hères, France

pour quantifier et démêler les effets respectifs des facteurs influençant les usages des terres et leurs changements. De plus, ces facteurs de changement peuvent être différents de ceux rencontrés dans les paysages tempérés, du fait de conditions topographiques et d'une histoire socioculturelle différente.

Comprendre la dynamique à long terme des paysages nécessite de recourir à des cartes anciennes de bonne qualité. En France, la carte d'état-major (1818-1866) est considérée comme la source la plus intéressante, car assez précise et exhaustive pour ce qui concerne les forêts, mais restant à une échelle suffisamment petite pour être vectorisée dans un délai raisonnable. Par ailleurs, repérer les éventuelles discontinuités temporelles des changements d'usage des terres suppose de disposer de cartes ou photographies aériennes à différentes dates. Enfin, la dynamique de la couverture forestière ne peut être bien comprise qu'en combinant les transitions entre usages du sol (d'où vient la forêt ?) et les facteurs de changement de la couverture forestière (pourquoi cette transition a-t-elle eu lieu à cet endroit ?).

Dans cette étude menée sur le parc naturel régional du Luberon, nous nous sommes basés sur trois sources cartographiques : la carte d'état-major (1860), les photographies aériennes historiques réalisées par l'IGN (1958) et les cartes d'occupation du sol actuelles (2010). Nous avons tout d'abord caractérisé les transitions des usages du sol entre 1860 et 2010 en précisant la persistance et les changements des usages et en identifiant aux dépens de quels usages la reconquête forestière avait eu lieu. Ensuite, nous avons identifié quels facteurs biophysiques et socioéconomiques expliquaient la localisation de la forêt en 1860, 1958 et 2010 ; nous avons comparé comment leur effet avait évolué entre 1860 et 2010 ; nous avons également recherché quels facteurs parmi les facteurs biophysiques, socioéconomiques et la distance aux forêts préexistantes expliquaient la localisation de la reconquête forestière ; puis nous avons analysé comment leurs effets avaient évolué entre 1860 et 2010. Ces analyses nous ont montré notamment que les variables biophysiques ont joué un rôle important dans la localisation de la reconquête forestière et suggèrent clairement que les caractéristiques biophysiques des forêts actuelles varient selon leur continuité temporelle. Une troisième série d'analyses a donc visé à caractériser les différences biophysiques entre forêts selon leur ancienneté : forêts présentes depuis 1860, dites anciennes (FA) ; forêts apparues après 1860, dites récentes (FR) et forêts apparues après 1958, dites très récentes (FRR).

## **ZONE D'ÉTUDE**

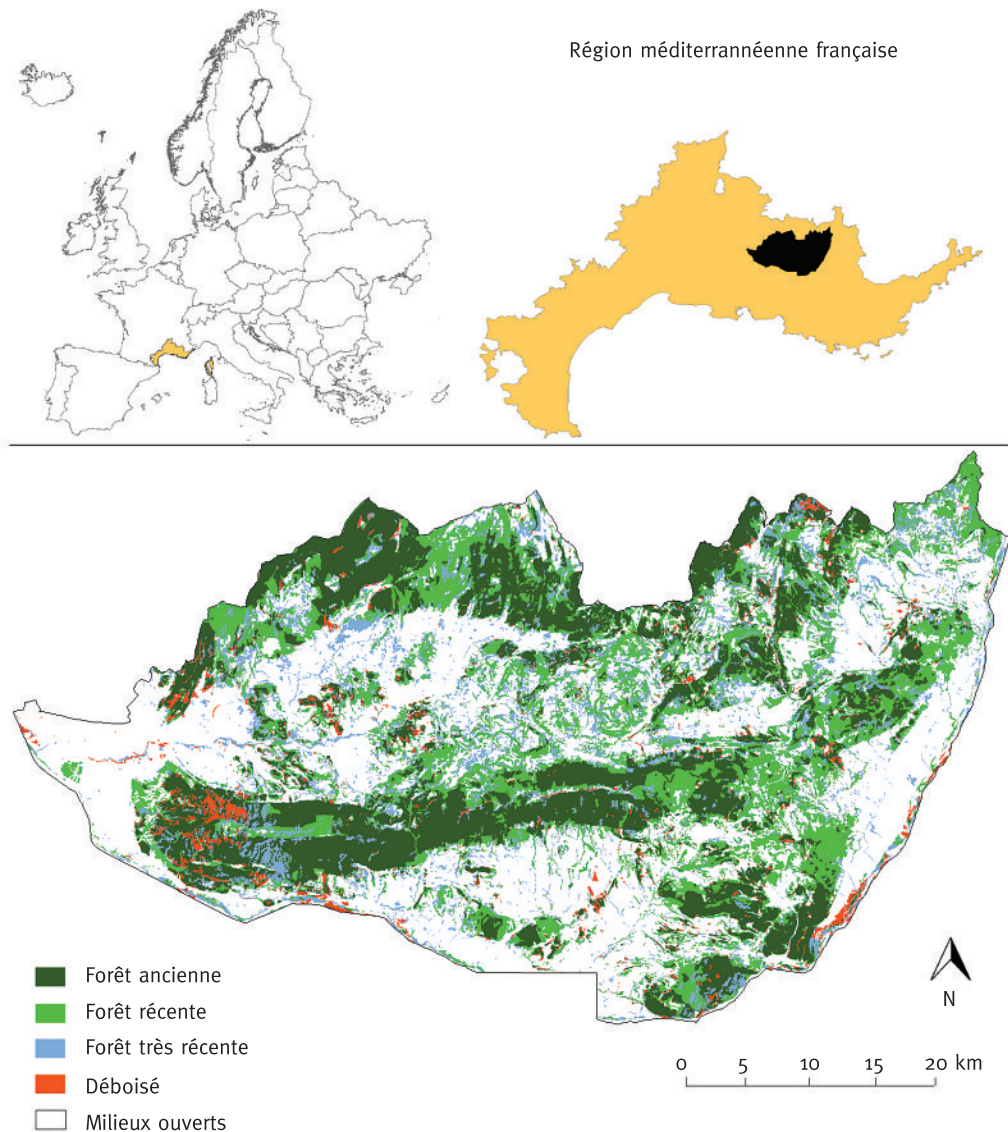
La zone d'étude est le parc naturel régional du Luberon (195 413 ha), situé dans la région méditerranéenne du sud-est de la France (figure 1, p. 373). Ce territoire rural est essentiellement forestier (55 % de forêts).

Historiquement, les forêts étaient principalement exploitées en taillis pour le charbon, le feu de bois, l'écorçage (chênes). Jusqu'à la moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, l'économie de la région était basée sur un système agrosylvopastoral, entraînant un usage multiple de la forêt : temporairement mises en culture (essartage) ; export du buis et des feuilles mortes pour enrichir les cultures ; pâturage par les troupeaux pour compléter leur régime. Entre 1830 et 1860, la population rurale a atteint un pic et la couverture forestière son minimum. Des lois ont alors été promulguées en 1860 et 1864 pour restaurer la forêt et stopper l'érosion des sols (Fourchy, 1963 ; Gilbert, 1989). La réglementation du pâturage en forêt et la mise en place d'un nouveau système économique ont rendu le pastoralisme extensif non rentable, poussant les paysans à changer progressivement leurs pratiques (Chalvet, 2006). Dans ce contexte, aussi caractérisé par la révolution industrielle, la région a subi un extraordinaire exode rural. La population rurale a continué de décliner pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, notamment à cause de la Première Guerre mondiale. Après 1960, la

population rurale a recommencé à augmenter avec la rurbanisation, le secteur tertiaire se développant rapidement au profit du secteur agricole. En 1977, le parc naturel régional du Luberon (PNRL) a été créé avec pour objectif principal de concilier le développement économique et la préservation des activités rurales traditionnelles et des espaces naturels.

**FIGURE 1** ZONE D'ÉTUDE ET ÉVOLUTION DE LA COUVERTURE FORESTIÈRE DEPUIS 1860, SELON LES COUVERTURES DE 1860, 1958 ET 2010

Forêt ancienne : persistante depuis 1860 ; forêt récente : développée entre 1860 et 1958 ; forêt très récente : développée entre 1958 et 2010 ; déboisé : déboisé entre 1860 et 2010.



## MÉTHODE

La démarche se base sur l'utilisation de données cartographiques portant sur les usages passés et actuels ainsi qu'une liste de facteurs biophysiques et socioéconomiques. Les données ont toutes été spatialisées et extraites au niveau de 1 916 points répartis selon un maillage systématique de 1 000 × 1 000 m couvrant l'ensemble de la zone d'étude.

### Cartes d'usages des sols

La carte d'usage des sols de 1860 est issue de la vectorisation des usages sur la carte d'état-major (1858 à 1861 sur notre zone d'étude) (Salvaudon *et al.*, 2012), avec une échelle de 1/40 000 et une erreur médiane de positionnement de 26 m. Les usages de 1958 sont issus de la photo-interprétation au niveau de chaque point des photographies aériennes. La carte d'usage des sols de 2010 résulte d'une combinaison de cartes actuelles (BD Forêt® v2, BD TOPO® Bâti et occupation du sol régionale). Pour ces trois dates, cinq classes d'usage ont été retenues à partir des informations d'usage fournies par la carte d'état-major : forêt, culture, pâture, bâti et autre. Les informations de 1958 et 2010 correspondent à des occupations du sol plutôt qu'à des usages, puisque issues de photo-interprétation, mais ces occupations correspondent aux usages cartographiés sur la carte d'état-major. En 1860, la pâture semble se situer en garrigue et au niveau des pelouses de crête. Par conséquent, la garrigue et les pelouses pâturées ont été utilisées pour qualifier l'usage « pâture » en 1958 et 2010. À toutes les dates, la classe « culture » regroupe tous les types de culture et les prairies de fauche.

### Déterminants biophysiques, socioéconomiques et paysagers

Notre analyse a porté sur 11 facteurs biophysiques et 7 facteurs socioéconomiques (tableau 1, p. 375). Parmi les facteurs biophysiques, nous avons retenu l'altitude, la pente, l'exposition, la position topographique [TPI, altitude relative d'un point par rapport à son environnement : au-dessus (valeur positive) ou en dessous (valeur négative)], le type de substrat géologique, la distance au plus proche cours d'eau (D.RIV), ainsi que les caractéristiques physiques de la couche superficielle du sol (0-20 cm) : réserve utile en eau (RU), pourcentage de sables (SABLES) et d'éléments grossiers (EG) (Ballabio *et al.*, 2016). Les facteurs socioéconomiques pris en compte sont la densité de population communale (DENS.POP), la densité de population agricole communale (DENS.AGRI), la distance à la plus proche route principale (D.ROUTE), la distance au plus proche bâti (D.BATI), la distance au bourg (D.CENTRE), la différence d'altitude avec le bourg (DIFF.ALT) et la distance au plus proche canal (D.CANAL). Enfin, la distance à la plus proche lisière de forêt préexistante (D.FOR.PREEX) a été utilisée comme variable explicative de la reconquête forestière.

Dans tous les cas, les variables de distance correspondent aux distances euclidiennes entre chaque point et la lisière du plus proche objet de la couche considérée. Toutes les variables utilisées correspondent à la date disponible la plus proche de chacune des trois dates analysées (1860, 1958 et 2010), à l'exception des facteurs biophysiques, de la position du bourg et des canaux, considérés comme invariants.

TABLEAU I Facteurs biophysiques, socioéconomiques et distance aux forêts préexistantes :  
gamme de variation, unité, source et date de référence utilisée  
par rapport aux trois dates analysées (1860, 1958 et 2010)

Facteur	Gamme et unité	Source	Date disponible
Biophysique			
Altitude	55 à 1 210 m	Modèle numérique de terrain (MNT) 25 m	
Pente	0 à 98 %	MNT 25 m	
TPI	- 26,2 à 25,9 m	MNT 25 m ; calculé dans un rayon de 113 m (Jeness <i>et al.</i> , 2013)	
Exposition	Indice d'exposition : - 1 (Sud) à 1 (Nord)	MNT 25 m ; cosinus de l'exposition	
Type de substrat	3 catégories : 44 % meuble (alluvions, colluvions, molasses), 38 % dur (calcaires durs, conglomérats) et 18 % autres substrats non productifs (acides, marnes, argiles)	Carte géologique 1/50 000 ©BRGM	
RU	0,08 à 0,13	ESDAC [ <a href="http://esdac.jrc.ec.europa.eu/">http://esdac.jrc.ec.europa.eu/</a> ; (Panagos <i>et al.</i> , 2012)] ; résolution 500 m	
SABLES	14,2 à 57,3 %	Idem	
EG	6,7 à 36,9 %	Idem	
D.RIV	0,8 à 7 294 m	BD Carthage® 2013 ( <a href="http://professionnels.ign.fr/bdcarthage">http://professionnels.ign.fr/bdcarthage</a> )	
Socioéconomique			
DENS.POP	1861 : 5 à 163,1 ; 1954 : 1,7 à 323,4 ; 2012 : 1,6 à 551,4 hab/km <sup>2</sup>	Archives ( <a href="http://archives.vaucluse.fr">http://archives.vaucluse.fr</a> ; <a href="http://www.archives04.fr">http://www.archives04.fr</a> ) et INSEE ( <a href="https://www.insee.fr">https://www.insee.fr</a> )	1861, 1954, 2012
DENS.AGRI	1851 : 4,2 à 58 ; 1968 : 0 à 23,7 ; 1999 : 0 à 11,6 hab/km <sup>2</sup>	Idem	1851, 1968, 1999
D.BATI	1860 : 0 à 2 414 ; 1958 : 0 à 2 598 ; 2010 : 0 à 2 697 m	Cartes d'usage de 1860, 1958 et 2010 (bâti)	1860, 1958, 2010
D.ROUTE	1860 : 1 à 7 225 ; 1958 : 0 à 2 860 ; 2009 : 0 à 2 642 m	Cartes des routes principales de 1860 et 1958 ; BD Route® 2009	1860, 1958, 2009
D.CENTRE	41,2 à 10 300 m	Bourg	
DIFF.ALT	- 294 à 789 m	MNT 25 m	
D.CANAL	0,1 à 19 060 m	BD Carthage® 2013	
Paysager			
D.FOR.PREEX	1958 : 0 à 3 174 ; 2010 : 0 à 3 209 m	Cartes d'usage des sols de 1860 et 1958 (forêt)	1860, 1958

## Analyse

- *Transitions des usages du sol*

Les transitions des usages du sol ont été obtenues en croisant les usages de 1860, 1958 et 2010 au niveau de chaque point et synthétisées dans une matrice des transitions qui permet de quantifier le gain et la perte totale, le changement net et la persistance ainsi que les transitions passées et futures de chaque usage du sol (Pontius *et al.*, 2004). La matrice des transitions a été convertie en schéma des transitions.

- *Effet des facteurs biophysiques, socioéconomiques et paysagers sur la forêt et la reconquête forestière*

L'effet des facteurs a été analysé par régression logistique (Van Doorn et Bakker, 2007) en appliquant un modèle additif généralisé et en tenant compte de l'autocorrélation spatiale dans les données, grâce à l'ajout d'un facteur spatial dérivé des coordonnées géographiques, selon la démarche proposée par Eitzel *et al.* (2016).

Dans un premier temps, nous avons construit trois modèles pour analyser l'effet des facteurs sur la présence ou l'absence de la forêt (un par date, ensemble des points), puis deux modèles pour analyser l'effet des facteurs sur la reconquête forestière entre 1860 et 1958 et entre 1958 et 2010 : le premier modèle a été appliqué sur les 1 400 points non situés en forêt en 1860 et le second sur les 1 115 points non situés en forêt en 1958. Dans ces deux modèles, nous avons comparé les points qui sont restés non forestiers entre deux dates à ceux qui le sont devenus. Pour chacun des cinq modèles, après avoir testé chaque prédicteur dans un modèle simple, un modèle multiple a été construit en intégrant tous les prédicteurs significatifs non corrélés entre eux. Un modèle final parcimonieux a été obtenu en éliminant pas à pas les prédicteurs non significatifs, jusqu'à ce que le modèle ne soit constitué que de prédicteurs significatifs. Une partition de la déviance a ensuite permis de déterminer les parts propres et communes des effets de chaque groupe de prédicteurs (voir Van Doorn et Bakker, 2007) : biophysique, socioéconomique et spatial pour les trois modèles de forêt et biophysique, socioéconomique, distance aux forêts préexistantes et spatial pour les deux modèles de reconquête forestière. Les variables démographiques ont été transformées en logarithme et les variables de distance en racine carrée avant analyse pour respecter les critères de normalité de résidus. Les données ont été traitées à l'aide des logiciels ArcGIS 10.3 et R v.3.2.5.

Dans un second temps, nous avons analysé la répartition des forêts actuelles selon leur ancienneté (FA : présentes depuis 1860 ; FR : apparues après 1860 ; FRR : apparues après 1958) et les espaces non forestiers en fonction des principaux déterminants biophysiques de la localisation de la forêt aux trois dates et de la reconquête forestière.

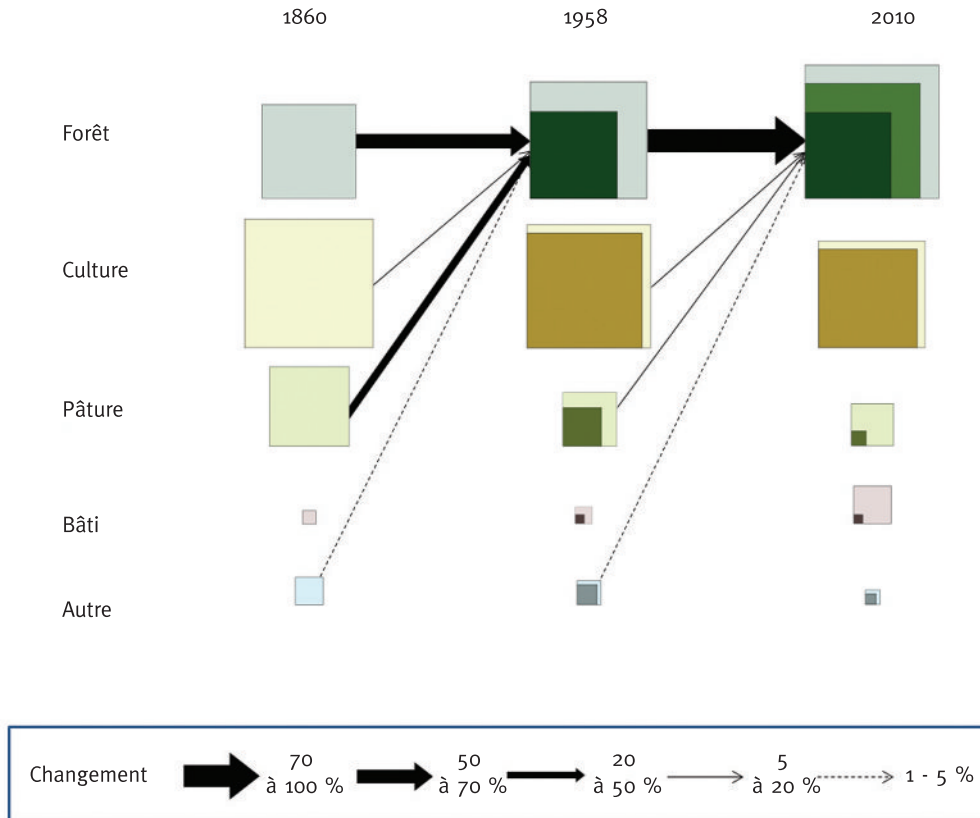
## RÉSULTATS

### Transitions des usages du sol entre 1860 et 2010

En 1860, les trois usages les plus fréquents sont la culture, la forêt et la pâture, la culture étant dominante. En 2010, la forêt devient majoritaire et la pâture minoritaire. Entre 1860 et 2010, la forêt et la surface bâtie ont augmenté de manière continue de + 103 % et de + 664 %, tandis que culture et pâture ont diminué de – 31 % et – 72 % (figure 2, p. 377). En 1958, 56 % de la forêt était issue de forêts existant en 1860, 27 % de pâture et 16 % de terres arables. En 2010, 74 % de la forêt était issue de forêts existant en 1958, 12 % de terres cultivées et 13 % de pâture. À l'inverse, environ 79 % des pâtures de 1860 et 28 % des cultures de 1860 ont été reboisées en 2010.

**FIGURE 2** **TRANSITION DES USAGES DU SOL ENTRE 1860 ET 2010**

Chaque carré est proportionnel à la surface de chaque usage à une date donnée. La persistance est représentée par un carré plus sombre inclus dans le carré de la surface totale. Les flèches représentent le pourcentage de transition vers la forêt entre 1860 et 1958 (ou entre 1958 et 2010) par rapport à la surface totale de forêt en 1958 (ou 2010). Les autres transitions (entre les autres usages, et de la forêt vers les autres usages) n'ont pas été représentées pour plus de clarté.



### Déterminants de la distribution spatiale de la forêt et de la reconquête forestière

- *Forêt en 1860, 1958 et 2010*

De manière générale depuis 1860, la localisation de la forêt dépend principalement de la pente, du substrat et de la distance au bâti (tableau II, p. 378) : la forêt est plus fréquemment située sur des pentes fortes, sur des substrats durs (figure 3, p. 379) et éloignée du bâti. De 1860 à 2010, les effets de la pente et de la distance au bâti augmentent alors que l'effet du type de substrat diminue. Les modèles expliquent de 46 à 50 % de la déviance aux trois dates. Le ratio entre les effets propres des facteurs biophysiques et les effets propres des facteurs socioéconomiques a fortement augmenté et passe de 0,9 en 1860 à 4,1 en 2010 (tableau II, p. 378).



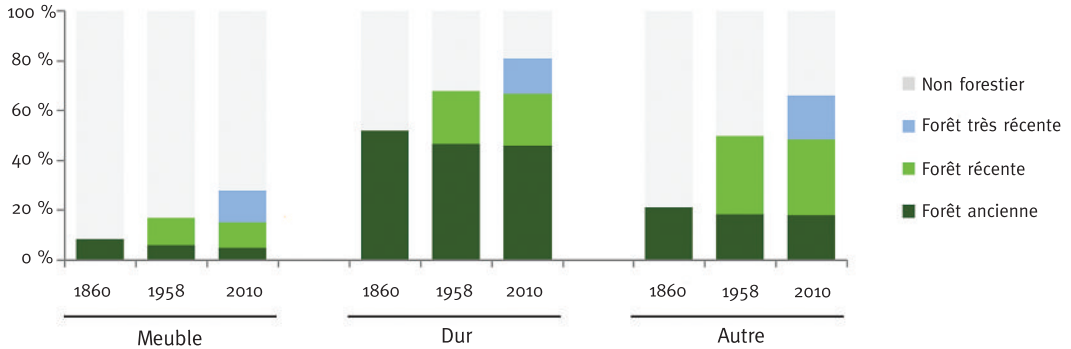
**TABEAU II Modèles GAM finaux appliqués à l'occupation forêt aux trois dates (1 916 points) et à la reconquête forestière entre 1860 et 1958 (1 400 points) ou entre 1958 et 2010 (1 115 points), avec partition de la déviance**

Les valeurs présentées sont les valeurs du  $\chi^2$  des prédicteurs et la déviance expliquée (en %) pour chaque modèle utilisé pour la partition de déviance. Les variables exposition, RU, DENS.POP, DENS.AGRI, et D.CANAL ont été analysées, mais n'étaient pas significatives. Une relation positive entre type d'usage et variable explicative est indiquée par "+", une relation négative par "-" et une courbe en cloche par "opt". BIO = effet propre des facteurs biophysiques ; SOC = effet propre des facteurs socioéconomiques ; SPA = effet propre du facteur spatial ; D.FOR = effet propre de la distance aux forêts préexistantes. Toutes les autres lignes correspondent aux effets communs des différentes combinaisons de ces groupes de facteurs (JE = effet joint).

	Forêt			Reconquête forestière	
	1860	1958	2010	1860-1958	1958-2010
Fréquence	0,27	0,42	0,55	0,25	0,24
Signification et sens des effets					
Facteurs biophysiques					
Altitude	-	-	20*** (+)	-	-
Pente	29*** (+)	81*** (+)	138*** (+)	97***	56***
TPI	-	35*** (-)	18** (-)	-	-
Type de substrat	26***	20***	17***	25***	-
EG	17*** (+)	19*** (+)	18*** (+)	6* (+)	-
SABLES	13* (opt)	-	-	-	-
D.RIV	-	-	32*** (-)	-	-
Facteurs socioéconomiques					
D.ROUTE	9** (+)	-	-	-	-
D.BATI	60*** (+)	101*** (+)	99*** (+)	61***	24***
D.CENTRE	23*** (+)	7** (+)	-	-	-
DIFF.ALT	9* (+)	9* (+)	7* (+)	-	-
D.FOR.PREEX				32***	60***
Facteur spatial	180***	136***	17*	74***	14***
Partition de la déviance					
BIO	4,65	8,95	10,15	10,5	3,4
SOC	5,05	4,2	2,5	3,8	1,8
SPA	11,9	7,9	1,2	7	1,5
JE(BIO,SOC)	2,9	3,75	3,85	- 0,1	- 0,3
JE(BIO,SPA)	5,4	4,15	9	4,8	2,7
JE(SOC,SPA)	3,85	2,8	1,95	0,7	0,7
JE(BIO,SOC,SPA)	15,85	16,35	18,05	2,25	0
D.FOR				2,3	4,7
JE(BIO,D.FOR)				1,3	3,9
JE(SOC,D.FOR)				0,5	1,2
JE(D.FOR,SPA)				0,2	0,5
JE(BIO,SOC,D.FOR)				0,2	- 0,1
JE(BIO,D.FOR,SPA)				5,05	11
JE(SOC,D.FOR,SPA)				- 0,1	1,5
JE(BIO,SOC,D.FOR,SPA)				- 0,6	0,6
Déviance totale expliquée	49,6	48,1	46,7	37,8	33,1



**FIGURE 3 PROPORTION DE FORÊT SUR LES DIFFÉRENTS TYPES DE SUBSTRAT (MEUBLE, DUR ET AUTRE) EN 1860, 1958 ET 2010**

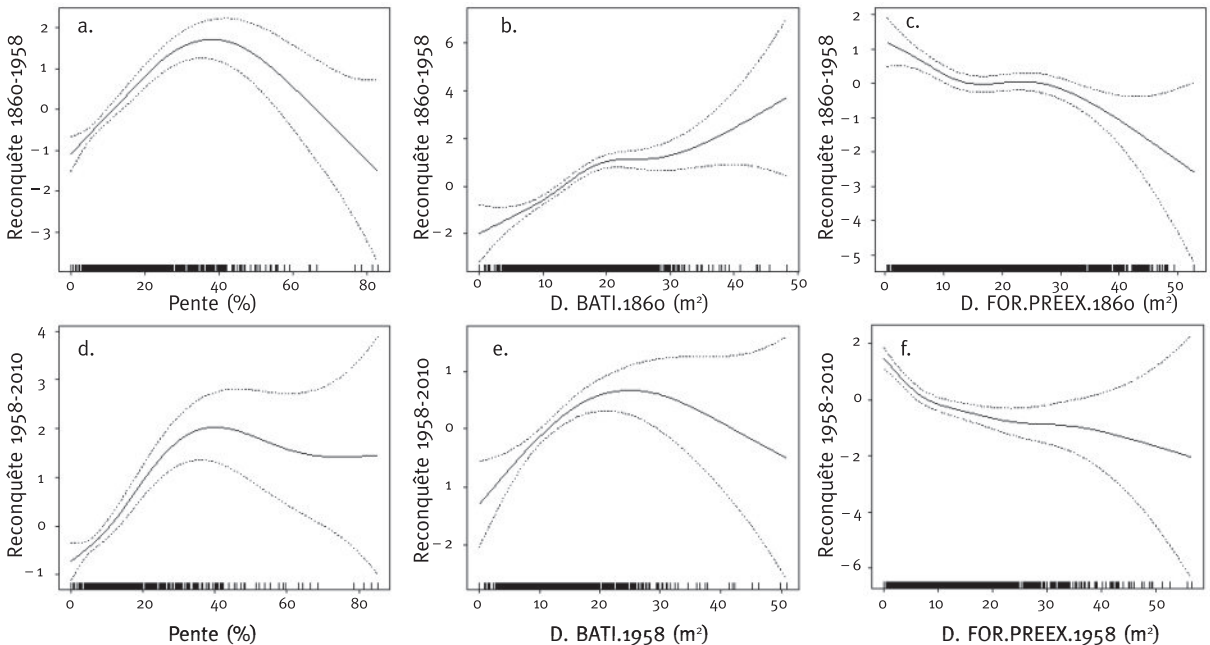


• *Reconquête forestière*

La reconquête forestière a eu lieu plus fréquemment dans des pentes de 35 à 40 %, loin du bâti et proche de la lisière des forêts préexistantes au cours des deux périodes (tableau II, p. 378 et figure 4, ci-dessous). La reconquête forestière est aussi plus fréquente sur sols improductifs à

**FIGURE 4 COURBES DE RÉPONSE LISSÉE DU MODÈLE DE RÉGRESSION LOGISTIQUE DE RECONQUÊTE FORESTIÈRE DE 1860 À 1958 (a, b et c) ET DE 1958 À 2010 (d, e et f) EN FONCTION DE LA PENTE (a et d), LA DISTANCE AU BÂTI (b et e) ET LA DISTANCE AUX FORÊTS PRÉEXISTANTES (c et f)**

Les valeurs prédites sont représentées par un trait plein et les intervalles de confiance en pointillés. Les observations sont indiquées par des traits le long de l'axe des abscisses.



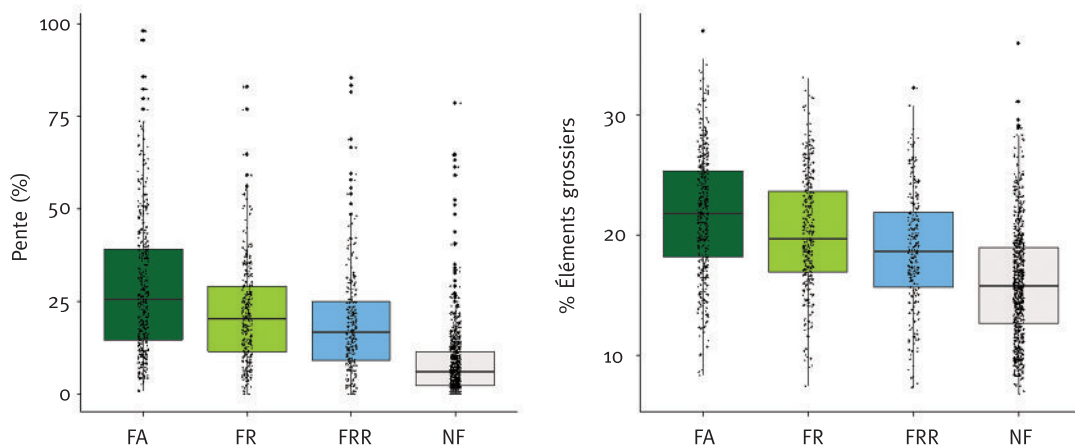
fort taux d'éléments grossiers, mais seulement au cours de la première période. L'analyse détaillée des courbes indique que les pentes supérieures à 40 % restent peu sujettes à reboisement jusqu'en 1958 mais que le phénomène est plus fréquent après 1958 (figure 4, p. 379). De la même manière, la courbe de réponse à l'effet distance au bâti est croissante sur la première période, ce qui indique que les secteurs les plus éloignés sont ceux qui se reboisent plus, alors que la courbe de réponse montre un optimum net entre 400 et 900 m au cours de la période suivante, probablement parce que la plupart des secteurs les plus éloignés sont déjà reboisés en 1958 (figure 4, p. 379). La pente et la distance au bâti expliquent mieux la reconquête forestière entre 1860 et 1958 qu'entre 1958 et 2010, alors que la proximité aux forêts préexistantes montre une tendance inverse.

Les deux modèles de reconquête forestière expliquent une part de déviance proche (38 % et 33 %). Pendant la première période, l'effet propre des facteurs biophysiques prédomine, alors qu'ensuite, l'effet propre de la distance aux forêts préexistantes est le plus fort. Une tendance remarquable est que tous les termes incluant les facteurs biophysiques et socioéconomiques (effets propres et communs) ont diminué entre les deux périodes, alors que tous ceux incluant la distance aux forêts préexistantes ont augmenté (tableau II, p. 378).

• Répartition des forêts actuelles selon leur continuité temporelle

Nous avons analysé la répartition des forêts actuelles selon la pente et la productivité des sols (type de substrat et pourcentage d'éléments grossiers). Les forêts anciennes sont plus fréquentes dans les pentes les plus fortes, sur substrat dur et avec un plus fort taux d'éléments grossiers (figure 3, p. 379 et figure 5, ci-dessous). On observe ensuite un gradient décroissant de pente et de teneur en éléments grossiers selon la durée décroissante de continuité des forêts (figure 5, ci-dessous). Les forêts récentes sont plus fréquentes que les autres forêts sur les substrats "autre" (de type marnes et argiles ou acides), alors que les forêts très récentes sont présentes sur tous les substrats, mais sont plus fréquentes que les autres forêts sur substrat meuble (figure 3, p. 379).

**FIGURE 5**  
**RÉPARTITION DES FORÊTS DE DIFFÉRENTES CONTINUITÉS**  
**(FA = forêt ancienne ; FR = forêt récente ; FRR = forêt très récente)**  
**ET DES ESPACES NON FORESTIERS (NF) SELON LA PENTE**  
**ET LE POURCENTAGE EN ÉLÉMENTS GROSSIERS DU SOL SUPERFICIEL (0-20 cm)**



## DISCUSSION

### Abandon de l'agriculture et du pastoralisme traditionnels et reconquête forestière

Le doublement de la surface forestière du parc naturel régional du Luberon confirme le contexte français de reconquête forestière depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (Cinotti, 1996 ; Koerner *et al.*, 2000). La forêt s'est principalement développée aux dépens des terres arables et pâturées suite à leur abandon, ce qui confirme la tendance régionale (Taillefumier et Piegay, 2003 ; Fabre et Vernet, 2006). Le parc naturel régional du Luberon a subi une très forte régression des pâtures entre 1860 et 1958, tandis que les terres arables ont diminué plus progressivement depuis 1860. Cette reconquête forestière résulte de (Lambin et Meyfroidt, 2010) :

- rétroactions socioécologiques : la réduction drastique de la couverture forestière aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles a entraîné des problèmes d'érosion des sols, qui ont débouché sur l'application de lois de protection de la forêt et de limitation du pâturage en forêt (lois de reforestation de 1860, 1864 et 1882) et de subventions pour restaurer la forêt (Fourchy, 1963 ; Chalvet, 2006). Au même moment, une crise agricole a causé la fin de la sériciculture et de la culture de garance et une baisse de la production viticole due au *Phylloxera*. Tout cela a entraîné en partie le déclin de la population rurale de la fin du XIX<sup>e</sup> à la moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

- facteurs socioéconomiques externes : le contexte politique et économique a renforcé l'exploitation forestière et les pratiques agricoles tournées vers la production. L'amélioration des rendements agricoles a réduit le besoin en surface agricole et a permis aux agriculteurs de nourrir leurs troupeaux avec du fourrage issu de prairies et de cultures, et donc d'abandonner les terres utilisées pour le pâturage extensif (forêts, pelouses, garrigues) (Gilbert, 1989).

La forêt s'est développée à partir des pâtures et cultures situées sur les pentes les plus fortes, les sols cultivés les moins productifs (substrats durs) et éloignés du bâti. Ces terres ont été abandonnées et boisées car non adaptées au nouveau système agricole à plus forts rendements (grands champs, équipements motorisés).

### Changements des facteurs d'évolution de la couverture forestière

De 1860 à 2010, la forêt est plus fréquente sur les terrains les moins productifs (pentes fortes, substrats durs, forte teneur en cailloux) et les moins accessibles (pentes fortes, loin du bâti, plus grande différence d'altitude avec le bourg). Cette continuité des facteurs induit une accentuation de la séparation entre les espaces les moins productifs, déjà plus forestiers en 1860 et qui vont se boiser presque totalement en 2010 (80 % des substrats durs), et les espaces les plus productifs où se concentrent les cultures et l'habitat humain ; ceci suggère que les forêts situées dans les situations les plus extrêmes n'ont probablement jamais été défrichées par le passé.

Nos résultats montrent que les facteurs biophysiques expliquent davantage la localisation des forêts aujourd'hui qu'en 1860 alors que c'est l'inverse pour les facteurs socioéconomiques. Cette tendance peut s'expliquer de la façon suivante : le paysage méditerranéen résulte d'un développement millénaire de l'agriculture et du pastoralisme, qui ont su s'accommoder des contraintes environnementales. La diminution du nombre de paysans, que l'on suppose associée à l'augmentation de la taille des exploitations agricoles, a entraîné l'abandon préférentiel des terres agricoles et pastorales auparavant exploitées malgré les contraintes biophysiques, ce qui a eu pour conséquence de renforcer le lien statistique entre facteurs biophysiques et localisation de la forêt.

Enfin, la proximité aux forêts préexistantes est un déterminant de la reconquête forestière, en cohérence avec les travaux précédents (Serra *et al.*, 2008 ; Wulf *et al.*, 2010 ; Puddu *et al.*, 2012). La part expliquée par ce paramètre devient plus importante après 1958, indiquant une reconquête forestière plus fortement déterminée par la proximité de la source potentielle de graines à

l'échelle du paysage. Tant que la pression agricole et pastorale était maintenue dans le paysage, le lien statistique entre recolonisation forestière et distance à une population source existait mais la force du lien était modeste ; dès lors que la pression agricole et pastorale sur l'usage des terres s'est relâchée, le rôle de la distance à la forêt limitant le reboisement des zones abandonnées s'est renforcé et le lien statistique entre colonisation forestière et distance à une population source est devenu plus net.

L'analyse de la littérature montre que les facteurs expliquant la reconquête forestière sont aussi ceux qui expliquent la déforestation (Flinn *et al.*, 2005 ; Wulf *et al.*, 2010 ; Mitsuda et Ito, 2011) : ceci suggère que les espaces reboisés après 1860 étaient ceux qui ont été préférentiellement déboisés auparavant, et que les phases d'expansion et de régression de la forêt au cours des siècles précédents ont probablement aussi eu lieu dans ces espaces (Paulet, 1982). On peut donc prédire que les futurs changements de la couverture forestière auront lieu dans ces zones de fluctuation entre forêt et culture.

### **Conséquences sur la répartition des forêts anciennes et récentes et implications écologiques**

Les principales différences biophysiques au sein des forêts actuelles selon leur continuité forestière sont un gradient de pente et de productivité liée à la réserve en eau du sol, ce qui suggère des différences d'habitat entre les forêts selon leur continuité. Ainsi, cela induit potentiellement une différence de flore entre les forêts d'âge différent qui n'est pas seulement liée à l'ancienneté elle-même. Par exemple, les espèces forestières sont susceptibles de se répartir entre forêts anciennes et récentes selon un gradient de réserve en eau du sol, avec des espèces potentiellement plus xérophiles en forêt ancienne et plus mésophiles en forêt très récente. Néanmoins, du fait de l'accumulation de matière organique sur un pas de temps plus long, les forêts anciennes pourraient accueillir des espèces mésophiles. L'analyse de la réponse de la flore forestière à la continuité temporelle est en cours sur le parc naturel régional. Cette analyse tiendra compte de la nature des usages passés (culture ou pâture), selon l'hypothèse que leur effet n'est pas le même sur les caractéristiques physiques et chimiques des sols et la flore forestière actuelles (Koerner *et al.*, 1997).

Les forêts se sont développées à proximité des forêts préexistantes, dans la première ou la seconde période, et semblent reconnecter les massifs de forêts déjà existantes en 1860 puis en 1958, comme on peut le voir sur la figure 1 (p. 373). L'habitat forestier, déjà assez important en 1860 (27%), est donc très bien connecté. Dans ce contexte, la limitation par la dispersion a donc sans doute un faible rôle à jouer dans la recolonisation de nouveaux habitats forestiers par les espèces forestières, comme montré dans les Alpes (Janssen, 2016).

## **CONCLUSIONS**

La persistance de la forêt jusqu'en 1860 et son augmentation depuis cette date s'expliquent principalement par la pente, la productivité du sol et la distance au bâti. Les forêts récentes sont issues de l'abandon de l'espace agricole et pastoral le moins productif ; en particulier, l'abandon des pratiques traditionnelles a entraîné une réduction drastique des paysages spécifiques à la région méditerranéenne (restanques, zones de pâture extensif). L'expansion de la forêt est de moins en moins contrainte par les autres usages des terres, et par défaut de plus en plus guidée par la proximité aux sources de graines forestières. Disposer d'autres dates intermédiaires permettrait de différencier des taux de reconquête forestière et détecter une éventuelle accélération ou décélération de cette tendance au cours des dernières décennies. Néanmoins, les situations extrêmes

ont connu peu de changement d'usage et les vagues antérieures de déforestation et de reboisement ont probablement concerné les mêmes espaces intermédiaires. Nous montrons pour la première fois en France que les forêts actuelles de différents anciennetés se répartissent selon des gradients, notamment de pente et de productivité des sols.

**Juliet ABADIE**  
Irstea, UR RECOVER  
CS 40061  
F-13182 AIX-EN-PROVENCE CEDEX 5  
(juliet.abadie@irstea.fr)

**Jean-Luc DUPOUEY**  
Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR Silva  
INRA Centre Grand Est Nancy  
F-54280 CHAMPENOUX  
(jean-luc.dupouey@inra.fr)

**Catherine AVON**  
Semperfloris  
Place de la République  
F-07000 PRIVAS  
(catherine.avon@hotmail.com)

**Xavier ROCHEL**  
Université de Lorraine, EA 7304 LOTERR – CLSH  
Campus Lettres et Sciences humaines  
BP 13397  
F-54015 NANCY CEDEX  
(xavier.rochel@univ-lorraine.fr)

**Aline SALVAUDON**  
Chef de projet biodiversité  
PARC NATUREL RÉGIONAL DU LUBERON  
60 place Jean Jaurès  
BP 122  
F-84400 APT  
(aline.salvaudon@parcduluberon.fr)

**Thierry TATONI**  
Aix Marseille Université, Avignon Université, CNRS,  
IRD, IMBE  
Campus étoile  
Faculté Saint-Jérôme  
Avenue Escadrille Normandie Niémen  
F-13397 MARSEILLE CEDEX 20  
(thierry.tatoni@imbe.fr)

**Laurent BERGÈS**  
Université Grenoble Alpes, Irstea, UR LESSEM  
2 rue de la Papeterie  
BP 76  
F-38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES CEDEX  
(laurent.berges@irstea.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- BALLABIO C., PANAGOS P., MONTANARELLA L., 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, pp. 110-123.
- BARBIER E.B., BURGESS J.C., GRAINGER, A. 2010. The forest transition: Towards a more comprehensive theoretical framework. *Land Use Policy*, 27, pp. 98-107.
- BÜRGI M., HERSPERGER A.M., SCHNEEBERGER N., 2004. Driving forces of landscape change - current and new directions. *Landscape Ecology*, 19, pp. 857-868.
- CHALVET M., 2006. Paysages et conflits en Provence. *Rives nord-méditerranéennes*, 23, pp. 11-26.

- CINOTTI B., 1996. Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. *Revue forestière française*, vol. XLVIII, n° 6, pp. 547-562.
- EITZEL M.V., KELLY M., DRONOVA I., VALACHOVIC Y., QUINN-DAVIDSON L., SOLERA J., VALPINE P. de, 2016. Challenges and opportunities in synthesizing historical geospatial data using statistical models. *Ecological Informatics*, 31, pp. 100-111.
- FABRE E., VERNET C., 2006. Évolution de l'occupation du sol dans les Alpes-de-Haute-Provence (début du XIX<sup>e</sup> siècle - fin du XX<sup>e</sup> siècle). *Méditerranée*, 3,4, pp. 35-42.
- FLINN K.M., VELLEND M., MARKS P.L., 2005. Environmental causes and consequences of forest clearance and agricultural abandonment in central New York, USA. *J. Biogeogr.*, 32, pp. 439-452.
- FOLEY J.A., DEFRIES R., ASNER G.P., BARFORD C., BONAN G., CARPENTER S.R., CHAPIN F.S., COE M.T., DAILY G.C., GIBBS H.K., HELKOWSKI J.H., HOLLOWAY T., HOWARD E.A., KUCHARIK C.J., MONFREDA C., PATZ J.A., PRENTICE I.C., RAMANKUTTY N., SNYDER P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309, pp. 570-574.
- FOURCHY P., 1963. Les lois du 28 juillet 1860 et 8 juin 1864 sur le reboisement et le gazonnement des montagnes. *Revue de géographie alpine*, 51, pp. 19-41.
- GILBERT Y., 1989. Élevage, forêt et société. Analyse socio-historique. *Forêt méditerranéenne*, XI, pp. 203-216.
- JANSSEN P., 2016. Influences relatives de l'ancienneté et de la maturité sur la biodiversité : implications pour la conservation en forêts de montagne. Université Grenoble-Alpes ; Irstea UR Écosystèmes montagnards. 312 p. + annexes (Thèse).
- JENNESS J., 2006. *Topographic Position Index extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises*. [En ligne] disponible sur : [http://www.jennessent.com/arcgis/land\\_facets.htm](http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm)
- KAPLAN J.O., PFEIFFER M., KOLEN J.C.A., DAVIS B.A.S., 2016. Large Scale Anthropogenic Reduction of Forest Cover in Last Glacial Maximum Europe. *PLOS ONE*, 11, e0166726.
- KOERNER W., CINOTTI B., JUSSY J.-H., BENOÎT M., 2000. Évolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle : Identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue forestière française*, vol. LII, n° 3, pp. 249-269.
- KOERNER W., DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., BENOIT M., 1997. Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *Journal of Ecology*, 85, pp. 351-358.
- LAMBIN E.F., GEIST H.J., eds, 2006. *Land-Use and Land-Cover Change - Local Processes and Global Impacts*. Berlin, New York : Springer.
- LAMBIN E.F., MEYFROIDT P., 2010. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27, pp. 108-118.
- MITSUDA Y., ITO S., 2011. A review of spatial-explicit factors determining spatial distribution of land use/land-use change. *Landscape and Ecological Engineering*, 7, pp. 117-125.
- PANAGOS P., VAN LIEDEKERKE M., JONES A., MONTANARELLA L., 2012. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29, pp. 329-338.
- PAULET J.-P., 1982. Forêts et pression démographique en Basse Provence. *Méditerranée*, 2, pp. 31-40.
- PONTIUS R.G., SHUSAS E., MCEACHERN M., 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 101, pp. 251-268.
- PUDDU G., FALCUCCI A., MAIORANO L., 2012. Forest changes over a century in Sardinia: implications for conservation in a Mediterranean hotspot. *Agroforestry Systems*, 85, pp. 319-330.
- SALVAUDON A., HAMEL A., GREL A., ROSSI M., VALLAURI D., 2012. *Notice de la carte des forêts anciennes du Parc naturel régional du Lubéron (1:40 000) avec référence aux autres usages du sol*. 18 p.
- SERRA P., PONS X., SAURÍ D., 2008. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 28, pp. 189-209.
- TAILLEFUMIER F., PIEGAY H., 2003. Contemporary land use changes in prealpine Mediterranean mountains: a multivariate GIS-based approach applied to two municipalities in the Southern French Prealps. *Catena*, 51, pp. 267-296.
- VAN DOORN A.M., BAKKER M.M., 2007. The destination of arable land in a marginal agricultural landscape in South Portugal: An exploration of land use change determinants. *Landscape Ecology*, 22, pp. 1073-1087.
- WULF M., SOMMER M., SCHMIDT R., 2010. Forest cover changes in the Prignitz region (NE Germany) between 1790 and 1960 in relation to soils and other driving forces. *Landscape Ecology*, 25, pp. 299-313.

---

**DÉTERMINANTS DU CHANGEMENT DU COUVERT FORESTIER DEPUIS 1860 DANS LE PARC NATUREL RÉGIONAL DU LUBERON ET IMPLICATIONS POUR LA RÉPARTITION DES FORÊTS ACTUELLES (Résumé)**

Après des siècles de diminution de sa surface, la forêt a connu un minimum historique en France vers le début du XIX<sup>e</sup> siècle puis a augmenté depuis, notamment en Provence. Les déterminants biophysiques, socio-économiques et paysagers de ces changements forestiers à long terme ont cependant été assez peu explorés. Cette étude vise à analyser les transitions des principaux usages des terres depuis 1860 ainsi que l'évolution de l'effet de déterminants biophysiques (topographie, géologie), socioéconomiques (bâti, démographie) et paysagers (distance aux forêts préexistantes) sur la forêt et la reconquête forestière entre 1860 et 2010 dans le parc naturel régional du Luberon. Nous montrons que la forêt s'est maintenue jusqu'en 1860 et est réapparue depuis dans les secteurs les moins accessibles et productifs (pente forte, substrats durs, loin du bâti). En dernier lieu, nous précisons les différences de conditions biophysiques entre forêts actuelles selon leur continuité temporelle. En conclusion, nous discutons des implications de cette reconquête forestière.

**FACTORS THAT HAVE DETERMINED FOREST COVER CHANGES SINCE 1860 IN THE LUBERON REGIONAL NATURAL PARK AND IMPLICATIONS FOR THE DISTRIBUTION OF TODAY'S FORESTS (Abstract)**

After centuries of deforestation, forest cover reached its minimum in France at the turn of the 19<sup>th</sup> century, and has been constantly increasing since then, in particular in Provence. However, there has been little research on the biophysical, socioeconomic and landscape factors involved in these long term forest cover changes in France. The purpose of this study is to analyse the main land-use transitions since 1860, as well as the changing effect of biophysical (topography, lithology), socioeconomic (built areas, population) and landscape (distance from pre-existing forests) factors on forests and forest regrowth between 1860 and 2010 in the Luberon Park. The authors show that forests persisted until 1860 and thereafter developed on less accessible and less productive land (steep slopes, hard substrate, secluded locations). Lastly, they detail the differences in biophysical conditions between current forests according to their continuity over time. To end with, the implications of this forest recovery are discussed.

---



