

Dynamique de régression des forêts d'Arganier et de Cèdre de l'Atlas : une synthèse des pressions anthropiques et climatiques

Regression dynamics of Argan and Atlas Cedar forests: A synthesis of anthropogenic and climatic pressures

Mohamed ALAOUI, (Doctorant)

*Laboratoire de geobiodiversite et patrimoine naturel
Institut scientifique de rabat
Université Mohammed V de rabat, Maroc*

Latifa TAHRI, (Enseignant-chercheur)

*Laboratoire de geobiodiversite et patrimoine naturel
Institut scientifique de rabat
Université Mohammed V de rabat, Maroc*

Oumnia HIMMI, (Enseignant-chercheur)

*Laboratoire de geobiodiversite et patrimoine naturel
Institut scientifique de rabat
Université Mohammed V de rabat, Maroc*

Adresse de correspondance :	Université Mohammed V de Rabat, Institut Scientifique de Rabat Av. Ibn Batouta, Rabat 05377-74549
Déclaration de divulgation :	Les auteurs n'ont pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude. Ils assument l'entière responsabilité de tout éventuel plagiat, de l'usage de l'intelligence artificielle dans la rédaction, ainsi que des résultats présentés dans cet article.
Conflit d'intérêts :	Les auteurs ne signalent aucun conflit d'intérêts.
Citer cet article	ALAOUI, M., TAHRI, L., & HIMMI, O. (2026). Dynamique de régression des forêts d'Arganier et de Cèdre de l'Atlas : une synthèse des pressions anthropiques et climatiques. <i>International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics</i> , 7(11), 321–339. https://doi.org/10.5281/zenodo.21980975
Licence	Cet article est publié en open Access sous licence CC BY-NC-ND

Received: 12/07/2026

Accepted: 12/09/2026

International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics - IJAFAME

ISSN: 2658-8455

Volume 7, Issue 10 (2026)

Dynamique de régression des forêts d'Arganier et de Cèdre de l'Atlas : une synthèse des pressions anthropiques et climatiques

Résumé

Cette revue intégrative synthétise 45 publications scientifiques et institutionnelles parues entre 1973 et 2025 afin d'expliquer les trajectoires de régression des forêts d'Arganier (*Argania spinosa* (L.) Skeels) et de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière) au Maroc. Le corpus a été constitué à partir de recherches documentaires menées dans Google Scholar, Crossref, DOAJ et les portails d'éditeurs, complétées par les documents officiels de l'UNESCO, du GIEC, de la FAO et de l'Agence Nationale des Eaux et Forêts. Les sources ont été retenues selon leur pertinence thématique, géographique et méthodologique, puis analysées au moyen d'une grille portant sur l'exposition climatique, la sensibilité écologique, la pression anthropique, la régénération et la capacité d'adaptation institutionnelle. La synthèse met en évidence des trajectoires distinctes mais un mécanisme commun de rupture du renouvellement forestier. Dans l'arganeraie d'Aoulouz, la densité moyenne est passée de 27,4 à 15,2 arbres par hectare entre 1970 et 2007, soit une baisse de 44,5 %, tandis que des observations plus récentes montrent une forte hétérogénéité locale et une perte de couvert proche de 2,86 % entre 2017 et 2023 dans un secteur suivi près d'Agadir. Pour le Cèdre de l'Atlas, les modèles projettent une diminution des populations situées dans les zones climatiquement favorables comprise entre 21 % et 41 % selon l'horizon et le scénario d'émissions. Ces résultats indiquent que le climat agit comme amplificateur, alors que le surpâturage, les coupes, la fragmentation, la pression sur l'eau et les faiblesses de gouvernance déterminent fréquemment le passage d'un stress réversible à une régression structurelle. Une gestion adaptative fondée sur la protection des régénérations, la conservation des microrefuges, le suivi par télédétection, les contrats pastoraux et une répartition équitable des bénéfices locaux apparaît prioritaire.

Mots clés : *Argania spinosa* ; *Cedrus atlantica* ; revue intégrative ; dépérissement forestier ; changement climatique ; surpâturage ; télédétection ; gouvernance adaptative ; Maroc.

Classification JEL : Q23 ; Q54 ; Q57

Type du papier : Recherche théorique (revue intégrative de la littérature)

Abstract

This integrative review synthesizes 45 scientific and institutional publications issued between 1973 and 2025 to explain the regression pathways of argan (*Argania spinosa* (L.) Skeels) and Atlas cedar (*Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière) forests in Morocco. The corpus was assembled through documentary searches conducted in Google Scholar, Crossref, DOAJ and publisher platforms, supplemented by official documents from UNESCO, the IPCC, FAO and the National Agency for Water and Forests. Sources were selected according to thematic, geographic and methodological relevance, then analyzed through a grid covering climatic exposure, ecological sensitivity, anthropogenic pressure, regeneration and institutional adaptive capacity. The synthesis identifies distinct pathways but a common mechanism of disrupted forest renewal. In the Aoulouz argan woodland, mean density declined from 27.4 to 15.2 trees per hectare between 1970 and 2007, a 44.5% decrease, whereas more recent observations reveal strong local heterogeneity and a canopy loss of approximately 2.86% between 2017 and 2023 in a monitored area near Agadir. For Atlas cedar, models project a 21% to 41% decrease in populations located within climatically suitable areas, depending on the time horizon and emission scenario. These findings indicate that climate acts as an amplifier, while overgrazing, cutting, fragmentation, water pressure and governance weaknesses often determine the shift from reversible stress to structural regression. Adaptive management based on regeneration protection, microrefugia conservation, remote-sensing monitoring, pastoral agreements and an equitable distribution of local benefits is therefore a priority. The comparison further shows that robust diagnosis requires jointly tracking adult vitality, recruitment, spatial connectivity and the institutional conditions that govern local uses.

Keywords: *Argania spinosa*; *Cedrus atlantica*; integrative review; forest dieback; climate change; overgrazing; remote sensing; adaptive governance; Morocco.

JEL Classification: Q23; Q54; Q57

Paper type: Theoretical Research (integrative literature review)

1. Introduction

Les écosystèmes forestiers méditerranéens figurent parmi les systèmes écologiques les plus exposés à l'intensification conjointe du réchauffement, de l'aridification et des usages du sol. Le bassin méditerranéen est considéré comme un point chaud du changement climatique, avec une augmentation des températures supérieure à la moyenne mondiale dans plusieurs sous-régions, une diminution probable des précipitations et une hausse de la fréquence des sécheresses longues ou composées (Giorgi, 2006 ; MedECC, 2020 ; IPCC, 2022 ; FAO & Plan Bleu, 2018). Ces changements modifient les bilans hydriques, la durée des saisons de croissance, la fréquence des épisodes de mortalité et la distribution potentielle des essences. Ils interagissent avec des pressions historiques telles que le pâturage, les prélèvements de bois, l'agriculture, l'urbanisation et la fragmentation, ce qui rend l'attribution causale plus complexe qu'une opposition simple entre facteurs naturels et facteurs humains (Allen et al., 2010 ; Anderegg et al., 2015).

Le Maroc concentre cette complexité dans des paysages allant des massifs humides aux plaines semi-arides et aux marges présahariennes. L'Arganier est une espèce endémique du Sud-Ouest marocain qui structure des systèmes agro-sylvo-pastoraux, stabilise les sols, alimente une filière économique internationale et soutient des usages locaux anciens. La Réserve de biosphère de l'Arganeraie a été désignée en 1998 et couvre un vaste territoire où conservation, activités productives et maintien des communautés rurales sont étroitement liés (UNESCO, s. d. ; Charrouf & Guillaume, 2018). Le Cèdre de l'Atlas, pour sa part, occupe principalement les étages montagnards du Moyen Atlas, du Rif et du Haut Atlas oriental. Il contribue à la régulation hydrologique, à la conservation de la biodiversité, au stockage de carbone et au maintien de paysages forestiers patrimoniaux.

La littérature montre cependant que la permanence visuelle d'un couvert ne garantit pas son bon état écologique. Dans l'arganeraie, la dégradation peut prendre la forme d'une baisse de densité, d'un éclaircissement des couronnes, d'une perte de connectivité, d'un appauvrissement des sols et d'un recrutement insuffisant, sans conversion immédiate de toute la surface forestière (Le Polain de Waroux & Lambin, 2012 ; Kirchhoff et al., 2022). Dans les cédraies, le dépérissement est observé à travers la réduction de la croissance radiale, la défoliation, la mortalité des cimes, l'augmentation de la sensibilité à la sécheresse et la faible représentation des jeunes classes d'âge (Linares et al., 2011 ; Camarero et al., 2021a). La comparaison doit donc porter sur les processus qui affectent la vitalité, la reproduction et la continuité fonctionnelle des peuplements, et non seulement sur la superficie occupée.

Le choix comparatif entre l'Arganier et le Cèdre de l'Atlas répond à une logique de systèmes contrastés. L'un est adapté à l'aridité et inséré dans des paysages fortement habités et valorisés ; l'autre est une essence montagnarde dont la performance dépend davantage du froid hivernal, de l'enneigement et de la disponibilité hydrique printanière. Cette différence permet d'identifier ce qui relève de sensibilités propres à l'espèce et ce qui relève de mécanismes généraux de vulnérabilité. Les cadres comparatifs de la vulnérabilité distinguent en effet l'exposition aux aléas, la sensibilité interne du système et sa capacité d'adaptation, ce qui autorise une lecture commune de cas écologiquement différents (Turner et al., 2003 ; Lindner et al., 2010).

La question principale est la suivante : dans quelles conditions la convergence des pressions climatiques, anthropiques et institutionnelles transforme-t-elle une perturbation réversible en régression structurelle dans les forêts d'Arganier et de Cèdre de l'Atlas ? Trois sous-questions organisent l'analyse. La première concerne les mécanismes de vulnérabilité propres à chaque essence. La deuxième porte sur les indicateurs capables de distinguer un stress ponctuel d'une rupture durable du renouvellement. La troisième examine les leviers de gestion adaptative susceptibles d'être appliqués dans des contextes territoriaux où la conservation doit être conciliée avec les usages ruraux.

L'article poursuit trois objectifs. Il vise d'abord à synthétiser les connaissances disponibles sur les trajectoires écologiques des deux essences. Il cherche ensuite à confronter les résultats issus de la dendroécologie, de l'écophysiologie, de la télédétection, de la biogéographie et des sciences de la gouvernance. Il propose enfin un cadre opérationnel reliant diagnostic, protection, restauration, financement et suivi. La section 2 expose le cadre théorique et les propositions d'analyse. La section 3 présente le protocole de revue intégrative. La section 4 synthétise les profils de vulnérabilité. La section 5 compare les moteurs de régression et examine les propositions. La section 6 discute les divergences entre études, la régénération, les microrefuges et la justice territoriale. La section 7 hiérarchise les implications scientifiques et opérationnelles. Les limites et l'agenda de recherche sont présentés dans la section 8, avant la conclusion générale.

2. Cadre théorique et propositions d'analyse

2.1. Résilience, vulnérabilité et régression structurelle

La résilience écologique désigne la capacité d'un système à absorber une perturbation tout en maintenant ses fonctions, ses relations et sa trajectoire générale. Dans la formulation fondatrice de Holling (1973), elle ne se confond pas avec un retour rapide à un état moyen ; elle renvoie à la persistance du système malgré les chocs. Appliquée aux forêts, cette perspective conduit à distinguer la résistance pendant l'épisode de stress, la récupération après l'épisode et la capacité de réorganisation à plus long terme. Une forêt peut perdre temporairement de la croissance sans entrer dans une trajectoire de régression, à condition que les arbres récupèrent et que la régénération assure la continuité démographique.

Le cadre de vulnérabilité de Turner et al. (2003) complète cette approche par trois composantes. L'exposition correspond à l'intensité des changements climatiques et des perturbations auxquelles le système est soumis. La sensibilité dépend des caractéristiques biologiques, des sols, de la structure d'âge, de l'état hydrique et des héritages d'usage. La capacité d'adaptation regroupe les ressources écologiques et institutionnelles qui permettent de modifier les pratiques, de protéger les refuges, de restaurer les peuplements et d'apprendre du suivi. Cette articulation est particulièrement adaptée aux socio-écosystèmes forestiers marocains, où les réponses écologiques sont indissociables des règles d'accès, des marchés et des politiques publiques.

La notion de régression structurelle est retenue ici pour désigner une trajectoire dans laquelle les pertes ne sont plus compensées par le renouvellement. Elle associe au moins trois signes : une dégradation persistante de la vitalité des adultes, une insuffisance du recrutement et une diminution de la capacité du système à fournir ses fonctions. Cette définition évite de réduire la dégradation à la déforestation. Elle inclut les peuplements qui restent cartographiés comme forêt mais dont la densité, la connectivité, la régénération ou la qualité fonctionnelle diminuent.

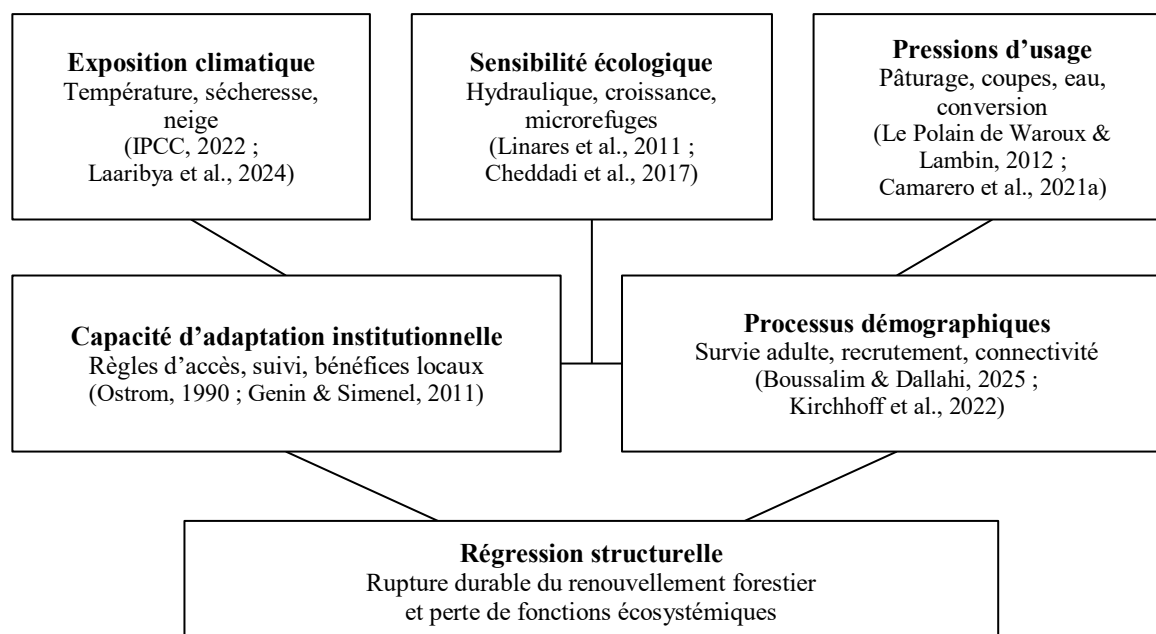
2.2. Propositions analytiques

Proposition 1. L'exposition climatique affecte directement la croissance, la survie et la distribution potentielle, mais son effet varie selon la niche écologique et les conditions locales de station.

Proposition 2. Les pressions d'usage augmentent la sensibilité du système lorsqu'elles réduisent la vigueur des adultes, dégradent les sols ou éliminent les semis ; elles transforment ainsi un stress climatique en verrou démographique.

Proposition 3. La régression devient structurelle lorsque le déclin des adultes, l'échec du recrutement et une capacité institutionnelle insuffisante se renforcent mutuellement pendant plusieurs cycles climatiques.

Figure 1. Cadre causal de la régression structurelle des forêts d'Arganier et de Cèdre de l'Atlas



Source : élaboration de l'auteur à partir de Holling (1973), Turner et al. (2003), Linares et al. (2011), Le Polain de Waroux et Lambin (2012), Cheddadi et al. (2017), Camarero et al. (2021a) et Boussalim et Dallahi (2025).

3. Méthodologie de la synthèse

3.1. Positionnement de la revue intégrative

La démarche relève d'une revue intégrative de la littérature. Ce type de revue est adapté à une question qui mobilise des preuves hétérogènes, incluant des études quantitatives, des analyses spatiales, des travaux écophysiologiques, des modèles de distribution, des recherches socio-économiques et des documents institutionnels. Contrairement à une méta-analyse, la revue intégrative ne suppose pas l'existence d'un indicateur homogène commun à toutes les études. Elle vise à organiser des résultats de nature différente dans une architecture interprétative explicite, tout en maintenant la traçabilité de la recherche et de la sélection documentaire (Whittemore & Knafl, 2005).

La démarche ne prétend pas produire un effet moyen unique. Les unités spatiales, les périodes, les capteurs, les variables climatiques et les indicateurs biologiques diffèrent fortement entre les travaux consacrés à l'Arganier et au Cèdre de l'Atlas. La comparaison repose donc sur une synthèse structurée des mécanismes, des ordres de grandeur et des convergences ou divergences. Les résultats quantitatifs sont conservés dans leur contexte d'origine et ne sont pas agrégés lorsqu'ils ne sont pas directement comparables.

3.2. Recherche documentaire et critères de sélection

La recherche documentaire a été actualisée en juillet 2026 et a porté sur les publications disponibles jusqu'au 31 décembre 2025. Les interrogations ont été menées dans Google Scholar, Crossref et DOAJ, ainsi que dans les portails de ScienceDirect, Springer Nature, Wiley, Frontiers et MDPI. Les sources institutionnelles ont été recherchées sur les sites de l'UNESCO, du GIEC, de la FAO, de l'IPBES et de l'Agence Nationale des Eaux et Forêts. Les chaînes de recherche combinaient les noms scientifiques et usuels des deux essences avec les termes climate change, drought, dieback, regeneration, overgrazing, remote sensing,

vulnerability, governance, *Argania spinosa*, *Cedrus atlantica*, arganeraie, cédraie, dépérissement et régénération naturelle.

Les critères d'inclusion étaient les suivants : lien direct avec l'une des deux essences ou avec un cadre théorique indispensable ; données concernant prioritairement le Maroc, puis l'Afrique du Nord et les forêts méditerranéennes comparables ; méthode décrite de manière suffisamment précise ; contribution à au moins une dimension de la grille comparative ; texte scientifique évalué par les pairs ou document institutionnel de référence. Ont été exclus les doublons, les textes sans métadonnées vérifiables, les études ne traitant pas directement des mécanismes de vulnérabilité ou de gestion et les documents dont les résultats ne pouvaient pas être replacés dans une unité spatiale ou temporelle identifiable.

Tableau 1. Traçabilité de la recherche et de la sélection documentaire

Étape	Nombre	Décision appliquée
Notices identifiées	72	Résultats issus des bases, portails d'éditeurs et sites institutionnels.
Doublons ou versions antérieures supprimés	11	Conservation de la version publiée la plus complète.
Titres et résumés examinés	61	Vérification de la pertinence pour les essences, les pressions ou le cadre théorique.
Notices exclues après examen initial	11	Hors champ, absence de données interprétables ou objet trop éloigné.
Textes intégraux évalués	50	Lecture de la méthode, du terrain, des indicateurs et des résultats.
Textes exclus après lecture intégrale	5	Données insuffisamment traçables ou redondance forte avec une étude retenue.
Sources incluses dans la synthèse	45	Articles scientifiques, ouvrages fondateurs et documents institutionnels.

Source : protocole documentaire de la présente synthèse.

3.3. Extraction et grille comparative

Pour chaque source, les informations suivantes ont été extraites : essence étudiée, zone géographique, période d'observation, méthode, unité d'analyse, indicateur principal, résultat quantitatif lorsqu'il était disponible, facteur explicatif avancé, limites mentionnées et implications de gestion. Les résultats ont ensuite été classés dans cinq dimensions. Cette procédure permet de comparer les études sans convertir artificiellement leurs résultats en un score numérique unique.

Tableau 2. Grille comparative à cinq dimensions et indicateurs mobilisés

Dimension	Questions d'analyse	Indicateurs mobilisés	Types de preuves
Exposition climatique	Quels changements affectent la station et à quel horizon ?	Température, précipitations, enneigement, déficit hydrique, scénarios RCP.	Séries climatiques, modèles de distribution, dendrochronologie.
Sensibilité écologique	Quels traits rendent l'essence ou la station vulnérable ?	Croissance radiale, potentiel hydrique, défoliation, état des sols, altitude.	Écophysiologie, inventaires, observations de terrain.
Pression anthropique	Quels usages accentuent ou atténuent le stress ?	Pâturage, coupes, conversion agricole, urbanisation, prélèvements d'eau.	Enquêtes, télédétection, analyse historique des usages.
Régénération et structure	Le peuplement assure-t-il son renouvellement ?	Densité des semis, survie, classes d'âge, densité de couronnes, connectivité.	Placettes, suivi des plants, images à haute résolution.
Capacité institutionnelle	Les acteurs peuvent-ils ajuster les règles et financer l'action ?	Contrats, contrôle, participation, bénéfices locaux, continuité du suivi.	Politiques publiques, études de gouvernance, retours territoriaux.

Source : élaboration de l'auteur à partir de Turner et al. (2003), Whittemore et Knafl (2005) et Lindner et al. (2010).

La grille tient compte de la différence entre exposition et sensibilité. Par exemple, une hausse de température constitue une exposition, alors que la dépendance du cèdre à l'enneigement ou

l'état hydrique d'une arganeraie constituent des éléments de sensibilité. De même, le pâturage est analysé à la fois comme pression directe sur les semis et comme variable institutionnelle lorsque son intensité dépend de règles d'accès, de compensations ou d'accords territoriaux.

3.4. Traitement des divergences et biais possibles

La synthèse a privilégié la triangulation. Un résultat local n'a pas été généralisé à l'ensemble de l'aire de répartition lorsqu'aucune étude indépendante ne permettait de le confirmer. Les différences entre mesures de terrain, classifications Landsat, images à très haute résolution et modèles climatiques ont été conservées comme informations sur l'échelle et la méthode, et non traitées automatiquement comme des erreurs. Les travaux portant sur des périodes différentes ont été comparés en distinguant les tendances historiques, l'état contemporain et les projections. Quatre biais demeurent possibles. Le biais de sélection peut favoriser les études qui rapportent une dégradation nette. Le biais de publication peut sous-représenter les sites stables ou en récupération. Le biais linguistique résulte de la priorité accordée aux publications en français et en anglais. Enfin, la disponibilité inégale des séries de terrain peut donner plus de poids aux massifs ou aux sites disposant d'équipes de suivi anciennes. Ces limites sont prises en compte dans l'interprétation et sont reprises dans la section 8.

4. Synthèse comparative des connaissances

4.1. Deux socio-écosystèmes et deux profils de vulnérabilité

L'Arganier et le Cèdre de l'Atlas occupent des niches contrastées, mais tous deux dépendent d'une continuité entre arbres adultes, sols fonctionnels et installation des jeunes générations. L'arganier tolère de fortes contraintes hydriques grâce à des ajustements morphologiques, physiologiques et biochimiques. Des différences importantes de surface foliaire, de teneur en eau relative et de composés protecteurs ont été observées le long de gradients d'aridité, ce qui confirme une plasticité réelle mais spatialement variable (Alados & El Aich, 2008 ; Díaz-Barradas et al., 2010 ; Afi et al., 2024). Cette plasticité ne neutralise pas les effets combinés de la baisse des nappes, de la dégradation des sols, du broutage et de la fragmentation.

Tableau 3. Profil comparatif des deux socio-écosystèmes forestiers

Dimension	Arganier (<i>Argania spinosa</i>)	Cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i>)
Aire principale	Souss-Massa, Essaouira, Anti-Atlas et marges présahariennes.	Moyen Atlas, Rif, Haut Atlas oriental et massifs montagnards frais.
Fonctions majeures	Stabilisation des sols, ressource fourragère, huile, revenus ruraux, mosaïque agro-sylvo-pastorale.	Régulation hydrologique, biodiversité montagnarde, bois, carbone, protection des sols.
Exposition dominante	Aridification, sécheresses répétées, baisse des nappes, épisodes thermiques.	Réchauffement, baisse de l'enneigement, sécheresses, déplacement des enveloppes climatiques.
Pressions d'usage	Conversion agricole, urbanisation, surpâturage, prélèvements multiples, pression sur l'eau.	Surpâturage, pollarding, coupes, fréquentation et contraintes locales d'accès.
Signal de régression	Baisse de densité, fragmentation, couronnes dégradées, recrutement faible.	Perte de croissance, défoliation, mortalité, absence de jeunes classes d'âge.
Levier prioritaire	Gestion territoriale de l'eau et du foncier, régénération assistée, filière équitable.	Protection des semis, microrefuges, accords pastoraux, suivi dendroécologique.

Source : synthèse à partir de Le Polain de Waroux et Lambin (2012), Cheddadi et al. (2017), Moukrim et al. (2020), Chakhchar et al. (2022), Laaribya et al. (2024) et Boussalim et Dallahi (2025).

Le cèdre dépend davantage de conditions montagnardes fraîches, d'une recharge hydrique régulière et de fenêtres favorables au recrutement. La croissance radiale diminue lors des sécheresses sévères et sa récupération devient plus incertaine lorsque les épisodes se répètent

ou lorsque l'état du peuplement a déjà été affaibli par les coupes et le pâturage (Linares et al., 2011 ; Camarero et al., 2021a). Les microrefuges topographiques peuvent néanmoins conserver des conditions plus favorables et jouent un rôle central pour la persistance locale (Dobrowski, 2011 ; Cheddadi et al., 2017).

4.2. La cédraie : dépérissement, contraction climatique et verrou de régénération

Les cédraies marocaines occupent des étages où la disponibilité hydrique dépend des précipitations, de l'enneigement, de l'exposition, de la profondeur du sol et de la durée des périodes chaudes. La hausse des températures hivernales réduit la persistance du manteau neigeux et peut avancer la fonte, ce qui diminue la libération progressive de l'eau au printemps. L'augmentation du déficit de pression de vapeur accroît parallèlement la demande atmosphérique et favorise la fermeture stomatique, la perte de croissance et, dans les situations extrêmes, la défaillance hydraulique (McDowell et al., 2008 ; IPCC, 2022).

Les séries dendrochronologiques mettent en évidence une sensibilité croissante aux sécheresses dans plusieurs peuplements du Moyen Atlas. Linares et al. (2011) relient le déclin à l'augmentation de la contrainte hydrique, tandis que Linares et al. (2013) montrent que l'âge et la structure des individus influencent la réponse. Camarero et al. (2021a) soulignent que l'aridification agit sur des forêts portant l'héritage de coupes, d'écimage et de pression caprine, ce qui rend les trajectoires plus synchrones et plus vulnérables. L'analyse ne permet donc pas d'isoler un facteur unique : la sécheresse fournit le choc, mais l'histoire d'usage et l'état du peuplement modulent l'ampleur du dommage.

Les modèles de distribution renforcent le diagnostic prospectif. Moukrim et al. (2020) identifient une modification des zones climatiquement favorables au Maroc. Laaribya et al. (2024) projettent une diminution des populations situées dans les aires potentielles de 21 % sous RCP 4.5 à l'horizon 2050, 23 % à l'horizon 2070, 35 % sous RCP 8.5 à l'horizon 2050 et 41 % à l'horizon 2070. Ces valeurs ne décrivent pas une mortalité certaine de tous les arbres concernés ; elles indiquent une contraction des conditions modélisées comme favorables et justifient une surveillance renforcée des marges basses et des populations isolées.

La régénération constitue le point de bascule le plus directement opérationnel. À Ain Leuh, Boussalim et Dallahi (2025) ont analysé 1 885 placettes et 55 variables. Le modèle logistique a obtenu une aire sous la courbe de 0,704 et a montré que les zones présentant une probabilité de régénération supérieure à 0,60 ne représentaient que 6,8 % de la surface étudiée. L'intensité du pâturage et les extrêmes bioclimatiques étaient les déterminants principaux. Ce résultat confirme que la conservation des adultes ne suffit pas lorsque les semis sont consommés, que les sols sont compactés ou que les conditions climatiques réduisent leur survie.

Les stations fraîches, les ravins, les versants abrités et les sols profonds peuvent néanmoins fonctionner comme microrefuges. Cheddadi et al. (2017) montrent que l'histoire climatique et la topographie contribuent à maintenir des noyaux de persistance dans le Rif. Leur protection doit viser non seulement les arbres adultes, mais aussi la continuité des processus de recrutement, la limitation des perturbations et la conservation de la diversité génétique.

4.3. L'arganeraie : densité, fragmentation et recomposition des usages

L'arganeraie est un paysage productif et habité. La collecte des fruits, le pâturage, les prélèvements de bois, l'agriculture et les règles coutumières ont façonné sa structure. La dégradation doit donc être appréciée à partir de la densité des arbres, de l'état des couronnes, de la connectivité, de la régénération et du fonctionnement hydrologique. Dans la région d'Aoulouz, Le Polain de Waroux et Lambin (2012) ont montré que la densité moyenne est passée de 27,4 à 15,2 arbres par hectare entre 1970 et 2007, soit une diminution de 44,5 %. Cette baisse était plus importante que ne le suggérait la seule variation de surface, ce qui confirme que la cartographie de l'occupation du sol peut sous-estimer une dégradation diffuse.

Les travaux plus récents ne reproduisent pas uniformément cette amplitude, ce qui est scientifiquement important. Sur 30 sites du bassin du Souss suivis entre 1972 et 2018, Kirchhoff et al. (2022) ont observé une évolution moyenne proche de +0,4 % avec l'approche fondée sur le terrain, contre -8,5 % avec l'interprétation WorldView, tandis que trois sites perdaient entre 40 % et 100 % de leur couvert. Ces résultats montrent que la tendance régionale agrégée masque des trajectoires locales opposées et que la réponse dépend de la résolution, du type d'indicateur et du régime d'usage. Ils ne réfutent pas la forte dégradation d'Aoulouz ; ils en limitent la généralisation à l'ensemble de l'arganeraie.

La télédétection récente améliore la capacité à suivre les changements. El Moussaoui et al. (2025) ont comparé plusieurs méthodes de classification Landsat dans la région de Smimou et obtenu des précisions globales proches ou supérieures à 88 %, avec une amélioration lorsque l'indice de végétation et le modèle numérique de terrain étaient combinés. Karmoude et al. (2025) ont utilisé une série Sentinel-2 de 2017 à 2023 dans un secteur proche d'Agadir et estimé une perte de couvert d'environ 2,86 % sur six ans. Ces travaux montrent l'intérêt d'une chaîne de suivi multiscalaire associant images gratuites, données à très haute résolution et vérification de terrain.

La sensibilité de l'arganier ne tient pas à une incapacité générale à supporter l'aridité. Afi et al. (2024) mettent en évidence des ajustements différenciés de la morphologie foliaire, de la teneur en eau et des composés biochimiques selon les sites. La question centrale est la durée du stress et sa combinaison avec l'état des sols, la disponibilité de la nappe, la concurrence agricole et la pression sur les jeunes plants. L'influence spatiale de l'arbre sur les sols inter-arbres demeure limitée mais présente des orientations utiles pour les mesures de restauration (Kirchhoff et al., 2021). Les techniques de rétention d'eau et les associations mycorhiziennes peuvent améliorer la croissance et le fonctionnement physiologique des plants dans certaines conditions expérimentales, mais leur efficacité dépend du choix de station et du suivi de terrain (Fassih et al., 2024).

La dimension économique est ambivalente. La valorisation de l'huile d'argan peut renforcer les revenus et l'intérêt pour l'arbre, mais elle n'entraîne pas automatiquement la restauration du couvert. Les études économiques montrent que les gains peuvent être inégalement distribués et que l'essor du marché peut coexister avec des pressions sur le système forestier (Lybbert et al., 2002 ; Lybbert et al., 2011). Les coopératives, la reconnaissance des droits d'usage et le lien contractuel entre valorisation et replantation sont donc essentiels pour que la filière contribue effectivement à la résilience.

5. Analyse comparative des moteurs de régression

5.1. Le climat comme amplificateur différencié

Le changement climatique n'agit pas de manière identique sur les deux essences. Dans les cédraies, la hausse des températures, la diminution de l'enneigement et l'allongement des périodes sèches affectent directement la croissance et déplacent les conditions favorables vers les altitudes ou les expositions les plus fraîches. Dans l'arganeraie, l'effet se manifeste davantage par l'aridification cumulative, la baisse de la recharge, la variabilité de la fructification et la diminution de la survie des plantules. Une espèce tolérante à l'aridité peut donc régresser lorsque les seuils physiologiques sont dépassés ou lorsque les ressources hydriques et édaphiques nécessaires à son renouvellement se dégradent.

Les résultats quantifiés doivent être interprétés selon leur portée. Les projections de 21 % à 41 % pour le cèdre proviennent de modèles de distribution potentielle et ne constituent pas une prédiction directe de mortalité. Les pertes de densité ou de couvert de l'arganier sont des observations localisées dont l'extrapolation dépend de la représentativité des sites. Cette distinction évite de juxtaposer des pourcentages sans tenir compte de la variable mesurée. Elle

souligne également l'intérêt d'indicateurs communs, tels que la survie des semis, la densité de couronnes, la croissance annuelle et l'état hydrique des sols.

5.2. Les usages comme facteurs de verrouillage

Le surpâturage est le mécanisme le plus transversal. Son effet principal n'est pas seulement la consommation de biomasse ; il réside dans l'élimination sélective des semis, la compaction des sols et la réduction des fenêtres de recrutement. Dans les cédraies, il peut maintenir une structure vieillissante sans remplacement. Dans l'arganeraie, il se combine avec l'émondage, la collecte et l'ouverture du couvert. Le pâturage devient un verrou lorsque les règles d'accès, les calendriers et les capacités de contrôle ne permettent pas de protéger les zones en régénération. La conversion agricole, l'urbanisation et la pression sur l'eau sont plus marquées dans les plaines et les secteurs périurbains de l'arganeraie. Elles réduisent la connectivité et créent des discontinuités qui limitent les échanges biologiques. Les coupes et l'écimage jouent un rôle important dans les deux systèmes, car ils diminuent la surface foliaire, modifient l'architecture et peuvent augmenter la sensibilité aux sécheresses. Ces pressions ne produisent pas toujours une disparition immédiate de l'arbre, mais elles réduisent progressivement sa capacité de croissance, de reproduction et de récupération.

Tableau 4. Mécanismes de régression selon le type de pression

Pression	Mécanisme écologique	Expression dominante dans la cédraie	Expression dominante dans l'arganeraie
Sécheresse récurrente	Réduction de croissance, déficit hydraulique, mortalité différée.	Perte de croissance et dépérissement des marges basses.	Baisse de fructification et survie incertaine des plantules.
Réchauffement hivernal	Modification des cycles et de la recharge hydrique.	Baisse de l'enneigement et saison de stress plus longue.	Stress thermique accru et évapotranspiration plus forte.
Surpâturage	Broutage des semis, compaction, perte du sous-bois.	Blocage critique de la régénération naturelle.	Dégradation diffuse, jeunes plants éliminés.
Conversion et urbanisation	Fragmentation, perte d'habitat et concurrence pour l'eau.	Effets localisés aux lisières et infrastructures.	Effet majeur dans les plaines et les zones périurbaines.
Coupes et écimage	Perte de vigueur, architecture dégradée, moindre reproduction.	Vulnérabilité accrue à la sécheresse.	Pression multi-usage sur branches, bois et fruits.
Gouvernance insuffisante	Règles instables, suivi discontinu, conflits d'usage.	Mises en défens peu négociées ou contournées.	Dissociation entre valeur commerciale et restauration.

Source : synthèse à partir de Genin et Simenel (2011), Le Polain de Waroux et Lambin (2012), Camarero et al. (2021a, 2021b), Chakhchar et al. (2022) et Boussalim et Dallahi (2025).

5.3. Examen des propositions analytiques

Tableau 5. Correspondance entre propositions, indices disponibles et niveau d'appui

Proposition	Indices issus du corpus	Appréciation
P1 : exposition climatique différenciée	Croissance radiale, enneigement, déficit hydrique, distribution potentielle, réponses foliaires.	Appui fort, avec résultats convergents et plusieurs méthodes.
P2 : usages comme amplificateurs	Grazing intensity, coupes, densité de couronnes, fragmentation, pression sur les nappes.	Appui fort, mais intensité variable selon les territoires.
P3 : convergence et rupture du renouvellement	Vieillessement des peuplements, rareté des semis, faibles zones favorables, suivi institutionnel incomplet.	Appui convergent ; besoin de dispositifs longitudinaux intégrés.

Source : résultats de la présente synthèse.

La première proposition est étayée par les séries de croissance et les modèles climatiques : l'exposition au réchauffement et à la sécheresse affecte les deux essences, mais les mécanismes diffèrent selon la niche et la station. La deuxième proposition est également soutenue : le pâturage, les coupes, la pression sur l'eau et la fragmentation augmentent la sensibilité et

réduisent la capacité de récupération. La troisième proposition reçoit un soutien convergent mais demeure plus difficile à tester directement, car peu d'études suivent simultanément la vitalité des adultes, le recrutement et la gouvernance sur une longue période. Elle constitue donc une proposition explicative robuste plutôt qu'une relation statistique déjà mesurée à l'échelle nationale.

6. Discussion

6.1. Convergences, divergences et portée des résultats

La littérature converge sur l'existence d'une vulnérabilité accrue, mais elle diverge sur son intensité et sur l'importance relative des causes. Dans l'arganeraie, la baisse de 44,5 % mesurée à Aoulouz ne se retrouve pas avec la même amplitude dans tous les sites du Souss. Les résultats de Kirchhoff et al. (2022) montrent à la fois des sites en récupération, une tendance moyenne faible et quelques pertes extrêmes. La divergence s'explique par l'échelle, la période, la résolution et le type de pression locale. Elle invite à abandonner les diagnostics uniformes et à classer les territoires selon des trajectoires observées.

Dans les cédraies, certaines études insistent sur l'aridification et la perte de croissance, tandis que d'autres soulignent l'héritage des coupes, de l'écimage et du pâturage. Ces interprétations ne sont pas incompatibles. Camarero et al. (2021a, 2021b) montrent précisément que la sécheresse agit sur des peuplements dont la structure a été modifiée par les usages. Sarmoum et al. (2024), dans des cédraies du nord-ouest algérien, observent une augmentation de la variabilité de la résistance sans diminution uniforme de la résilience, ce qui rappelle que les réponses peuvent différer selon les stations, la sévérité des sécheresses et l'état initial du peuplement.

La distinction entre attribution et gestion est importante. Même lorsque la part exacte du climat et des usages ne peut pas être quantifiée, les actions de gestion peuvent cibler les facteurs modifiables : protection des semis, limitation des coupes, réduction de la compaction, conservation des sols, suivi des nappes et contrôle de la fragmentation. L'incertitude causale ne justifie donc pas l'inaction ; elle justifie une gestion expérimentale, réversible et suivie.

6.2. La régénération comme indicateur central

La régénération constitue l'indicateur le plus directement relié à la persistance. Une forêt composée d'adultes anciens peut conserver son apparence pendant plusieurs décennies alors que son renouvellement est déjà compromis. Le suivi doit donc inclure la densité des semis, leur survie après les saisons sèches, la distribution des classes d'âge, la présence de microsites favorables et la pression réelle de broutage. Ces indicateurs doivent être associés à la croissance et à la mortalité des adultes pour distinguer un déficit ponctuel d'un blocage durable.

La plantation ne peut pas remplacer ce diagnostic. Les techniques de propagation et de régénération assistée de l'arganier sont connues depuis plusieurs décennies (Nouaim et al., 2002), mais la survie dépend du sol, de l'eau, de la protection et de l'entretien. Les dispositifs de rétention hydrique et les symbioses mycorhiziennes offrent des pistes prometteuses (Fassih et al., 2024), tandis que les modèles de régénération du cèdre permettent de cibler les zones présentant les meilleures probabilités d'installation (Boussalim & Dallahi, 2025). Une restauration efficace combine donc sélection du site, matériel végétal adapté, protection pastorale et suivi sur au moins trois années sèches.

6.3. Microrefuges, télédétection et apprentissage adaptatif

Les microrefuges sont des unités prioritaires parce qu'ils amortissent les conditions régionales et peuvent préserver des noyaux de reproduction. Dans les cédraies, ils correspondent notamment aux expositions fraîches, aux ravins et aux sols profonds. Dans l'arganeraie, ils

peuvent prendre la forme de noyaux denses, de secteurs où les sols retiennent mieux l'humidité ou de territoires où les règles communautaires limitent les prélèvements. Leur identification doit combiner topographie, climat local, structure du couvert et observations de régénération. La télédétection offre la fréquence de mesure nécessaire à une gestion adaptative. Les archives HEXAGON et Landsat permettent de reconstruire les trajectoires longues, Sentinel-2 fournit un suivi régulier et les images à très haute résolution améliorent l'analyse des couronnes isolées (Mouafik et al., 2024 ; Marzloff et al., 2022 ; Kirchhoff et al., 2022 ; El Moussaoui et al., 2025). Les classifications ne doivent toutefois pas être confondues avec des diagnostics écophysiologicals. Elles doivent être calibrées par des placettes permanentes, des mesures de terrain et des protocoles reproductibles.

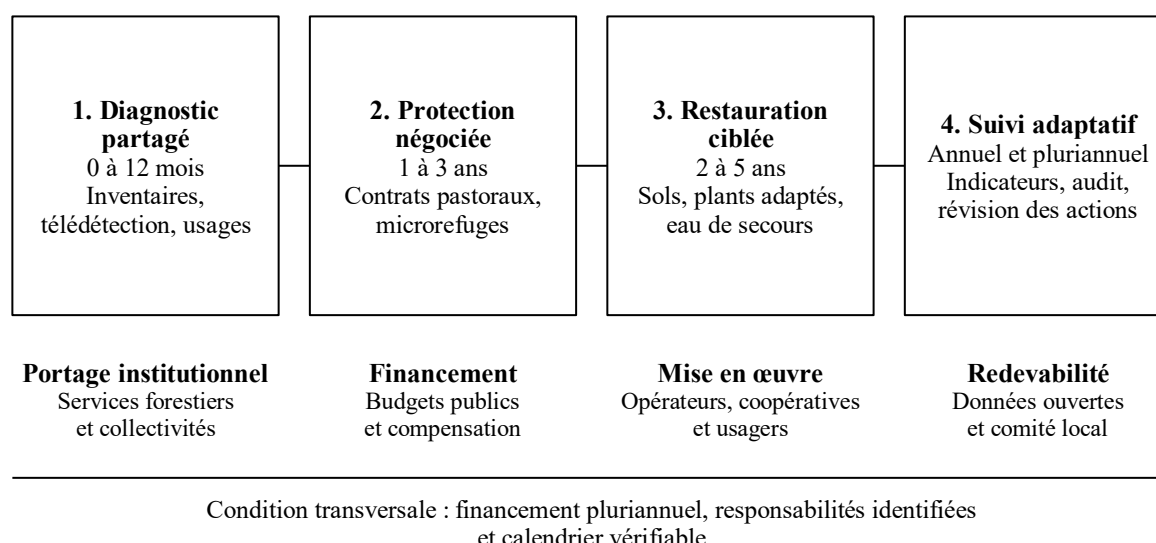
Une boucle d'apprentissage est nécessaire : diagnostic initial, intervention ciblée, mesure des résultats, comparaison avec une zone témoin et ajustement. Cette logique réduit le risque de déployer à grande échelle une technique mal adaptée. Elle permet aussi d'identifier rapidement les échecs de plantation, les contournements de mises en défens ou les déplacements de pression vers des zones voisines.

6.4. Gouvernance, financement et justice territoriale

La conservation impose des coûts localisés : réduction temporaire du pâturage, accès limité au bois, changement de pratiques agricoles ou temps consacré au suivi. Si ces coûts sont supportés par les ménages ruraux tandis que les bénéfices de la conservation et des filières sont captés ailleurs, les règles perdent leur légitimité. La justice environnementale permet d'analyser cette situation selon trois dimensions : distribution des coûts et bénéfices, reconnaissance des groupes et savoirs locaux, participation effective aux décisions (Schlosberg, 2007 ; Sikor & Newell, 2014).

La gouvernance des communs montre que les règles sont plus robustes lorsqu'elles sont compréhensibles, adaptées au contexte, suivies localement et associées à des mécanismes gradués de résolution des conflits (Ostrom, 1990). Dans l'arganeraie, les pratiques endogènes et les arrangements collectifs ont contribué à façonner les paysages, mais ils sont fragilisés par les transformations économiques, foncières et institutionnelles (Genin & Simenel, 2011). Dans les cédraies, la mise en défens doit être négociée avec les éleveurs et associée à des calendriers, des zones alternatives ou des compensations vérifiables.

Figure 2. Séquence de mise en œuvre d'une gestion adaptative et conditions de faisabilité



Source : élaboration de l'auteur à partir d'Ostrom (1990), Schlosberg (2007), Genin et Simenel (2011), ANEF (2020) et Sikor et Newell (2014).

La faisabilité dépend enfin du portage institutionnel et du financement. Les diagnostics peuvent être financés sur des budgets de suivi et de recherche, mais les restrictions pastorales exigent souvent une compensation ou un appui aux alternatives fourragères. La restauration requiert des engagements pluriannuels, car l'évaluation à la fin de la première année surestime le succès. Le suivi annuel doit relever d'une responsabilité identifiée et disposer de données accessibles aux acteurs territoriaux.

7. Implications scientifiques et recommandations opérationnelles

7.1. Priorités scientifiques hiérarchisées

À court terme, la priorité scientifique est l'harmonisation des indicateurs. Un noyau commun devrait inclure la mortalité annuelle, la croissance, la densité des semis, la survie à 12, 24 et 36 mois, la densité de couronnes, la connectivité, l'humidité des sols et la pression pastorale. La deuxième priorité immédiate est la constitution de placettes permanentes appariées à des séries satellitaires, afin de relier les changements spectraux à des mécanismes biologiques.

À moyen terme, les recherches doivent intégrer la génétique, l'écophysiologie et l'économie territoriale. Les essais multi-provenances sont nécessaires pour identifier des matériels adaptés sans réduire la diversité. Les équations allométriques développées pour les jeunes arganiers peuvent améliorer l'estimation de la biomasse et du carbone, mais elles doivent être testées sur des âges et des conditions plus diversifiés (Oumasst et al., 2024). L'évaluation économique doit mesurer non seulement la valeur marchande, mais aussi la distribution des bénéfices, les coûts de restriction et les services hydrologiques ou antiérosifs.

Tableau 6. Matrice des connaissances, lacunes et priorités de recherche

Axe	Connaissances établies	Lacune prioritaire	Indicateurs et références
Distribution climatique	Contraction ou déplacement probable des enveloppes favorables au cèdre.	Validation par inventaires fins et suivi des marges.	Surface favorable, altitude, exposition : Moukrim et al. (2020) ; Laaribya et al. (2024).
Dépérissement du cèdre	Croissance sensible aux sécheresses et à l'héritage d'usage.	Séries comparables entre massifs et classes d'âge.	Cernes, défoliation, mortalité : Linares et al. (2011, 2013) ; Camarero et al. (2021a, 2021b) ; Sarmoum et al. (2024).
Régénération du cèdre	Pâturage et extrêmes bioclimatiques limitent l'installation.	Suivi longitudinal des semis protégés et non protégés.	Densité, survie, probabilité d'occurrence : Boussalim et Dallahi (2025).
Dégradation de l'arganeraie	La densité et la connectivité peuvent diminuer sans conversion totale.	Séries homogènes couvrant plusieurs territoires et usages.	Couronnes, connectivité, perte annuelle : Le Polain de Waroux et Lambin (2012) ; Kirchhoff et al. (2022) ; Karmoude et al. (2025).
Écophysiologie de l'arganier	Plasticité foliaire et réponses hydriques différenciées.	Essais multi-provenances et suivi après transplantation.	Potentiel hydrique, traits foliaires, survie : Afi et al. (2024) ; Fassih et al. (2024).
Carbone et services	Outils allométriques disponibles pour de jeunes plantations.	Extrapolation aux peuplements adultes et aux systèmes naturels.	Biomasse, carbone, sols : Oumasst et al. (2024) ; IPBES (2019).
Gouvernance	Participation et reconnaissance des usages sont déterminantes.	Évaluation comparative de l'efficacité réelle des contrats.	Respect des règles, coûts, revenus : Ostrom (1990) ; Genin et Simenel (2011) ; Sikor et Newell (2014).

Source : synthèse de la littérature retenue.

À plus long terme, un observatoire interrégional devrait comparer les trajectoires des arganeraies et des cédraies à partir de protocoles communs. La diffusion de données ouvertes, la conservation des séries historiques et la documentation des interventions permettraient

d'éviter que chaque programme recommence sans tirer les enseignements des expériences précédentes.

7.2. Recommandations différenciées et indicateurs de suivi

Pour les cédraies, les actions immédiates sont la protection ciblée des zones de recrutement, la conservation des microrefuges, la réduction saisonnière du pâturage et le suivi des marges basses. Pour l'arganeraie, les priorités sont la limitation de la fragmentation, la protection des sols, la gestion de l'eau, la réduction du broutage des jeunes plants et la contractualisation d'un lien entre valeur de la filière et restauration. Dans les deux cas, les interventions doivent être comparées à des zones témoins et faire l'objet d'un suivi annuel.

Les valeurs de référence ne peuvent pas être universelles, car les sites diffèrent fortement. Le tableau 7 propose des règles de décision et des fourchettes pilotes à calibrer localement. Elles ne remplacent pas un état initial ; elles servent à déclencher une vérification ou un ajustement lorsque la tendance s'écarte de l'objectif.

Tableau 7. Recommandations, horizons et règles de décision pour le suivi

Objectif	Mesures prioritaires	Horizon	Indicateur et règle de décision
Restaurer la régénération	Protection des semis, gestion saisonnière du pâturage, plants adaptés.	1 à 3 ans	Survie à 36 mois ; cible pilote d'au moins 60 %, à ajuster selon la station et le témoin.
Réduire le stress hydrique	Protection des sols, collecte limitée du ruissellement, irrigation de secours initiale.	1 à 5 ans	Humidité du sol et survie estivale ; intervention si baisse continue pendant deux campagnes.
Préserver les microrefuges	Cartographie, exclusion des coupes, contrôle des perturbations.	Immédiat et continu	Absence de perte nette de couvert et présence de recrutement dans les placettes suivies.
Limiter la fragmentation	Contrôle de conversion, maintien de noyaux et corridors.	Annuel	Alerte si perte de couvert égale ou supérieure à 0,5 % par an dans une unité suivie.
Améliorer la gouvernance	Contrats pastoraux, comité local, compensation et mécanisme de plainte.	0 à 3 ans	Respect des règles, conflits enregistrés, part des bénéfices réinvestie dans la restauration.
Assurer la redevabilité	Base de données annuelle, audit des plantations, publication des résultats.	Annuel	Taux de placettes renseignées, comparabilité des données, correction documentée des échecs.

Source : proposition opérationnelle fondée sur le corpus. Les seuils pilotes doivent être validés par l'état initial, les témoins et les objectifs territoriaux.

8. Limites de la synthèse et agenda de recherche

8.1. Limites

La première limite résulte de l'hétérogénéité des données. Les études ne portent pas sur les mêmes périodes, les mêmes unités spatiales ou les mêmes indicateurs. Les modèles de distribution, les séries dendrochronologiques et les classifications satellitaires répondent à des questions différentes. La synthèse conserve cette diversité et ne produit pas un taux global de régression qui serait méthodologiquement artificiel.

La deuxième limite concerne la couverture linguistique. Le corpus est principalement composé de publications en français et en anglais. La littérature grise en arabe, les rapports locaux non numérisés et certaines données administratives peuvent contenir des informations utiles qui ne sont pas représentées. La troisième limite est géographique : quelques massifs cédricoles et secteurs de l'arganeraie disposent de séries beaucoup plus riches que d'autres, ce qui crée une représentativité inégale.

La quatrième limite tient à l'absence de traitement original de données satellitaires ou de terrain. Les résultats quantitatifs proviennent des études retenues et sont rapportés avec leur contexte.

Enfin, la revue intégrative reste exposée au biais de publication et au biais de sélection, malgré l'explicitation du protocole et la confrontation des résultats divergents.

8.2. Agenda de recherche

Au cours des trois prochaines années, des sites pilotes devraient être établis dans au moins deux arganeraies et deux massifs cédricoles représentant des gradients d'altitude, d'aridité et de pression d'usage. Chaque site devrait associer placettes permanentes, données Sentinel-2, images à haute résolution, suivi de l'humidité du sol, mesure du pâturage et documentation des règles locales. Les zones d'Aoulouz et de Smimou offrent un intérêt particulier pour comparer les trajectoires historiques et contemporaines de l'arganeraie, tandis que le Moyen Atlas et le Rif permettent de confronter les marges basses et les microrefuges du cèdre.

À l'horizon de trois à cinq ans, les essais de restauration devraient comparer des provenances, des techniques de conservation de l'eau et plusieurs niveaux de protection pastorale. Les résultats doivent être évalués par la survie, la croissance, les coûts et l'acceptabilité sociale. Des travaux spécifiques sont également nécessaires sur la justice territoriale : répartition de la valeur de l'huile, effets des restrictions, compensation, participation des femmes dans les coopératives et mécanismes de règlement des conflits.

À plus long terme, la priorité est la construction de séries interopérables permettant de distinguer variabilité climatique, changement structurel et effet des interventions. Une base nationale ouverte, associée à des protocoles de métadonnées, améliorerait la reproductibilité et permettrait de tester directement la proposition de convergence entre déclin des adultes, échec de recrutement et faiblesse institutionnelle.

9. Conclusion

La synthèse répond au premier objectif en distinguant deux trajectoires de vulnérabilité. Le Cèdre de l'Atlas est fortement exposé au réchauffement, à la diminution de l'enneigement, au dépérissement des marges basses et au blocage de la régénération. L'Arganier présente une tolérance élevée à l'aridité, mais sa continuité est menacée par la fragmentation, la pression sur l'eau, les prélèvements multiples et l'échec d'installation des jeunes plants. Les valeurs disponibles montrent à la fois des pertes importantes dans certains territoires et une forte hétérogénéité spatiale.

Le deuxième objectif est atteint par l'identification d'un mécanisme commun : la régression devient durable lorsque le stress sur les adultes se combine à l'insuffisance du recrutement et à une capacité limitée d'ajustement des usages. Cette conclusion replace le climat et les pressions anthropiques dans une relation d'amplification réciproque. Elle explique pourquoi une politique centrée uniquement sur la surface forestière ou sur la plantation ne suffit pas.

Le troisième objectif conduit à une stratégie différenciée mais fondée sur les mêmes principes : protéger les régénérations, conserver les microrefuges, associer télédétection et terrain, négocier les règles pastorales, sécuriser un financement pluriannuel et répartir équitablement les bénéfices de la conservation. Les forêts d'Arganier et de Cèdre de l'Atlas constituent ainsi des cas comparatifs utiles pour comprendre l'adaptation des socio-écosystèmes méditerranéens, sous réserve de vérifier la transférabilité des résultats dans d'autres territoires et par des suivis de long terme.

Références

- (1). Afi, C., Telmoudi, M., Labbassi, S., Chabbi, N., Hallam, J., Msanda, F., & Ait Aabd, N. (2024). Assessing the impact of aridity on argan trees in Morocco: Implications for conservation in a changing climate. *Resources*, 13(10), 135. <https://doi.org/10.3390/resources13100135>
- (2). Agence Nationale des Eaux et Forêts. (2020). Forêts du Maroc 2020-2030 : stratégie nationale pour une gestion durable, participative et productive des écosystèmes forestiers.
- (3). Alados, C. L., & El Aich, A. (2008). Stress assessment of argan (*Argania spinosa* (L.) Skeels) in response to land uses across an aridity gradient: Translational asymmetry and branch fractal dimension. *Journal of Arid Environments*, 72(4), 338-349. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.015>
- (4). Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- (5). Anderegg, W. R. L., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J. W., Macalady, A. K., McDowell, N., Pan, Y., Raffa, K., Sala, A., Shaw, J. D., Stephenson, N. L., Tague, C., & Zeppel, M. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208(3), 674-683. <https://doi.org/10.1111/nph.13477>
- (6). Boussalim, Y., & Dallahi, Y. (2025). Predictive modeling of *Cedrus atlantica* natural regeneration: Grazing intensity and bioclimatic extremes as the primary drivers in the Ain Leuh Forest, Middle Atlas of Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 17. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02191-0>
- (7). Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Sangüesa-Barreda, G., Lechuga, V., Viñegla, B., Seco, J. I., Taïqui, L., Carreira, J. A., & Linares, J. C. (2021a). Drought, axe and goats: More variable and synchronized growth forecasts worsening dieback in Moroccan Atlas cedar forests. *Science of the Total Environment*, 765, 142752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142752>
- (8). Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Sangüesa-Barreda, G., Lechuga, V., Viñegla, B., Seco, J. I., Taïqui, L., Carreira, J. A., & Linares, J. C. (2021b). Overgrazing and pollarding threaten Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) conservation under forecasted aridification regardless of stakeholders' nature. *Forest Ecology and Management*, 503, 119779. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119779>
- (9). Chakhchar, A., Lamaoui, M., Aissam, S., Ferradous, A., Wahbi, S., El Mousadik, A., Ibensouda-Koraichi, S., Filali-Maltouf, A., & El Modafar, C. (2022). Agro-fruit-forest systems based on argan tree in Morocco: A review of recent knowledge and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 12, 783615. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.783615>
- (10). Charrouf, Z., & Guillaume, D. (2018). The argan oil project: Going from utopia to reality in 20 years. *OCL*, 25(2), D209. <https://doi.org/10.1051/ocl/2018006>
- (11). Cheddadi, R., Henrot, A. J., François, L., Boyer, F., Bush, M., Carré, M., Coissac, E., De Oliveira, P. E., Ficetola, F., Hambuckers, A., Huang, K., Lézine, A. M., Nourelbait, M., Rhoujjati, A., Taberlet, P., Sarmiento, F., Abel-Schaad, D., Alba-Sánchez, F., & Zheng, Z. (2017). Microrefugia, climate change, and conservation of *Cedrus atlantica*

- in the Rif Mountains, Morocco. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 114. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00114>
- (12). Díaz-Barradas, M. C., Zunzunegui, M., Ain-Lhout, F., Jáuregui, J., Boutaleb, S., Álvarez-Cansino, L., Esquivias, M. P., & García Novo, F. (2010). Seasonal physiological responses of *Argania spinosa* tree from Mediterranean to semi-arid climate. *Plant and Soil*, 337, 217-231. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0518-8>
 - (13). Dobrowski, S. Z. (2011). A climatic basis for microrefugia: The influence of terrain on climate. *Global Change Biology*, 17(2), 1022-1035. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02263.x>
 - (14). El Moussaoui, E. H., Moumni, A., Khabba, S., Amazirh, A., Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Lahrouni, A. (2025). A comparative methodological approach for argan forest classification using Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 210. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13649-8>
 - (15). FAO & Plan Bleu. (2018). *State of Mediterranean Forests 2018*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Plan Bleu.
 - (16). Fassih, B., Ait-El-Mokhtar, M., Nait Douch, A., Boutasknit, A., Ben-Laouane, R., Aganchich, B., & Wahbi, S. (2024). Combined effect of subsurface water retention technology and arbuscular mycorrhizal fungi on growth, physiology and biochemistry of argan seedlings under field conditions. *Plants*, 13(15), 2098. <https://doi.org/10.3390/plants13152098>
 - (17). Genin, D., & Simenel, R. (2011). Endogenous Berber forest management and the functional shaping of rural forests in southern Morocco: Implications for shared forest management options. *Human Ecology*, 39, 257-269. <https://doi.org/10.1007/s10745-011-9392-2>
 - (18). Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33, L08707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
 - (19). Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
 - (20). IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
 - (21). IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
 - (22). Karmoude, Y., Idbraim, S., Saidi, S., Masse, A., & Arbelo, M. (2025). Efficient argan tree deforestation detection using Sentinel-2 time series and machine learning. *Applied Sciences*, 15(6), 3231. <https://doi.org/10.3390/app15063231>
 - (23). Kirchhoff, M., Romes, T., Marzloff, I., Seeger, M., Aït Hssaine, A., & Ries, J. B. (2021). Spatial distribution of argan tree influence on soil properties in southern Morocco. *SOIL*, 7, 511-524. <https://doi.org/10.5194/soil-7-511-2021>
 - (24). Kirchhoff, M., Marzloff, I., Stephan, R., Seeger, M., Aït Hssaine, A., & Ries, J. B. (2022). Monitoring dryland trees with remote sensing. Part B: Combining tree cover and plant architecture data to assess degradation and recovery of *Argania spinosa* woodlands of South Morocco. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 896703. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.896703>
 - (25). Laaribya, S., Alaoui, A., Ayan, S., & Dindaroğlu, T. (2024). Changes in the potential distribution of Atlas cedar in Morocco in the twenty-first century according to the emission scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5. *Forestist*, 74(1), 16-25. <https://doi.org/10.5152/forestist.2023.0004>

- (26). Le Polain de Waroux, Y., & Lambin, E. F. (2012). Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and woodlands: The case of the argan woodlands (Morocco). *Applied Geography*, 32(2), 777-786. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.005>
- (27). Linares, J. C., Taïqui, L., & Camarero, J. J. (2011). Increasing drought sensitivity and decline of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Forests*, 2(3), 777-796. <https://doi.org/10.3390/f2030777>
- (28). Linares, J. C., Camarero, J. J., & Carreira, J. A. (2013). Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Dendrochronologia*, 31(2), 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.003>
- (29). Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698-709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- (30). Lybbert, T. J., Barrett, C. B., & Narjisse, H. (2002). Market-based conservation and local benefits: The case of argan oil in Morocco. *Ecological Economics*, 41(1), 125-144. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00020-4)
- (31). Lybbert, T. J., Aboudrare, A., Chaloud, D., Magnan, N., & Nash, M. (2011). Booming markets for Moroccan argan oil appear to benefit some rural households while threatening the endemic argan forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(34), 13963-13968. <https://doi.org/10.1073/pnas.1106382108>
- (32). Marzolff, I., Kirchhoff, M., Stephan, R., Seeger, M., Aït Hssaine, A., & Ries, J. B. (2022). Monitoring dryland trees with remote sensing. Part A: Beyond CORONA, historical HEXAGON satellite imagery as a new data source for mapping open-canopy woodlands on the tree level. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 896702. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.896702>
- (33). McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb? *New Phytologist*, 178(4), 719-739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- (34). MedECC. (2020). Climate and environmental change in the Mediterranean Basin: Current situation and risks for the future. First Mediterranean Assessment Report. Union for the Mediterranean, Plan Bleu and UNEP/MAP.
- (35). Mouafik, M., Chakhchar, A., Fouad, M., & El Aboudi, A. (2024). Remote sensing technologies for monitoring argane forest stands: A comprehensive review. *Geographies*, 4(3), 441-461. <https://doi.org/10.3390/geographies4030024>
- (36). Moukrim, S., Lahssini, S., Rifai, N., Menzou, K., Mharzi-Alaoui, H., Labbaci, A., Rhazi, M., Wahby, I., El Madihi, M., & Rhazi, L. (2020). Modelling the potential distribution of *Cedrus atlantica* Manetti in Morocco and impacts of climate change. *Bois et Forêts des Tropiques*, 344, 3-16. <https://doi.org/10.19182/bft2020.344.a31888>
- (37). Nouaim, R., Mangin, G., Breuil, M. C., & Chaussod, R. (2002). The argan tree (*Argania spinosa*) in Morocco: Propagation by seeds, cuttings and in-vitro techniques. *Agroforestry Systems*, 54, 71-81. <https://doi.org/10.1023/A:1014236025396>
- (38). Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- (39). Oumasst, A., Tioudji, F. E., Tabi, S., Zahidi, A., El Mousadik, A., El Finti, A., Aitlhaj, A., & Hallam, J. (2024). Development of allometric equations to determine the biomass of plant components and the total storage of carbon dioxide in young Mediterranean argan trees. *Sustainability*, 16(11), 4592. <https://doi.org/10.3390/su16114592>

- (40). Sarmoum, M., Camarero, J. J., & Abdoun, F. (2024). Aridification increases growth resistance of Atlas cedar forests in NW Algeria. *Forest Ecology and Management*, 556, 121730. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121730>
- (41). Schlosberg, D. (2007). *Defining environmental justice: Theories, movements, and nature*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199286294.001.0001>
- (42). Sikor, T., & Newell, P. (2014). Globalizing environmental justice? *Geoforum*, 54, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.04.009>
- (43). Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- (44). UNESCO. (s. d.). *Arganeraie. Programme sur l'Homme et la biosphère*. <https://www.unesco.org/en/mab/arganeraie>
- (45). Whitemore, R., & Knafl, K. (2005). The integrative review: Updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(5), 546-553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>