DESERT.ECO

Régénération des **zones arides**

Revue scientifique et cadrage méthodologique des pratiques de régénération en milieu aride.

« La différence entre un jardin et un désert, ce n'est pas l'eau, c'est l'homme. »

Volet B · Revue bibliographique

La Manufacture du Climat · juin 2026

Établi pour la Regenerative Foundation

Table des matières

I. Régénération : cadrage conceptuel 5
I.a. Régénération : un terme à consolider 5
I.b. Restauration : définition, cadre normatif, limites 5
I.c. Régénération : un terme émergent, un potentiel conceptuel 7
I.d. Articulation des deux concepts et prise de position 8
I.e. Régénération et sol : une dynamique centrale en zone aride 9
I.f. Apports pour desert.eco 10
II. Géographies de l'aridité 12
II.a. Définir et mesurer l'aridité 12
II.b. Panorama des zones arides mondiales 13
II.c. Scénarios d'extension de l'aridification 15
II.d. Zones de l'aridité : histoires de lutte différenciées 17
III. Mécanismes de l'aridification 20
III.a. L'usage des sols, pilote du climat ? 20
III.b. Mécanismes locaux de rupture du cycle de l'eau 20
III.c. Seuils, hystérésis et irréversibilité 21
III.d. Cascades et processus aggravants 22
III.e. Altérations anthropiques des sols arides 24
IV. Questions scientifiques ouvertes 25
IV.a. En zone aride, planter des arbres réchauffe-t-il le climat local ? 25
IV.b. Le verdissement global (*global greening*) 26
IV.c. Sahara Vert et dynamiques historiques de dégradation 27
IV.d. Macro-tendances, climat et attribution 28
IV.e. Le couplage sol-végétation-atmosphère 30
IV.f. Symétrie inverse : la régénération peut-elle modifier la pluie ? 32
V. Les projets de régénération 34
V.a. Typologie des projets 34
V.a.1. Méga-programmes étatiques et coalitions multilatérales 34
V.a.2. Régénération paysanne, communautaire et de terrain 35

V.a.3. Cas hydrologiques et frontières des bassins 36
V.a.4. Cas continentaux peu documentés 37
V.a.5. Compléments par zone 38
V.b. Cas emblématiques 40
V.c. Cas-laboratoires : régénération sous contrainte documentaire 41
V.c.1. Mines, infrastructures linéaires et substrat sévèrement dégradé 41
V.c.2. Régénération post-incendie : un contrefactuel temporel 42
V.c.3. Marais mésopotamiens : aggradation et fragilité hydraulique 43
VI. Les techniques 45
VI.a. Restauration passive et active 45
VI.b. Les techniques de régénération 46
VI.c. Principes d'usage transversaux 50
VI.c.1. Combinaisons et séquençage 50
VI.c.2. Compatibilités et transposabilité 50
VI.c.3. Eau souterraine : couplage et statut 51
VI.c.4. Coût-bénéfice : protéger avant de réparer 51
VI.c.5. Partage et épargne des terres (land sharing / land sparing) 51
VI.d. Approches systémiques et techniques émergentes 52
VI.d.1. Solutions fondées sur la nature systémiques et régénération 52
VI.d.2. Techniques émergentes : l'agrivoltaïsme 53
VII. Conditions sociales, historiques et institutionnelles 55
VII.a. Du sommet à la base : trajectoires comparées 55
VII.b. Coût d'opportunité : qui paye, qui gagne, qui perd 55
VII.c. Gouvernance de l'eau 57
VII.d. Diffusion d'une pratique régénérative 58
VII.e. Le temps long : colonial, moderniste, écologique 59
VII.f. Écoles scientifiques de la régénération en zone aride 61
VII.g. Cartographie des acteurs opérationnels 61
VIII. Faire advenir la régénération 63
VIII.a. Seuils et géométrie 63
VIII.a.1. Le seuil de masse à dépasser (ignition) 63

VIII.a.2. La géométrie d'intervention (nucléation) 64
VIII.a.3. La fenêtre climatique d'opportunité 64
VIII.b. Réserves et garde-fous 65
VIII.b.1. Hystérésis empirique 65
VIII.b.2. Dépendance au contexte des mécanismes 65
VIII.b.3. Un concept sous conditions 66
VIII.c. Leviers biophysiques 66
VIII.c.1. Le sol comme moteur d'aggradation 66
VIII.c.2. Maximiser toute l'eau disponible 68
VIII.c.3. Biodiversité : noyaux et corridors 69
VIII.d. Leviers sociaux 70
VIII.d.1. Seuils d'adoption sociale 70
VIII.d.2. Bascules de gouvernance 71
VIII.e. Etendre la régénération au-delà de la parcelle 71
VIII.e.1. L'eau fossile, un levier de la régénération ? 71
VIII.e.2. Le recyclage de l'humidité atmosphérique comme levier 72
VIII.f. Du constat à la méthode 73
Annexe A. Bibliographie 74

I. Régénération : cadrage conceptuel

I.a. Régénération : un terme à consolider

Face à l'aridification, trois réponses se distinguent. La première est l'adaptation, qui prend le milieu tel qu'il devient et ajuste les pratiques, les calendriers et l'usage de l'eau. La deuxième est la restauration, qui vise le retour à un état antérieur lorsqu'il reste accessible. La troisième est la régénération. Elle réactive les fonctions écologiques et hydrologiques d'un milieu, sans viser un état du passé ni tenir le milieu pour acquis. C'est cette troisième voie que desert.eco retient pour les zones arides, autour du terme de régénération.

Or ce terme est faiblement stabilisé dans le champ scientifique. D'une discipline à l'autre, il est riche en concepts et pauvre en mesure (Yunibandhu & Hallinger 2025). Dans la littérature des zones arides, le terme est marginal. La restauration domine. Le parti pris est donc assumé. Il n'est pas sans risque.

Ce risque tient à la nature du terme. Faute de contenu mesurable, il glisse vers le déclaratif et se prête à la récupération commerciale. La présente revue ne conteste pas ce pari, mais entend le rendre vérifiable. Sa fonction est d'établir, projet par projet, si une régénération a réellement eu lieu.

Éprouver le terme ne revient pas à le restreindre. La régénération ne se qualifie pas par l'atteinte d'un état complet, mais par une trajectoire mesurable. Cette trajectoire vaut à tout niveau, de la seule fonction du sol jusqu'au système entier. La définition gagne ainsi à rester graduée plutôt que catégorique (Garbisu et al. 2025). Une régénération réussie doit-elle nécessairement progresser ? Dans un contexte régional qui se dégrade, une trajectoire qui régresse plus lentement que son environnement pourrait constituer un succès relatif que les indicateurs absolus ne captent pas.

Cette section n'est donc pas une définition liminaire ordinaire, mais une mise à l'épreuve du terme. Le livrable y répond pas à pas.

I.b. Restauration : définition, cadre normatif, limites

L'écologie de la restauration constitue un champ scientifique. La Society for Ecological Restoration (SER), fondée en 1988, en produit le standard de référence international. Le cadre actuel définit la restauration écologique comme l'assistance à la récupération d'un écosystème dégradé vers une trajectoire de rétablissement, avec pour cible un écosystème de référence natif (Gann et al. 2019). Au sein du référentiel SER, deux variantes plus souples existent. La *rehabilitation* vise un niveau de fonctionnement écosystémique pour la fourniture

de services sans cibler un écosystème natif. Enfin, la *reclamation* se contente de stabiliser un état dégradé pour un usage défini (Gann et al. 2019).

Les principaux cadres institutionnels, l'évaluation IPBES sur la dégradation et la restauration des terres (IPBES 2018) et le Global Land Outlook 2 (UNCCD 2022), s'inscrivent dans cette architecture. Le suivi opérationnel s'appuie sur trois indicateurs phares (couvert végétal, productivité primaire nette, carbone organique du sol), structurés par l'objectif de Neutralité en matière de Dégradation des Terres de la convention UNCCD. Ce champ est ancien, dense et productif. Toutefois, moins de 5% de la littérature en écologie de la restauration leur est consacrée (Svejcar & Kildisheva 2017).

Ce cadre est utilisable à condition de pouvoir définir un état de référence et qu'un lien à cet état subsiste. Cela suppose d'identifier l'écosystème antérieur (sa composition, son fonctionnement, ses conditions climatiques) et de juger s'il est possible, par une intervention raisonnable, d'en retrouver l'essentiel. Cette restriction est aussi ce qui rend la démarche opérable. Elle force à expliciter une cible, à choisir des indicateurs et à mesurer le chemin à parcourir. Le cahier des charges est restreint, mais il est de ce fait évaluable et comparable d'un site à l'autre. Le champ de la restauration tire sa rigueur de cette contrainte.

La contrainte devient toutefois structurelle quand l'état antérieur cesse d'être accessible. Ainsi, la littérature sur les pâturages a établi de longue date que les écosystèmes arides ne convergent pas vers un climax unique. Ils oscillent entre états stables alternatifs séparés par des seuils que la simple levée des pressions ne suffit pas toujours à franchir (Westoby et al. 1989 ; Briske et al. 2008). Le cas de la Patagonie argentine l'illustre. La levée de la pression de pâturage n'y a pas ramené l'écosystème à son état antérieur (Oliva et al. 2015). Dans une telle configuration, l'écosystème de référence reconstitué, la cible de la restauration, n'est plus opérable.

Cette limite n'est pas un défaut du cadre, mais sa délimitation. La qualification rigoureuse de la restauration d'une zone suppose des experts capables de caractériser un état de référence qui ait encore un sens écologique. Quand l'une ou l'autre de ces conditions fait défaut, le cadre s'enferme dans sa propre exigence. La régénération, telle qu'on l'examine dans la section suivante, n'est pas une supériorité conceptuelle. C'est une tentative de nommer le travail qui se fait là où la restauration au sens SER ne peut plus s'engager pleinement. Il faut le souligner : « restauration » reste le terme académique reconnu. C'est sur lui que repose l'essentiel de ce qui est écrit, mesuré et publié sur le sujet. La régénération est une extension prudente, à construire. Elle suppose la même exigence d'objectivation.

I.c. Régénération : un terme émergent, un potentiel conceptuel

La limite identifiée ouvre un espace conceptuel, que le terme de « régénération » vient occuper. Ce terme est porté depuis plusieurs décennies par des courants praticiens : agriculture de conservation, agroécologie, syntropie, pâturage holistique. La réponse au *Dust Bowl* en est une expérience historique. Face à l'érosion des Grandes Plaines, le semis direct et la création du Soil Conservation Service n'ont pas reconstitué l'écosystème prairial pré-agricole. Ils ont permis de tendre vers un nouveau régime fonctionnel, productif et économiquement soutenable (McLeman et al. 2014 ; Hornbeck 2012 ; Cook et al. 2009).

La littérature académique récente sur l'agriculture régénératrice explicite ce statut conceptuel instable. Les revues systématiques convergent. Ce terme n'a pas de définition scientifique consensuelle (Giller et al. 2021). Les pratiques mobilisées comme les résultats attendus varient largement selon les auteurs (Newton et al. 2020 ; Schreefel et al. 2020 ; Jayasinghe et al. 2023). Plusieurs écoles coexistent, qu'elles soient centrées sur le sol et la matière organique, sur le pâturage et l'animal ou encore sur l'agroforesterie complexe. Aucune ne tient de monopole conceptuel. Le mot a d'abord émergé en pratique. Depuis, la communauté scientifique tente d'en formaliser les contours, avec des objets et des objectifs hétérogènes. La régénération en zones arides hérite de cette ambiguïté, sans bénéficier du volume de méta-analyses qui permettrait de la résoudre de manière empirique.

Une intention commune à ces différents courants se dessine. Le reverdissement sahélien porté par la régénération naturelle assistée (RNA) repose sur l'idée que la végétation ligneuse peut se reconstituer à partir des souches et des semences déjà présentes, si la pression de coupe et de pâturage est levée (Reij & Garrity 2016 ; Lohbeck et al. 2020). L'agriculture régénératrice telle que l'articulent Husson, Sarthou et al. (2025) propose de réactiver les fonctions du sol (vie microbienne, structure, infiltration) sans présupposer un retour à un sol primitif. Les systèmes syntropiques tropicaux, dont l'archétype provient d'Ernst Götsch au Brésil, partagent cette logique d'activation d'un potentiel. La littérature académique commence à les documenter (Jacobi et al. 2025). Dans le même espace conceptuel, le pâturage holistique d'Allan Savory ajoute l'animal comme levier. Au-delà de la diversité des écoles, la régénération désigne moins un état d'arrivée qu'une trajectoire de remise en mouvement.

On retient pour ce livrable une définition opérationnelle, à partir de la distinction proposée par Morseletto (2020) en économie circulaire. La régénération désigne la reconstruction progressive de fonctions hydrologiques,

énergétiques et biologiques d'un écosystème, sans présupposer de convergence vers un état de référence historique. Elle se qualifie par une trajectoire positive de variables fonctionnelles (couvert végétal, productivité primaire, infiltration, carbone organique du sol). En complément de la régénération, nous qualifions cette trajectoire positive d'aggradation. Symétrique de dégradation, le terme est attesté de longue date en géologie. Son extension à la régénération des sols, plus récente, reste peu codifiée. Pour Prigogine, un écosystème en régénération est une structure dissipative qui exporte son entropie et reconstruit ses capacités fonctionnelles.

Cette posture est apparentée, en écologie de la restauration, aux *novel ecosystems*, selon lequel un système peut s'organiser dans une configuration sans analogue historique tout en remplissant des fonctions écosystémiques (Higgs 2014). La régénération devient objectivable même quand la performance absolue reste éloignée de toute référence historique. On mesure une dynamique, pas une distance. Ainsi envisagée, la télédétection permet de qualifier la régénération.

L'absence de définition consensuelle expose le terme à la récupération. Une partie de la littérature critique a documenté l'usage de « régénératrice » (pour l'agriculture) par des opérateurs commerciaux pour signaler un positionnement environnemental sans engagement biophysique mesurable (Tittonell et al. 2022 ; Wilson et al. 2024 ; Bless 2024). La distinction entre ces deux niveaux d'évaluation est centrale. La régénération constitue-t-elle une étape sur le chemin vers la restauration, ou la restauration est-elle un cas particulier de régénération quand un état de référence reste accessible ?

I.d. Articulation des deux concepts et prise de position

Avec cette lecture, la restauration n'est pas un cas plus pauvre, c'est un cas plus contraint, donc plus rigoureux quand les conditions le permettent. La régénération devient le terme générique, la restauration son cas particulier. Le livrable adopte une démarche souple et extensive, qui intègre la restauration comme sous-ensemble pour couvrir le spectre le plus large possible de projets.

Le mot « régénération » porte une charge mobilisatrice. Il rend une trajectoire désirable, il décrit moins un état qu'une promesse. Cette charge n'est pas un défaut. C'est ce qui distingue le terme de son équivalent strictement scientifique et qui en fait un horizon d'action plutôt qu'un objet de mesure. Sa charge sémantique même en fait la cible de récupérations marketing, d'où la nécessité d'un cadrage strict. Sans indicateurs multi-niveaux, sans télédétection capable de qualifier la trajectoire, le terme glisse vers le déclaratif. La

méthodologie que le livrable construit est ce qui permet à la régénération de rester opérable.

D'autres configurations qualifiées d'« ensemblistes » sont envisageables. La régénération peut être lue comme étape sur le chemin de la restauration : quand une espèce pionnière relance le système avant qu'un travail de restauration plus exigeant ne prenne le relais. Elle peut aussi être lue en intersection partielle avec la restauration plutôt qu'en inclusion, ou en continuum sans frontière nette. Ces lectures ne sont pas écartées par invalidation mais par un choix de périmètre. Quand la restauration vise la fidélité à un passé, la régénération assume une part de création. L'absence de référence n'est plus une lacune, mais un potentiel.

I.e. Régénération et sol : une dynamique centrale en zone aride

Ce flou définitionnel ne vide pas le terme de sa substance. Malgré la divergence sur les pratiques et les périmètres, une convergence se dessine. Le sol y figure comme socle. Schreefel et al. (2020) en font le titre de leur revue systématique. L'agriculture régénératrice est une démarche dont le sol est la base. Newton et al. (2020), à partir d'une analyse (229 articles et 25 sites de praticiens), identifient la santé du sol comme l'un des résultats partagés par l'ensemble des approches. La convergence reflète un constat opérationnel commun. Le sol est non seulement la base, mais le facteur limitant principal de toute trajectoire.

Régénérer un sol implique de réactiver l'ensemble des facteurs qui en gouvernent le fonctionnement. Husson, Sarthou et al. (2025) en proposent un cadre conceptuel opérant. Cinq piliers en interaction conditionnent la dynamique : disponibilité hydrique, structure et potentiel d'oxydoréduction, azote, microbiologie du sol et équilibre minéral. La défaillance d'un seul pilier bloque la trajectoire d'ensemble. Sur la dimension carbone, Kirkby et al. (2013 ; 2016) ont établi que la stœchiométrie nutritive (C:N:P:S) contraint l'humification autant que la quantité d'apports. Cet argument est repris par Husson à propos des promesses de séquestration carbone dissociées du diagnostic minéral. Schlesinger (2022) prolonge la mesure. Les limites biogéochimiques réduisent plus la marge de séquestration que ne le revendiquent certains acteurs de l'agriculture régénératrice.

La facilité d'observation du couvert végétal par satellite a fait du LAI et du NDVI les proxys dominants de la régénération. Pourtant, Costantini et al. (2016) rappellent que la matière organique, la stabilité des agrégats, l'infiltration et les biocroûtes récupèrent plus lentement que la végétation aérienne. Ainsi, s'appuyer sur le couvert seul surestime la résilience écosystémique. Burke (2020), dans le

Namib hyper-aride, recommande des horizons multi-décennaux pour détecter la récupération des indicateurs physiques. Un projet peut donc réussir pour le couvert et échouer pour le sol. Les plantations forestières chinoises documentées par Cao (2008) en fournissent l'illustration historique. La plantation monospécifique à grande échelle échoue en aride : mortalité massive sous 500 mm, pompage hydrique documenté. Turner et al. (2023) étendent cette critique à la Great Green Wall africaine et au programme chinois des Trois-Nords. Toutefois, pour certains sols très dégradés, une espèce pionnière monospécifique peut amorcer la dynamique et l'essor d'un système plus diversifié. Ce point ressort d'une observation de terrain, sans étai bibliographique consolidé à ce stade.

Le cadre conceptuel ne tient que s'il s'incarne dans des trajectoires mesurables. Kimmell et al. (2023) compilent sept méta-analyses parallèles couvrant les zones arides mondiales. L'indice d'aridité et la texture du sol sont les modérateurs principaux de la réponse à la restauration active. En semi-aride indien, Patil et al. (2025) mesurent un gain de carbone organique du sol de l'ordre de 17 % après cinq ans de pratiques régénératives. L'effet est plus marqué pour le biochar et les amendements organiques. Ces résultats fondent la matérialité de la trajectoire sans suffire à la garantir. Deux conditions la structurent. La première est économique. Tant que les besoins en énergie domestique ne basculent pas, la pression sur la ressource bois persiste (déforestation pour charbon en Afrique par exemple). Cela entrave les efforts de régénération biophysique. La seconde limite est documentaire. Sanderman et al. (2025), revisitant la littérature sur le pâturage régénératif, concluent que la qualité des preuves disponibles reste majoritairement faible.

I.f. Apports pour desert.eco

Généralement, une revue bibliographique s'arrête à l'évaluation de l'état du savoir. La définition retenue en I.d ouvre l'inventaire à un large spectre d'initiatives, du reverdissement spontané par levée de pression aux interventions de très grande ambition climatique. Cette extension est un choix de cadrage.

Le terme « régénération » porte une charge mobilisatrice. Notre revue en prend acte, mais sa fonction reste d'évaluer, pas de convaincre. La suite, panorama géographique, mécanismes d'aridification, projets emblématiques, techniques, conditions socio-économiques, est ce qui sépare l'horizon désirable de la promesse vague. L'ambition affichée par desert.eco, rendre l'utopie concrétisable, n'est tenable qu'à la condition que l'utopie en question désigne un état évaluable, comparable, documentable.

Peu de projets se qualifient pleinement, en particulier aux niveaux les plus exigeants de l'évaluation (cf. Volet A). Ce résultat révèle deux problèmes qu'aucun livrable ne peut combler seul. Le premier est une divergence. Ce que les praticiens revendiquent comme acquis, la communauté scientifique ne le mesure pas. Le second est documentaire. La régénération en zones arides reste structurellement sous-représentée dans la littérature peer-reviewed (Svejcar & Kildisheva 2017). La fraction des projets revendiqués qui y figurent l'est plus encore.

II. Géographies de l'aridité

II.a. Définir et mesurer l'aridité

Avant de cartographier des projets, il faut en définir le périmètre géographique. La définition de la régénération du chapitre I présupposait un objet, les zones arides, sans le caractériser.

> **Périmètre : ce que recouvre « *zones arides* »**
> Dans ce livrable, « zones arides » désigne les terres dont l'indice d'aridité (P/PET) est inférieur à 0,65, au sens large de la définition UNCCD (IPCC SRCCL 2019 ; UNCCD 2022).
> Le terme anglais *drylands*, utilisé dans ce livrable faute d'équivalent français stabilisé, recouvre ce même périmètre.

La mesure standard est l'indice d'aridité (AI), défini comme le rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle (P/PET). La PET est la quantité d'eau qu'un sol végétalisé évaporerait si l'eau n'y était pas limitante. Quand la PET dépasse les précipitations, le bilan hydrique est structurellement déficitaire : on est en zone aride. Le cadre des drylands distingue quatre classes selon des seuils discrets : hyper-aride (AI < 0,05), aride (0,05–0,20), semi-aride (0,20–0,50), subhumide sec (0,50–0,65). La Convention des Nations unies de lutte contre la désertification (UNCCD) opère sur les trois dernières de ces classes, excluant les hyper-arides de son périmètre opérationnel. Pour l'horizon d'action de la convention, ces zones sont des états stabilisés hors d'atteinte des leviers de lutte contre la dégradation des terres. Leur origine, naturelle ou anthropique sur le temps long, relève d'une question distincte. Le subhumide sec, bien qu'éloigné de l'image courante du désert, est inclus dans le cadre en raison de sa vulnérabilité au franchissement de seuils (Berdugo et al. 2020).

Cette classification recoupe la cartographie de Köppen-Geiger pour les types BWh, BWk, BSh, BSk, sans s'y substituer. Köppen attribue à chaque lieu un type climatique unique, calculé sur des moyennes longues. L'indice d'aridité est une variable continue dont on peut suivre la dérive d'année en année. Le livrable retient l'AI comme grille de lecture principale et utilise Köppen en référence indirecte. La cartographie globale de l'AI la plus citée à ce jour est celle de Zomer, Xu & Trabucco (2022), qui actualise les bases climatiques antérieures.

La distinction entre l'aridification et la désertification est plus que cosmétique. L'aridification désigne l'augmentation de l'aridité, mesurée par la

baisse de l'AI sous l'effet de modifications climatiques : baisse des précipitations, hausse de la PET ou les deux. La désertification, selon la convention UNCCD, désigne la dégradation des terres en zones arides, semi-arides ou subhumides sèches, sous l'effet combiné de variations climatiques et d'activités humaines (UNCCD 2022). Dans la littérature anglo-saxonne, cette distinction recoupe celle proposée par Reynolds et Stafford Smith (2002) entre *desiccation* (oscillations régionales du climat hors signal anthropique) et *desertification* (dégradation anthropique des terres en climat aride). La présente version française utilise les termes aridification et désertification dans cet usage. Une zone semi-aride peut donc se désertifier sans s'aridifier (dégradation par surpâturage à climat constant). Une zone peut s'aridifier sans dégradation visible des terres, lorsqu'un changement de régime pluviométrique n'a pas encore dégradé la couverture végétale. Cette distinction structure la suite du livrable. La plateforme desert.eco compare des situations où les deux dynamiques s'entremêlent, mais leurs leviers d'action diffèrent.

À mesure que l'aridité s'accroît, les marges de manœuvre se rétrécissent par paliers. Berdugo et al. (2020) ont établi à l'échelle globale que les écosystèmes terrestres traversent trois seuils écosystémiques séquentiels, situés autour de AI ≈ 0,54, 0,70 et 0,82. Ils correspondent à des transitions abruptes dans la couverture végétale, la productivité et la complexité fonctionnelle des sols. Ces seuils, identifiés à partir de l'analyse de vingt attributs écosystémiques, sont opérationnels (fermeture de fenêtres d'opportunité). Au-delà du dernier seuil, le couvert végétal s'effondre vers le sol nu. L'effort de restauration devient très complexe. Berdugo et al. (2022) montrent que la moitié des changements de végétation observés dans les zones arides globales sont abrupts. Ils se réfèrent autant à des trajectoires positives (Sahel, Asie centrale, Australie) que négatives. Ici, l'exemple phare est l'Amérique du Nord, où 62,6 % des changements abrupts sont des déclins.

Cette revue porte sur la partie des terres dégradées où l'aridité est un facteur structurant. Ce n'est qu'une fraction. Selon le Global Land Outlook 2 (UNCCD 2022), 40 % des terres globales sont aujourd'hui dégradées, mais toutes ne sont pas arides. Inversement, toutes les zones arides ne sont pas dégradées. C'est la fraction où la mécanique des seuils de Berdugo donne une pertinence opérationnelle particulière à la question de la régénération, parce qu'il y subsiste des marges. Ces marges, une fois franchies, deviennent compliquées à reconquérir.

II.b. Panorama des zones arides mondiales

Les zones arides ne sont pas monolithiques. Elles couvrent environ 41 % des terres émergées et abritent 2,3 milliards de personnes en 2020 (Mirzabaev et al. 2022 ; UNCCD-SPI 2024). Cette sous-section dresse l'image globale, le gradient interne et la mosaïque brunissement-verdissement qui complique tout panorama statique. Un point souvent occulté est aussi abordé. L'aridité existe aussi en poches dans des paysages globalement non arides.

Toutes les zones arides ne sont pas équivalentes. Les zones hyper-arides (Sahara central, Atacama, Rub al-Khali, Gobi) relèvent d'écosystèmes minéraux où la vie biologique se déclenche par à-coups, le temps d'une rare averse. La régénération biologique n'y a priori pas vocation à être recherchée par intervention. Les zones semi-arides et subhumides sèches, qui concentrent les agricultures pluviale et pastorales, relèvent d'une logique de seuils biogéochimiques. Elle abrite les zones de marges où la régénération est à la fois pertinente et techniquement envisageable. Cette différence conditionne les leviers. On n'intervient pas sur un erg comme sur une steppe semi-aride. Certaines confusions s'expliquent par l'oubli de cette distinction.

Le panorama statique masque une dynamique. L'évaluation IPCC (Mirzabaev et al. 2022) documente un paradoxe central. Entre 1982 et 2015, 6 % des zones arides globales se sont désertifiées tandis que 41 % ont verdi. Ce verdissement n'est pas uniforme ni forcément positif. Piao et al. (2020) attribuent à l'effet fertilisant du CO_2 une large part du verdissement global. En Chine et en Inde, l'intensification agricole et l'irrigation y pèsent fortement. Ils posent une nuance. Un signal de verdissement satellitaire peut recouvrir une intensification d'usage qui appauvrit le système.

Une dernière zone d'observation est plus diffuse et moins documentée. L'aridification ne se déploie pas seulement aux marges des zones arides reconnues : elle apparaît en poches au sein de paysages globalement humides ou subhumides, à des échelles fines (parcelle, bassin versant, micro-région). Le cas birman (WWF-Myanmar 2020) documente une poche aride au cœur d'une région bénéficiant de la mousson tropicale, reliée à des pratiques d'occupation du sol.

L'observation d'un mitage aride en territoire tempéré est plus diffuse encore. On peut observer des « micro-déserts agricoles » et des différentiels visibles entre zones soumises à des usages des sols différents (cas frontalier RDA/RFA, cas français). Ceci fait l'objet de travaux internes en cours par C. Cabrol (communication personnelle, 2025). À l'échelle globale, ce mitage est désormais documenté. Dureti et al. (2026), exploitant les discontinuités d'état des sols cultivés de part et d'autre des frontières internationales à conditions climatiques

égales, mettent en évidence des différentiels nets que les moyennes nationales masquent.

II.c. Scénarios d'extension de l'aridification

Les zones arides s'étendent-elles ? Si la question paraît empirique, la littérature académique de ces dix dernières années oppose des projections qui couvrent entre un quart et plus de la moitié des terres émergées en 2100. Les chiffres varient selon les hypothèses méthodologiques retenues. La divergence tient moins à l'incertitude des données qu'à des choix de méthode : la définition de l'aridité retenue et la manière de calculer l'évapotranspiration. Cette sous-section expose le débat avant de présenter les mécanismes physiques en jeu.

La projection canonique vient de Huang et al. (2016). Elle estime que les zones arides couvriront 50 à 56 % des terres émergées d'ici 2100. Cette projection a structuré le discours public et institutionnel durant la décennie 2010. Elle est cependant contestée sur des bases méthodologiques. Berg & McColl (2021) introduisent un indice écohydrologique qui tient compte de l'effet du CO_2 sur la physiologie végétale. A concentration accrue, les plantes ferment partiellement leurs stomates, réduisant la transpiration et découplant l'indice d'aridité atmosphérique de la limitation hydrique réelle. Selon cette approche, aucune expansion globale nette des zones arides n'est projetée. Pour Zhou & Yu (2025), l'évapotranspiration potentielle calculée selon la formule de Penman, qui sous-tend les estimations classiques, surestime systématiquement l'assèchement continental. Recalculée selon un bilan énergétique strict, l'expansion projetée n'est plus statistiquement aussi significative.

Ce débat n'est pas un détail technique. Il porte sur ce qu'on veut mesurer : un signal climatique atmosphérique au sens classique de P/PET ou une contrainte hydrique effective sur les écosystèmes. Les deux camps s'accordent sur les observations passées. Au sens de l'indice d'aridité, la période 1980-2015 a vu une expansion documentée des zones arides. Cette expansion atmosphérique ne contredit pas le verdissement satellitaire relevé sur la même période. Les deux signaux ne mesurent pas la même chose. Leur désaccord porte sur l'interprétation de ce signal et sur sa projection. La synthèse institutionnelle (UNCCD-SPI 2024) tient la trajectoire d'expansion pour acquise. Selon elle, jusqu'à 5 milliards de personnes vivront en zones arides d'ici 2100 dans les pires scénarios. La science n'est cependant pas figée. Les modèles continuent d'évoluer, en particulier sur l'intégration des rétroactions terre-atmosphère.

Indépendamment des projections, la décomposition causale de l'expansion observée est utile. Feng et al. (2022) établissent avec environ 95 % de

confiance que les émissions de gaz à effet de serre pilotent l'expansion globale des zones arides. Néanmoins, les schémas spatiaux d'aridification, à la résolution régionale, ne sont pas encore attribuables aux seuls GES. Burrell et al. (2020), sur la base d'une analyse NDVI satellitaire mondiale, estiment que 5 millions de km² de zones arides ont basculé vers la désertification depuis 1982, soit 12,6 % du total. Ils identifient l'usage des sols comme facteur dominant, le changement climatique anthropique comme amplificateur. Ces résultats ne se contredisent pas. Le climat globalise la pression, l'usage des sols la régionalise. Cette dissociation a une conséquence opérationnelle. Les leviers d'action sur l'usage des sols restent significatifs, indépendamment de la trajectoire climatique projetée.

Une catégorie de mécanismes complique la lecture. Koppa et al. (2024) montrent que les zones déjà arides sont elles-mêmes responsables de plus de 40 % de l'aridification des zones nouvellement aridifiée, à cause de la réduction de l'évaporation et de l'advection de chaleur sensible. Les auteurs qualifient ce phénomène d'auto-extension. Une zone aride n'évapore plus, donc n'humidifie plus l'atmosphère sous le vent, ce qui assèche les zones réceptrices voisines. Les sécheresses sont en ce sens contagieuses. Ce résultat ouvre directement vers la question du recyclage des précipitations. Interrompre l'auto-extension demande de régénérer les zones sources en amont, pas seulement les zones réceptrices.

L'autre catégorie de mécanismes concerne la réversibilité. Jinling et al. (2025) montrent que l'aridification, à l'échelle globale, présente un comportement hystérétique. Même dans les scénarios de mitigation où le CO_2 atmosphérique décline, les zones arides continuent de s'étendre. Cela s'explique par une réorganisation persistante de la zone de convergence intertropicale et des précipitations tropicales. Chandanpurkar et al. (2025), à partir des données GRACE (2002–2024) identifient des zones de méga-assèchement continental dans l'hémisphère Nord. 68 % de la perte de stockage en eau provient de la déplétion des nappes phréatiques. Ces deux résultats convergent sur un point qu'on ne peut pas écarter. La trajectoire actuelle a une part d'inertie. La régénération ne peut pas être pensée comme la remise à plat d'un système réversible. Les contraintes du phénomène global de réchauffement climatique ne peuvent donc être omises.

Une dernière catégorie de mécanismes ressort d'une lecture agronomique. Les cinq piliers identifiés par Husson et al. (2025) décrivent l'état du sol. L'aridification pèse d'abord sur le premier d'entre eux, l'eau. Ses effets se propagent à la structure, la biologie et l'équilibre minéral. La régénération en zones arides ne se réduit donc pas à compenser l'indice d'aridité. Elle travaille un

ensemble couplé de contraintes. Les seuils de Berdugo signalent quand ce couplage devient critique.

Enfin, l'ombre pluviométrique, diminution des précipitations sur le versant sous le vent d'une chaîne de montagnes, explique l'existence de zones arides avec un déficit pluviométrique très marqué. Pour ces zones, la régénération hydrologique est particulièrement complexe. Les déserts d'Atacama et de Gobi en sont des illustrations.

II.d. Zones de l'aridité : histoires de lutte différenciées

Les zones arides du monde permettent de documenter des histoires de dégradation et des configurations institutionnelles de réponse variées. Les zones aujourd'hui les plus en pointe sont, presque sans exception, celles qui ont été dégradées le plus tôt et le plus durement. Cette asymétrie d'expertise façonne ce que la littérature scientifique a documenté sur la régénération en zones arides.

Trois grandes configurations se dégagent. La première concerne des zones de dégradation ancienne, dotée d'un État central fort : Chine, Méditerranée, Asie centrale postsoviétiques. La deuxième regroupe des zones à pression démographique, où la captation hydrique est un enjeu, avec des réponses paysannes ou hybrides : Sahel, Inde du Nord-Ouest, parties du Moyen-Orient. La troisième couvre des zones à faible densité humaine, avec une dégradation pastorale documentée et une réponse en deuil de l'état antérieur ou qui sont des « laboratoires techniques » : Patagonie, Australie aride, *rangelands* nord-américains. Cette typologie propose une grille de lecture, pas une taxonomie. Plusieurs zones illustrent ces configurations.

Chine

La singularité chinoise tient à la conjonction d'une dégradation ancienne, ressentie comme menace urbaine (tempêtes de poussière touchant les villes) et d'un État central capable de mobiliser à grande échelle. Le Plateau de Loess, dégradé par des siècles d'agriculture, et les zones de Mongolie-Intérieure et du Xinjiang sont devenus le terrain d'expérimentations massives (Programme des Trois-Nords lancé en 1978, Grain for Green à partir de 1999).

Sahel

La densité humaine élevée et une tension foncière chronique entre éleveurs et agriculteurs font du Sahel un cas particulier. Avec 30 à 100 habitants par kilomètre carré selon les zones, c'est l'une des rares grandes zones arides aussi peuplées. Les sécheresses qui l'ont frappé dans les années 1970-1980 ont précipité l'effondrement agropastoral.

Méditerranée

La Méditerranée est marquée par une dégradation millénaire. Déforestations antiques, érosion accumulée sur des sols anciennement productifs, paysages progressivement transformés en garrigues, maquis et terres ravinées. Les techniques de gestion de l'eau (jessour, terrasses, banquettes) sont anciennes et partiellement abandonnées au XXe siècle. Elles réémergent aujourd'hui comme objets d'étude (Castelli et al. 2019 ; Jarray et al. 2023 ; Martínez-Mena et al. 2020). À ce temps long s'ajoute une asymétrie Nord-Sud. Sur la rive nord, sous l'impulsion de la Politique Agricole Commune Européenne (PAC) et d'un exode rural prolongé, les terres marginales s'enfrichent, le carbone organique de surface s'accumule lentement, ce qui augmente les risques d'incendies (Bell et al. 2021 ; Boix-Fayos et al. 2009). La rive Sud, elle, subit une pression démographique et agricole soutenue. L'hétérogénéité des trajectoires de chaque côté du bassin est plus forte que ne le suggèrent les cartes de Köppen ou les indices d'aridité moyens. Ainsi, le devenir d'une zone aride peut être façonné moins par les choix faits sur place que par des décisions extérieures, politiques agricoles, exode rural, marchés mondiaux.

Inde du Nord-Ouest : le désert du Thar

Le Thar est la seule zone aride au monde à conjuguer densité humaine très élevée (jusqu'à 80 habitants par kilomètre carré) et mousson active. Cette double caractéristique change la nature même de la lutte. L'eau ne manque pas absolument. Elle tombe durant la mousson, mais ruisselle ou s'évapore avant d'avoir pu être utilisée. La problématique n'est plus celle de l'apport, mais de la captation et du stockage. Cette spécificité a réactivé une tradition de *water harvesting* indigène relayée à partir des années 1980 par des mouvements paysans organisés autour du Tarun Bharat Sangh (Everard 2015 ; Yadav et al. 2022).

Patagonie

L'extrême Sud de l'Argentine et du Chili représente l'inverse démographique du Thar : très faible densité d'habitants, des étendues steppiques qui se mesurent en centaines de milliers de kilomètres carrés, mémoire institutionnelle limitée. La pression historique principale est le pastoralisme ovin.

Au-delà de ces cinq zones

L'Asie centrale anciennement soviétique, et singulièrement le bassin de la mer d'Aral, illustre la version extrême de la problématique d'une irrigation massive aux effets contestés. Elle a conduit à un effondrement écologique documenté à l'échelle de plusieurs décennies, qu'on a cherché à contrer avec des programmes

de phytostabilisation par saxaul (Kim et al. 2024) et la reconquête steppique dans des friches au Kazakhstan (Brinkert et al. 2016). Le Moyen-Orient et la Péninsule Arabique relèvent de configurations fragmentées où la documentation peer-reviewed reste rare en regard de l'ambition affichée des programmes (Al-Harbi et al. 2024 ; Ghazanfar 2024). L'Australie aride, enfin, se rapproche des zones pastorales des Etats-Unis : zones étendues, faible densité, pâturage adaptatif et restauration de biocroûtes (Bartley et al. 2022 ; Schultz et al. 2022).

Ce panorama est asymétrique. Les zones les mieux documentées sont celles qui ont porté un programme durable, pas nécessairement les plus performantes.

III. Mécanismes de l'aridification

III.a. L'usage des sols, pilote du climat ?

La formule « le climat global comme moteur, l'usage des sols comme amplificateur régional » décrit la décomposition causale du signal, non les mécanismes physiques par lesquels l'occupation des sols agit. Elle ouvre surtout la question de la symétrie de l'effet. Si la dégradation des sols modifie le climat local, la régénération pourrait le modifier en retour. Eltahir a théorisé ce couplage dès le milieu des années 1990. La dégradation du couvert et l'assèchement des sols réduisent les précipitations en régions tropicales et de mousson, par une rétroaction humidité du sol-pluie (Eltahir 1996 ; Zheng & Eltahir 1997).

Le mécanisme tient au partage de l'énergie solaire. Un sol sec n'évapotranspire plus. L'énergie reçue part en chaleur sensible, qui réchauffe l'air, plutôt qu'en chaleur latente, qui partirait avec la vapeur d'eau. En régime méditerranéen et tempéré, des sols secs au printemps exacerbent les extrêmes thermiques de l'été suivant. Des sols humides les atténuent (Ardilouze et al. 2021). Le même couplage joue sur la pluie, mais la réponse pluviométrique dépend fortement du modèle (Ardilouze et al. 2020).

Le Midwest américain en donne une démonstration empirique inattendue. Depuis les années 1950, l'intensification de la culture du maïs sur la Corn Belt a accru l'évapotranspiration estivale. Les températures maximales estivales ont baissé alors que la moyenne globale montait (Mueller et al. 2016). Des travaux régionaux y associent une hausse des pluies d'été. La nuance s'impose. Cette intensification industrielle, dépendante de l'irrigation et exposée à la rétraction des nappes, n'est pas une stricte « régénération écologique ». L'effet bioclimatique, lui, est réel. Un changement d'usage des sols a déplacé un signal climatique régional.

Pour les zones arides, l'enjeu n'est pas de transposer le Midwest, mais d'en retenir le principe. Les modes d'occupation des sols sont des leviers physiques mesurables sur le climat local, le bilan thermique et le cycle de l'eau, sur lesquels la régénération agit en reconstituant couvert et évapotranspiration. Toutefois, le levier joue plus vite en phase de dégradation que d'aggradation.

III.b. Mécanismes locaux de rupture du cycle de l'eau

À l'échelle d'un paysage, trois mécanismes emboîtés, du millimètre au kilomètre, expliquent comment la dégradation rompt le cycle local de l'eau.

Au plus fin, évoquons la croûte de battance. Sur sol nu, l'énergie cinétique des gouttes désagrège les agrégats de surface. Les fragments colmatent les premiers pores et forment une croûte dense de l'ordre du dixième de millimètre. Sa conductivité hydraulique chute, l'infiltration s'effondre, le ruissellement prend le relais (Le Bissonnais 1996 ; Valentin & Bresson 1992). Le facteur décisif est le couvert. Protégé par la végétation et la matière organique, le sol encaisse l'impact. Nu, il y est exposé. Ce phénomène ne doit pas être confondu avec les biocroûtes (cyanobactéries, lichens et mousses), qui stabilisent la surface sans l'imperméabiliser et sont très présentes dans les *drylands*.

À l'échelle supérieure, l'eau ne ruisselle pas en ligne droite. Elle traverse une mosaïque de patches végétalisés et d'inter-patches dénudés, où les premiers captent et retiennent tandis que les seconds transfèrent (Tongway & Ludwig 2007). Cette structure régule l'eau davantage que la pluviométrie moyenne. Au Tigray, des mesures de terrain associent à cette couverture l'essentiel de la variation du ruissellement. Celui-ci devient négligeable au-delà d'environ 65 % de couvert (Descheemaeker et al. 2006). Ces valeurs sont propres au site et non une loi générale. Le surpâturage, la mise en culture et l'érosion homogénéisent le paysage et font basculer le bilan vers le ruissellement.

Le mécanisme le plus en amont est météorologique. En zone aride, une fraction de la pluie n'atteint jamais le sol. Les gouttes s'évaporent en chute dans la couche d'air sec sous la base nuageuse. Il s'agit de la virga, documentée de longue date, fréquente quand la base des cumulus s'élève à trois ou quatre kilomètres (Petterssen 1958 ; Fraser & Bohren 1992). Le lien à la dégradation exige la prudence. Nous postulons qu'un sol dégradé, renvoyant plus de chaleur sensible et asséchant la couche basse, favoriserait cette évaporation. Ce mécanisme est physiquement cohérent mais la quantification reste à établir. À l'inverse, un paysage intact entretient un cycle local (cumulus en matinée, averse en fin de journée). Selon les travaux de Millán Millán et al. (2005), les orages méditerranéens d'après-midi tendent à disparaître l'été, suite à la dégradation du couvert et de l'urbanisation côtière.

III.c. Seuils, hystérésis et irréversibilité

La rupture du cycle local n'est pas stable. A l'échelle d'un paysage, elle franchit des seuils que la seule levée de la pression initiale ne suffit plus à inverser.

Les écosystèmes arides ne tendent pas vers un climax unique (terme du reste polémique en écologie, dont nous ne faisons pas un horizon nostalgique). La littérature état-transition l'a établi de longue date (Westoby et al. 1989 ; Briske et al. 2008). Le cadre des bascules catastrophiques en donne le mécanisme. Un

système peut occuper plusieurs états stables séparés par des seuils (Scheffer et al. 2001). Berdugo et al. (2020) en identifient trois à l'échelle globale, correspondant à des transitions abruptes de l'état du couvert et du fonctionnement des sols. La structure spatiale de la végétation porte d'ailleurs des signatures détectables avant le franchissement : auto-organisation en motifs dont la fragmentation annonce l'effondrement, désormais exploitée par apprentissage automatique (Rietkerk et al. 2004 ; Kéfi et al. 2007 ; Bernardino et al. 2025).

Le franchissement n'est pas symétrique : la trajectoire de retour, quand elle existe, ne suit pas l'inverse de la dégradation. La notion d'hystérésis est le cœur des états stables alternatifs (Scheffer et al. 2001). Min et al. (2025), sur 8 392 jeux de données issus de 247 articles, distinguent trois trajectoires : récupération facile pour les sites peu dégradés, récupération lente (une décennie ou plus pour le sol) pour les modérés, récupération bloquée par hystérésis pour les plus dégradés, avec la synergie plantes-sol-microorganismes comme verrou principal. D'autres travaux récents étendent le constat à l'échelle des modèles climatiques et confirment spécifiquement en zone aride (Liu et al. 2025 ; Micaela et al. 2025).

Une part de l'irréversibilité tient au sol. La levée de la pression principale, même sur des décennies, ne déclenche pas mécaniquement un retour. Pour les parcours Borana d'Éthiopie, des exclosures de 14 à 36 ans n'ont produit aucun effet significatif sur le carbone du sol (Aynekulu et al. 2017), faute de leviers concomitants. Le cas patagonien relève du même registre, à plus grande échelle. Plusieurs verrous sont propres à l'aride : la perte d'argiles par érosion est quasi-irréversible à l'échelle humaine, la pédogenèse argileuse étant bien plus lente que l'érosion. La banque de graines s'épuise quand la végétation cesse de fructifier. L'horizon encroûté perd la conductivité hydraulique qui permettrait le retour de l'infiltration. Un écosystème qui « régénère » ne revient pas nécessairement à son état antérieur. Il peut s'organiser dans une configuration sans analogue historique.

Une asymétrie de vitesse s'ajoute : la rétroaction terre-atmosphère amplifie l'extension géographique de la dégradation, les zones arides exportant leur sécheresse vers les zones réceptrices voisines (Burrell et al. 2020 ; Koppa et al. 2024). La bascule est plus rapide que le retour. Le contexte climatique global aggrave ce décalage. Des bascules positives existent néanmoins, nous le verrons.

III.d. Cascades et processus aggravants

Franchir un seuil ne clôt pas la trajectoire. Une seconde dynamique de processus enchaînés s'enclenche. Ils aggravent l'état atteint et exportent

l'aridification dans le temps et l'espace. Ces cascades opèrent sur trois canaux (hydrologique, biogéochimique, climatique). Les trois tendent à libérer vers l'atmosphère le carbone enfoui, transformant des puits de CO_2 en sources.

Quand un sol s'assèche durablement, ses propriétés physiques se dégradent (compaction, hydrophobicité, perte de porosité), produisant un régime de bascules brutales entre sec et humide. Mullens et al. (2025) le nomment *precipitation whiplash*. La cascade sécheresse-incendie-inondation-érosion s'enchaîne maillon par maillon. La sécheresse rend la végétation inflammable, le feu élimine couvert et stabilisateurs de versant et crée des couches hydrophobes. Les pluies suivantes ruissellent et emportent les sols dénudés. Vahedifard et al. (2024) en documentent les effets géomorphologiques (glissements, coulées, subsidence). Barendrecht et al. (2024) décryptent le pas de temps suivant, quand les sols durcis amplifient les crues, qui aggravent l'érosion.

La salinisation revêt deux formes : primaire (accumulation par évaporation depuis la nappe ou la roche-mère) et secondaire (irrigation mal drainée ou remontée de nappe induite par un changement de couvert) (Shokri et al. 2024). Son mécanisme impose une dépendance contre-intuitive à la pluie : abondante, elle lessive les sels en profondeur, rare, l'évaporation domine, les sels remontent et stérilisent la zone racinaire. Hassani et al. (2021) projettent une expansion de la salinisation primaire d'ici 2100. L'Aralkum, le fond de la mer d'Aral devenu désert salin en une vie humaine (Kim et al. 2024), en est une illustration extrême.

Le troisième processus concerne l'état des sols eux-mêmes. Leur stock de carbone est individuellement faible en aride. Cependant, ils couvrent 41 % des terres émergées. Leur agrégation pèse donc dans le bilan global. Beillouin et al. (2023), en méta-analyse de 230 méta-analyses, identifient le feu comme facteur de perte de carbone organique supérieur au seul réchauffement. Cascade et salinisation y contribuent l'une par combustion et érosion, l'autre par effondrement de la productivité. À l'inverse, stabiliser le couvert peut convertir le carbone aérien en réservoirs souterrains plus stables et moins exposés au feu (Kristensen et al. 2024). Le mouvement n'est pas symétrique. La libération opère sur des pas de temps courts, la séquestration, contrainte par la disponibilité hydrique et minérale, s'étale sur des décennies. C'est dans cette asymétrie que les trois processus convergent. Le risque d'effondrement tient moins à un événement unique qu'à l'enchaînement d'altérations qui rend chaque retour plus coûteux.

III.e. Altérations anthropiques des sols arides

L'aridification, signal climatique, ne rend pas compte à elle seule de la trajectoire des sols arides. L'altération anthropique directe des sols et des couverts s'y ajoute. Conjuguée au signal climatique, cela compose ce que l'UNCCD nomme désertification. Cette attribution conjointe est le cadre de référence (Mirzabaev et al. 2022). Le diagnostic pédologique anthropique se décline en quatre grandes voies.

La répartition des contributions varie selon l'échelle. Globalement, le forçage radiatif domine l'expansion observée des terres sèches. Les émissions expliquent avec une confiance élevée l'extension nette des *drylands* pour 1950-2014 (Feng et al. 2022). Burrell et al. (2020) estiment que le changement climatique anthropique a dégradé 12,6 % des terres arides entre 1982 et 2015 (5,43 millions de km², 213 millions de personnes, majoritairement dans les pays en développement). Quelque 6 % de surfaces supplémentaires ont basculé à cause d'usages non soutenables aggravés par le climat. À l'échelle des configurations spatiales, le forçage explique mal la concentration de la dégradation. Les pratiques locales le déterminent. Cette tension global-régional structure l'attribution en zone aride.

L'élevage extensif altère les *rangelands* par tassement, perte de couvert herbacé et bascule vers des états dégradés stables (Noy-Meir 1975 ; Briske et al. 2005). Ses effets s'amplifient avec l'aridité (Filazzola et al. 2020). Une fois perturbées, les biocroûtes récupèrent lentement (Concostrina-Zubiri et al. 2014). Les *rangelands* (terres non cultivées, steppes, savanes, prairies sèches, en pâturage extensif) forment la part dominante des surfaces dégradées en *drylands*. Les cultures pluviales, notamment en zones semi-arides et subhumides sèches, déstructurent les sols, accélèrent la minéralisation de la matière organique et favorisent croûtes de battance et érosion. La conversion de couverts pérennes en cultures annuelles peut amorcer des cascades pédologiques difficilement réversibles (Costantini et al. 2016). L'irrigation mal drainée provoque la salinisation en surface. Selon, Wei et al. (2025) une part de la désertification en Asie centrale vient des pratiques d'irrigation, à la signature distincte du signal climatique régional.

L'urbanisation représente peu de surface, mais la démographie change la donne (près de 4 milliards d'habitants en terres arides en 2050 contre 2,7 en 2010 ; UNCCD 2022), par imperméabilisation, altération des bilans hydriques et fragmentation. Les travaux académiques sur les drylands urbains restent rares.

IV. Questions scientifiques ouvertes

IV.a. En zone aride, planter des arbres réchauffe-t-il le climat local ?

Pendant plusieurs décennies, le consensus voulait que la hausse d'albédo l'emporte sur les bénéfices climatiques de la régénération aride. Un sol nu renvoie davantage de rayonnement solaire qu'un couvert végétal. L'hypothèse fondatrice est celle de Charney (1975). Au Sahel, la perte de couvert accroît l'albédo, dégrade le bilan radiatif, renforce la subsidence et réduit les précipitations. Bonan (2008) a posé la grille moderne, qui sépare les effets biogéochimiques de la végétation (séquestration de carbone) de ses effets biophysiques (albédo, évapotranspiration, rugosité, chimie atmosphérique). La question est restée la même. La transpiration et les nuages générés par la végétation aride compensent-ils la chaleur absorbée quand le sol s'assombrit ?

Depuis le milieu des années 2010, le verdict s'est inversé. Quatre études convergent vers le même résultat. L'évapotranspiration et les rétroactions de nuages dominent l'effet d'albédo. Syktus & McAlpine (2016) le montrent par modélisation pour des savanes boisées australiennes, Alkama & Cescatti (2016) par observation satellitaire globale du couvert forestier aux basses latitudes, Peng et al. (2014) par mesure en Chine où l'afforestation refroidit la surface, davantage en zones sèches. Daramola et al. (2026) concluent provisoirement sur la mécanique générale par une mesure satellitaire globale sur les zones arides verdissantes. Le refroidissement par évapotranspiration y excède le réchauffement par perte d'albédo, sous condition d'humidité suffisante du sol.

Trois questions demeurent. La première tient à l'aridité de départ. En Israël, sur un gradient d'environ 200 km, Rohatyn et al. (2023) mesurent que le délai pour que la séquestration compense le réchauffement par albédo varie d'un facteur cinq (213 ans pour les sites les plus secs, 43 ans pour les plus humides). Cette équipe de recherche a d'ailleurs publié des positions assez différentes sur l'effet net, signe que des variables échappaient à l'analyse. La deuxième question tient à la disponibilité en eau. Selon Feldman et al. (2023) la capacité de refroidissement décroît avec l'aridité, avec une perte de 14 % du refroidissement net en tropicales arides. Zampieri et al. (2023) relèvent inversement plus de 5 °C de refroidissement par végétation gérée en Péninsule Arabique, mais sur des couverts à apports hydriques soutenus. Le refroidissement net dépend donc de l'eau, pas seulement du couvert. La troisième question tient aux émissions chimiques. Weber et al. (2024) montrent que les composés organiques volatils biogéniques (COVB) émis par les forêts, via l'ozone et le méthane qu'ils génèrent,

compensent jusqu'à un tiers du refroidissement par séquestration de CO_2 d'une afforestation à grande échelle.

Pour la mécanique générale, un consensus se dessine. Le refroidissement par évapotranspiration l'emporte. Sur la pertinence de l'afforestation comme stratégie aride, le débat est ouvert, parce qu'il dépend du bilan hydrique. Hoek van Dijke et al. (2022) établissent à l'échelle globale que la plantation d'arbres réduit la disponibilité en eau dans 44 % des zones concernées, l'effet étant le plus marqué en zones arides où l'évapotranspiration des plantations excède les gains en pluie.

IV.b. Le verdissement global (*global greening*)

Le verdissement global, mesuré par l'indice de surface foliaire (LAI) satellitaire, est documenté depuis le milieu des années 1980. Deux propriétés en font un objet de diagnostic difficile. Sa répartition est très inégale. Chine et Inde concentrent un tiers du gain mondial sur 9 % seulement des terres végétalisées (Chen et al. 2019). Et le poids des écosystèmes semi-arides dans le bilan carbone terrestre, longtemps sous-estimé, est considérable. Ils expliquent près de 39 % de la variabilité interannuelle du puits de carbone global, plus que les forêts tropicales (Ahlström et al. 2015 ; Poulter et al. 2014). Comprendre ce qui pilote le verdissement des *drylands* devient ainsi central, pour le diagnostic régional comme pour le bilan global.

Un paradoxe préliminaire mérite d'être levé. Le LAI progresse depuis quarante ans alors que l'aridité atmosphérique, mesurée par l'évapotranspiration potentielle, augmente sur une grande partie des terres. Si l'aridité atmosphérique contraignait la végétation, un brunissement devrait suivre. Deux mécanismes déjà esquissés lèvent la contradiction. Le premier est physiologique. Sous CO_2 élevé, les plantes transpirent moins à carbone fixé égal, ce qui découple l'indice d'aridité atmosphérique de la contrainte hydrique réelle (Berg & McColl 2021). Le second est direct. La fertilisation par le CO_2 stimule la photosynthèse. Piao et al. (2020), sur plus de 250 publications, lui attribuent environ 70 % du verdissement global. Reste la part résiduelle, qui structure le débat d'attribution fine.

La fertilisation CO_2 ne porte pas tout le signal. La part de l'occupation des sols est croissante. Wang et al. (2025) chiffrent à 18,1 ± 5,9 % la contribution des changements de couverture à la hausse du LAI depuis les années 1980, soit environ un cinquième. La contribution la plus marquée vient de l'expansion arborée de l'hémisphère nord (33,8 ± 3,6 %), partiellement compensée par la déforestation tropicale (-15,7 ± 3,1 %). Chen et al. (2019) confirment, pour la Chine et l'Inde, un verdissement majoritairement issu de la gestion des terres, irrigation,

double culture et afforestation. Les deux récits ne s'opposent pas frontalement. Ils opèrent à des échelles distinctes, et la répartition entre CO_2 et usage des sols dépend de l'indicateur retenu.

La Chine concentre les écarts d'attribution les plus visibles. Wang et al. (2023) chiffrent à 13 % la part des politiques publiques. Le climat et la fertilisation CO_2 expliquent l'essentiel du reste. Yue et al. (2024) abordent la question par le bilan carbone plutôt que par la couverture. Sans les politiques chinoises de restauration, les sols seraient source nette de carbone, et ces politiques expliqueraient 72,7 % du puits observé entre 2001 et 2020. La contradiction est plus apparente que réelle. L'indicateur n'est pas le même, couverture d'un côté, flux carbone de l'autre. L'écart suffit néanmoins à montrer que, sans accord préalable sur la grandeur mesurée, l'attribution se déplace. Li et al. (2021) ajoutent une réserve hydrologique. Sur treize grands programmes recensés, 11,4 % des *drylands* restent dégradés. L'afforestation impose une pression hydrique substantielle.

Deux verrous structurent le débat. Le premier est l'indicateur. NDVI et LAI surestiment la qualité écologique (Piao et al. 2020). Une monoculture irriguée et un écosystème natif diversifié peuvent produire le même signal satellitaire. Le second tient aux outils de modélisation, pas toujours les mieux adaptés à cette fraction du globe. Les modèles dynamiques globaux de végétation sous-estiment systématiquement le flux carbone moyen et sa variabilité en zones arides, faute de bien représenter la sensibilité de la productivité primaire à l'humidité (MacBean et al. 2021). Le débat d'attribution se conduit ainsi avec des outils mal calibrés précisément sur la fraction qui pilote le plus la variabilité du puits.

IV.c. Sahara Vert et dynamiques historiques de dégradation

Il y a onze mille ans, le Sahara n'était pas un désert. Sédiments lacustres, pollens fossiles, faune datée et peintures rupestres documentent une savane arborée parcourue de lacs et de rivières. La fin de cet African Humid Period (AHP), il y a 5 à 6 000 ans, est déclenchée par une modification orbitale qui réduit l'insolation estivale boréale et affaiblit la mousson africaine. Le forçage orbital seul ne reproduit pas l'amplitude observée dans les modèles. Seules les simulations couplant orbite, couvert végétal, charge en poussières et lacs s'alignent sur les paléo-données. Pausata et al. (2016) montrent que la baisse des émissions de poussières liée au verdissement (un sol végétalisé émet moins de poussière) déplaçait la mousson ouest-africaine vers le nord deux fois plus que le seul forçage orbital. L'AHP est ainsi un cas où un système couplé sol-végétation-atmosphère s'est auto-entretenu pendant des millénaires, puis s'est effondré sous un forçage externe que ses propres rétroactions, devenues négatives, ont

amplifié plutôt qu'amorti. La chronologie de l'effondrement est solidement datée, mais la part qu'y ont prises les rétroactions reste débattue.

Le cas contemporain du lac Tchad donne à ce passé une résonance inattendue. Sa surface, réduite des trois quarts au plus fort des sécheresses des années 1980, est partiellement remontée depuis. La pluviométrie sahélienne s'est partiellement reconstituée depuis les années 1990. La crue de 2022 est comparable à celles de la période humide 1950-1960. L'eau souterraine alimentée par le Chari et le Logone contribue à environ 70 % de la variation annuelle du stockage. Ce signal d'ensemble est massif. Il ne procède d'aucun programme de régénération. Il pose l'attribution dans sa forme la plus aiguë. Avant de revendiquer un succès local, il faut distinguer ce qui relève de l'intervention de ce qui relève d'une dynamique climatique et hydrogéologique régionale.

Sur cette trame, les praticiens de la régénération construisent un récit de dégradation successive, Sahara, Égypte, Croissant Fertile, pourtour méditerranéen. La dégradation anthropique est documentée pour chaque zone prise à part (surpâturage néolithique, défrichements de l'âge du Bronze, irrigation mésopotamienne), mais la chaîne causale directe entre zones ne l'est pas. La fin de l'AHP est principalement orbitale. Le Croissant Fertile s'est dégradé sur fond de variabilité holocène déjà marquée. Le livrable mentionne ce récit comme hypothèse de travail mobilisatrice, sans l'endosser aveuglément. Le cas méditerranéen fait en revanche consensus sur un point. La palynologie confirme qu'avant les défrichements de l'âge du Bronze et de l'Antiquité, des forêts de chênes caducifoliés, de hêtres et de pins couvraient les versants aujourd'hui en garrigue, maquis et badlands (Delhon et al. 2010). La pression continue des ongulés domestiques les a maintenus ouverts en empêchant la régénération naturelle. L'argument de réversibilité qui en découle se manie avec discernement. Certains versants conservent un sol et une banque de graines suffisants pour répondre à une mise au repos. D'autres ont franchi des seuils au-delà desquels lever la cause ne résorbe pas l'effet à échelle humaine.

Ces systèmes ont basculé dans un sens, parfois dans l'autre, selon des amplitudes qui n'étaient pas planifiées. Un cadre d'évaluation de la régénération aride ne peut donc se contenter d'un signal de couverture. Il doit distinguer, dans un verdissement observé, la part du projet, celle du climat régional et celle des rétroactions internes au système sol-végétation-atmosphère.

IV.d. Macro-tendances, climat et attribution

L'attribution macro ne se joue pas qu'aux échelles paroxystiques comme le lac Tchad. Elle traverse, à des degrés variables, la plupart des trajectoires

documentées en zones arides. La tension de fond est simple à énoncer, mais difficile à résoudre. Un design contrefactuel rigoureux suppose des territoires comparables. Ils sont rares en zones arides, où les conditions hydroclimatiques sont souvent hétérogènes à l'échelle régionale.

L'oscillation australe El Niño (ENSO) est le premier modulateur. Pour l'Australie de l'Est, Van Dijk et al. (2013) lui attribuent l'essentiel du déficit pluviométrique de la Millennium Drought (2001-2009). Au Sahel, Ndehedehe et al. (2019) documentent des téléconnexions claires entre ENSO, oscillations multi-décennales et sécheresses, sans qu'un mécanisme unique ne permette de clore le diagnostic. La corrélation n'est pas stationnaire. Wang et al. (2014) montrent que la phase de l'oscillation décennale du Pacifique (PDO) module l'effet de l'ENSO sur les zones sèches. En phase, les anomalies se renforcent. En opposition, elles s'atténuent. La conséquence pour l'attribution est directe. Selon sa phase, ENSO peut masquer un effet d'intervention. Un projet qui régénère réellement pendant une phase défavorable verra son signal écrasé, quand un projet inerte verra une trajectoire favorable s'attacher à lui par coïncidence. Cela justifie qu'un protocole d'attribution tente de décomposer le signal climatique régional pour lire le résultat.

Le déplacement de la cellule de Hadley est un second modulateur structurel. Lu et al. (2007) ont diagnostiqué par simulations une expansion de la circulation de Hadley vers les pôles. Un déplacement de sa zone subsidente y est lié. Cette branche descendante d'air sec définit les latitudes désertiques. Sous scénario fort, les zones arides subtropicales s'étendent ainsi d'environ 1° par hémisphère vers les pôles. Les observations confirment l'expansion pour les dernières décennies, sa magnitude restant discutée selon l'indicateur. Schmidt et al. (2017) précisent que l'assèchement associé n'est pas zonalement symétrique, moins net sur les terres que sur les océans, ce qui complique la lecture régionale.

Joseph et al. (2024) en donnent une illustration locale. Dans l'Inde du Nord-Ouest, l'élargissement de Hadley combiné au réchauffement de l'océan Indien augmente la mousson estivale. Une dynamique globale produit donc localement l'inverse de ce qu'une lecture naïve attendrait.

À cette logique s'ajoute une rétroaction partant du sol. Miralles et al. (2025) rattachent à ce mécanisme l'idée qu'une surface plus claire (albédo accru par la perte de couvert) renforce la subsidence de Hadley. Ceci entretiendrait les conditions arides, comme l'illustre le cas sahélien. Couplée à l'auto-extension des sécheresses, cette boucle ferait du forçage de Hadley un processus à double sens. L'expansion de Hadley est solidement établie. Le poids des boucles de

rétroaction reste à quantifier. La revue de Miralles l'examine aussi aux échelles méso et micro.

Un troisième type de mécanismes mérite mention, les régimes de blocage anticyclonique estivaux. Cassou et al. (2005) ont montré que les canicules européennes sont associées à deux régimes de circulation d'été, eux-mêmes modulés par les anomalies de température de l'Atlantique tropical. Ces blocages prolongent les périodes sèches, puis cèdent à des précipitations concentrées et intenses. La littérature qualifie cela de « coup de fouet » pluviométrique (Mullens et al. 2025 ; Barendrecht et al. 2024). Sur un sol nu, ces averses provoquent battance, ruissellement et érosion (Le Bissonnais 1996), alors qu'une couverture végétale dense dissipe l'énergie des gouttes et améliore l'infiltration. La régénération mobilise directement ce levier d'atténuation.

IV.e. Le couplage sol-végétation-atmosphère

Une fois les dynamiques macro-climatiques présentées, reste la question de l'effet du couvert végétal et de l'état du sol sur la pluie qui tombe. C'est le point le plus discuté du chapitre.

À la circulation atmosphérique synoptique de grande échelle s'ajoute un mécanisme côtier de moyenne échelle. Millán Millán en a émis l'hypothèse dès le milieu des années 1990. Sur la rive nord-occidentale de la Méditerranée, l'urbanisation côtière, la déforestation des piémonts et la rupture du cycle local de l'eau (battance, perte de rugosité hydrologique) ont diminué l'évapotranspiration estivale. La couche d'air en contact avec le sol, privée de vapeur d'eau, ne déclenche plus la convection orageuse vers l'arrière-pays. Les orages méditerranéens d'après-midi, autrefois réguliers en été, tendent à disparaître (Millán Millán et al. 2005). Formulé il y a près de trois décennies, ce mécanisme reste sous-instrumenté en termes contrefactuels. Il décrit néanmoins un canal physique cohérent. L'usage des sols côtiers détermine si l'humidité venue de la mer abouti à des précipitations sur les terres.

Le mécanisme général qui sous-tend ces observations est cartographié à l'échelle globale. Van der Ent et al. (2010) ont établi qu'environ 40 % des précipitations terrestres proviennent de l'évaporation continentale et que 57 % de celle-ci retombe sur les continents. Une forte disparité régionale existe (recyclage faible sur les façades océaniques, très élevé au cœur des continents). Spracklen, Arnold et al. (2012) en quantifient la modulation par la végétation. Sur plus de 60 % des terres tropicales, l'air ayant traversé une végétation étendue produit au moins deux fois plus de pluie qu'au-dessus d'une zone peu végétalisée. D'où, projeté sur les trajectoires de déforestation, des baisses de précipitation

amazonienne de 12 % en saison humide et 21 % en saison sèche d'ici 2050. Selon la revue de Spracklen et al. (2018) la déforestation tropicale réduit l'évapotranspiration, réchauffe la surface de 1 à 3 °C et abaisse les précipitations régionales jusqu'à 40 %.

La preuve la plus directe d'un effet du couvert sur la précipitation en zone semi-aride vient du Sahel. Notaro et al. (2017) ont identifié, par observation satellitaire, une rétroaction positive végétation-précipitations dont le mécanisme dominant est le recyclage d'humidité, non l'albédo. Le couvert accru augmente l'évapotranspiration, l'eau précipitable et l'activité convective. Cette inversion empirique déplace la lecture du couplage. Si la dégradation du couvert diminue la pluie, sa reconstitution pourrait, sous conditions, l'augmenter. Les projections ne sont pas linéaires pour autant. Staal et al. (2025) prévoient une diminution du ratio de recyclage continental de 3 à 7 % d'ici 2100. Les conséquences les plus marquées seraient dans les zones arides, où les apports d'humidité sous le vent dépendent davantage de la végétation amont. Si ces mécanismes se confirment en contexte aride, la régénération devrait être pensée comme agissant aux deux extrémités du couplage amont-aval.

Le couplage continental a aussi reçu une formulation théorique forte. La théorie de la pompe biotique, proposée par Makarieva, Gorshkov et al. (2009), avance que la condensation au-dessus des forêts génère un gradient de pression qui aspire l'humidité océanique vers l'intérieur des continents. L'analyse de cinq transects continentaux, bassins forestiers où la pluviométrie reste quasi-constante sur des milliers de kilomètres contre un déclin exponentiel sur les zones non forestées, soutient l'hypothèse. La proposition reste discutée. Les modèles classiques ne reproduisent pas la magnitude avancée. L'évidence empirique est tout autant compatible avec d'autres mécanismes (recyclage simple, convection thermique, rugosité). C'est une hypothèse parmi d'autres, non le pivot du raisonnement. La forêt amazonienne offre néanmoins un cas mieux contraint. En fin de saison sèche, la transpiration de la canopée humidifie et déstabilise la basse atmosphère (Wright et al. 2017). Elle active une convection peu profonde qui prépare la convection profonde, deux à trois mois avant l'arrivée de la Zone de convergence intertropicale. A partir des traceurs isotopiques, la transpiration émise par la forêt apparait comme source dominante de cette humidité. Le détail de l'enchaînement convectif et le poids des autres processus restent discutés.

Des mécanismes physiques locaux modulent enfin la transformation de la vapeur en pluie. La virga, évaporation des gouttes en chute dans une couche d'air sec sous la base nuageuse, n'est que la fraction visible d'un problème plus large. À condensation constante, la quantité de pluie qui atteint le sol dépend des

conditions au sol et dans la couche d'air sous-jacente. La rugosité aérodynamique des canopées module la convection et la formation de nuages. La position LMDC précise ce point. Ce qui compte n'est pas seulement l'indice foliaire moyen, mais l'hétérogénéité spatiale entre canopée haute et basse. Cela crée les instabilités locales qui déclenchent la convergence atmosphérique, c'est-à-dire la rencontre de masses d'air qui force l'ascension et la condensation (C. Cabrol, communication personnelle 2026). Un dernier canal est sous-représenté dans la modélisation. Les bioaérosols (bactéries glaçogènes, spores fongiques, pollens) servent de noyaux de condensation et de glaciation (Morris et al. 2014). Le couvert végétal ne module donc pas seulement la vapeur disponible, mais aussi la capacité atmosphérique à précipiter. La revue de Miralles et al. (2025) place ces couplages au cœur des limites de la modélisation climatique actuelle.

IV.f. Symétrie inverse : la régénération peut-elle modifier la pluie ?

Si la dégradation du couvert casse le couplage local, sa reconstitution devrait le réactiver. Cette symétrie n'est ni automatique ni universelle.

Le cas chinois fournit le faisceau le plus dense. Une étude de modélisation du recyclage atmosphérique (An et al. 2025) montre qu'entre 2001 et 2020, l'expansion forestière en mousson orientale et la restauration des prairies sur le plateau tibétain et le Nord-Ouest aride ont augmenté l'évapotranspiration de 1,7 mm/an et les précipitations de 1,2 mm/an, la disponibilité nette (P - ET) diminuant de 0,5 mm/an. Le résultat saillant n'est pas le bilan moyen mais sa redistribution : la disponibilité augmente sur le plateau tibétain au détriment de la région orientale et du Nord-Ouest aride, par transfert d'humidité inter-régional. Pour le Plateau de Loess, Liu et al. (2023) montrent, par modélisation couplée à un traceur de vapeur, que la pluie gagnée par la transpiration accrue dépasse la perte par évapotranspiration directe en saison de croissance. La pérennité hydrique du verdissement reste débattue. Ces résultats valident le mécanisme (les changements d'usage redistribuent la pluie via le recyclage). Sa contrepartie est aussi validée : régénérer une zone peut assécher celle qui en dépendait en aval.

D'autres signaux convergent. En Chine, dans le désert de Mu Us, Gao et al. (2025) documentent une trajectoire de déplétion hydrique initiale, puis de récupération via une rétroaction végétation-précipitations. La symétrie n'est pas uniforme pour autant. Autour de la Méditerranée, l'afforestation produit deux régimes opposés selon l'humidité initiale du sol, « *dry gets drier, wet gets wetter* » (Theeuwen et al. 2025). Régénérer la rive Nord, plus humide, pourrait y amplifier la pluie tout en aggravant l'assèchement de la rive Sud déjà sèche.

En contexte plus aride, les preuves observationnelles d'une telle rétroaction sont rares. Le verdissement du Thar reste attribué au macro-climat, à l'irrigation et au pompage des nappes. La Mongolie, le Maghreb et l'Asie centrale restent sans preuve consolidée. Cette lacune n'invalide pas l'hypothèse de symétrie : documenter l'effet de la régénération sur les précipitations en zones réellement arides reste un programme à conduire. La possibilité de bascules positives à grande échelle (Lenton et al. 2023 ; Eker et al. 2024) demeure spéculative et à examiner au cas par cas.

V. Les projets de régénération

Le panorama qui suit s'appuie sur un corpus de près de 500 références. L'exhaustivité n'étant pas atteignable, nous privilégions les cas documentés.

Trois biais orientent ce que la littérature rend disponible. Le premier est la sur-représentation de quelques cas emblématiques, le Plateau de Loess et la RNA sahélienne concentrant une part importante des références. Le deuxième est géographique, en faveur des publications nord-américaines et chinoises. La production se raréfie pour l'Asie centrale, la péninsule Arabique, la rive sud de la Méditerranée et l'Amérique latine. La Méditerranée est un cas particulier. La littérature y est dense mais relève majoritairement de la restauration au sens SER, non de la régénération entendue comme aggradation. Le troisième biais est la sous-représentation systématique des échecs.

V.a. Typologie des projets

V.a.1. Méga-programmes étatiques et coalitions multilatérales

Les interventions à grande échelle sont les plus visibles dans la littérature, et leurs bilans les plus contestés. La Chine du Nord fournit le faisceau le plus dense. Le programme des Trois-Nords, lancé en 1978, articule un volontarisme étatique continu et une instrumentation budgétaire que peu de pays peuvent égaler (Kong 2021). Le Plateau de Loess y est traité comme cas emblématique. Deux autres cas méritent mention. Kubuqi (environ 18 600 km², Mongolie-Intérieure) est souvent revendiqué comme le seul désert massivement reverdi à grande échelle, revendication que la critique des méga-programmes invite à manier avec précaution (Turner et al. 2023). Le désert de Mu Us, suivi sur 34 ans, illustre une trajectoire hydrique non linéaire en trois temps (Gao et al. 2025).

La densité documentaire chinoise traduit une singularité institutionnelle. La revue de Yue et al. (2025) recense 9 486 publications peer-reviewed sur la restauration écologique chinoise entre 1991 et 2024. Sa croissance s'aligne sur les jalons politiques successifs (Grain for Green 1999, Ecological Redline plus récemment). L'action est pilotée par le politique. Les publications émanent surtout de la Chinese Academy of Sciences et d'universités d'État, financées par les administrations ayant lancé les programmes. Yue et al. (2024) le confirment sur le bilan biophysique, en attribuant 72,7 % du puits de carbone terrestre chinois post-1980 aux politiques de restauration. La Chine couple ainsi volontarisme étatique, appareil scientifique national capable d'évaluer ses propres programmes et financement des deux.

La principale réponse multilatérale a été déployée au Sahel. La Grande Muraille Verte africaine, lancée en 2007, vise un corridor de 8 000 km sur onze pays. En 2020, environ 4 % de la cible affichée était atteint (UNCCD 2020). Ce programme a fait l'objet d'une critique structurelle sur l'écart entre ambition et matérialité des plantations (Turner et al. 2023 ; Stanturf & Mansourian 2020). Le projet Regreening Africa, huit pays subsahariens, déploie un modèle plus orienté vers l'agroforesterie paysanne. La RNA paysanne sahélienne est traitée à part.

Un troisième type de méga-programmes, au bilan peer-reviewed plus mince, s'étend de l'Asie du Sud et occidentale à l'Afrique du Nord. Le Billion Tree Tsunami pakistanais, le Billion Tree turc et le Barrage Vert algérien partagent un même schéma : des surfaces revendiquées considérables et une documentation insuffisante. Une catégorie voisine relie cet ensemble à la rive Sud méditerranéenne. Le programme tunisien de conservation des eaux et des sols, déployé sur plus d'un million d'hectares depuis 1990 (banquettes, tabias, jessours, lacs collinaires ; Castelli et al. 2019 ; Jarray et al. 2023), et le programme marocain d'agriculture de conservation, suivi 32 ans dans le Saïs (Laghrour et al. 2016), relèvent de la restauration plus que de l'aggradation. À notre connaissance, la littérature ne documente pas de programme méditerranéen atteignant une aggradation systémique. Le mode *top-down* impose une signature commune, des bilans contestés, des simplifications protocolaires et des coûts hydriques documentés (Turner et al. 2023).

V.a.2. Régénération paysanne, communautaire et de terrain

La régénération paysanne dépend de l'état initial du site et de la gouvernance locale. Le cas le plus mobilisé est la régénération naturelle assistée (RNA) des agriculteurs au Sahel depuis les années 1980, surtout dans les régions de Maradi et Zinder au Niger (Sendzimir et al. 2011). L'ordre de grandeur avancé, environ 5 millions d'hectares (Reij & Garrity 2016), est à manier avec prudence. La convergence entre sources est imprécise. La condition de réussite est précise. La RNA suppose une banque de souches vivantes encore enracinées dans le sol. Lohbeck et al. (2020), au Ghana et au Burkina Faso, montrent que la réussite dépend de la disponibilité de propagules dans le paysage et de l'état antérieur du couvert. Quand le substrat est épuisé, la technique n'opère pas. Une revue de Chomba et al. (2020) souligne la rareté des évaluations contrôlées. L'effet positif sur les revenus est documenté localement (Weston et al. 2015 ; Binam et al. 2017) sans généralisation établie au Sahel entier. La diffusion (Burkina Faso, Mali, Sénégal, Éthiopie) mobilise zaï, demi-lunes et espèces pionnières (Eshete et al. 2023).

Hors Sahel, plusieurs coalitions articulent restauration écologique, organisation communautaire et activité économique. En Espagne, AlVelAl mobilise l'agriculture régénérative et la valorisation de produits premium dans l'Altiplano de Granada-Almería. Luján Soto et al. (2021) en documentent les effets sur la biomasse souterraine et la matière organique en semi-aride méditerranéen, avec des durées de suivi encore limitées. En Éthiopie semi-aride, la restauration de bassins versants favorise la recharge des nappes et la résilience à la sécheresse (Woldearegay et al. 2024). Le programme MERET, conduit par le PAM, en a été un vecteur en couplant travaux antiérosifs et appui alimentaire. Au Rajasthan, l'ONG Tarun Bharat Sangh a relancé dès les années 1980 la construction de petits ouvrages de captation de la mousson, au sein d'une organisation communautaire (Everard 2015 ; Dashora et al. 2018, 2022).

En Afrique de l'Est et australe, une tension empirique éclaire les conditions de réussite des mises en défens (exclusion du pâturage). Mekuria et al. (2011) documentent dans le Tigray des gains significatifs en carbone du sol après mise au repos pluriannuelle. Aynekulu et al. (2017), eux, n'observent, sur le système Borana, aucun effet significatif pour des *exclosures* de 14 à 36 ans. La différence ne tient pas au geste, mais à l'état initial du sol et à la dynamique végétale antérieure. Verdoodt et al. (2009) au Kenya et Coppock et al. (2022) en Namibie ajoutent la variable institutionnelle. La gestion communautaire produit des succès de gouvernance et de revenus sans amélioration environnementale systématique. Un même dispositif technique produit ou non des résultats biophysiques selon le substrat et l'engagement local.

Le Sud-Ouest des États-Unis a vu émerger depuis une vingtaine d'années une communauté de praticiens du *process-based restoration*, mobilisant barrages perméables, « barrages castors » et mini-aménagements dans les ravines incisées pour ralentir l'écoulement et reconstituer les sédiments alluviaux, là où la nappe a chuté (Norman et al. 2025). La possibilité de comparer à des sites témoins, plus systématique dans cette zone, justifie un traitement distinct.

Deux préconditions ressortent. L'une est biologique , un substrat encore mobilisable doit exister. L'autre repose sur l'existence d'un dispositif local effectif, du droit reconnu aux paysans nigériens de gérer les arbres de leurs parcelles aux associations d'usagers de l'eau au Rajasthan. Les deux sont interdépendants.

V.a.3. Cas hydrologiques et frontières des bassins

Certains cas s'appréhendent à l'échelle du bassin hydrique. Le lac Tchad en fournit la première illustration. Sa surface, passée d'environ 25 000 km² dans les années 1960 à 2 500 km² au plus fort des sécheresses des années 1980, s'est partiellement stabilisée depuis, entre 5 000 et 14 000 km² selon les années et la

méthode (Pham-Duc et al. 2020 ; Sylvestre, Mahamat-Nour et al. 2024). Cette stabilisation relève d'une dynamique hydroclimatique régionale, évoquée à propos du Sahara vert. Ce qui se joue ici est la dimension de gestion. La Commission du Bassin du Lac Tchad coordonne quatre pays riverains autour d'un plan d'eau que la dynamique du lac redessine en permanence. Des initiatives de régénération et de recharge y sont engagées à cette échelle. La régénération d'un bassin ne sera lisible qu'avec un cadre de coordination capable de la mesurer.

La mer d'Aral représente la trajectoire inverse. L'extraction massive du Syr-Daria et de l'Amou-Daria pour l'irrigation cotonnière soviétique a vidé ce bassin endoréique en quatre décennies. L'Aralkum, ancien fond de mer exposé, est devenu une zone aride sujette aux poussières salines. Cela nécessite des programmes de phytostabilisation (Kim et al. 2024). La documentation peer-reviewed contemporaine du bassin reste limitée. Le facteur limitant n'y est pas climatique mais hydropolitique.

Les marais mésopotamiens (Irak) relèvent de la même logique : asséchés par décision politique, partiellement remis en eau, puis fragilisés par les barrages amont sur le Tigre. Ce cas d'école d'une trajectoire de bassin commandée par l'aménagement transfrontalier est traité en détail comme cas-laboratoire.

V.a.4. Cas continentaux peu documentés

La régénération s'observe aussi dans des contextes plus dispersés, inégalement documentés. Cette diversité est un objet d'étude (Berdugo et al. 2022).

En Australie aride et semi-aride, trois études à long recul documentent des cas plutôt positifs. Bastin et al. (2024) appliquent à 30 ans de données satellitaires sur le district d'Alice Springs deux méthodes de télédétection pour séparer la pression de pâturage de la variabilité climatique. La réduction du cheptel engagée vers 2002 a réduit le déficit de couvert au sol les années suivantes. Witt et al. (2011), sur *exclosures* de longue durée dans les Mulga Lands du Queensland, mesurent des gains réels mais faibles (de l'ordre de 1 t CO_2-eq/ha/an), au terme de plusieurs décennies. Bartley et al. (2022), pour le bassin du Burdekin, concluent à des preuves quantitatives limitées au-delà des bonnes pratiques traditionnelles. Gain, plateau, indistinction, cette diversité est cohérente avec des pratiques décentralisées en conditions hétérogènes.

En Asie centrale post-soviétique et en Mongolie, l'effondrement de la gestion collective au début des années 1990 a produit des cas naturels de retrait de pression. Brinkert et al. (2016) documentent au Kazakhstan une régénération

spontanée des steppes sur d'anciennes terres cultivées, selon le régime de pâturage subsistant. Ils confirment que le retrait de pression suffit quand le substrat reste mobilisable. Jamsranjav et al. (2018) distinguent en Mongolie les zones récupérables et celles ayant franchi un seuil. Le résultat n'est pas uniforme. La steppe de Mongolie-Intérieure montre une restructuration nette : sur 31 ans d'exclusion, le carbone du sol a plus que doublé et la part des macroagrégats est passée de 15 à 82 % (Wen et al. 2016).

La steppe patagonienne offre un contraste plus net entre revendication et mesure. Oliva et al. (2015) ne détectent, sur 750 000 km² et 30 ans de NDVI, aucune tendance générale de verdissement malgré la division par 2,5 du cheptel ovin. Le suivi local de Los Pozos sur 80 ans montre une stabilisation sans récupération En parallèle, un réseau praticien (Ovis 21, certification GRASS) revendique 1,3 million d'hectares en gestion régénérative. La littérature peer-reviewed est plus prudente. La synthèse de Hawkins, Venter & Cramer (2022), sur 22 études, ne soutient pas les revendications de séquestration de 2,5 à 9 t C/ha/an, les valeurs contrôlées se situant entre 0,13 et 0,32 t C/ha/an. La Patagonie ne permet pas de trancher sur la régénération aride. Elle souligne toutefois un décalage entre revendication praticienne et validation scientifique qui structure le débat sur l'évaluation.

V.a.5. Compléments par zone

Plusieurs cas mobilisés ne relèvent d'aucun ensemble précédent. Ce sont surtout des projets à ambition explicite, portés par des acteurs identifiables. Ils sont inégalement documentés.

Péninsule Arabique et Moyen-Orient

La péninsule Arabique et le Moyen-Orient ont vu émerger depuis les années 1970 plusieurs démonstrateurs portés par des entités hybrides. Le plus ancien est Sekem, fondé en 1977 dans le désert oriental égyptien. Il associe agriculture biodynamique, recherche universitaire (Heliopolis University) et formation de petits exploitants. Il rassemble environ 2 000 agriculteurs sous contrat, avec une extension engagée en 2019 sur l'oasis de Wahat El-Bahariya (objectif de 50 000 hectares). La documentation peer-reviewed centrée sur le site reste ponctuelle. Köberl et al. (2011) ont comparé la diversité microbienne des sols cultivés en biodynamie depuis trente ans à celle des sols désertiques natifs adjacents. Ils documentent un écart de 60 % dans la composition bactérienne et une diversité plus élevée dans les sols agricoles. Ce résultat valide la trajectoire pédologique du site, sans qualifier les autres dimensions du projet.

Le projet d'Al Baydha, dans le Hijaz saoudien, occupe une position distincte. Conduit par Neal Spackman entre 2009 et 2017 sur quelques dizaines d'hectares, il combine ouvrages de captation des eaux pluviales et restauration ligneuse (Kresh 2020 ; Landua & Spackman 2020 ; Spackman 2023). Aucune publication *peer-reviewed* sur le site n'a été identifiée. Son écho dans les milieux praticiens excède ce que la documentation établit. Fait révélateur de la rareté de l'objectivation, le seul suivi par télédétection indépendant a été produit par Cédric Cabrol (analyse NDVI, Landsat/Sentinel 2012-2023). Il montre une progression du signal photosynthétique maintenue après l'arrêt des apports en 2016. Ce suivi demeure hors protocole publié, sans site témoin.

Un programme voisin apporte le contraste documentaire. Dans la Badia jordanienne, la recherche-action de l'ICARDA fournit un point d'appui *peer-reviewed* cumulatif. Strohmeier et al. (2021) mesurent que les micro-bassins de captation de type Vallerani augmentent l'humidité du sol et soutiennent la croissance d'Atriplex halimus. Haddad et al. (2022), par modélisation calibrée sur le terrain, chiffrent une baisse du ruissellement et de l'érosion après captation et plantation d'arbustes natifs, convergeant vers les conditions historiques. Tatsumi et al. (2021) documentent quatre ans après l'aménagement une hausse de l'abondance, de la diversité et de la fonction de décomposition des communautés microbiennes des banquettes. Là où Al Baydha reste pour partie à approfondir, la Badia jordanienne est un cas mesuré.

Afrique sub-saharienne hors Sahel-RNA

L'Afrique sub-saharienne hors Sahel offre un cas singulier. Justdiggit, ONG néerlandaise fondée en 2009, opère au Kenya et en Tanzanie. L'intervention se base sur un geste paysan minimal, le creusement de cuvettes semi-circulaires (« *earth smiles* ») qui limitent le ruissellement et favorisent l'infiltration. L'organisation fait état de 660 000 cuvettes et d'environ 300 000 hectares en régénération. La singularité tient moins à l'ampleur revendiquée qu'à l'effort d'évaluation. Van der Vliet et al. (2024) appliquent à un site de Pembamoto (Tanzanie) un protocole *before-after-control-impact* avec quatre sites de contrôle (2018-2022). Ils documentent un signal de régénération distinct, illustration d'un monitoring produisant une métrique satellitaire.

Asie du Sud : observation directe sans documentation

L'Asie du Sud contient un type de cas que le panorama documentaire ne capte pas, l'observation directe sans publication *peer-reviewed* accessible. Le site de Garavadi (Maharashtra), semi-aride au sens climatique strict, a bénéficié de l'intervention de la Paani Foundation, mouvement de mobilisation participative déployé dans cet État entre 2016 et 2019. La mouvance a été analysée pour sa

stratégie (Mody et al. 2023), pas pour ses effets hydrologiques. A Garavadi, un village au cœur du programme, une analyse satellitaire conduite en 2022 par Cédric Cabrol montre, sur plusieurs années, une amélioration de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et une baisse de la température de surface (LST). Ce cas illustre une régénération produite hors des cadres publiables, que seul un effort d'observation documente. Cette configuration, une trajectoire visible au satellite, mais absente des bases académiques, n'est pas isolée. Elle appelle des travaux complémentaires.

V.b. Cas emblématiques

Quatre cas emblématiques traversent cette revue et dominent les discussions publiques sur la régénération en zone aride : le Plateau de Loess, le Sahel, le désert du Thar et le Bunny Fence. S'ils circulent autant (documentaires, vidéos, réseaux sociaux), c'est que quelque chose de visible s'y est passé. Des paysages dégradés y ont reverdi. Ces cas montrent qu'un territoire peut changer à l'échelle d'une vie humaine, sous l'effet de pratiques améliorées.

Plateau de Loess (Chine)

Le Plateau de Loess est le cas le plus densément documenté de la revue. Le programme Grain for Green, cofinancé par la Banque mondiale et le gouvernement chinois, a mobilisé environ 3,5 millions d'hectares en deux décennies. Le plateau dispose en outre d'archives écrites documentant son couvert sur le temps long, avec un taux de couverture de 53 % rapporté pour la dynastie Xia (Chen X. et al. 2024). Cette profondeur documentaire rare renforce son caractère emblématique. Les images comparatives avant/après circulent largement. Sa trajectoire écologique est documentée. Le couvert mesuré par satellite a fortement augmenté depuis 2000 (Chen et al. 2019). Le flux sédimentaire vers le fleuve Jaune a notablement baissé, tandis que la hausse du couvert et l'amélioration des sols ont accru l'évapotranspiration. Le débat sur la pérennité hydrique de ce verdissement sera traité dans le volet A.

Sahel

Le Sahel concentre la documentation *peer-reviewed* la plus dense hors Loess. Les techniques mobilisées (RNA, zaï, cordons pierreux, agroforesterie en parklands) sont traitées au chapitre dédié. Un reverdissement post-1980 est documenté par télédétection à l'échelle régionale (Herrmann, Anyamba & Tucker 2005 ; Brandt et al. 2019). Le cas concentre un débat non clos sur l'attribution du verdissement entre retour des pluies, adoption des pratiques et rétroaction végétation-précipitations. Ce cas est approfondi dans le volet A.

Désert du Thar (Inde)

Le contexte du désert du Thar, au Rajasthan (densité humaine élevée, mousson active et tradition de *water harvesting*, ainsi que les mesures du Tarun Bharat Sangh), ont déjà été présentés. Le signal satellitaire est un verdissement continu depuis le début des années 2000, le NDVI progressant sur le Nord-Ouest indien (Jin & Wang 2018), avec une hausse des pluies de mousson estimée à 40 % entre les années 1980 et 2022 (Joseph et al. 2024). Trois causes possibles coexistent, reprise de la mousson (Jin & Wang 2017), irrigation par puits profonds et water harvesting local, dont la pondération reste non tranchée (Mishra et al. 2025 ; Patel et al. 2025). Le risque de déplétion des nappes est documenté quantitativement (Mishra et al. 2025). L'attribution multi-causes est approfondie au Volet A.

Bunny Fence (Sud-Ouest de l'Australie)

En Australie, une clôture érigée en 1907 contre une invasion de lapins sépare depuis un siècle deux paysages contigus aux propriétés climatiques et pédologiques homogènes. Le côté Est, préservé de l'usage agricole par accident historique, documente une régénération passive involontaire, une non-dégradation maintenue sur un siècle plutôt qu'un programme actif. La discontinuité d'usage qu'elle trace fonctionne comme contrefactuel spatial intégré, dont l'exploitation pour l'attribution est conduite au Volet A. Le mécanisme local est bien documenté, son ampleur quantitative l'est moins.

V.c. Cas-laboratoires : régénération sous contrainte documentaire

Dans certains contextes, la régénération s'appréhende de façon particulièrement lisible. Trois types de cas sont examinés, les substrats sévèrement dégradés (mines, corridors d'infrastructure), les paysages post-incendie où la perturbation est datée et les zones humides en climat aride où une décision amont modifie le facteur limitant.

V.c.1. Mines, infrastructures linéaires et substrat sévèrement dégradé

Les sites miniers et les corridors d'infrastructure offrent des conditions rares : une perturbation initiale brutale et datée suivie de protocoles de réhabilitation documentés et des obligations réglementaires de monitoring produisant un suivi long. L'Australie fournit le plus de cas. Koch & Hobbs (2007) synthétisent quarante ans de réhabilitation post-bauxite par Alcoa (groupe minier) en forêt jarrah, avec un score global de restauration de 90 à 92 % et des fonctions (cycle des nutriments, bilan hydrique) restaurées, malgré des déficiences persistantes sur le bois mort. Ngugi et al. (2018), à partir d'une chronoséquence de 3 à 23 ans en mine de charbon (Queensland), documentent une convergence partielle du carbone organique, de l'azote, du pH et des

communautés bactériennes vers les conditions pré-minières. La projection est de 16 à 36 ans pour atteindre les niveaux de référence. Ezeokoli et al. (2020), sur 3 à 24 ans post-mine dans le Highveld sud-africain, font des champignons mycorhiziens à arbuscules des bioindicateurs corrélés au couvert et à l'azote.

Un contre-exemple est tout aussi instructif. Erskine & Fletcher (2013) documentent dans le Bowen Basin (Queensland central) une réhabilitation de mine de charbon, suivie de 2 à 22 ans après la remise en état, qui a produit des écosystèmes nouveaux et dysfonctionnels. En effet, les pentes y sont 2,5 à 7 fois plus raides que les paysages de référence, le pH et la conductivité sont élevés. Enfin, la végétation est dominée par le *buffel grass* exotique. Le résultat ne répond ni aux objectifs pastoraux ni aux objectifs conservatoires affichés. C'est une version dysfonctionnelle des *novel ecosystems* (Higgs 2014), sans analogue historique et sans les fonctions attendues. La distinction structure-fonction qu'il rend visible renvoi directement à la méthodologie du Volet A. Un suivi sur la couverture et la composition floristique pourrait enregistrer le cas comme « réhabilité ». Le suivi des bilans hydrique et énergétique signalerait le dysfonctionnement.

Enfin, Terry & Adler (2024) appliquent cette logique à 5 600 km de corridors de gazoducs en zones arides nord-américaines. La perturbation uniforme (même technique de pose, même calendrier de remise en état) fait office de contrefactuel spatial intégré. La productivité primaire nette reste incomplète sur 42 % des sites, l'horizon de rétablissement du couvert arbustif est estimé à 81 ans. L'interaction entre saisonnalité des précipitations et texture du sol prédit la vitesse de récupération mieux que les caractéristiques du corridor. Ces sites réunissent des conditions nécessitant un cadre d'évaluation. Le suivi est financé et imposé et les substrats sont si dégradés que les méthodes courantes sont incomplètes.

V.c.2. Régénération post-incendie : un contrefactuel temporel

Un incendie est un événement de perturbation daté à la journée près, spatialement délimité, à trajectoire post-perturbation observable. C’est un laboratoire naturel pour l'attribution, dans le prolongement de la cascade sécheresse-feu-inondation-érosion. Cerdà et al. (2017) en donnent une mesure trente ans après un incendie en Espagne orientale. Les sols sous pins d'Alep présentent six fois plus de ruissellement et dix fois plus d'érosion que sous chêne vert. L'espèce dominante détermine ainsi durablement le régime hydrologique. La trajectoire post-feu dépend donc de la composition floristique reconstituée et de la séquence pluviométrique qui suit.

Les techniques de mitigation (mulchs de paille et de bois, semis) sont traitées au chapitre VI. On s'attache ici à ce qu'elles enseignent sur la

régénération. La méta-analyse de Girona-García et al. (2021) établit que la paille et le mulch de bois sont les traitements anti-érosion post-feu les plus efficaces, mais aussi qu'intervenir reste préférable à l'inaction quand l'érosion est forte. En contexte semi-aride, Badía et Martí (2000) documentent qu'un semis de légumineuses et de graminées installe un couvert protecteur dès la première année, sans que le semis conduit seul ne suffise à réduire significativement les pertes en sol. Le contrefactuel n'oppose donc pas l'intervention à une régénération spontanée idéale, mais l'intervention ciblée à l'aggravation de la cascade sur sols nus. En Méditerranée, les exports sédimentaires de la première année post-feu dépassent d'un à trois ordres de grandeur ceux des bassins non brûlés (Shakesby 2011).

L'efficacité dépend de la calibration au contexte. Knutson et al. (2014), sur 88 sites du Grand Bassin, montrent qu'un semis de graminées pérennes natives conduit seul ne produit aucun effet significatif quand des espèces invasives colonisent en parallèle. García-Carmona et al. (2023) signalent qu'un mulch de bois en couverture totale peut nuire aux biocroûtes et à la diversité microbienne tout en réduisant le ruissellement à court terme. Sur sols nus exposés à l'érosion, agir s'impose. Mais le succès se joue ensuite sur la calibration au contexte : sévérité du feu, pression des invasives, taux de couverture du traitement.

V.c.3. Marais mésopotamiens : aggradation rapide et fragilité hydraulique

En Irak, les marais mésopotamiens offrent un cas sans équivalent identifié, avec trois transitions consécutives en moins de trente ans. Drainés délibérément à partir de 1991, ils ont perdu en moins d'une décennie la quasi-totalité de leur surface. La remise en eau de 2003 a permis une recolonisation rapide, avant une nouvelle dégradation sévère depuis 2019. Bassora reçoit moins de 150 mm/an et les étés dépassent 50 °C, mais l'eau vient du Tigre et de l'Euphrate. Le cas de cette zone humide interroge la frontière opérationnelle des zones arides.

La phase 2003-2010 illustre une aggradation rapide par levée du facteur limitant. Richardson et al. (2005) relèvent qu'environ 20 % de l'étendue originelle de 15 000 km² étaient réinondés en 2004, puis 39 % en 2005 (Richardson & Hussain 2006). De nombreux marais avaient alors retrouvé un fonctionnement proche du marais Al-Hawizeh, seul grand marais non drainé et pris comme référence. Quand le facteur limitant est levé et que le substrat reste mobilisable, l'aggradation peut être rapide. La phase 2019-2025 illustre l'inverse. La mise en service du barrage d'Ilisu sur le Tigre (2019) et de Silvan (2023), combinée à une forte sécheresse régionale, a engendré une grave crise hydrique.

Une évaluation récente (Al Tameemi et al. 2026) chiffre une bascule trophique majeure. Entre 2018 et 2023, la part des plantes aquatiques dans la

diversité floristique passe de 70 % à 27 %, celle des plantes terrestres de 30% à 73%. Seize plantes halophytes terrestres ont été recensées pour la première fois, la concentration en chlorures a quasi doublé. La régression n'est pas un brunissement diffus mais une réorganisation écologique complète suite à une décision d'aménagement en amont.

VI. Les techniques

VI.a. Restauration passive et active

Le cadre de la restauration SER distingue deux modalités articulées (Gann et al. 2019). La restauration passive retire la pression qui maintient l'écosystème dégradé (pâturage, défrichement, coupe) et laisse agir les processus autonomes. La restauration active intervient sur la composition (planter, semer, construire des ouvrages). La dichotomie structure les protocoles d'évaluation, mais sa pertinence en zone aride mérite examen, car l'arbitrage y est plus serré qu'en zone tempérée.

La restauration passive suppose deux préconditions liées. La banque biologique doit être suffisamment intacte, souches encore enracinées pour la RNA, graines viables pour les exclusions. Le substrat ne doit pas avoir franchi un seuil d'irréversibilité. L'aggradation par le seul retrait de pression exige un substrat encore réactif. La restauration active déploie un arsenal plus large, mais opère dans une fenêtre resserrée. La plantation en monoculture à grande échelle produit en aride une forte mortalité et un pompage hydrique documenté (Cao 2008). Le Bowen Basin montre qu'une intervention lourde mal calée produit des écosystèmes restaurés en couvert, mais dysfonctionnels. La distinction entre actif réussi et actif dégradé ne repose donc pas sur la quantité d'intervention, mais sur son adéquation au site.

Entre les deux, la facilitation désigne l'usage d'espèces pionnières ou nourricières (*nurse plants*) qui modifient le microclimat sous leur couvert et préparent l'établissement d'espèces de stade ultérieur (Padilla & Pugnaire 2006) : plantation initiale d'acacias sahéliens, densification de Faidherbia albida dans les parklands cultivés. La plupart des cas combinent les trois registres, comme la RNA articulée au zaï et aux cordons pierreux, ou les structures basses du Sud-Ouest américain accompagnées de végétalisation pionnière.

Le couple passif/actif rend compte de l'intensité de l'intervention, pas de la manière dont elle a été choisie. Une seconde distinction sépare approches fondées sur la technique et approches fondées sur le design. La première applique des recettes éprouvées, la seconde lit le paysage spécifique. Les deux couples ne se recouvrent pas.

Al Baydha, qui combine ouvrages de captation, terrasses et restauration ligneuse à partir d'une lecture fine, est fondée sur le design. Les Trois-Nords chinois appliquent une doctrine de plantation fondées sur la technique, en conditions très variables, ce qui est source de difficultés. Le tableau ci-après

recensant les techniques de régénération ne les organise pas par fonction paysagère, choix opérationnel à avoir en tête. Sous réserve qu'il soit observable et suffisamment documenté, le couple technique-based / design-based est une variable de qualification de premier niveau de la grille (Volet A).

VI.b. Les techniques de régénération

Cette section s'articule autour d'un tableau recensant les principales techniques de régénération en zones arides. Il organise une cinquantaine de pratiques non par le couple passif/actif ni par zone bioclimatique, mais par fonction : ce qu'une technique fait dans le cycle eau-sol-végétation-atmosphère, sur quel facteur limitant elle agit et à quelle échelle. Six fonctions paysagères l'organisent.

Le tableau s'adosse à la nomenclature WOCAT, référentiel de pratiques de gestion durable des terres de l'UNCCD, qu'il prolonge vers les techniques émergentes ou spécifiquement régénératives en milieu aride qui n'y figurent pas encore. Les catégories peu pertinentes ici (gestion post-récolte, déchets, efficacité énergétique, lutte intégrée) sont laissées de côté. Une annexe détaillée précise cet adossement, technique par technique.

Lire le tableau

- Chaque technique est qualifiée par trois entrées. La famille la rattache à l'une des six fonctions paysagères.
- La maturité distingue quatre états : ancestrale, éprouvée, émergente, hypothétique, selon le degré de validation et d'usage.
- Le niveau de preuve, de ●●● à ○○○, qualifie la force des données sur l'effet régénératif en milieu aride réel, et non la robustesse technique générale de la pratique.

Cette distinction est importante : une technique peut être techniquement maîtrisée tout en restant peu documentée quant à son effet régénératif propre en aride. La mention « débattu » signale les pratiques bien documentées dont cet effet fait l'objet d'un débat scientifique actif.

Les six fonctions ne sont pas étanches : la plupart des cas réels combinent plusieurs techniques, et c'est cette combinaison qui constitue la modalité dominante de la régénération.

Techniques de régénération en zones arides · *panorama*

FAMILLES 1 & 2

TECHNIQUE	MATURITÉ	NIVEAU DE PREUVE
1 Ralentir, infiltrer, capter l'eau et l'humidité atmosphérique		
Zaï	ancestrale	●●●
Demi-lunes / micro-bassins	ancestrale	●●○
Cordons pierreux / bunds	ancestrale	●●○
Terrasses	ancestrale	●●●
Banquettes / tabias / jessour	ancestrale	●●○
Swales / Keyline	éprouvée	●○○
Johads / khadin / retenues	ancestrale	●○○
Lacs collinaires / farm ponds	éprouvée	●○○
Check dams / ouvrages de retardement	ancestrale	●●○
Castor analogues (BDA) contexte : cours d'eau	émergente	●●○
NIDS / Zeedyk structures	émergente	●○○
Agriculture de conservation / no-till	éprouvée	●○○
Réinondation de zones humides arides contexte : zones humides	émergente	●●○
Collecte de rosée contexte : humidité nocturne	éprouvée	●●○
Collecte de brouillard contexte : brouillard côtier	éprouvée	●●○
Tours de condensation atmosphérique stade exploratoire	hypothétique	○○○
Serres refroidies à l'eau de mer contexte : accès eau de mer	émergente	●○○
2 Couvrir, amender et inoculer le sol		
Biocroûtes (régénération passive)	éprouvée	●●●
Biocroûtes (inoculation active)	émergente	●○○
Mulch organique / résidus	ancestrale	●●●
Couverts végétaux	éprouvée	●○○
Mulching post-incendie contexte : post-incendie	éprouvée	●●●
Fixation mécanique du sable contexte : dunes mobiles	éprouvée	●●○
Fixation végétale (saxaul, Atriplex) contexte : sables, sols salins	éprouvée	●●○
Mycorhizes (inoculation racinaire)	émergente	●●○
Biochar	émergente	●●○
Compost et amendements organiques	ancestrale	●●○
Haies vives fertilisantes	éprouvée	●●○
Technosols contexte : sites dégradés / mines	émergente	●●○

●●● méta-analyses ou études convergentes ●●○ peer-reviewed sans méta-analyse ●○○ fragmentaire ou effet contesté ○○○ prototype / concept

Le niveau de preuve qualifie l'effet régénératif en milieu aride réel, non la robustesse technique générale. Mention « débattu » : technique bien documentée dont l'effet régénératif aride fait l'objet d'un débat scientifique actif.

Techniques de régénération en zones arides · *panorama*

FAMILLES 3 À 6

TECHNIQUE	MATURITÉ	NIVEAU DE PREUVE
3 Gérer le végétal ligneux		
RNA, régénération naturelle assistée	éprouvée	●●●
Parklands (Faidherbia, Vitellaria…)	ancestrale	●●●
Alley cropping / haies productives	éprouvée	●○○
Arbres pionniers / nurse plants	éprouvée	●●○
Cocoon (aide à l'établissement)	émergente	●○○
Plantation forestière monoculture effet régénératif aride débattu	éprouvée	●○○
Plantation forestière diversifiée	éprouvée	●●○
Windbreak / shelterbelt grande échelle effet mésoclimatique débattu	éprouvée	●○○
Brise-vent agricole local	éprouvée	●●○
Xérophytes commerciales (argan, jojoba…)	éprouvée	●○○
Drone seeding / reforestation par UAV	émergente	○○○
Seed Enhancement Technologies (SETs)	émergente	●●○
Syntropie agroforestière (Götsch)	émergente	○○○
4 Gérer le pâturage		
Mise en défens / exclusion	ancestrale	●●●
Hima, mise en défens traditionnelle	ancestrale	●○○
HPG, pâturage holistique planifié (Savory) effet régénératif aride débattu	éprouvée	●○○
Rotation pastorale simple	ancestrale	●●○
Rewilding / réintroduction de faune	émergente	●○○
5 Gérer l'eau souterraine		
Recharge artificielle de nappe (MAR)	éprouvée	●●●
Ag-MAR (recharge par parcelles) contexte : irrigation existante	émergente	●●○
Galeries gravitaires (qanat) contexte : nappes de versant	ancestrale	●●○
Régulation des prélèvements	éprouvée	●●○
Usage planifié des aquifères fossiles contexte : aquifères fossiles	émergente	●○○
6 Modifier l'atmosphère par structure physique		
Tour catabatique (frères Salinas) premiers essais	hypothétique	○○○
Éco-machines holistiques (Weather Makers) prototype unique	hypothétique	○○○

●●● méta-analyses ou études convergentes ●●○ peer-reviewed sans méta-analyse ●○○ fragmentaire ou effet contesté ○○○ prototype / concept

Le niveau de preuve qualifie l'effet régénératif en milieu aride réel, non la robustesse technique générale. Mention « débattu » : technique bien documentée dont l'effet régénératif aride fait l'objet d'un débat scientifique actif.

Fonction 1 - Ralentir, infiltrer, capter l'eau et l'humidité atmosphérique

Ce regroupement est le plus dense, du *water harvesting* paysan ancestral aux structures inspirées des castors et de la géomorphologie, jusqu'aux techniques marginales de captation d'humidité atmosphérique (rosée, brouillard). Toutes captent une eau sinon perdue (ruissellement ou évaporation). Leur transposabilité dépend des savoir-faire et de la main-d'œuvre locale.

Fonction 2 - Couvrir, amender et inoculer le sol

Cette fonction agit sur les piliers de la roue Husson autres que l'eau, structure et porosité, azote, microbiologie, des biocroûtes aux technosols en passant par les couverts, mulchs, fixations du sable, inoculations et amendements. Couvert et amendement se jugent rarement isolément. Leur effet tient à la combinaison avec d'autres fonctions, en particulier l'eau et le pâturage.

Fonction 3 - Gérer le végétal ligneux

Cette fonction, la plus médiatisée et la plus contestée, va du sobre conditionnellement régénératif (RNA, agroforesterie en parklands, brise-vent locaux) aux plantations à grande échelle dont l'effet régénératif aride est ouvertement débattu, en passant par la facilitation pionnière et des techniques émergentes (semis par drone, syntropie).

Fonction 4 - Gérer le pâturage

L'animal est à la fois l'agent dominant de la dégradation des parcours et leur levier potentiel de régénération. Cette fonction couvre les exclusions, les systèmes communautaires traditionnels, les rotations, la gestion densément planifiée encore contestée (Briske et al. 2008, 2014) et le *rewilding* émergent. C'est ici que le décalage entre les revendications des praticiens et le corpus académique est le plus marqué. L'incompatibilité entre pâturage et biocroûtes est reprise plus loin.

Fonction 5 - Gérer l'eau souterraine

La régénération aride sollicite, recharge ou vide presque toujours la nappe. Cette fonction regroupe la recharge artificielle, les galeries gravitaires, la régulation institutionnelle des prélèvements et les stratégies d'usage des aquifères fossiles. Elle se lit en couplage avec les fonctions 1 et 3.

Fonction 6 - Modifier l'atmosphère par structure physique

Cette fonction regroupe deux familles au statut prospectif, les tours et collecteurs de condensation atmosphérique et la tour catabatique des frères Salinas. Elles agissent sur l'air ambiant par structure physique, sans introduction

de substance étrangère, à distinguer du *cloud seeding* chimique et des ambitions régionales (*Targeted Rainfall Enhancement, Weather Makers*).

VI.c. Principes d'usage transversaux

VI.c.1. Combinaisons et séquençage

Peu de cas mobilisent une technique unique. Le verdissement sahélien combine RNA, zaï, demi-lunes, cordons pierreux et agroforesterie. Le Plateau de Loess articule terrasses, plantation, exclusion partielle de pâturage et reconversion de terres cultivées. Le Sud-Ouest américain enchaîne structures hydromorphologiques basses, ralentissement du ruissellement et végétalisation pionnière. Le programme ICARDA en Jordanie est un cas particulièrement complet.

Le séquençage importe autant que la combinaison. Généralement, la levée prioritaire du principal facteur limitant doit être visée. Plusieurs cas documentent un ordre régulier : retrait de pression d'abord, structures hydromorphologiques ensuite, RNA ou facilitation pionnière quand le substrat le permet, plantation diversifiée enfin parfois conduite conjointement à la facilitation pionnière. Son inversion, planter avant d'avoir retiré la pression, produit les échecs les plus documentés. La littérature sur le séquençage reste mince. Elle est surtout praticienne et issue des manuels WOCAT. C'est à l'échelle des combinaisons, plus qu'à celle des techniques isolées, que se situe l'enjeu.

VI.c.2. Compatibilités et transposabilité

Plusieurs combinaisons négatives sont documentées. La plus régulière est l'incompatibilité entre pâturage et formation de biocroûtes. Le piétinement détruit les communautés cyanobactériennes en cours de constitution (Zhou et al. 2020 ; Eldridge et al. 2020). Une autre oppose le mulch ligneux post-incendie en couverture totale à la régénération microbienne et lichénique de surface (García-Carmona et al. 2023). Une combinaison théoriquement possible peut donc dégrader l'écosystème. Leur repérage relève d'une lecture croisée au cas par cas.

La transposabilité n'est jamais mécanique. La RNA s'est diffusée hors de Maradi-Zinder, mais la composition des communautés régénérées varie selon la disponibilité de propagules et l'état antérieur du couvert (Lohbeck et al. 2020). Ainsi, les transferts vers le Maghreb sans calage local ont donné des résultats contrastés. Une approche fondée sur la technique suppose la transposabilité, l'approche fondée sur le design la requalifie à chaque site. Notre grille d'analyse prévoit une de distinguer, quand la documentation le permet, spécifique et généralisable.

VI.c.3. Eau souterraine : couplage et statut

Toutes les techniques de la fonction 1 modifient la recharge de la nappe sans toujours la qualifier. Plusieurs études en mesurent l'effet net (Djuma et al. 2017 sur les check dams à Chypre, Norman et al. 2025 sur les *leaky weirs*, Bosworth et al. 2025 sur les *beaver dam analogues*). À l'inverse, les techniques de la fonction 3 augmentent la transpiration et abaissent le niveau piézométrique. La régénération aride est donc systématiquement une intervention indirecte sur le bilan hydrogéologique. La fonction 5 se lit en couplage avec les fonctions 1 et 3.

Trois logiques coexistent dans la fonction 5. La recharge artificielle (MAR, Ag-MAR) agit sur le stock souterrain, les galeries gravitaires (qanat, foggara) régulent par leur structure, la galerie ne pouvant surexploiter la nappe au-delà du niveau de son drain. La régulation institutionnelle opère par la gouvernance. Aucune n'est mécaniquement supérieure. Cuthbert et al. (2019) montrent par ailleurs que les temps de réponse des aquifères arides sont décennaux à séculaires. L'attribution de l'effet à un projet de régénération est ici particulièrement complexe.

Une distinction conceptuelle reste rarement explicitée. La régénération hyper-aride peut s'appuyer sur des aquifères non renouvelables pour lesquels Engelhardt et al. (2013) et Gleeson et al. (2020) proposent les concepts de *smart mining* ou *managed aquifer depletion*. Cela suppose de planifier une exploitation à durée de vie contrôlée plutôt que de prétendre à une gestion durable au sens strict (Famiglietti 2014 ; Voss & Soliman 2014). La question conditionne plusieurs cas de régénération. Elle relève de la qualification du bilan hydrique. Plus largement, la littérature sur la régénération aride mobilise peu le corpus hydrogéologique, pourtant dense (Gleeson et al. 2020 ; Al-Maktoumi 2025 ; El Khalki et al. 2025).

VI.c.4. Coût-bénéfice : protéger avant de réparer

Un principe transversal mérite d'être assumé comme position de la revue. La perte de potentiel d'un sol est très dommageable. Prévenir coûte moins que régénérer (Husson et al. 2025). La conséquence est pourtant inégalement reconnue. La littérature *peer-reviewed* et les financements se concentrent sur les sites les plus dégradés, où l'effet régénératif est le plus visible. Pourtant, le coût est le plus élevé, tandis que les terres en cours de dégradation, encore protégeables sans intervention lourde, restent un angle mort.

VI.c.5. Partage et épargne des terres (land sharing / land sparing)

Le débat land sharing / land sparing nous concerne directement, parce qu'en zone aride il met en jeu non seulement la biodiversité mais le climat local. Il

structure depuis Green, Balmford et al. (2005) la réflexion sur la conciliation entre production et conservation. Ce débat n'est pas clos. Balmford et al. (2025) consolident la position pro-sparing à partir d'environ 2 000 espèces sur cinq continents, quand la méta-analyse d'Augustiny et al. (2025) ne tranche franchement ni l'une ni l'autre. Enfin, une troisième lignée (Kremen 2015 ; Fischer et al. 2014) juge le cadre trop binaire et plaide pour une lecture en gradient.

En zones arides, la transposition n'est pas balisée, le corpus dominant portant sur les forêts tropicales. Trois arguments se confrontent. Le *land sharing* maintient l'hétérogénéité du paysage, donc la rugosité aérodynamique, le recyclage d'humidité et la convergence locale. Ses structures (haies, ripisylves, parklands, jachères pâturées) offrent un habitat que le paysage natif, majoritairement ouvert, n'a pas. Le *land sparing* concentre la production sur les terres les plus aptes (oasis, périmètres irrigués maîtrisés), préservant des bassins cohérents. Cela permet d'éviter de fragmenter les habitats steppiques natifs des zones peu peuplées (Patagonie, Mongolie, intérieur australien).

Une critique récuse enfin cette binarité elle-même. Beaucoup de paysages arides sont nativement mixtes, entre parcours multi-usages, *parklands*, oasis et arrière-pays. La mosaïque agro-sylvo-pastorale sahélienne en est l'illustration la plus documentée. Arbres, cultures et parcours y partagent les mêmes terres. C'est dans cette configuration mixte, plutôt que dans une ségrégation des usages, que se concentrent les reverdissements arides les mieux documentés.

Le débat dépend donc de la zone, de l'échelle et de la fonction recherchée. Il reste ouvert pour l'aride. Plutôt que de trancher a priori la supériorité d'une stratégie, l'enjeu est de lire chaque projet sur sa configuration paysagère réelle et ses effets de redistribution.

VI.d. Approches systémiques et techniques émergentes

VI.d.1. Solutions fondées sur la nature systémiques et régénération

Les techniques rassemblées ici sont des solutions fondées sur la nature au même titre que la régénération des sols. Elles s'en distinguent par leur ambition systémique et climatique. Elles visent explicitement à infléchir le cycle de l'eau ou le bilan énergétique à l'échelle d'un bassin, alors que la plupart des techniques opèrent au niveau du sol, du paysage ou du microclimat parcellaire. Cette ambition appelle un niveau de preuve plus exigeant et ouvre des questions d'effets à distance (téléconnexions atmosphériques) que la régénération de proximité ne pose pas. Leurs preuves d'efficacité restent à ce jour prospectives.

La première de ces approches est le *Targeted Rainfall Enhancement*, c'est-à-dire l'afforestation conçue pour augmenter les précipitations par le recyclage continental d'humidité. Le mécanisme et les réserves sont décrites précédemment(Staal et al. 2025). L'approche régénérative intégrée des Weather Makers s'en réclame en partie. Pour le bassin méditerranéen, Theeuwen et al. (2025) modélisent deux régimes opposés selon l'humidité initiale du sol. La reforestation réchauffe et assèche les zones sèches, mais refroidit et favorise la convection dans les zones plus humides, par l'abaissement du niveau de condensation et la hausse de l'énergie convective, surtout là où la brise marine se déclenche.

Une seconde catégorie agit sur l'atmosphère par voie structurale, sans substance étrangère. Les tours catabatiques des frères Salinas cherchent à provoquer un courant descendant qui se couple à la brise marine au point de rencontre avec le relief pour amorcer la convection. Ce mécanisme est cohérent avec celui que décrit Theeuwen et al. (2025). La démarche reste prospective. Warnau, Theeuwen et al. (2025) en proposent une formalisation récente sous le concept de TEAM (*Technology-Enhanced Atmospheric Moistening*), utilisant l'eau de mer pour augmenter l'humidité atmosphérique côtière. Sept zones arides côtières candidates sont proposées. Un cadre comparatif entre TEAM, osmose inverse, *cloud seeding* et forestation est fourni. Cet ensemble inscrit la démarche praticienne dans un programme académique structuré.

L'ensemencement de nuages occupe une position distincte. Il modifie la microphysique des nuages par injection de particules (iodure d'argent, sels hygroscopiques), ce qui le rapproche de la géoingénierie atmosphérique. Son efficacité reste modeste et contestée, de l'ordre de 5 à 15 % selon les conditions. Cette approche n'est pas dans le périmètre de cette revue.

VI.d.2. Techniques émergentes : l'agrivoltaïsme

L'agrivoltaïsme promet d'intégrer production énergétique et maintien de cultures en zone aride. La méta-analyse de Liu et al. (2025) documente une baisse de 1 à 4 °C de la température de l'air et du sol sous panneaux et une efficience hydrique des cultures en hausse de 20 à 47 % (Barron-Gafford et al. 2019 ; Hassanpour Adeh et al. 2018). Trois réserves demeurent.

La première est de design. Barron-Gafford et al. (2016) mesurent à l'inverse un îlot de chaleur photovoltaïque de 3 à 4 °C la nuit en désert nu, lié à la chute de l'albédo et à la suppression de l'évapotranspiration. La frontière entre régime refroidissant et réchauffant dépend de la présence et de la nature de la végétation sous les panneaux.

La deuxième réserve dépend de l'échelle. À l'échelle régionale, les seules données disponibles sont des simulations de modèles du système Terre sur scénarios maximalistes (Li et al. 2018 ; Lu et al. 2021). Elles suggèrent un verdissement local, mais une redistribution possible des précipitations à distance. Il n'existe pas d'observation empirique pour les installations actuelles. La troisième est le recul temporel, les suivis chinois les plus longs sont récents au regard des décennies que demande la stabilisation des indicateurs sol-eau-énergie. Les bénéfices observés concernent surtout le couvert et le carbone aérien, la stabilité hydrique et pédologique restant à confirmer.

Le livrable retient donc l'agrivoltaïsme comme champ pertinent, à condition de le distinguer fermement du déploiement de centrales photovoltaïques nues. Le bilan thermique à grande échelle et la trajectoire à long terme restent des questions ouvertes.

VII. Conditions sociales, historiques et institutionnelles

VII.a. Du sommet à la base : trajectoires comparées

L'opposition *top-down* / *grassroots* traverse la littérature sur la régénération aride. Les programmes exogènes (bailleurs, agences nationales, conventions multilatérales) visent d'abord l'écologie : couvert végétal, carbone, désertification ralentie. Les institutions endogènes (coutumes foncières, pactes pastoraux, conseils de village) visent d'abord l'économie domestique : sécurité alimentaire, droits d'usage, accès aux ressources sauvages. Cette asymétrie d'objet structure les trajectoires et leur évaluation.

Owusu et al. (2023) confirment cette lecture en Afrique subsaharienne. Les institutions endogènes affichent des résultats exclusivement positifs sur les variables économiques et sociales. Les institutions exogènes, plus dispersées, contournent souvent les gouvernances locales. Kong et al. (2021) transposent à l'échelle multilatérale. Une approche unifiée non participative compromet les bénéfices socio-économiques, quelle que soit la cohérence écologique du dispositif. Le verdissement peut être atteint sans bénéficier aux ménages. À l'inverse, Sendzimir et al. (2011) identifient pour le Niger trois variables nécessaires : autonomie paysanne, reconnaissance foncière de la propriété des arbres et institutions inclusives intégrant aînés, femmes et éleveurs transhumants.

La conclusion ne doit pas être hâtive. Coppock (2022) rapporte un essai contrôlé randomisé sur des *rangelands* namibiens en gestion communautaire. La qualité de gouvernance s'améliore, mais les effets sur l'économie des ménages sont nuls, voire légèrement négatifs. Le mécanisme institutionnel local ne garantit donc pas le gain économique. Il suppose accès au marché, droits d'usage stabilisés et articulation aux filières. La distribution des coûts et des bénéfices devient alors la question structurante.

VII.b. Coût d'opportunité : qui paye, qui gagne, qui perd

Osborne et al. (2021) qualifient les restaurations pilotées par le marché de projets « placebo ». Elles produisent du couvert sans transformer les rapports de pouvoir à l'origine de la dégradation. Turner et al. (2021) analysent douze pays de la Grande Muraille Verte (programme SAWAP, Banque mondiale). Ils documentent une dynamique convergente : les terres réhabilitées sont clôturées et privatisées par les élites locales, femmes et pasteurs en sont exclus. Le récit gagnant-gagnant trompe quand les rapports de pouvoir ne sont pas traités en amont. Au Burkina Faso, le programme PATECORE de cordons pierreux mobilise 100 à 150 jours-homme par hectare non rémunérés (CGIAR-CSA) est qualifié de «

peu coûteux ». Il absorbe pourtant une part conséquente du temps disponible des ménages. Là où PATECORE sous-rémunère le travail paysan, le *drone seeding* l'évince. Le différentiel entre semis par drone ($1200-2200/ha) et plantation manuelle ($4000-6000/ha) déplace la rente du travail local vers des opérateurs technologiques globaux. C'est la version technologique de la cooptation documentée par Bless (2024).

Weston (2015) conduit le premier retour social sur investissement de RNA communautaire à Talensi, Ghana (revenus, actifs, accès aux ressources sauvages, santé, cohésion). Les règlements communautaires en sont la condition critique. Binam et al. (2017) confirment avec 1 080 ménages ouest-africains : institutions locales et accès au marché conditionnent l'adoption. Quand elles sont réunies, elles font progresser revenus, production céréalière et apport calorique. Aker et Jack (2025) inversent une intuition courante sur les demi-lunes au Niger. Les paysans adoptent quand ils savent faire (formation, démonstration, voisinage), pas grâce au transfert de capital. Ceci est probablement vrai pour d'autres techniques régénératives.

Zan B. et al. (2024) attribuent aux politiques chinoises (Grain for Green) 13 % du verdissement du Plateau de Loess, 87 % reviennent au climat et à l'effet CO_2. Ces politiques réduisent surtout les revenus paysans au-delà des subventions, qui ne compensent pas la perte d'usage. Deux cas confirment l'asymétrie. La viabilité de l'agriculture de conservation au Zimbabwe dépend des prix subventionnés des fertilisants (Homann-Kee Tui et al. 2015). Les revenus carbone des *exclosures* du Tigray ne représentent que 44 % des revenus de blé sacrifiés (Aynekulu et al. 2017). Ce qui est peu coûteux par principe écologique dépend de subventions élevées en coût réel. Isolés des autres revenus, les paiements pour services écosystémiques en aride ne semblent pas inciter pas à étendre la pratique.

Une seconde dynamique opère par capture symbolique du label « régénératif ». Bless (2024) documente des entreprises agroalimentaires affichant la mention « régénérative » sans modifier leur approvisionnement. Gordon et al. (2023) recensent, parmi 96 organisations australiennes et états-uniennes, neuf discours concurrents, du *carbon farming* industriel à la régénération holistique. Mambo et Lhermie (2024) tirent le parallèle avec le label biologique : les définitions *process-based* reposent sur une liste de pratiques, non sur des résultats mesurés. Le boom de l'argan marocain l'illustre. Lybbert et al. (2011) documentent l'absence d'investissement de long terme dans l'arganeraie malgré les revenus de la filière : La régénération devient un levier marchand qui reproduit les rapports de pouvoir préexistants.

Différentiel protéger-réparer.

Les trois cas suivants exposent une thèse cruciale : il est bien plus rentable de protéger que de réparer.

CAS	COÛT	RÉSULTAT	LOGIQUE
RNA, Niger — Reij & Garrity 2016 ; Haglund et al. 2011	~20 USD/*ha*, coût d'expert	+30 % de revenus chez les adoptants ; intervention précoce, capital biologique encore présent	La technique la moins coûteuse devient la plus efficace : elle s'appuie sur ce qui reste.
Three-North, Chine — Suo & Cao 2021	Perte nette 230,8 Md RMB ; gain potentiel 447,4 Md en récupération naturelle	Allocation irrationnelle : afforestation artificielle sur écosystème effondrement	Intervention tardive sur milieu dégradé : le coût explose pour un effet moindre.
Check dams, Rajasthan — Dashora et al. 2022	Bénéfices ≈ 4× les coûts à densité optimale	Rentable mais saturable : gain marginal décroissant au-delà du seuil	Rentabilité réelle mais bornée : tout dépend du diagnostic préalable.

Stapleton et al. (2023), l'une des rares revues coût-efficacité en zones arides, signale une forte lacune comparative. Yirdaw et al. (2017) relèvent l'absence d'analyse coût-bénéfice entre contextes. Crouzeilles et al. (2020) proposent un cadre de ciblage pour la seule régénération naturelle. Une analyse coût-bénéfice normalisée des techniques en aride reste donc à produire. Le constat tient moins au manque de chiffres qu'au cadre de comparaison : contextes biophysiques et dispositifs sociaux variables, horizons d'amortissement d'un facteur dix (cinq ans pour une RNA, trente pour une plantation), indicateurs dépendant du commanditaire (carbone, hectares, revenus, biodiversité, recharge de nappe). La trajectoire des cas reste opaque sans grille d'attribution distinguant la pratique, le climat et l'usage des sols en amont.

VII.c. Gouvernance de l'eau

Plus qu'ailleurs, la régénération en zone aride repose sur la gouvernance de l'eau. Elle est d'abord réglée par les institutions et le droit, ensuite par les prix. La science institutionnelle des communs (Ostrom 1990) montre que les systèmes d'irrigation traditionnels ont durablement régulé l'accès par des règles communautaires : *huertas* du Levant ibérique (associations d'irrigation médiévales), *zanjeras* philippines (groupements de répartition de l'eau), *qanats* iraniens (galeries souterraines gravitaires). Les principes sont connus : limites claires, surveillance par les usagers, sanctions graduées, gouvernance imbriquée

du local au régional. Ce rappel n'est pas nostalgique. Les dispositifs contemporains qui fonctionnent (règles villageoises sahéliennes, associations d'usagers de l'eau au Maharashtra) en reproduisent les principes.

Environ 263 bassins fluviaux et lacustres transfrontaliers couvrent près de la moitié des terres émergées et concernent 145 États (UN-Water 2024). Les plus tendus traversent précisément des zones arides ou semi-arides : Indus, Helmand, Tigre-Euphrate, Jourdain, Nil, Aral, Colorado, Rio Grande. Malgré la Convention de New York (1997) sur les cours d'eau internationaux, le nombre d'États ratificateurs reste faible au regard des bassins concernés. Les arrangements pratiques relèvent de traités bilatéraux fragmentés, souvent antérieurs à la Convention.

Environ 300 aquifères transfrontaliers desservent près de 2 milliards de personnes (UN-Water 2024). Trois constats convergent. Jasechko et al. (2024) analysent 1 693 systèmes d'aquifères. Ils documentent des baisses rapides et accélérées au XXIe siècle, surtout dans les *drylands* cultivés. Richardson et al. (2023) actualisent le cadre des limites planétaires. La limite eau douce est franchie pour ses deux composantes, eau bleue (cours d'eau, lacs, nappes) et eau verte (humidité du sol disponible pour les plantes). Cuthbert et al. (2019) établissent un décalage temporel substantiel entre prélèvement et réponse de la nappe. L'enjeu de gouvernance est donc intergénérationnel. Juridiquement, l'eau souterraine échappe au droit foncier : pomper sous sa parcelle prélève une ressource partagée. Aucun droit international des aquifères transfrontaliers n'existe, hors Systèmes Aquifères Nubien et du Sahara Septentrional.

Restaurer sans réguler les prélèvements en amont produit des effets pervers documentés. Sur le Plateau de Loess, le verdissement aurait accentué la pression sur les ressources hydriques résiduelles (Zan B. et al. 2024). Pour la Grande Muraille Verte, la fermeture des terres réhabilitées déplace la contrainte hydrique sur les usages pastoraux (Turner et al. 2021). À l'inverse, Liu et al. (2025) rapportent une remontée piézométrique depuis 2020 sur la Plaine de Chine du Nord, attribuée à des transferts d'eau du Sud humide vers le Nord aride et à une régulation stricte des prélèvements. Une intervention de gouvernance peut donc renverser une déplétion.

VII.d. Diffusion d'une pratique régénérative

Comment une pratique régénérative atteint l'adoption massive ? La sociologie de la diffusion éclaire des trajectoires contrastées.

Modèle classique et complex contagions

Le modèle Rogers (1962) (courbe en S, innovateurs, *early adopters*, majorité) a structuré l'extension agricole occidentale. Centola (2018) en établit la

limite. Il vaut pour les *simple contagions*, pratiques à faible coût et faible engagement, mais non pour les *complex contagions*. Celles-ci exigent un changement substantiel et un risque individuel. La régénération aride suppose un changement cultural, une transition à rendement plus faible, souvent une modification du rapport au foncier. Sa diffusion passe par des ponts larges (*wide bridges*) : un seuil de voisinage atteint dans le réseau local permet de déclencher la bascule. Moussaïd (2019, *Fouloscopie*) vulgarise ces dynamiques d'adoption.

RNA au Sahel : la diffusion par voisinage

La RNA a stagné une décennie avant de se répandre dans les années 1990-2000. Sendzimir et al. (2011) documentent un mouvement d'observation directe entre exploitations voisines, conditionné par la reconnaissance du droit paysan sur les arbres présents dans les parcelles. La révision du cadre foncier nigérien des années 2000 a levé le verrou juridique. Reij et Garrity (2016) chiffrent la diffusion à plus de cinq millions d'hectares au Niger. La trajectoire suit le schéma des *wide bridges* : un seuil de voisinage adoptant déclenche la bascule régionale après une décennie de présence souterraine. La levée du verrou foncier (par révision du droit positif au Niger ou par arrangements coutumiers ailleurs) figure comme seuil en deçà duquel le mécanisme de diffusion n'opère pas.

Paani Foundation au Maharashtra

Mody et al. (2023) documentent une mobilisation déployée de 2016 à 2019 dans le Maharashtra semi-aride : compétition entre villages diffusée à la télévision régionale, formations collectives aux techniques de captation pluviale, mesures publiques des volumes mobilisés village par village. Le dispositif active explicitement un seuil de voisinage, à l'échelle de plusieurs milliers de villages. L'évaluation *peer-reviewed* des effets hydrologiques cumulés reste limitée. C'est un cas d'école sociologique avant de l'être comme régénération hydrologique.

La diffusion d'une pratique régénérative cumule ainsi trois préalables : un verrou institutionnel levé, un seuil de voisinage atteint et des résultats effectivement mesurables sur la pratique elle-même.

VII.e. Le temps long : colonial, moderniste, écologique

Les programmes étatiques de régénération en zones arides héritent de deux siècles de doctrine, qui s'articulent à travers plusieurs récits non exclusifs.

Le récit colonial naît dans la première moitié du XIX^{e} siècle, en contexte d'occupation. La doctrine française dite de la dessiccation attribue la dégradation des paysages méditerranéens et nord-africains à une déforestation imputée aux pratiques locales. Elle identifie le reboisement comme solution. Le

couplage forêt-eau, déjà formalisé par les écoles forestières françaises, est étendu sans conditions aux zones arides. Les premières ceintures vertes algériennes datent de la seconde moitié du siècle. L'approche des Eaux et Forêts essaime en formant des forestiers britanniques, américains et russes. Le mot « désertification », apparu dans l'entre-deux-guerres, naturalise l'idée d'un désert qui « avance ». Turner et al. (2023), mobilisant la distinction désertification / dessiccation (Reynolds et Stafford Smith 2002), attribuent les oscillations régionales du désert d'abord à la variabilité climatique.

Les grands programmes de plantation du XXe siècle (Prairie States Forestry Project nord-américain, Plan de transformation de la nature soviétique, Three-North chinois, Barrage Vert algérien puis Grande Muraille Verte sahélienne) partagent une mobilisation étatique, une gestion technique de la forêt et une ligne continue imposée au paysage. Le Prairie States, engagé en réponse au Dust Bowl, obtient des résultats documentés sur l'érosion éolienne. Les programmes soviétique et chinois pâtissent d'une mortalité massive des semis. Pour Turner et al. (2023), planter est aussi un acte de territorialisation. L'État se rend visible et impose une lecture homogénéisante du paysage. Ils identifient trois erreurs conceptuelles partagées : le désert comme front linéaire, l'homogénéité supposée des drylands justifiant une intervention standardisée et l'arborocentrisme (l'arbre comme indicateur de réussite indépendamment de son adéquation au milieu). Rohatyn et al. (2022) prolongent la critique sur le plan climatique. Le bénéfice carbone net de l'afforestation aride est en grande partie absorbé par l'effet albédo. Un ciblage spatial restreint aux zones de refroidissement net en double l'efficacité.

Le récit écologique s'installe à partir des années 1990. Pour la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD, 1994), la dégradation des terres est un problème global. La Décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes (2021-2030) le prolonge. Chasek et al. (2019) documentent les tensions de l'interface science-politique dans la mise en œuvre nationale de la neutralité en matière de dégradation des terres. L'asymétrie entre niveau d'ambition affiché et opérationnalisation documentée reste prononcée. Pour la Grande Muraille Verte sahélienne, le suivi (UNCCD 2020) documente seulement 4 % des 100 millions d'hectares ciblés qui sont réellement engagés sur la première décennie. Deux zones échappent au schéma général, le Plateau Mossi (Burkina Faso) et la zone Maradi-Zinder (Niger). Des actions paysannes et d'ONG y ont précédé l'initiative, pour une productivité supérieure à la cible. Le Plateau de Loess chinois fait exception : intervention étatique massive et engagement paysan ont permis un verdissement à coût hydrique documenté.

Ces récits opèrent tous à une échelle unique, alors que la régénération en zones arides articule les échelles locales (mise en œuvre), régionales (climat et hydrologie) et globales (financement et trajectoire d'aridification).

VII.f. Écoles scientifiques de la régénération en zone aride

La régénération en zones arides est un objet multidisciplinaire (écohydrologie, écologie de la restauration, *range science*, climatologie des rétroactions sol-atmosphère, etc.). Cela rend toute lecture bibliométrique structurellement incomplète. La bibliométrie de référence (Shi et al. 2022) recense 2 254 articles Web of Sciences publiés entre 2009 et 2021 sur la *dryland ecological* restoration. La Chine (583 articles) et les États-Unis (517) dominent en volume, suivis de l'Australie, l'Allemagne, l'Espagne, le Royaume-Uni, l'Italie et la France. L'Université Rey Juan Carlos est l'institution la plus citée, devant le CSIC et l'Université de Leeds. Ces chiffres captent un sous-ensemble étiqueté, sans l'école adjacente des rétroactions sol-végétation-atmosphère.

Le pôle espagnol Maestre-Berdugo (Université Rey Juan Carlos, CSIC) occupe le premier rang d'impact : multifonctionnalité écosystémique des drylands, seuils d'aridité globaux, programme BIODESERT. Trois pôles chinois complètent le tableau : le Global Dryland Ecosystem Programme (Fu et al. 2021), l'attribution du verdissement global (Piao et al. 2020 ; Chen et al. 2019) et une collaboration France-Chine sur les rétroactions revégétalisation-bilan hydrique. Les États-Unis articulent une *range science* du Sud-Ouest (modèles de transition d'état) et une écohydrologie aride autour de l'Université d'Arizona. Israël a une tradition ancienne (Université Ben Gurion, *runoff farming* ; forêt de Yatir). La France apparaît au 8e rang via un pôle dispersé entre CIRAD, IRD et INRAE.

La découverte de positionnement tient à un absent. Une « école » nord-européenne (Wageningen, Utrecht, Delft, Wetsus, Ghent et Leeds) est absente de la bibliométrie indépendante Shi 2022. Ses contributeurs publient hors de l'étiquette *dryland ecological restoration*, dans un champ connexe (Global Change Biology, Nature, etc.). La régénération aride est donc cartographiée par des disciplines n'incluant pas le couplage sol-atmosphère, pourtant stratégique.

VII.g. Cartographie des acteurs opérationnels

La cartographie recense les acteurs opérationnels du champ de la régénération en aride. Elle vise à repérer et décrire les principales catégories. Des informations complémentaires figurent en annexe. Ce champ articule des registres documentaires très distincts : production institutionnelle des agences onusiennes, récit visuel des vulgarisateurs, littérature grise des praticiens et structures, recherche académique des centres internationaux.

Cartographie des acteurs opérationnels · *régénération en zones arides*

TYPE D'ACTEUR	FONCTION	EXEMPLES
1 Cadrage normatif & savoir		
ONU, registre normatif	Cadrage normatif mondial : conventions, évaluations, vocabulaire	UNCCD · IPBES · IPCC
Centres de recherche internationaux	Recherche appliquée, démonstration in situ, formation	ICRAF · ICARDA · CGIAR
2 Financement & engagement		
Engagements globaux multi-pays	Objectifs volontaires, sommets, suivi pluriannuel	Grande Muraille Verte · Bonn Challenge · AFR100
Agences bilatérales	Financement et co-pilotage de programmes terrain	AFD · GIZ · JICA
Fondations philanthropiques	Financement philanthropique non lucratif	DOEN Foundation · Good Energies Foundation · Robert Bosch Stiftung
Investissement à mission	Investissement à impact : rendement et résultat environnemental	Mirova LDN Fund · Climate Asset Management
Industries certifiantes	Standards privés, audits, accès aux marchés carbone / biodiversité	Verra · Gold Standard · Plan Vivo
3 Mise en œuvre institutionnelle		
ONU, registre opérationnel	Programmes techniques via partenaires nationaux	FAO · UNDP · UNEP
Gouvernements nationaux	Politiques publiques, services forestiers, programmes nationaux	Chine (Three-North) · Niger (CNEDD) · Maroc (Forêts du Maroc 2020-2030, ANEF)
Opérateurs industriels sous obligation	Restauration post-exploitation imposée (loi ou réputation)	Rio Tinto · Anglo American · BHP
4 Société civile & ONG		
ONG internationales humanitaires	Régénération intégrée à un mandat plus large	World Vision · CARE · Oxfam
ONG mono-mandat	Programmes dédiés à la restauration des paysages	Justdiggit · Commonland · Ecosystem Restoration Camps
ONG nationales	Opération directe en pays cible, ancrage national	Paani Foundation · Sahel Eco · BAIF
ONG locales & associations paysannes	Gestion communautaire des ressources, portage local	Comités villageois sahéliens · associations d'usagers de l'eau · coopératives argan
Coalitions militantes grassroots	Événements-réseaux, discours-cadre régénératif	GERC · Global Evergreening Alliance · Regeneration International
5 Praticiens & terrain		
Grands éleveurs extensifs	Pratique extensive sur grandes surfaces	Savory Hub · GRASS / Ovis 21 (Patagonie) · Holistic Management International
Praticiens-structures	Sites pilotes signés par un fondateur	Regenerative Resources Co (Spackman) · Agenda Götsch · Permaculture Research Institute (Lawton)
Petits exploitants	Pratique familiale ou communautaire	Paysans sahéliens (RNA, zaï, demi-lunes) · paysans indiens des bassins versants (johads) · communautés oasiennes (qanat, foggara)
6 Récit & diffusion		
Vulgarisateurs & relais médiatiques	Diffusion du récit à large audience	John D. Liu · Tony Rinaudo · Andrew Millison

Approche descriptive : lister un acteur ne vaut pas endossement. Détail complémentaire (registre documentaire dominant, statut institutionnel, marqueurs de reconnaissance) en annexe.

VIII. Faire advenir la régénération

La régénération ne se réduit pas au verdissement. Ce dernier ne signale qu'une biomasse plus dense, sans rien dire du retour de l'eau, des nutriments ou de la biodiversité fonctionnelle (Piao 2020). Ce qui compte est qu'une biomasse à photosynthèse intense active plusieurs piliers d'aggradation : prélèvement du carbone atmosphérique, stocks de matière organique, structuration des communautés microbiennes, modulation des flux d'eau et d'énergie. C'est ce moteur que des leviers doivent mobiliser.

Ce chapitre passe du descriptif aux mécanismes. L'agronome se tient à la jonction de plusieurs enjeux structurants pour la régénération (sol, eau, nutriments, couverture végétale) sur lesquels il opère simultanément. Cette posture transversale est précisément celle qu'exige l'articulation des piliers d'aggradation. La roue proposée par Olivier Husson en donne un cadre intégré.

VIII.a. Seuils et géométrie

VIII.a.1. Le seuil de masse à dépasser (ignition)

En aride, le seuil se pose avec une acuité particulière. Les rétroactions eau-végétation opèrent par à-coups, les propagules (graines, rejets, fragments végétatifs) sont rares, la dispersion limitée. Créer un patch durable suppose de franchir une taille minimale, le seuil d'ignition. Un foyer trop petit s'éteint, un foyer suffisant se propage et s'auto-entretient. Michaels et al. (2024) proposent un cadre de nucléation autocatalytique. Pour qu'un patch introduit dans un état dégradé bascule vers un état amélioré, sa taille initiale doit excéder une taille critique. Il n'existe pas de valeur universelle. Elle dépend de la force de la rétroaction et de la résistance du milieu et se calibre localement.

Les valeurs empiriques se déclinent à trois échelles. À la plante isolée, les îlots de fertilité sous arbre (10-100 m²) concentrent matière organique, azote et humidité. Au couvert, la végétation tigrée (bandes alternant avec le sol nu, transverses à la pente) opère à 5-50 m, documentée en Sahel et en Australie (Kéfi et al. 2007). À l'échelle paysagère, des exclos pastoraux de 5-20 ha ont enclenché des trajectoires d'aggradation au Tigray.

Le mécanisme biologique de l'ignition peut s'ancrer dans le sol. Bowker (2007) montre que la restauration assistée des biocroûtes permet une transition depuis un état dégradé. Elles stabilisent le sol, fixent l'azote, retiennent l'humidité. Passé une couverture minimale, elles facilitent l'installation des plantes vasculaires.

VIII.a.2. La géométrie d'intervention (nucléation)

La taille seuil ne dit pas comment disposer les patches : plusieurs petits, un seul grand, un maillage régulier, un essaim irrégulier ? Selon la nucléation autocatalytique, un patch initial supérieur au seuil critique catalyse la transition du paysage par expansion auto-entretenue. Eppinga et al. (2023) et Michaels et al. (2024) convergent : plusieurs petits patches franchissant chacun le seuil l'emportent sur un patch unique plus grand. Le nombre d'interfaces de propagation prime sur la masse concentrée. C'est l'argument matériel de la stratégie en essaim de noyaux, plutôt qu'un front continu.

Le cadre s'inverse selon le sens de la bascule. Rietkerk et al. (2004) et Kéfi et al. (2007) lisaient l'auto-organisation des patches comme signe d'une bascule vers la désertification. Kéfi et al. (2024) inversent le cadre. Sur un gradient d'aridité global, la structure auto-organisée du couvert renforce la résilience par bascule ascendante, jusqu'à un seuil d'aridité au-delà duquel cette résilience s'effondre. Arrault (2026), dans sa bande dessinée reportage, conçoit la Grande Muraille Verte non comme une muraille linéaire mais comme un maillage d'écosystèmes productifs, un puzzle paysager plutôt qu'un front.

VIII.a.3. La fenêtre climatique d'opportunité

Quels signaux climatiques ouvrent la fenêtre d'ignition ? Une même intervention paysagère peut catalyser un état alternatif en contexte favorable, ou rester sans effet en saison sèche.

Holmgren et Scheffer (2001) en posent le cadre fondateur. L'oscillation ENSO module la pluviométrie de plusieurs zones arides (Sud-Ouest américain, Patagonie, Sud-Ouest australien). Un épisode humide combiné à un contrôle du pâturage peut y déclencher une bascule durable, qu'une année sèche n'aurait pas permise. La fenêtre n'est pas permanente.

Le pivot empirique vient de Berdugo et al. (2022), sur 41 830 sites arides et 20 ans de NDVI MODIS. La répartition globale est asymétrique : 36 % de trajectoires positives, 8 % négatives, 56 % neutres, soit, en nombre de sites, des bascules positives nettement plus fréquentes que les négatives. Ceci est posé sans préjuger de leur amplitude. Au sein de chaque tendance, les négatives sont plus souvent abruptes (67 %) que les positives (50 %), ce qui n'inverse pas l'asymétrie globale.

L'aridité sépare deux régimes : sous un seuil d'environ 0,8 (transition semi-aride / aride strict au sens UNCCD), les bascules négatives abruptes dominent ; au-delà, les positives prennent le dessus. Berdugo et al. citent le Sahel (aridité ~0,8) comme cas d'école (désertification rapide des années 1970, reverdissement

tout aussi rapide après le retour des pluies des années 1980). Ils concluent que la restauration y serait d'autant plus efficace que la variabilité climatique est faible.

Une fenêtre récente est documentée. Gao et al. (2025) suivent le Mu Us Sandyland chinois sur 34 ans de satellite et repèrent trois phases : stabilité (1987-1998), déplétion rapide (2003-2010), récupération (2011-2020). La restauration consomme d'abord davantage d'eau par transpiration accrue, puis une rétroaction végétation-précipitations inverserait la trajectoire. Ce cas semble donc combiner seuil franchi, nucléation enclenchée et fenêtre ouverte.

VIII.b. Réserves et garde-fous

VIII.b.1. Hystérésis empirique

L'asymétrie entre dégradation et régénération est désormais quantifiée. Ascenzi et al. (2025) consolident 41 méta-analyses : les écosystèmes restaurés rattrapent une part substantielle de leur capital sol (en moyenne 79 % du stock de carbone organique pour les arbustaies semi-arides), mais une fraction du déficit subsiste. Les stocks restaurés sont 14 % (forêts) à 50 % (zones humides) en deçà de leurs références non perturbées. La régénération avance, sans effacer la dégradation.

Cette asymétrie soulève la question de la référence. L'état non perturbé (*pristine*) servant de comparaison est une convention plus qu'une donnée empirique. Les écosystèmes terrestres n'ont pas d'état de référence stable. La forêt méditerranéenne actuelle hérite de millénaires de défrichement. L'état de référence observé est lui-même déjà dégradé.

Les écosystèmes régénérés en aride ne convergent ni vers un *pristine* inaccessible, ni vers leur état dégradé de départ. Ils tracent une trajectoire fonctionnelle propre, parfois qualifiée de *novel ecosystem*. La régénération se pense selon son régime propre, non comme retour à une origine.

VIII.b.2. Dépendance au contexte des mécanismes

Aucun mécanisme régénérateur n'est universel. Trois exemples invitent à la prudence.

L'afforestation modifie la pluviométrie selon des régimes opposés. Dans les modélisations du bassin méditerranéen de Theeuwen et al. (2025), l'asymétrie marquée entre les zones initialement sèches qui s'assèchent davantage après reboisement et les plus qui humides s'humidifient. Le levier végétation-climat n'est pas additif. Sa mobilisation suppose une lecture locale du bilan hydrique initial.

Selon leur composition, les biocroûtes facilitent ou inhibent la végétation. Havrilla et al. (2019), sur plus de 1 000 études, établissent que les croûtes à mousses tendent à faciliter le recrutement, celles à lichens à l'inhiber. Les graminées en C4 et les plantes non-fixatrices d'azote en bénéficient davantage que les C3 et les fixatrices. Le levier biocroûte n'est pas uniformément activable.

Les seuils de couverture sont eux aussi contextuels. Wu et al. (2020) identifient en semi-aride un seuil d'environ 60 % de couverture au-delà duquel ruissellement et érosion se stabilisent, seuil qui ne peut être transposé mécaniquement à la persistance végétale. Quantifier un mécanisme ne permet pas de le transposer à un mécanisme associé.

Un argument de symétrie inverse mérite mention. Le couplage couvert-précipitation à l'échelle régionale est mieux démontré en zone tempérée qu'en aride, où l'attribution se complique de pressions concurrentes (climat, pâturage, érosion antérieure). Teuling et al. (2017) documentent dans les Landes une baisse de la couverture nuageuse après le chablis de la tempête Klaus (2009). Si la perte végétale dégrade l'ennuagement local, sa reconstitution peut, sous conditions, le restaurer en partie. La symétrie reste à approfondir à grande échelle en aride.

VIII.b.3. Un concept sous conditions

Le point de bascule positif est peu mobilisé le corpus consolidé pour ce livrable, deux références seulement l'emploient explicitement en semi-aride (Lenton 2026 ; Emenyu et al. 2025). La littérature préfère des concepts proches (états alternatifs stables, hystérésis, nucléation, fenêtre d'opportunité) sans en revendiquer l'étiquette.

Cette rareté impose une discipline. Mobiliser le concept sans l'adosser à un mécanisme précis et à un cas documenté, c'est employer le terme sans son contenu. Ce risque est aussi opérationnel. Un projet qui promettrait une bascule positive sans s'être assuré du seuil d'ignition, de la fenêtre climatique et de la trajectoire d'auto-renforcement s'exposerait à l'échec.

Enfin, la faible présence académique du terme régénération n'est pas neutre. Elle signale une opportunité de positionnement, à condition de charger le terme d'un contenu scientifique calibré et mobilisateur.

VIII.c. Leviers biophysiques

VIII.c.1. Le sol comme moteur d'aggradation

La régénération aride suppose un sol en aggradation, qui accroît ses stocks de matière organique stable. Husson et al. (2025) distinguent trois régimes (sol dégradé déficitaire en carbone, sol restauré, sol saturé proche de son plafond

géochimique). La question est déplacée. Ce n'est pas la quantité d'apport qui décide de la régénération, mais l'état initial du sol et la nature du carbone à fixer.

Le verrou est stœchiométrique, c'est-à-dire lié aux proportions entre éléments. Kirkby et al. (2016) établissent que l'humification stable exige, pour chaque tonne de carbone durablement stockée, de l'azote, du phosphore et du soufre en proportion fixe. À défaut, l'apport de carbone se retourne. Les microorganismes puisent ces éléments dans la matière organique préexistante (effet d'amorçage). Le bilan devient négatif. Apporter du carbone ne suffit donc pas sans azote, phosphore et soufre en proportion. Ce raisonnement pourrait d'ailleurs être étendu à tous les minéraux nécessaires au fonctionnement du vivant.

Ces transferts n'opèrent pas dans un sol abstrait. En aride, les vers de terre sont rares et les termites prennent le relais (Jouquet et al. 2011). Leurs édifices forment des points chauds de fertilité (azote, phosphore, argiles, rétention hydrique accrue ; Bonachela et al. 2015), dont la distribution crée une hétérogénéité fonctionnelle favorable à l'installation végétale (Sileshi et al. 2010). L'effet est contextuel. La mésofaune édaphique joue un rôle complémentaire mal documenté en aride strict.

La méta-analyse de Kimmell et al. (2023), sur 1 403 études et six continents, fixe la borne globale : la restauration active des sols arides accroît le carbone organique de +72 % et l'azote de +76 % en moyenne. La borne spectaculaire sur la colonisation mycorhizienne (+6 967 %) reflète surtout des protocoles d'inoculation. Le résultat structurant est l'interaction entre aridité et texture. La restauration agit le plus fortement sur les sols à texture fine en conditions arides et sur les sols sableux en conditions moins arides.

La trajectoire d'aggradation commence parfois avant la strate herbacée. En hyper-aride, les biocroûtes constituent souvent le premier couvert biologique possible (Weber et al. 2015). Par la fixation d'azote, l'agrégation des particules fines et l'amorçage des associations mycorhiziennes, elles préparent l'installation ultérieure d'herbacées et de ligneux.

Deux régimes illustrent l'aggradation par voie biologique. En Caatinga brésilienne semi-aride, diversification végétale et apports organiques produisent des trajectoires de récupération documentées sur des décennies (Barros 2021 ; Oliveira et al. 2023). Sur le plateau de Loess, l'aggradation a procédé par succession de strates herbacées puis ligneuses, avec des gains nets de matière organique sur trois décennies. Ces cas confirment l'existence de fenêtres d'aggradation, sans pour autant lever les contraintes de proportion entre éléments posées plus haut.

On le voit, l'aggradation par le sol ne suffit pas. Il faut également agir sur le cycle hydrique.

VIII.c.2. Maximiser toute l'eau disponible

L'eau est le second facteur limitant. La régénération la mobilise à trois échelles : les gouttes au sol, la vapeur localement captable, la vapeur en transit. Pour les gouttes d'eau, le principe est de ralentir et infiltrer, afin d'amorcer la vie du sol et de recharger les nappes peu profondes.

Au Rajasthan, le programme Tarun Bharat Sangh est le cas le mieux ancré. Everard (2015) en synthétise 40 ans pour un millier de villages, 8 600 johads reconstruits et cinq rivières redevenues pérennes. Des puits asséchés en 1985 avaient encore de l'eau lors de la sécheresse 1999-2002 après restauration du bassin par retenues collectives. Dashora et al. (2018) mesurent une recharge moyenne de 33 mm/an (17 en année sèche). Dashora et al. (2022), sur sept ans, estime le ratio bénéfice-coût à 400 %. Toutefois, les rendements marginaux décroissent quand la densité d'ouvrages augmente sur un bassin. Sur plus de 200 000 check dams indiens, une trentaine seulement sont quantitativement évalués.

Le cas du Tigray-Gule (Éthiopie) déplace ces ordres de grandeur en contexte sahélien africain. Woldearegay et al. (2024), à partir de dix ans de suivi dresse un bilan positif : nappes remontées, débit des sources existantes en hausse de 73 %, sources nouvelles, sédiments en hautes eaux diminuant jusqu'à 65 %, surfaces irriguées passées de 3,5 à 166 ha (2002-2019), résilience maintenue durant la sécheresse 2015-2016. C'est une des évidences empiriques les plus quantifiées pour un cas hydrologique aride positif.

La vapeur atmosphérique offre un autre levier, capté par deux mécanismes. Le brouillard, géographiquement contraint, exige une fréquence et une densité d'événements élevées, réunies sur quelques façades océaniques arides (Chili, Pérou, Namibie, Maroc, Péninsule Arabique). Klemm et al. (2012) recensent des rendements de quelques litres par mètre carré et par jour. Lobos-Roco et al. (2025) valident un modèle de prédiction à Alto Hospicio (Atacama). Ils concluent à une transposabilité faible vers les sites arides non côtiers. La calibration tient à la fréquence du brouillard, non à l'aridité seule.

La rosée est plus diffuse et plus universelle, mais ses rendements unitaires sont modestes (environ 0,5 L/m²/nuit en condensation passive ; Beysens et al. 2006 ; Tomaszkiewicz et al. 2015). Dans le Sud-Ouest marocain, Lekouch et al. (2011) mesurent une rosée annuelle équivalant à environ 40 % de la pluie cumulée, pour un coût amorti localement. Paulus et al. (2024) en mesurent le mécanisme sur le site ICOS de Las Majadas del Tiétar (dehesa ibérique). La corrélation de turbulence (eddy covariance) enregistre, pour 30 % des nuits, un flux de chaleur

latente descendant. La vapeur se condense sur un sol refroidi par rayonnement infrarouge sous le point de rosée. En conditions sèches, ce flux représente 25 à 64 % du bilan hydrique journalier. Son ampleur n'est donc pas marginale.

Ces mesures ouvrent une question. Le mécanisme dépend du refroidissement nocturne de surface, donc du type d'occupation du sol. La régénération pourrait-elle en moduler le bilan, dans un sens qui reste à documenter ?

À l'échelle d'un dispositif isolé, capter rosée ou brouillard ne soustrait rien de notable à l'atmosphère. A l'échelle régionale cumulée, l'effet net n'est pas documenté. La même question vaut pour la végétation, qui modifie les conditions de condensation par évapotranspiration, rugosité et convection. Celle-ci pèse sur les précipitations à des distances de la centaine à plusieurs milliers de kilomètres par téléconnexions atmosphériques. Un bilan hydrique formel serait nécessaire.

VIII.c.3. Biodiversité : noyaux et corridors

Le lien entre richesse en espèces et résilience écosystémique fait consensus depuis deux décennies (Cardinale et al. 2012). En aride, Maestre et al. (2012) montrent, à partir de centaines de sites, que la richesse en plantes vivaces prédit la capacité d'un écosystème à assurer simultanément plusieurs fonctions liées aux cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. La redondance des espèces amortit les chocs quand certaines disparaissent.

Une stratégie de noyaux et corridors se formule alors comme une hypothèse opérationnelle. Plutôt qu'un front continu, un maillage de noyaux à forte diversité capables de se propager pourrait être déployé. L'assise théorique est celle de la nucléation autocatalytique. Souza Moura et al. (2023), notamment, en donnent un appui empirique en Caatinga, où les arbres rémanents agissent comme noyaux facilitant le recrutement.

Les corridors transforment la mosaïque en réseau. Kiffner et al. (2016) documentent, sur des couloirs pastoraux semi-arides reliant deux parcs de Tanzanie du Nord, une richesse en grands mammifères très supérieure dans les corridors gérés par les communautés. La structure spatiale (connectivité, gestion locale) devient un levier de biodiversité au même titre que le contenu écologique.

Les cascades trophiques constituent un cas plus disputé. Ripple et Beschta (2012) documentent à Yellowstone la chaîne déclenchée par la réintroduction des loups, mais sa transposition en aride se heurte à un goulot hydrologique. Marshall et al. (2013) montrent qu'une réduction du pâturage ne suffit pas sans remontée des nappes pour la recolonisation riveraine. Yellowstone relève d'ailleurs du semi-aride. Le rôle des grands herbivores en aride tropical reste quant à lui controversé.

L'agrobiodiversité locale complète le tableau. Ghazanfar (2024) souligne la valeur des variétés cultivées et refuges floristiques de la Péninsule Arabique. Elles forment un capital génétique mobilisable pour la régénération. Barros et al. (2021) confirment en Caatinga que la reconstitution par rejet de souche restaure non seulement la structure, mais aussi la composition fonctionnelle et phylogénétique de la forêt sèche. La biodiversité y est le moteur, non seulement le résultat.

VIII.d. Leviers sociaux

VIII.d.1. Seuils d'adoption sociale

Le chapitre VII.d a décrit la diffusion régénérative comme un processus à seuil de voisinage. Reste à formaliser ce qui sépare une adoption progressive d'une bascule auto-propagatrice. Dit autrement, à partir de quel seuil le mécanisme cesse-t-il d'exiger une impulsion externe pour s'auto-entretenir ?

Le cadre des points de bascule positifs appliqué aux systèmes socio-écologiques apporte cette formalisation. Lenton (2026) l'articule autour de quatre leviers (récupération d'écosystèmes dégradés, bascule des systèmes socio-écologiques, initiatives favorables à la nature portées par la société civile, transformations des comportements de consommation). Il retient les pratiques régénératives paysannes africaines comme cas pertinent. Le critère est simple : un système bascule positivement quand une boucle de rétroaction interne (capital social, démonstration par voisinage, mutualisation des risques) remplace l'impulsion externe.

Emenyu et al. (2025) en donnent la première application *peer-reviewed* à un cas africain. Le programme TIST, déployé autour du Mont Kenya (un contexte qui n'est pas *dryland* strict), documente deux ensembles de surfaces presque équivalents. Certaines sont directement plantées par les groupes adhérents. Dans les surfaces voisines, l'adoption s'est propagée par observation. Pour chaque hectare planté, environ un hectare voisin a adopté la pratique. Ce ratio constitue un indicateur quantitatif de bascule. Deux leviers l'expliquent : la boucle de capital social (petits groupes, démocratie interne, visites mutuelles) et la levée des barrières d'accréditation carbone qui bloquaient les petits exploitants.

La diffusion par voisinage au Sahel rempli rétrospectivement ce critère. La pratique s'est étendue sans pilotage central une fois le verrou foncier levé, signe que le seuil d'auto-soutien avait été franchi à l'échelle régionale. Le franchissement se constate après coup, sans que la valeur du seuil ne puisse être fixée à l'avance.

VIII.d.2. Bascules de gouvernance

La gouvernance hydrique en zone aride a été décrite en VII.c. Le même cadre de bascule éclaire comment des règles collectives d'usage font passer d'un régime de surexploitation à un régime de conservation.

Castilla-Rho et al. (2017) simulent le comportement de milliers d'agriculteurs irrigants, calibré sur la World Values Survey et appliqué à trois aquifères surexploités (Murray-Darling, Central Valley, Punjab indo-pakistanais). La part d'usagers respectant les règles partagées ne croît pas progressivement. Elle bascule au-delà d'un seuil critique, sous l'effet conjugué d'un déplacement modeste des valeurs du groupe et d'un renforcement du contrôle et de la sanction. Passé ce seuil, tout le bassin applique le régime conservatoire.

Le programme Tarun Bharat Sangh en donne l'illustration empirique aride, que Lenton (2026) cite comme cas canonique. En environ quarante ans, la reconstitution communautaire des johads et la création d'institutions délibératives (Parlement de la rivière Arvari) ont fait basculer le régime d'usage, depuis le pompage individuel non régulé vers une gestion collective de la ressource, bascule de gouvernance à l'origine des forts gains hydrologiques. Ce changement de gouvernance est documenté sur un cas. Pour autant, rien n'indique fermement qu'il s'agit d'un seuil transposable.

VIII.e. Etendre la régénération au-delà de la parcelle

VIII.e.1. L'eau fossile, un levier de la régénération ?

La régénération en hyper-aride dépend d'une eau qui, à cette échelle d'aridité, est souvent fossile.

L'inertie de ces aquifères fixe une première contrainte. Cuthbert et al. (2019) documentent des temps de réponse médians millénaires en aride. Cet ordre de grandeur dépasse l'horizon humain de planification. La durabilité stricte y est rarement atteignable. Un prélèvement même modéré peut affecter les écoulements des siècles plus tard. Gleeson et al. (2020) distinguent trois approches : durabilité physique stricte, déclin géré dans la durée (*managed aquifer depletion*), rabattement décennal calibré sur une sécheresse (*strategic aquifer depletion*), tandis que le *smart mining* (Engelhardt et al. 2013) porte sur l'efficience d'usage. Trajectoire et rendement ne se substituent pas : ils se cumulent.

L'usage d'eau fossile pour amorcer la régénération est défendable selon plusieurs conditions : surveillance régulière du stock, réduction progressive du prélèvement, efficience d'usage tenue et alternative envisagée. La propriété de l'eau fossile d'un aquifère transfrontalier reste une question ouverte.

VIII.e.2. Le recyclage de l'humidité atmosphérique comme levier

Le recyclage atmosphérique terrestre, sa modulation par le couvert végétal et sa symétrie inverse (la sécheresse se propage, sa réversibilité est défendable) sont établis (Koppa et al. 2024). Reste à évaluer ce qu'un projet de régénération peut produire et à quelle échelle.

Des travaux récents montrent qu'une modification volontaire des couvertures peut amplifier la précipitation régionale. Theeuwen et al. (2025) simulent dans le bassin méditerranéen l'effet positif de la forestation sur les précipitations convectives, concentré sur les côtes humides et le relief. Par ailleurs, Branch et Wulfmeyer (2019) modélisent à partir d'une plantation de jojoba de 10 000 km² en Oman un enchaînement vertueux : albédo abaissé, chaleur sensible accrue, convergence au sol, initiation convective, pour 24 mm supplémentaires cumulés sur l'été. Staal et al. (2024) en font un objectif explicite de forestation (le targeted rainfall enhancement). Enfin, Warnau, Theeuwen et al. (2026) proposent l'humidification technologique de la couche limite par évaporation côtière. Trois leviers distincts pour un même couplage surface-atmosphère. Aucun ne crée l'humidité, ils la captent ; leur efficacité dépend de la position dans le flux.

L'argument pose la question de l'échelle. Elle gagnerait à être traitée à l'échelle des bassins atmosphériques de recyclage, sans présupposer leur correspondance avec des entités administratives. Une régénération conduite à grande échelle ne reste pas sans effet sur son voisinage. Elle modifie les bilans d'eau et d'énergie de proche en proche. Cette modification doit être assumée, surveillée, pour pouvoir être ajustée ou interrompue. Sur le terrain tempéré français, le projet Autoroute de la Pluie porté par la Manufacture du Climat va dans le sens d'une telle articulation (autoroutedelapluie.org ; lien d'intérêt déclaré).

Cette articulation n'est plus marginale. Aux États-Unis, une série de travaux de l'USGS en documente les étages successifs. Norman et al. (2022) montrent que des infrastructures naturelles en lits arides reconstituent des zones humides qui inversent la désertification et renforcent la résilience climatique. Petrakis et al. (2026) quantifient ensuite une boucle de rétroaction où sol humide, végétation et recharge se consolident mutuellement, sur quarante ans d'imagerie satellitaire.

Une revue conduite avec le NCAR et la Scripps (Norman et al. 2026) étend enfin l'analyse à l'atmosphère. Elle pose en hypothèse, non en acquis, qu'à une étendue et une densité suffisantes ces effets renforceraient la convergence d'humidité et la convection. Fait notable, la revue revendique des pratiques

régénératrices d'usage des sols dans un cadre non agricole, l'un des rares emplois de ce terme dans la littérature évaluée par les pairs.

VIII.f. Du constat à la méthode

Les sections précédentes établissent que la régénération aride est possible grâce à des leviers qui s'articulent, tout en exposant les réserves méthodologiques.

La première réserve est la sectorisation des travaux qui pointent l'écart entre pratique de terrain et documentation. La distinction entre régénération et restauration est formalisée en économie circulaire (Morseletto 2020). Le fossé entre protocoles de recherche et gestion adaptative est documenté pour le pâturage planifié (Teague 2013), la régénération naturelle assistée (Chomba 2020) et la syntropie. Les revues d'évaluation de la restauration signalent l'absence chronique de suivi multi-indicateurs et la sous-représentation du socio-économique (Wortley 2013 ; Nilsson 2016). Nous n'avons pas identifié de synthèse transversale couvrant ces sous-secteurs pour les zones arides.

La seconde réserve est le défaut de calibrage des outils de suivi pour l'aride. Le NDVI surestime la qualité écologique des couverts observés (Piao 2020), les études de dégradation mobilisent rarement plusieurs indicateurs végétaux et pédologiques de concert (Jamsranjav 2018) et les plateformes commerciales de MRV satellite concentrent leur offre sur le carbone et les niveaux descriptifs, sans traitement intégré des variables hydriques et énergétiques.

Le Volet A répond à ces deux limites. Il substitue à l'assemblage sectoriel une lecture transversale de l'aride. Ce volet documente une trajectoire de régénération sur plusieurs niveaux d'indicateurs, de la couverture végétale aux dynamiques hydriques et énergétiques. Les rétroactions climatiques y sont abordées, mais comme horizon de recherche plus que comme niveau qualifiable. En effet, leur attribution suppose des sources qui font souvent défaut. La grille reste un levier d'analyse des projets, non un instrument d'attribution. Elle s'applique sur l'ensemble du gradient aride pour permettre une qualification comparée. Certains éléments ne deviennent analysables qu'au-delà d'une certaine emprise spatiale ou, selon les cas, d'une certaine configuration paysagère.

Annexe A. Bibliographie

279 références citées dans le corps, vérifiées dans la base maître.

Ahlström A. et al (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO2 sink. *Science.* Consulter

Aker, J.C. & Jack, B.K (2025). Harvesting the Rain: The Adoption of Environmental Technologies in the Sahel. *Review of Economics and Statistics.* Consulter

Al Tameemi, K.A.K., Hasan, B.A., Al-Kanani, K.A. et al (2026). Drought and flood footprint: An environmental analysis of plant biodiversity changes in Al-Hawizeh Marsh, Iraq. *International Journal of Aquatic Biology.* Consulter

Al-Harbi, H.F. et al (2024). Vegetation trends and dynamics in Shada Mountain, Saudi Arabia, (1984–2023): insights from Google Earth Engine and R analysis. *Frontiers in Environmental Science.* Consulter

Al-Maktoumi, A (2025). A review of factors affecting the performance and impact of managed aquifer recharge projects: Insights from arid regions. *Journal of Groundwater Science and Engineering.* Consulter

Alkama R., Cescatti A (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science.* Consulter

An, et al. (2025). Land cover changes redistribute China's water resources through atmospheric moisture recycling. *Earth's Future (AGU).* Consulter

Ardilouze et al (2020). Precipitation response to extreme soil moisture conditions over the Mediterranean. *Climate Dynamics, 58:1927-1942.* Consulter

Ardilouze et al (2021). Summer temperature response to extreme soil water conditions in the Mediterranean transitional climate regime. *Climate Dynamics.* Consulter

Arrault (2025). Dadji - De Dakar à Djibouti, à la rencontre de la grande initiative verte panafricaine Consulter

Ascenzi I. et al (2025). Increased but not pristine soil organic carbon stocks in restored ecosystems. *Nature Communications.* Consulter

Augustiny et al (2025). Empirical evidence supports neither land sparing nor land sharing as the main strategy to manage agriculture–biodiversity tradeoffs. *PNAS Nexus, 4(9):pgaf251.* Consulter

Aynekulu E., Mekuria W., Tsegaye D. et al (2017). Long-term livestock exclosure did not affect soil carbon in southern Ethiopian rangelands. *Geoderma, 307.* Consulter

Badía, D. & Martí, C (2000). Seeding and mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the Central Ebro Valley, NE Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation.* Consulter

Balmford et al (2025). Sustainable high-yield farming is essential for bending the curve of biodiversity loss. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.* Consulter

Barendrecht, M.H. et al (2024). Exploring drought-to-flood interactions and dynamics. *WIREs Water.* Consulter

Barron-Gafford et al (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports.* Consulter

Barron-Gafford G.A. et al (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands. *Nature Sustainability.* Consulter

Barros, M.F., Ribeiro, E.M.S., Vanderlei, R.S., de Paula, A.S., Silva, A.B., Wirth, R., Cianciaruso, M.V. & Tabarelli, M (2021). Resprouting drives successional pathways and the resilience of Caatinga dry forest in human-modified landscapes. *Forest Ecology and Management, 482: 118881.* Consulter

Bartley, Abbott, Ghahramani, Ali, Kerr, Roth & Kinsey-Henderson (2022). Do regenerative grazing management practices improve vegetation and soil health in grazed rangelands? Preliminary insights from a space-for-time study in the Great Barrier Reef catchments, Australia. *The Rangeland Journal, 44, 221-246.* Consulter

Bastin, Cowley, Friedel & Materne (2024). Applying two remotely-sensed methods for monitoring grazing impacts in the Australian arid zone. *The Rangeland Journal, 45, 141-159.* Consulter

Beillouin D. et al (2023). A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. *Nature Communications.* Consulter

Bell S.M., Terrer C., Barriocanal C. et al (2021). Soil organic carbon accumulation rates on Mediterranean abandoned agricultural lands. *Science of the Total Environment, 759, 143535.* Consulter

Berdugo et al (2020). Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science.* Consulter

Berdugo et al (2022). Prevalence and drivers of abrupt vegetation shifts in global drylands. *PNAS.* Consulter

Berg, A. & McColl, K.A (2021). No projected global drylands expansion under greenhouse warming. *Nature Climate Change.* Consulter

Bernardino, P.N. et al (2025). Predictability of abrupt shifts in dryland ecosystem functioning. *Nature Climate Change, 15:86–91.* Consulter

Beysens et al (2006). Application of passive radiative cooling for dew condensation. *Energy.* Consulter

Binam, J.N. et al (2017). Effects of local institutions on the adoption of agroforestry innovations: evidence of farmer managed natural regeneration and its implications for rural livelihoods in the Sahel. *Agricultural and Food Economics, 5, Article 2.* Consulter

Bless R (2024). The Co-optation of Regenerative Agriculture: Revisiting the Corporate Environmental Food Regime. *Globalizations.* Consulter

Boix-Fayos C., de Vente J., Albaladejo J., Martínez-Mena M (2009). Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 133, 75–85.* Consulter

Bonachela, J.A., Pringle, R.M., Sheffer, E. et al (2015). Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. *Science, 347(6222):651–655.* Consulter

Bonan G.B (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science.* Consulter

Bosworth, D. et al (2025). Streamflow and groundwater response to stream restoration using beaver dam analogues in a semi-arid perennial stream. *JAWRA — Journal of the American Water Resources Association.* Consulter

Bowker, M.A (2007). Biological Soil Crust Rehabilitation in Theory and Practice: An Underexploited Opportunity. *Restoration Ecology.* Consulter

Branch, O. & Wulfmeyer, V (2019). Deliberate enhancement of rainfall using desert plantations. *PNAS.* Consulter

Brandt, M. et al (2019). Changes in rainfall distribution promote woody foliage production in the Sahel. *Communications Biology, 2:133.* Consulter

Brinkert A., Hölzel N., Sidorova T.V., Kamp J (2016). Spontaneous steppe restoration on abandoned cropland in Kazakhstan: grazing affects successional pathways. *Biodiversity and Conservation, 25, 2543–2561.* Consulter

Briske, Fuhlendorf & Smeins (2005). State-and-transition models, thresholds, and rangeland health. *Rangeland Ecology & Mgmt.* Consulter

Briske, Bestelmeyer, Stringham & Shaver (2008). Recommendations for Development of Resilience-Based State-and-Transition Models. *Rangeland Ecology & Mgmt.* Consulter

Briske, D.D. et al (2008). Rotational Grazing on Rangelands: Reconciliation of Perception and Experimental Evidence. *Rangeland Ecology & Management.* Consulter

Briske, D.D., Bestelmeyer, B.T. & Brown, J.R (2014). Savory's Unsubstantiated Claims Should Not Be Confused With Multipaddock Grazing. *Rangelands.* Consulter

Burke (2020). Soil indicators for restoration monitoring in arid regions (Namib). *Namibian J. Environment.* Consulter

Burrell, A.L. et al (2020). Anthropogenic CC has driven 5M km² of drylands to desertification. *Nature Communications.* Consulter

Cao S (2008). Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem. *Environmental Science & Technology.* Consulter

Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A. et al (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature 486(7401):59–67.* Consulter

Cassou et al (2005). Tropical Atlantic Influence on European Heat Waves. *Journal of Climate, 18(15):2805–2811.* Consulter

Castelli G., Oliveira L.A.A., Abdelli F., Dhaou H., Bresci E., Ouessar M (2019). Effect of traditional check dams (jessour) on soil and olive trees water status in Tunisia. *Science of the Total Environment, 690, 226-236.* Consulter

Castilla-Rho J.C. et al (2017). Social tipping points in global groundwater management. *Nature Human Behaviour 1(9):640–649.* Consulter

Centola, D (2018). How Behavior Spreads: The Science of Complex Contagions. *Princeton University Press, Princeton NJ (Princeton Analytical Sociology Series, vol. 3), 312 p.* Consulter

Cerdà, A., Lucas Borja, M.E., Úbeda, X. et al (2017). Pinus halepensis M. versus Quercus ilex subsp. Rotundifolia L. runoff and soil erosion at pedon scale under natural rainfall in Eastern Spain three decades after a forest fire. *Forest Ecology & Mgmt.* Consulter

Chandanpurkar, H.A. et al (2025). Unprecedented continental drying, shrinking freshwater availability. *Science Advances.* Consulter

Charney, J.G (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* Consulter

Chasek, P. et al (2019). Land degradation neutrality: The science-policy interface from the UNCCD to national implementation. *Environmental Science & Policy, 92, 182–190.* Consulter

Chen C. et al. (incl. Ciais P.) (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability.* Consulter

Chen, X. et al (2024). 65% cover is the sustainable vegetation threshold on the Loess Plateau. *Environ. Sci. Ecotechnol.* Consulter

Chomba, S. et al (2020). Opportunities and Constraints for Using Farmer Managed Natural Regeneration for Land Restoration in Sub-Saharan Africa. *Frontiers in Forests and Global Change.* Consulter

Concostrina-Zubiri et al (2014). Biological soil crusts across disturbance–recovery scenarios: effect of grazing regime on community dynamics. *Ecological Applications.* Consulter

Cook et al (2009). Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human-induced land degradation. *PNAS, 106(13):4997-5001.* Consulter

Coppock D.L., Crowley L., Durham S.L., Groves D., Jamison J.C., Karlan D., Norton B.E. & Ramsey R.D (2022). Community-based rangeland management in Namibia improves resource governance but not environmental and economic outcomes. *Communications Earth & Environment.* Consulter

Costantini et al (2016). Soil indicators for dryland restoration effectiveness. *Land Degradation & Dev.* Consulter

Crouzeilles R. et al (2020). Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration. *Conservation Letters.* Consulter

Cuthbert, M.O., Gleeson, T., Moosdorf, N. et al (2019). Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change, 9(2):137–141.* Consulter

Daramola M.T., Li R. & Xu M (2026). Evaporative cooling exceeded albedo-induced warming in greening areas of global drylands. *Scientific Reports.* Consulter

Dashora, Y. et al (2018). A simple method using farmers' measurements applied to estimate check dam recharge in Rajasthan, India. *Sustainable Water Resources Management.* Consulter

Dashora, Y. et al (2022). Hydrologic and Cost–Benefit Analysis of Multiple Check Dams in Catchments of Ephemeral Streams, Rajasthan, India. *Water (MDPI).* Consulter

Delhon, C., Thiébault, S., Brochier, J.-L. & Berger, J.-F (2010). Dynamiques de végétation au Tardiglaciaire et à l'Holocène ancien en moyenne vallée du Rhône d'après les données anthracologiques. *Quaternaire, 21(3).* Consulter

Descheemaeker K., Nyssen J., Poesen J. et al (2006). Runoff on slopes with restoring vegetation: A case study from the Tigray highlands, Ethiopia. *Journal of Hydrology.* Consulter

Djuma, H., Bruggeman, A., Camera, C., Eliades, M., & Kostarelos, K (2017). The impact of a check dam on groundwater recharge and sedimentation in an ephemeral stream. *Water (MDPI).* Consulter

Dureti, G., Hadi, H. & Wuepper, D (2026). Agri-environmental policies have reduced cropland degradation globally. *Nature Food.* Consulter

Eker, S., Lenton, T.M. et al (2024). Cross-system interactions for positive tipping cascades. *Earth System Dynamics, 15:789–800.* Consulter

El Khalki, E.M., et al (2025). Future water resources and droughts in the Atlas Mountains of Morocco under a high-emission climate scenario. *Journal of Hydrology: Regional Studies.* Consulter

Eldridge et al (2020). The pervasive and multifaceted influence of biocrusts on water in the world's drylands. *Global Change Biology.* Consulter

Eltahir (1996). The role of vegetation in sustaining large-scale atmospheric circulations in the tropics. *Journal of Geophysical Research, 101(D2):4255-4268.* Consulter

Emenyu A.P. et al (2025). Positive tipping points for accelerating adoption of regenerative practices in African smallholder farming systems: what drives and sustains adoption?. *Earth System Dynamics 16:1699–1710.* Consulter

Engelhardt, I., Prommer, H., Schulz, H.D. et al (2013). Surface and subsurface conceptual model of an arid environment with respect to mid- and late Holocene climate changes. *Environmental Earth Science.* Consulter

Eppinga, M.B., Michaels, T.K., Santos, M.J. et al (2023). Introducing desirable patches to initiate ecosystem transitions and accelerate ecosystem restoration. *Ecological Applications, 33(8):e2910.* Consulter

Erskine P.D., Fletcher A.T (2013). Novel ecosystems created by coal mines in central Queensland's Bowen Basin. *Ecological Processes, 2, 33.* Consulter

Eshete A. et al (2023). Selection of Soil and Water Conservation Technologies and Native Tree Species for Rehabilitation of Degraded Arid Lands in Southeast Ethiopia. *International Journal of Forestry Research.* Consulter

Everard, M (2015). Community-based groundwater and ecosystem restoration in semi-arid north Rajasthan (1): Socio-economic progress and lessons for groundwater-dependent areas. *Ecosystem Services.* Consulter

Ezeokoli O.T., Mashigo S.K., Maboeta M.S. et al (2020). Arbuscular mycorrhizal fungal community differentiation along a post-coal mining reclamation chronosequence in South Africa. *Applied Soil Ecology, 147, 103429.* Consulter

Famiglietti, J.S (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change.* Consulter

Feldman, A.F. et al (2023). Tropical surface temperature response to vegetation cover changes. *Global Change Biology.* Consulter

Feng, S. et al (2022). Greenhouse gas emissions drive global dryland expansion (attribution). *Journal of Climate.* Consulter

Filazzola et al (2020). Effects of livestock grazing and aridity on plant communities. *J. Applied Ecology.* Consulter

Fischer, J., Abson, D.J., Butsic, V. et al (2014). Land sparing versus land sharing: moving forward. *Conservation Letters.* Consulter

Fraser et al (1992). Is virga rain that evaporates before reaching the ground?. *Monthly Weather Review, 120(8):1565-1571.* Consulter

Fu B. et al (2021). The Global-DEP conceptual framework — research on dryland ecosystems to promote sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability.* Consulter

Gann et al (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology, 27(S1):S1-S46.* Consulter

Gao, N. et al (2025). Ecological restoration reverses terrestrial water storage losses in the Mu Us Sandyland in China. *Communications Earth & Environment.* Consulter

Garbisu C., Unamunzaga O. & Alkorta I (2025). Generating regenerative agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* Consulter

García-Carmona, M. et al (2023). Post-fire wood mulch negatively affects the moss biocrust cover and its positive effects on microbial diversity in a semi-arid Mediterranean forest. *Applied Soil Ecology.* Consulter

Ghazanfar, S.A (2024). Biogeography and Conservation in the Arabian Peninsula: A Present Perspective. *Plants (MDPI).* Consulter

Giller K.E., Hijbeek R., Andersson J.A. & Sumberg J (2021). Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture.* Consulter

Girona-García, A. et al (2021). Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis. *Earth-Science Reviews.* Consulter

Gleeson, T., Cuthbert, M.O., Ferguson, G. et al (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* Consulter

Gordon E., Davila F. & Riedy C (2023). Regenerative Agriculture: A Potentially Transformative Storyline Shared by Nine Discourses. *Sustainability Science.* Consulter

Green et al (2005). Farming and the Fate of Wild Nature. *Science.* Consulter

Haddad, Strohmeier, Nouwakpo, Rimawi, Weltz & Sterk (2022). Rangeland restoration in Jordan: Restoring vegetation cover by water harvesting measures. *International Soil and Water Conservation Research.* Consulter

Haglund, E. et al (2011). Dry land tree management for improved household livelihoods: Farmer managed natural regeneration in Niger. *Journal of Environmental Management.* Consulter

Hassani et al (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nature Communications, 12:6663.* Consulter

Hassanpour Adeh et al (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE.* Consulter

Havrilla, C.A., Chaudhary, V.B., Ferrenberg, S. et al (2019). Towards a predictive framework for biocrust mediation of plant performance: a meta-analysis. *Journal of Ecology, 107(6):2789–2807.* Consulter

Hawkins et al (2022). A holistic view of Holistic Management: What do farm-scale, carbon, and social studies tell us?. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* Consulter

Herrmann, S.M., Anyamba, A. & Tucker, C.J (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change, 15:394–404.* Consulter

Higgs, E., Falk, D.A., Guerrini, A. et al (2014). The changing role of history in restoration ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment.* Consulter

Hoek van Dijke, A.J. et al (2022). Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience.* Consulter

Holmgren, M. & Scheffer, M (2001). El Niño as a window of opportunity for the restoration of degraded arid ecosystems. *Ecosystems, 4(2):151–159.* Consulter

Homann-Kee Tui, S., Valbuena, D., Masikati, P. et al (2015). Economic trade-offs of biomass use in crop-livestock systems: Exploring more sustainable options in semi-arid Zimbabwe. *Agricultural Systems.* Consulter

Hornbeck (2012). The Enduring Impact of the American Dust Bowl: Short- and Long-Run Adjustments to Environmental Catastrophe. *American Economic Review, 102(4):1477-1507.* Consulter

Huang, J. et al (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change.* Consulter

Husson, O., Sarthou, J.-P., Thérond, O. & Duru, M (2025). L'agriculture régénératrice, une démarche pour massifier la transition vers l'agroécologie. *Revue AE&S, 15(1), juin 2025.* Consulter

IPBES (2018). Assessment Report on Land Degradation and Restoration. *IPBES Secretariat.* Consulter

Jacobi et al (2025). Syntropic farming systems for reconciling productivity, ecosystem functions, and restoration. *The Lancet Planetary Health.* Consulter

Jamsranjav C., Reid R.S., Fernández-Giménez M.E., Tsevlee A., Yadamsuren B., Heiner M (2018). Applying a dryland degradation framework for rangelands: the case of Mongolia. *Ecological Applications, 28(3), 622–642.* Consulter

Jarray F., Hermassi T., Mechergui M., Zucca C., Le Q.B (2023). Long-Term Impact of Soil and Water Conservation Measures on Soil Erosion in a Tunisian Semi-Arid Watershed. *Land, 12(8), 1537.* Consulter

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D. et al (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature, 625(7996):715–721.* Consulter

Jayasinghe S.L., Thomas D.T., Anderson J.P., Chen C. & Macdonald C.A (2023). Global Application of Regenerative Agriculture: A Review of Definitions and Assessment Approaches. *Sustainability.* Consulter

Jin, Q. & Wang, C (2017). A revival of Indian summer monsoon rainfall since 2002. *Nature Climate Change.* Consulter

Jin, Q. & Wang, C (2018). The greening of Northwest Indian subcontinent and reduction of dust abundance resulting from Indian summer monsoon revival. *Scientific Reports.* Consulter

Jinling P. et al (2025). Land aridification persists in vulnerable drylands under climate mitigation scenarios. *Communications Earth & Environment.* Consulter

Joseph, L. et al (2024). Increased Summer Monsoon Rainfall Over Northwest India Caused by Hadley Cell Expansion and Indian Ocean Warming. *Geophysical Research Letters.* Consulter

Jouquet, P., Traoré, S., Choosai, C. et al (2011). Influence of termites on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. *European Journal of Soil Biology, 47(4):215–222.* Consulter

Kéfi, S. et al (2007). Spatial vegetation patterns and imminent desertification. *Nature.* Consulter

Kéfi, S., Génin, A., Garcia-Mayor, A. et al (2024). Self-organization as a mechanism of resilience in dryland ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 121(6):e2305153121.* Consulter

Kiffner et al (2016). Wildlife species richness and densities in wildlife corridors of Northern Tanzania. *Journal for Nature Conservation.* Consulter

Kim G., Ahn J., Chang H., An J., Khamzina A., Kim G., Son Y (2024). Effect of vegetation introduction versus natural recovery on topsoil properties in the dried Aral Sea bed. *Land Degradation & Development, 35(13), 4121–4132.* Consulter

Kimmell et al (2023). Soil restoration increases soil health across global drylands. *J. Applied Ecology.* Consulter

Kirkby, C.A. et al (2013). Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry, 60, 77–86.* Consulter

Kirkby, C.A. et al (2016). Inorganic nutrients increase humification efficiency and C-sequestration in an annually cropped soil. *PLoS One, 11(5), e0153698.* Consulter

Klemm et al (2012). Fog as a Fresh-Water Resource: Overview and Perspectives. *Ambio.* Consulter

Knutson K.C., Pyke D.A., Wirth T.A. et al (2014). Long-term effects of seeding after wildfire on vegetation in Great Basin shrubland ecosystems. *Journal of Applied Ecology.* Consulter

Köberl et al (2011). Desert Farming Benefits from Microbial Potential in Arid Soils and Promotes Diversity and Plant Health. *PLoS ONE.* Consulter

Koch J.M., Hobbs R.J (2007). Synthesis: Is Alcoa Successfully Restoring a Jarrah Forest Ecosystem after Bauxite Mining in Western Australia?. *Restoration Ecology, 15(S4), S137–S144.* Consulter

Kong Z.-H. et al (2021). Situating China in the Global Effort to Combat Desertification. *Land (MDPI).* Consulter

Koppa, A. et al (2024). Dryland self-expansion enabled by land–atmosphere feedbacks. *Science.* Consulter

Kremen, C (2015). Reframing the land-sparing/land-sharing debate for biodiversity conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences.* Consulter

Kresh, M (2020). The Al Baydha Project: How Regenerative Agriculture Revived Green Life in a Saudi Arabian Desert. *Regeneration International (republié depuis Green Prophet).* Consulter

Kristensen, J.A. et al (2024). Ruminating on soil carbon: Applying current understanding to inform grazing management. *Global Change Biology.* Consulter

Laghrour M., Moussadek R., Mrabet R., Dahan R., El-Mourid M., Zouahri A., Mekkaoui M (2016). Long and midterm effect of conservation agriculture on soil properties in dry areas of Morocco. *Applied and Environmental Soil Science, 2016, 6345765.* Consulter

Landua, G. & Spackman, N (2020). Planetary Regeneration Podcast, Episode 9: Neal Spackman (transcription intégrale). *Medium / Regen Network.* Consulter

Le Bissonnais (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science, 47(4):425–437.* Consulter

Lekouch et al (2011). Dew, fog, and rain as supplementary sources of water in south-western Morocco. *Energy.* Consulter

Lenton, T.M. et al. (eds.) (2023). The Global Tipping Points Report 2023. *University of Exeter.* Consulter

Lenton T.M (2026). Positive tipping points for nature. *Nature Sustainability.* Consulter

Li, Y., Kalnay, E., Motesharrei, S. et al (2018). Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation. *Science.* Consulter

Li C. et al (2021). Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nature Reviews Earth & Environment.* Consulter

Liu, S. et al (2023). Revisiting biophysical impacts of greening on the Loess Plateau (WRF-WVT). *Geophysical Research Letters.* Consulter

Liu, L. et al (2025). Hysteresis and reversibility of agroecological droughts in response to carbon dioxide removal. *Nature Water, 3:1017–1024.* Consulter

Lobos-Roco et al (2025). Unlocking the fog: assessing fog collection potential and need as a complementary water resource in arid urban lands – the Alto Hospicio, Chile case. *Frontiers in Environmental Science.* Consulter

Lohbeck M. et al (2020). Drivers of farmer-managed natural regeneration in the Sahel. Lessons for restoration. *Scientific Reports.* Consulter

Lu et al (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters, 34(6):L06805.* Consulter

Lu, J., Carton, J., Chiang, J. et al (2021). Impacts of large-scale Sahara solar farms on global climate and vegetation cover. *Geophysical Research Letters (vol. 48, e2020GL090789).* Consulter

Luján Soto R., Martínez-Mena M., Cuéllar Padilla M., de Vente J (2021). Restoring soil quality of woody agroecosystems in Mediterranean drylands through regenerative agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 306, 107191.* Consulter

Lybbert, T.J., Aboudrare, A., Chaloud, D. et al (2011). Booming markets for Moroccan argan oil appear to benefit some rural households while threatening the endemic argan forest. *PNAS.* Consulter

MacBean N. et al (2021). Dynamic global vegetation models underestimate net CO2 flux mean and inter-annual variability in dryland ecosystems. *Environmental Research Letters.* Consulter

Maestre, F.T., Quero, J.L., Gotelli, N.J. et al (2012). Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science 335(6065):214–218.* Consulter

Makarieva, Gorshkov & Li (2009). Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological Complexity.* Consulter

Mambo M.N. & Lhermie G (2024). The Futures for Regenerative Agriculture: Insights from the Organic Movement and the Tussle with Industrial Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* Consulter

Marshall, Hobbs & Cooper (2013). Stream hydrology limits recovery of riparian ecosystems after wolf reintroduction. *Proceedings of the Royal Society B.* Consulter

Martínez-Mena M., Carrillo-López E., Boix-Fayos C., Almagro M., García Franco N., Díaz-Pereira E., Montoya I., de Vente J (2020). Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *Catena, 187, 104352.* Consulter

McLeman et al (2014). What we learned from the Dust Bowl: lessons in science, policy, and adaptation. *Population and Environment, 35(4):417-440.* Consulter

Mekuria W., Veldkamp E., Corre M.D., Haile M (2011). Restoration of Ecosystem Carbon Stocks Following Exclosure Establishment in Communal Grazing Lands in Tigray, Ethiopia. *Soil Science Society of America Journal.* Consulter

Micaela et al (2025). Alternative vegetation states and limited reversibility in dryland ecosystems. *J. Ecology.* Consulter

Michaels, T.K., Eppinga, M.B. & Bever, J.D (2024). When patches grow themselves: from analogy to autocatalytic processes, the relevance of ecological nucleation for restoration practices. *Restoration Ecology, 32(1):e14066.* Consulter

Millán, M.M., Estrela, M.J., Sanz, M.J. et al (2005). Climatic Feedbacks and Desertification: The Mediterranean Model. *Journal of Climate, 18(5):684-701.* Consulter

Min, L. et al (2025). Does restoration of degraded grasslands follow the theory of multiple stable states?. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 382:109496.* Consulter

Miralles et al (2025). Vegetation–climate feedbacks across scales. *Annals of the New York Academy of Sciences.* Consulter

Mirzabaev A. et al (2022). Cross-Chapter Paper 3: Deserts, Semiarid Areas and Desertification — IPCC AR6 WG II. *IPCC 6th Assessment Report.* Consulter

Mishra, V. et al (2025). Greening of the Thar Desert driven by climate change and human interventions. *Cell Reports Sustainability.* Consulter

Mody, S., Khandelwal, A., Aneja, U. et al (2023). Paani Foundation — diffusion régénérative au Maharashtra (titre à confirmer).

Morris, C.E., Conen, F., Huffman, J.A., Phillips, V., Pöschl, U. & Sands, D.C (2014). Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology, 20(2), 341–351.* Consulter

Morseletto P (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of Industrial Ecology.* Consulter

Moussaïd, M (2019). Fouloscopie : ce que la foule dit de nous. *HumenSciences, Paris, 224 p.* Consulter

Mueller et al (2016). Cooling of US Midwest summer temperature extremes from cropland intensification. *Nature Climate Change, 6(3):317-322.* Consulter

Mullens, E.D. et al (2025). Drought to flood to drought: precipitation whiplash events. *Int. J. Climatology.* Consulter

Ndehedehe et al (2020). Evolutionary drought patterns over the Sahel and their teleconnections with low frequency climate oscillations. *Atmospheric Research, 233:104700.* Consulter

Newton P., Civita N., Frankel-Goldwater L., Bartel K. & Johns C (2020). What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based on Processes and Outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* Consulter

Ngugi M.R., Dennis P.G., Neldner V.J. et al (2018). Open-cut mining impacts on soil abiotic and bacterial community properties as shown by restoration chronosequence. *Restoration Ecology, 26(5), 839–850.* Consulter

Nilsson et al (2016). Evaluating the process of ecological restoration. *Ecology and Society.* Consulter

Norman, L.M., Uhlman, K., Coy, H., Wilson, N., Bennett, A., Gray, F., & Ehrenberg, K (2025). "Leaky weirs" capture alluvial deposition and enhance seasonal mountain-front recharge in dryland streams. *Applied Water Science.* Consulter

Notaro, M. et al (2017). Observed positive vegetation-rainfall feedbacks in the Sahel dominated by a moisture recycling mechanism. *Nature Communications, 8:1801.* Consulter

Noy-Meir, I (1975). Stability of grazing systems. *J. Ecology.* Consulter

Oliva, G., Ferrante, D., Gaitán, J. & Bran, D (2015). Humans Cause Deserts: Evidence of Irreversible Changes in Argentinian Patagonia Rangelands. *In: Hydrological and Biological Responses to Land Degradation (Springer), pp. 275–290.* Consulter

Oliveira, C.C., Martins, F.R., Souza, B.C., Sampaio, E.V.S.B., Loiola, M.I.B. & Soares, A (2023). Resilience and successional trends of woody vegetation in seasonally dry tropical forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research, 96(5): 740–753.* Consulter

Osborne, T. et al (2021). The political ecology playbook for ecosystem restoration: Principles for effective, equitable, and transformative landscapes. *Global Environmental Change, 70, 102320.* Consulter

Ostrom, E (1990). Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. *Cambridge University Press, Cambridge (Political Economy of Institutions and Decisions series), 298 p.* Consulter

Owusu, R. ; Kimengsi, J.N. ; Giessen, L (2023). Outcomes of Forest Landscape Restoration Shaped by Endogenous or Exogenous Actors and Institutions? A Systematic Review on Sub-Saharan Africa. *Environmental Management, 72(2), 246–261.* Consulter

Padilla & Pugnaire (2006). The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment.* Consulter

Patel, V.K. et al (2025). Agriculture intensification and moisture-induced Thar desert greening: implications for energy balance, socio-economy, and biodiversity. *GIScience & Remote Sensing.* Consulter

Patil, M. et al (2025). Differential impacts of regenerative agriculture practices on soil organic carbon: a meta-analysis of studies from India. *Scientific Reports, 15, 33470.* Consulter

Paulus S.J. et al (2024). Interpretability of negative latent heat fluxes from eddy covariance measurements in dry conditions. *Biogeosciences.* Consulter

Pausata et al (2016). Impacts of dust reduction on the northward expansion of the African monsoon during the Green Sahara period. *Earth and Planetary Science Letters, 434:298-307.* Consulter

Peng S. et al. (incl. Ciais P.) (2014). Afforestation in China cools local land surface temperature. *PNAS.* Consulter

Petterssen (1958). Introduction to Meteorology, Second Edition. *McGraw-Hill Book Company, New York, 327 p.*

Pham-Duc et al (2020). The Lake Chad hydrology under current climate change. *Scientific Reports, 10:5498.* Consulter

Piao S. et al (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment.* Consulter

Poulter B. et al. (incl. Ciais P.) (2014). Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature.* Consulter

Reij, C. & Garrity, D (2016). Scaling up farmer-managed natural regeneration in Africa to restore degraded landscapes. *Biotropica.* Consulter

Reynolds & Stafford Smith (2002). Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?. *Dahlem Workshop Report 88, Dahlem University Press, Berlin.* Consulter

Richardson, Reiss, Hussain, Alwash & Pool (2005). The Restoration Potential of the Mesopotamian Marshes of Iraq. *Science.* Consulter

Richardson & Hussain (2006). Restoring the Garden of Eden: An Ecological Assessment of the Marshes of Iraq. *BioScience.* Consulter

Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W. et al (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances, 9(37):eadh2458.* Consulter

Rietkerk, M. et al (2004). Self-organized patchiness and catastrophic shifts. *Science.* Consulter

Ripple & Beschta (2012). Trophic cascades in Yellowstone: The first 15 years after wolf reintroduction. *Biological Conservation.* Consulter

Rogers, E.M (1962). Diffusion of Innovations. *The Free Press of Glencoe, New York, 1st edition, 367 p.* Consulter

Rohatyn S. et al (2022). Limited climate change mitigation potential through forestation of the vast dryland regions. *Science.* Consulter

Rohatyn S. et al (2023). Large variations in afforestation-related climate cooling and warming effects across short distances. *Communications Earth & Environment.* Consulter

Sanderman, J. et al (2025). Low quality evidence dominates discussion of carbon benefits of alternative grazing strategies. *bioRxiv (preprint).* Consulter

Scheffer, M. et al (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature.* Consulter

Schlesinger, W.H (2022). Biogeochemical constraints on climate change mitigation through regenerative farming. *Biogeochemistry, 161, 9-17.* Consulter

Schmidt & Grise (2017). The Response of Local Precipitation and Sea Level Pressure to Hadley Cell Expansion. *Geophysical Research Letters, 44(20):10,573–10,582.* Consulter

Schreefel L., Schulte R.P.O., de Boer I.J.M., Pas Schrijver A. & van Zanten H.H.E (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security.* Consulter

Schultz et al (2022). Biocrust amendments to topsoils facilitate biocrust restoration in a post-mining arid environment. *Frontiers in Microbiology.* Consulter

Sendzimir, J. ; Reij, C.P. ; Magnuszewski, P (2011). Rebuilding Resilience in the Sahel: Regreening in the Maradi and Zinder Regions of Niger. *Ecology and Society, 16(3), 1.* Consulter

Shakesby, R.A (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth-Science Reviews, 105(3-4), 71–100.* Consulter

Shi et al (2022). Dryland Ecological Restoration Research Dynamics: A Bibliometric Analysis Based on Web of Science Data. *Sustainability.* Consulter

Shokri et al (2024). Multi-Scale Soil Salinization Dynamics From Global to Pore Scale: A Review. *Reviews of Geophysics, 62:e2023RG000804.* Consulter

Sileshi, G.W., Arshad, M.A., Konaté, S. et al (2010). Termite-induced heterogeneity in African savanna vegetation: mechanisms and patterns. *Journal of Vegetation Science, 21(5):923–937.* Consulter

Souza Moura M. et al (2023). Facilitation in Brazilian semiarid zone: remnant trees show a positive effect on caatinga regeneration. *Acta Oecologica.* Consulter

Spackman, N (2023). An Update on Al Baydha 7 Years Later. *LinkedIn Pulse.* Consulter

Spracklen, Arnold & Taylor (2012). Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature.* Consulter

Spracklen, D.V. et al (2018). The Effects of Tropical Vegetation on Rainfall. *Annu. Rev. Environ. Resour.* Consulter

Staal, A., Theeuwen, J.J.E., Wang-Erlandsson, L. et al (2024). Targeted rainfall enhancement as an objective of forestation. *Global Change Biology 30(1):e17096.* Consulter

Staal, A. et al (2025). Global terrestrial moisture recycling in Shared Socioeconomic Pathways. *Earth System Dynamics.* Consulter

Stanturf, J.A. ; Mansourian, S (2020). Forest landscape restoration: state of play. *Royal Society Open Science, 7(12), 201218.* Consulter

Stapleton et al (2023). A global review on arid zone restoration: approaches and challenges. *Restoration Ecology.* Consulter

Strohmeier, Fukai, Haddad, AlNsour, Mudabber, Akimoto, Yamamoto, Evett & Oweis (2021). Rehabilitation of degraded rangelands in Jordan: The effects of mechanized micro water harvesting on hill-slope scale soil water and vegetation dynamics. *Journal of Arid Environments.* Consulter

Suo A. & Cao S (2021). China's Three North Shelter Forest Program: cost-benefit analysis and policy implications. *Environment Development and Sustainability.* Consulter

Svejcar & Kildisheva (2017). The age of restoration: challenges in dryland systems. *Plant Ecology.* Consulter

Syktus J.I. & McAlpine C.A (2016). More than carbon sequestration: Biophysical climate benefits of restored savanna woodlands. *Scientific Reports.* Consulter

Sylvestre et al (2024). Strengthening of the hydrological cycle in the Lake Chad Basin under current climate change. *Scientific Reports, 14:24639.* Consulter

Tatsumi, Taniguchi, Yamanaka, Yamamoto, Fukai, Strohmeier, Haddad & Oweis (2021). The micro-catchment water harvesting-based rehabilitation ameliorated soil microbial abundance, diversity and function in a degraded dryland. *Applied Soil Ecology.* Consulter

Teague, W.R. et al (2013). Multi-paddock grazing on rangelands: Why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience?. *Journal of Environmental Management.* Consulter

Terry, T. & Adler, P.B (2024). Precipitation seasonality and soil texture interact to shape dryland recovery from severe disturbance. *Journal of Ecology, 112(6):1356-1368.* Consulter

Teuling, A.J., Taylor, C.M., Meirink, J.F. et al (2017). Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications 8:14065.* Consulter

Theeuwen, J.J.E., Warnau, S.N., Benedict, I.B. et al (2025). Forest favours conditions for convective precipitation in the Mediterranean Basin. *Biogeosciences.* Consulter

Tittonell P., El Mujtar V., Felix G., Kebede Y., Laborda L., Luján Soto R. & de Vente J (2022). Regenerative Agriculture—Agroecology Without Politics?. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* Consulter

Tomaszkiewicz et al (2015). Dew as a sustainable non-conventional water resource: a critical review. *Environmental Reviews.* Consulter

Tongway et al (2007). Landscape function analysis: a system for monitoring rangeland function. *Ecological Indicators.* Consulter

Turner, M.D. et al (2021). Environmental rehabilitation and the vulnerability of the poor: The case of the Great Green Wall. *Land Use Policy, 111, 105750.* Consulter

Turner, M.D. et al (2023). Great Green Walls: Hype, Myth, and Science. *Annual Review of Environment and Resources, 48, 263–287.* Consulter

UN-Water (UNECE & UNESCO) (2024). Progress on Transboundary Water Cooperation – 2024 Update (SDG indicator 6.5.2). *UNECE & UNESCO, on behalf of UN-Water.* Consulter

UNCCD (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. *United Nations (Convention internationale).* Consulter

UNCCD (Climatekos gGmbH) (2020). The Great Green Wall: Implementation Status and Way Ahead to 2030. *UNCCD — Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, Bonn.* Consulter

UNCCD (2022). Global Land Outlook 2. *UNCCD, Bonn.* Consulter

UNCCD-SPI (2024). The Global Threat of Drying Lands. *UNCCD Technical Series No. 09.* Consulter

Vahedifard, F., Abdollahi, M., Leshchinsky, B.A. et al (2024). Interdependencies Between Wildfire-Induced Alterations in Soil Properties, Near-Surface Processes, and Geohazards. *Earth and Space Science (AGU).* Consulter

Valentin et al (1992). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma, 55:225-245.* Consulter

Van der Ent, R.J. et al (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research.* Consulter

van der Vliet et al. 2024 (2024). Quantifiable impact: monitoring landscape restoration from space. A regreening case study in Tanzania. **Frontiers in Environmental Science* (indication utilisateur, non vérifiée).* Consulter

van Dijk et al (2013). The Millennium Drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources,

ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research, 49(2):1040–1057.* Consulter

Verdoodt A., Mureithi S.M., Ye L., Van Ranst E (2009). Chronosequence analysis of two enclosure management strategies in degraded rangeland of semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* Consulter

Voss, K.A., Famiglietti, J.S., Lo, M. et al (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research.* Consulter

Wang et al (2014). Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry–Wet Changes. *Scientific Reports, 4:6651.* Consulter

Wang X. et al (2023). Unintended consequences of combating desertification in China. *Nature Communications.* Consulter

Wang, D., Ziegler, A.D., Holden, J., Spracklen, D.V., Ciais, P., Peng, L. & Zeng, Z (2025). Vegetation cover change as a growing driver of global leaf area index dynamics. *Nature Communications, 16 (2025).* Consulter

Warnau, S.N., Theeuwen, J.J.E., Sadeghi, G. et al (2025). Technology-Enhanced Atmospheric Moistening (TEAM) for more precipitation: a perspective. *Environmental Science & Technology.* Consulter

Weber et al (2015). Biological soil crusts accelerate the nitrogen cycle through large NO and HONO emissions in drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* Consulter

Weber J. et al (2024). Chemistry-albedo feedbacks offset up to a third of forestation's CO2 removal benefits. *Science.* Consulter

Wei, Y. et al (2025). Natural and anthropogenic contributions to desertification in Central Asia. *Catena.* Consulter

Wen D., He N., Zhang J (2016). Dynamics of Soil Organic Carbon and Aggregate Stability with Grazing Exclusion in the Inner Mongolian Grasslands. *PLoS ONE.* Consulter

Westoby, Walker & Noy-Meir (1989). Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *J. Range Management.*

Weston, P. ; Hong, R. ; Kaboré, C. ; Kull, C.A (2015). Farmer-Managed Natural Regeneration Enhances Rural Livelihoods in Dryland West Africa. *Environmental Management, 55, 1402–1417.* Consulter

Wilson M., Hendrickson M.K. & Myers J.S (2024). A Buzzword, a 'Win-Win', or a Signal Towards the Future of Agriculture? A Critical Analysis of Regenerative Agriculture. *Agriculture and Human Values.* Consulter

Witt, Noël, Bird, Beeton & Menzies (2011). Carbon sequestration and biodiversity restoration potential of semi-arid mulga lands of Australia interpreted from long-term grazing exclosures. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 141(1-2), 108-118.* Consulter

Woldearegay K. et al (2024). Watershed management, groundwater recharge and drought resilience: an integrated approach to adapt to rainfall variability in northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research.* Consulter

Wortley, Hero & Howes (2013). Evaluating ecological restoration success: a review. *Restoration Ecology.* Consulter

Wright, J.S., Fu, R., Worden, J.R., Chakraborty, S., Clinton, N.E., Risi, C., Sun, Y. & Wang, L (2017). Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 114(32), 8481–8486.* Consulter

Wu, G.-L., Liu, Y.-F., Cui, Z. et al (2020). Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology.* Consulter

WWF-Myanmar (2020). Revitalizing Farmer-Managed Natural Regeneration in Myanmar. *WWF-Myanmar Report (littérature grise).* Consulter

Yadav, B. et al (2022). Assessment of traditional rainwater harvesting system in barren lands of a semi-arid region: A case study of Rajasthan (India). *Journal of Hydrology: Regional Studies.* Consulter

Yirdaw, Tigabu & Monge (2017). Rehabilitation of degraded dryland ecosystems — review. *Silva Fennica.* Consulter

Yue C. et al. (incl. Ciais P.) (2024). Contributions of ecological restoration policies to China's land carbon balance. *Nature Communications.* Consulter

Yue, Q., Wang, S., Chen, S. & Cai, X (2025). A systematic review of ecological restoration in China from 1991 to 2024: A bibliometric analysis. *Ecological Engineering (2025).* Consulter

Yunibandhu R. & Hallinger P (2025). From Sustainability to Regeneration: Mapping the Conceptual Foundations and Future Directions of Regenerative Development. *Sustainable Development, 33(6), 8569-8585.* Consulter

Zampieri, M. et al (2023). Managing vegetation for stronger cooling efficiency during hot days in the Arabian Peninsula. *Ecological Indicators.* Consulter

Zan, B., Ge, J., Mu, M. et al (2024). Spatiotemporal inequality in land water availability amplified by global tree restoration. *Nature Water, 2, 863-874.* Consulter

Zheng et al (1997). The Response to Deforestation and Desertification in a Model of West African Monsoons. *Geophysical Research Letters, 24(2):155-158.* Consulter

Zhou et al (2020). Practices of biological soil crust rehabilitation in China: experiences and challenges. *Restoration Ecology.* Consulter

Zhou, Y. & Yu, S (2025). Reconciling the discrepancy in projected global dryland expansion. *Global Change Biology.* Consulter

Zomer, R.J., Xu, J. & Trabucco, A (2022). Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database. *Scientific Data.* Consulter