DESERT.ECO

Régénération des **zones arides**

Une grille de lecture pour évaluer les trajectoires de régénération et en attribuer les causes.

Une surface qui verdit ne dit rien du retour de l'eau et des fonctions du sol.

Volet A · Cadrage méthodologique
Établi pour la Regenerative Foundation

La Manufacture du Climat · juin 2026

Table des matières

Préambule 3

I. Cadre et état de l'art 4

I.a. Cadre et objet du livrable 4

I.b. Cadres méthodologiques comparés 4

I.c. Le déficit de lecture croisée 6

II. Le problème d'attribution 8

II.a. Avant d'attribuer : les limites du verdissement 8

II.b. Le plateau de Loess : le mieux mesuré, le plus controversé 9

II.c. Le Sahel : attribution locale, indétermination régionale 10

II.d. Le désert du Thar : succès et baisse de réserve hydrique 12

II.e. Le Bunny Fence : le contrefactuel 13

III. La grille d'analyse comparative LMDC 15

III.a. Périmètre opérationnel 15

III.b. Architecture de la grille LMDC 16

III.c. Indicateurs par niveaux de la grille 17

III.d. Forme de trajectoire et échelle de lecture 19

IV. Application : cas d'étude 20

V. Qualifier la régénération : synthèse et perspectives 32

V.a. Qualifier la régénération : apports de la grille 32

V.b. Qualifier la régénération : horizons 33

Annexe volet A — Bibliographie 36

Préambule

Ce volet propose un cadre méthodologique d'évaluation de la régénération en zones arides. Il s'organise autour d'une grille de lecture à plusieurs niveaux, la grille LMDC. C'est une première itération, un outil à éprouver, à critiquer et à améliorer. Elle ne procède pas d'un programme institutionnel pluriannuel. Elle pose un cadre de classification, sans prétendre déboucher sur une preuve causale irréfutable.

Des dispositifs structurés existent déjà. La grille LMDC ne prétend pas s'y substituer. Elle apporte une lecture transversale, quand ces dispositifs sont généralement sectoriels. La grille demeure un levier d'analyse des projets, non un instrument d'attribution. Le Volet B s'achève sur le passage du constat à la méthode (VIII.f). Ce volet A le poursuit.

La grille nécessite des mesures satellitaires qui dépassent ce premier cadrage. Le document marque où passe cette frontière. Une note de recommandations en précise l'usage. Ce cadrage méthodologique prolonge le Volet B en s’appuyant sur le panorama précédemment dressé. Il en rappelle les références utiles.

La revue bibliographique source chaque assertion. Le présent cadrage relève d'un autre registre. Il avance également des hypothèses de travail, étayées par notre analyse, pas encore académiquement vérifiées et signalées comme telles.

I. Cadre et état de l'art

I.a. Cadre et objet du livrable

La revue bibliographique a posé le périmètre géographique. Les zones arides sont les territoires dont l'indice d'aridité P/PET reste inférieur à 0,65, au sens large de l'UNCCD (cf. B.II.a). À travers le livrable, l'aridité se lit sur cette échelle, où une valeur basse signale un milieu sec. On ne le démontre pas ici à nouveau. Le Volet B a aussi séparé la régénération du verdissement. Une surface qui verdit ne dit rien, à elle seule, du retour des fonctions du sol et de l'eau.

Le Volet B décrit ce qui se passe sur le terrain. Le cadrage méthodologique interroge ce qui s'est réellement remis en mouvement, puis s'attache à identifier à quelle cause l'attribuer. La régénération avancée pour un projet reste une revendication. Ce volet l'éprouve, projet par projet.

La régénération se lit comme la remise en mouvement d'une ou plusieurs variables clés, du sol au système. Une trajectoire compte même sans progrès absolu. Notre évaluation mesure jusqu'où vont les trajectoires. Elle en identifie les causes (humaines, climatiques ou les deux). Le détail des variables et des niveaux relève de la grille LMDC. L'évaluation forme ainsi le cadre du livrable. L'attribution en est le niveau le plus exigeant en preuve.

Le présent chapitre présente les cadres d'évaluation existants. Tous mesurent un état ou une pratique. Peu interrogent la régénération comme processus. Deux manques reviennent. D'une part, la preuve d'un couvert ou d'un label ne vaut pas attribution. D'autre part, la juxtaposition d'indices isolés ne tient pas lieu de lecture croisée. La suite recense ces deux manques puis les instruit.

Évaluer suppose des choix de méthode, que ce volet explicite à mesure. En effet, la zone aride en tant que catégorie a des bords poreux. Les zones humides arides (*wetland-in-dryland*) en sont la preuve. Elles sont bien arides par l'indice, l'évapotranspiration potentielle (ETP) domine. Mais l'eau vient souvent d'ailleurs. Le facteur limitant n'est plus local. La grille permet de lire ce décalage (cf. A.III.a).

I.b. Cadres méthodologiques comparés

Évaluer la régénération des terres n'est pas une démarche neuve. Des cadres structurés existant depuis plus de vingt ans décrivent des indicateurs, fixent des protocoles et notent parfois des trajectoires. La méthodologie proposée pour la plateforme desert.eco s'inscrit donc dans un champ déjà constitué.

Ce paysage est pluriel. Trois principales approches se distinguent. La première est institutionnelle. La FAO et l'UNCCD suivent la dégradation des terres.

Cette approche vise l'harmonisation en proposant une méthode commune éprouvée sur plusieurs pays, de LADA-WOCAT à ILAM. La deuxième approche est académique. Des équipes de recherche évaluent des projets ou échantillonnent le terrain. La force d'une telle approche est l'intégration. Ainsi, REACTION croise biophysique et socio-économique par l'enquête participative. Le LDSF de CIFOR-ICRAF standardise le relevé de terrain. La troisième approche, enfin, est praticienne. Des opérateurs certifient des pratiques ou pilotent des paysages sur le temps long. Une des forces de cette approche est de proposer une architecture d'ensemble. Le cadre 4 Returns de Commonland articule quatre dimensions. Savory EOV vérifie un résultat sur un parcours agricole.

Chaque famille a sa focale propre, chacune légitime. Aucune ne vise exactement ce que requiert desert.eco : qualifier un projet de régénération en zone aride. Le tableau présenté en page suivante réunit neuf de ces cadres, sans prétendre à l'exhaustivité. Il se structure en quatre familles d'indicateurs.

La matrice dessine l'organisation du champ. Le sol et la végétation sont bien intégrés, plusieurs cadres y excellent. La gouvernance est portée par les cadres les plus intégrateurs. L'eau l'est partiellement. Une colonne est par contre presque vide d'un bout à l'autre : l'énergie-climat. Plusieurs cadres intègrent un contexte climatique, mais aucun ne s'attache à l'évaluation des flux énergétiques de surface comme variable de régénération. La rétroaction sol-énergie reste hors de leur portée. Signalons que l'architecture du cadre 4 Returns de Commonland est la plus complète. Elle contient quatre dimensions (naturelle, sociale, financière et inspiration) et plusieurs dizaines d'indicateurs.

Deux manques échappent même à la matrice. Quasiment aucun cadre n'intègre le coût à l'hectare. C'est une lacune partagée. Le suivi chiffre rarement ce que coûte réellement une intervention. Par ailleurs, un cadre d'évaluation normalisé fait encore défaut pour comparer les interventions de régénération en zones arides.

Ces cadres ne sont donc pas insuffisants. Ils répondent à d'autres questions. Toutefois, une opération leur manque à tous : ils juxtaposent des indices plus qu'ils ne les croisent.

Enfin, une approche distincte mérite d'être citée. Le Regenerative Tetrad Model de Regenesis relève de la conception régénérative, non de l'évaluation. Il pense le potentiel propre d'un lieu là où tous les autres mesurent un résultat. On le cite sans s'y aligner, faute d'outils de mesure et de cas aride documenté.

Cadres méthodologiques d'évaluation · couverture comparée

A.I.b · COMPARATIF

Neuf cadres existants.

CADRE	SOL / VÉGÉTATION	EAU	ÉNERGIE-CLIMAT	SOCIO-ÉCO	LIMITE CLÉ
LADA-WOCAT / Trends.Earth 2008–19 · territoire	◐	○	○	○	Suivi national, pas l'évaluation de projet
GGW HRMF 2021 · programme	◐	◐	◐	●	Sahel seul ; en opérationnalisation
IAPro / REACTION 2004–17 · projet	●	●	○	●	Pas de télédétection ; daté
Costantini (COST ES1104) 2016 · site	◐	◐	○	○	Sol quasi exclusif ; non testé inter-sites
LDSF 2016–24 · site / paysage	●	◐	○	○	Très biophysique ; socio-éco absent
4 Returns 2015–24 · paysage	◐	◐	○	●	Fort socio-éco, faible mesure biophysique fine
ILAM 2020–24 · programme / paysage	●	●	◐	●	Récent, surtout ex-ante
Regen10 2023–26 · ferme / paysage	◐	◐	◐	○	Conceptuel ; pas de contexte aride
Savory EOV 2018–19 · parcours	◐	◐	○	○	Parcours seul ; protocole propriétaire

● couvre ◐ partiel ○ absent

Lecture qualitative de couverture et de maturité par famille, non un score.
L'étiquette sous chaque cadre indique sa période et son échelle d'application (territoire, programme, site, paysage…).

I.c. Le déficit de lecture croisée

Le déficit de lecture croisée mérite d'être instruit. Les cadres ne manquent pas d'indicateurs, mais les lisent séparément. Le Volet B l'a établi pour le NDVI. Un indice isolé surestime la qualité écologique d'un couvert. Une pratique culturale non durable peut faire monter le NDVI tout en appauvrissant le système. Le problème, toutefois, n'est pas l'indice, mais le fait qu'aucun cadre n'offre une lecture d'ensemble de ces indicateurs.

Le défaut ne tient pas au seul NDVI. Pris isolément, chaque indicateur reste insuffisant. Ainsi, le carbone du sol est trompeur en zone aride. Sa fraction inorganique y dépasse souvent l'organique. La mesure usuelle, centrée sur le carbone organique, manque donc l'essentiel (Lal 2019). Enfin, pour le coût à l'hectare, les comparaisons systématiques manquent (Stapleton et al. 2023). Une variable seule ne permet donc pas de séparer un signal d'un artefact. La preuve faiblit dès qu'on isole.

Le croisement permet de combler les lacunes de l'indice isolé. Évaluer un processus de régénération ne se résume pas à suivre une variable. Cet exercice suppose de lire comment plusieurs variables se remettent en mouvement ensemble. Les dynamiques de la végétation, du sol, de l'eau, des minéraux et de l'énergie se confirment ou se contredisent. Leur cohérence produit la preuve, mieux qu'aucun indice pris isolément. En se référant à la roue de Husson (cf. B.VIII.c.1), un état transitoire de divergence peut exister entre une composante et les autres. Cela ne signifie pas forcément que la régénération n'est pas enclenchée. Bien entendu, ce constat vaut tant qu'aucun de ces composants ne passe sous le seuil d'irréversibilité.

À ce défaut de méthode s'ajoute un défaut de corpus. La littérature documente peu les échecs. Pourtant, quand ils sont mesurés, ceux-ci s'avèrent fréquents. Un projet sur six ne voit aucune plante s'implanter (Shackelford et al. 2021). Évaluer suppose alors deux opérations que le champ ne réunit pas : croiser les indicateurs et accepter les trajectoires négatives comme des résultats. L'une et l'autre supposent une architecture analytique (cf. A.III).

II. Le problème d'attribution

II.a. Avant d'attribuer : les limites du verdissement

Une surface qui verdit ne prouve pas une régénération. Avant de chercher la cause du changement, il faut s'assurer de son effectivité. Deux questions s'emboîtent. Le verdissement traduit-il une fonction écologique ou une simple apparence, un signal ou un artefact ? À qui revient le crédit, à l'intervention, au climat, ou à des causes concomitantes ? Aucune variable seule ne sépare un signal d'un artefact. La convergence de la végétation, du sol et du bilan eau-énergie permet de l'évaluer. Cette lecture croisée est l'instrument de l'analyse et, dans le meilleur des cas, d'une attribution fine et d'une lecture précise de la trajectoire.

Selon la bibliographie, le verdissement mondial vient pour l'essentiel de la fertilisation par le CO_2. Les indices de verdure surestiment la qualité écologique (Piao et al. 2020). Une surface verte peut donc s'expliquer par le climat global plutôt que par une intervention locale. Pour autant, nous émettons une hypothèse additionnelle. Les enregistrements satellitaires sont postérieurs au choc agronomique du XX^{e} siècle. L'état antérieur échappe donc très souvent à la mesure, ce qui peut conduire à sous-estimer les effets des pratiques agricoles.

L'attribution est difficile pour des raisons de structure. On n'observe jamais le même lieu sans l'intervention. L'attribution repose donc sur un terme supposé, le contrefactuel, qui se calcule et ne s'observe pas. La variabilité du climat brouille le signal. Cycles, sécheresses et forçages concomitants se superposent à l'effet recherché. Par ailleurs, deux méthodes de mesure d'un même lieu peuvent diverger. La réanalyse ne s'accorde pas toujours avec un réseau de pluviomètres. C'est pourquoi il faut, dans la mesure du possible, recouper plusieurs sources. À l'échelle mondiale, l'attribution par indice de végétation parvient à séparer l'usage des terres du changement climatique (Burrell et al. 2020).

Toutefois, l'attribution a des limites. La machinerie climatique la plus lourde le révèle. Les méthodes d'attribution formelle, fondées sur les modèles globaux, établissent que l'expansion des zones arides dépend des gaz à effet de serre avec une confiance d'au moins 95 %. Elles échouent toutefois à attribuer les schémas spatiaux de cette aridification. À l'échelle locale, le signal se perd dans le bruit (Feng et al. 2022). Une attribution rigoureuse mobilise des climatologues durant des années. Pourtant, l'attribution locale reste compliquée. Pour un projet restreint, elle excède ce qu'un premier travail documentaire peut établir.

La grille LMDC n'a pas vocation à trancher cette attribution. Sur ce sujet, la grille organise le recoupement des sources et rend visibles les écarts entre

méthodes. Elle permet d'isoler ce qui reste à mesurer. En posant le problème à la bonne échelle, elle le rend lisible, quand la documentation seule ne permet pas de conclure. Ce qui dépasse la documentation devient l'objet des niveaux supérieurs de la grille. Les quatre cas suivants, particulièrement emblématiques en matière de régénération, démontrent ces deux questions sur des territoires réels. S'ils peuvent être analysés de la sorte, c'est qu'ils ont déjà mobilisé des années de travail spécialisé, parfois un témoin que la géographie a tracé. Un projet restreint n'a pas ce corpus. La même lecture y trouve sa limite.

II.b. Le plateau de Loess : le mieux mesuré, le plus controversé

Si l'attribution pouvait se résoudre par la seule documentation, ce serait sur le plateau de Loess. Aucun territoire régénéré n'est mieux instrumenté. Le cas offre une profondeur historique rare. Foyer du peuplement chinois, son couvert végétal se reconstitue sur des millénaires, d'un maximum estimé à environ 53 % durant la dynastie Xia jusqu'à un minimum très dégradé au XX^{e} siècle (Chen et al. 2024). Peu de territoires offrent une référence historique aussi profonde.

Le programme Grain for Green a converti des terres érodées, souvent en pentes, en forêts et prairies depuis 1999, sur des millions d'hectares, à l'échelle d'un plateau de près de 640 000 km². On dispose donc de deux décennies de séries continues. Le couvert est désormais proche d'un seuil de durabilité estimé autour de 65 %, soit au-dessus même de son maximum antique reconstitué. L'échelle compte ici doublement. La régénération semble atteindre un seuil à partir duquel les effets de la végétation sur la pluie deviennent détectables. C'est ce qui rend la controverse possible. Les projets de terrain sont trop petits pour qu'un tel effet s'y voie. Le Loess sert de cas de référence.

Or, deux verdicts opposés ont été posés sur ce territoire. Feng et al. 2016 concluent que la végétalisation approche les limites des ressources en eau et menace sa propre durabilité. Un faisceau plus récent conclut l'inverse. La transpiration accrue alimente une convergence d'humidité qui fait remonter les précipitations au-delà de la perte par évapotranspiration, sans réduire le rendement hydrique (Tian et al. 2022). L'écart ne vient pas des données, qui sont partagées. Il vient du contrefactuel, d'une comparaison à un monde sans intervention. Le partage des causes du verdissement reste discuté. Une étude ne l'attribue qu'à 13 % aux politiques publiques (Wang et al. 2023). Ce chiffre néglige néanmoins l'arrêt de cultures peu durables, sans lequel le climat aurait moins verdi la zone. L'attribution opère de plus à une maille qui ne distingue ni les techniques d'implantation ni l'état de surface du sol. Or l'infiltration et la levée des plantules en dépendent. Ce signal mesure donc un couvert, pas une fonction écologique.

Un cas récent montre jusqu'où la méthode peut décider du résultat. Dans une étude qui a fait grand bruit, An et al. 2025 attribuent à la forestation chinoise une baisse d'eau disponible de 0,46 mm par an. Or An a posé son calcul de sorte que planter ne puisse qu'abaisser l'eau disponible, jamais l'augmenter. La baisse ne vient donc pas de ce qui s'est passé en Chine, mais de cette hypothèse de départ (Makarieva 2026). Les données observées le confirment : sur la période, la pluie et l'eau disponible augmentent quand l'évaporation diminue. Le chiffre annoncé est un contrefactuel reconstruit, non une mesure. Pour le Loess, la mesure va dans l'autre sens. En saison des pluies, la pluie progresse plus vite que l'évapotranspiration. L'eau disponible s'accroît, portée par une convergence atmosphérique renforcée (Tian 2022 ; Chen 2023).

Par ailleurs, la gravimétrie satellitaire, utilisée pour évaluer l'état des nappes phréatiques, mesure une variation de masse totale, pas de l'eau seule. Dans ce cas, l'extraction de charbon abaisse la nappe en même temps que le verdissement progresse (Zhang et al. 2026). Les études qui imputent toute la baisse aux arbres en surestiment donc les effets. La démonstration la plus nette vient du désert voisin de Mu Us (cf. A.IV). Une fois retirés le charbon et l'irrigation, la baisse de stock d'eau réellement imputable à la restauration est plus de trois fois inférieure à celle qu'on lui prête (Shen et al. 2025). La consommation d'eau attribuée aux arbres dépend en réalité en partie d'un autre facteur.

Reste une lecture temporelle, plausible mais discutée. La couverture végétale diminue l'évaporation du sol nu en saison sèche. La transpiration nourrit ensuite la convergence en saison humide. La succession écologique traverserait un régime sec puis un régime humide (Makarieva et al. 2023). Si ce mécanisme tient, une évaluation menée sur cinq à dix ans peut évaluer un projet avant sa bascule. Notre grille le traite en décryptant les trajectoires, pas des états figés.

Nous ne tranchons pas pour le plateau de Loess. Nous montrons pourquoi la documentation seule ne le peut pas. Sur le territoire le mieux étudié, le verdict bascule avec le contrefactuel. Les forçages concomitants brouillent le signal. Seule une mesure instrumentée, comparée à des références de terrain et conduite à l'échelle où l'effet s'exprime, peut analyser de telles attributions pour identifier les erreurs et séparer les causes.

II.c. Le Sahel : attribution locale, indétermination régionale

Le Sahel porte le corpus de régénération académiquement vérifié le plus dense, plateau de Loess mis à part. Quelque chose de bien réel s'y est produit. Dans les terroirs de Maradi et Zinder, des millions d'arbres ont repoussé, non par plantation, mais parce que les paysans ont cessé de couper et protégé les rejets

déjà présents. Le lien de cause est direct, local, attribuable à la parcelle (le Volet B en documente l'ampleur et les conditions). À cette échelle, le succès n'est pas en doute. La difficulté commence quand on change d'échelle.

À partir de la vue satellite, un verdissement régional a suivi les sécheresses des années 1980. Toutefois, ses causes sont entremêlées. Trois coexistent sans pondération claire : le retour des pluies, la diffusion des pratiques régénératives, et une rétroaction végétation-précipitations établie pour le Sahel. Or la première, le retour des pluies, est elle-même une attribution disputée. Longtemps attribuée aux gaz à effet de serre (Giannini & Kaplan 2015), elle a récemment été réattribuée pour l'essentiel aux aérosols anthropiques (Nnamchi & Fiedler 2026). Une cause elle-même contestée ne peut ancrer l'attribution de ce qu'elle est censée expliquer. La nature même du verdissement est complexe. Les pluies revenues favorisent plus le ligneux que l'herbacé (Brandt et al. 2019). Ainsi, le signal porte sur une recomposition du système, non sur un retour uniforme. Le fait qu'il y ait davantage d'arbustes ne signifie pas nécessairement davantage de fonctions écologiques.

L'eau expose une version plus aiguë de la même leçon. Pendant les décennies de sécheresse, alors que la pluie tombait moins, les nappes du Sud-Ouest nigérien ont monté plutôt que baissé. La cause est l'inverse de ce que suggère ce signal favorable. En défrichant la végétation naturelle pour l'agriculture, on réduit l'évapotranspiration et on concentre le ruissellement vers des mares, ce qui augmente la recharge (Favreau et al. 2009). Ce signal hydrologique positif s'explique donc par la dégradation.

La gravimétrie satellitaire confirme un gain de stockage à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest (Scanlon et al. 2022). Ce signal régional se mesure en volume, non en hauteur d'un puits. La nappe locale, elle, est peu profonde et répond en décennies, environ quatre mètres gagnés depuis 1963. Les aquifères profonds gardent au contraire l'écho de pluies parfois millénaires (Cuthbert et al. 2019). Le niveau au puits ne se lit qu'avec le temps de réponse de la nappe.

Ce paradoxe ne s'est pas refermé avec le retour des pluies. La reprise, à partir des années 1990, ne l'a pas effacé. Le coefficient de ruissellement a continué d'augmenter malgré le reverdissement, sous l'effet de la dégradation de surface et de l'intensification des pluies (Descroix et al. 2018). Le ruissellement ne réinfiltre pas la surface encroûtée. Le verdissement ne semble donc pas avoir rétabli l'infiltration diffuse. Le mécanisme du Sud-Ouest nigérien reste discuté et propre à ce contexte, mais ce cas défait l'attribution naïve. Ce n'est pas pour autant une loi sahélienne.

Pourtant le Sahel montre aussi où l'attribution réussit. Sur dix-huit sites du sud du Niger traités en demi-lunes et zaï, le couvert mesuré par satellite après intervention dépassait d'environ un quart celui des terres voisines non traitées, gain

attribuable précisément parce qu'un témoin spatial l'isole (Mishra et al. 2023). C'est la comparaison à un témoin qui a permis de conclure. Mais la preuve s'arrête à la surface. Les programmes rapportent que l'eau captée recharge la nappe locale. Cette assertion repose sur des chiffres de programme, non sur une mesure instrumentée et contrôlée. Nos recherches n'ont pas identifié d'étude académique mesurant cette recharge contre un témoin. La preuve documentaire couvre le couvert et le sol. Le bilan hydrique y échappe. Le plafond se situe exactement au niveau N3 de la grille LMDC.

La leçon du Sahel n'est donc pas que rien ne fonctionne. Les arbres ont bien repoussé. On retiendra surtout que l'attribution change avec l'échelle. Locale et instrumentée contre un témoin, elle aboutit. Régionale et agrégée, elle se dissout dans des causes concurrentes et des signaux dont le sens peut s'inverser. Comprendre le Sahel implique de créditer le succès local sans lui prêter le signal régional. Il importe de distinguer, à chaque échelle, ce que la documentation établit de ce que seule une mesure instrumentée pourrait trancher.

II.d. Le désert du Thar : succès et baisse de réserve hydrique

À rebours de nombre de déserts, le Thar indien verdit. Le Volet B en a posé le signal : un couvert qui progresse depuis le début des années 2000, une mousson en forte hausse, trois causes possibles enchevêtrées. Le cas n'appelle donc pas une nouvelle description, mais une question que ni le Loess ni le Sahel ne posaient. Ce verdissement est-il durable ?

L'attribution bute d'abord sur la difficulté déjà rencontrée pour le plateau de Loess. Selon la méthode, le partage s'inverse. Deux études récentes, mêmes années et même désert, concluent à l'opposé. À partir de 728 puits de terrain croisés avec la gravimétrie satellitaire, Mishra et al. 2025 attribuent au pompage la part majoritaire du verdissement annuel, soit 55 %, la pluie venant ensuite. À partir d'une analyse de causalité conduite sur des indices satellitaires, Patel et al. 2025 inversent l'ordre et attribuent au climat près de 61 %. Le partage des causes n'est pas tranché : il dépend de l'instrument qui le mesure.

Mais le Thar ajoute une difficulté propre, que ce partage climat-humain masque. L'impact humain n'est pas un flux, c'est un prélèvement dans un stock qui ne se reconstitue pas. En zone aride, la recharge est infime. Dans le désert du Thar, une fraction marginale du ruissellement atteint la nappe, le reste s'évapore. Or l'extraction par puits dépasse de loin cette recharge et les niveaux baissent (Mishra et al. 2025). Une part du verdissement est donc un déstockage, non un revenu. Cette part menace sa durabilité. Encore faut-il savoir quel stock compte. Les études disponibles jugent le Thar sur la nappe profonde. L'infiltration restaurée par

les racines y reste peu documentée. Or un couvert casse la croûte de battance et rouvre l'infiltration. Au-delà d'un optimum, la transpiration consomme le gain. Le bilan se joue donc aussi sur le couvert et l'optimum associé, pas que sur la pompe.

La saisonnalité du verdissement permet de séparer les deux. En saison de mousson, le couvert progresse surtout grâce à la pluie, un flux renouvelable. En saison sèche, il progresse surtout par le pompage, un prélèvement sur le stock (Mishra et al. 2025). Le moment où le couvert verdit dit donc s'il durera. Cette décomposition temporelle est l'instrument d'attribution du cas. Elle isole la part durable, mousson et captation locale de la pluie, de l'extraction de la nappe. Sans elle, un chiffre de verdissement agrégé confond le revenu et l'entame du capital. Une question cruciale reste ici ouverte, celle de l'effet de la végétation sur le rendement d'infiltration.

Le Thar ajoute ainsi la durée à l'attribution. Le Loess oppose des verdicts selon la méthode, le Sahel joue sur l'échelle et sur le signe. Ici un même signal est à la fois acquis et précaire, selon qu'on regarde le flux ou le stock. Le constater suppose un bilan hydrique, distinguant ce qui se recharge de ce qui s'épuise, que la documentation seule n'établit pas de manière normalisée et que seule une mesure instrumentée finement pourrait trancher.

II.e. Le Bunny Fence : le contrefactuel

À de telles échelles, le contrefactuel manque aux trois cas précédents : verdicts selon la méthode au Loess, échelle et signe au Sahel, durée et durabilité au Thar. Le cas du Bunny Fence renverse la situation, en fournissant un témoin spatial déjà tracé. Pour empêcher les lapins de pulluler, une clôture sépare depuis un siècle deux paysages contigus, de climat et de sol homogènes. L'un est préservé de l'usage agricole moderne, l'autre défriché.

Le seul écart, de part et d'autre de la ligne, étant le couvert, la différence climatique observée lui revient. Les nuages et la convection se forment préférentiellement au-dessus du couvert natif. Un relevé aérien dessine même une bande nuageuse le long de la clôture (Lyons 2002 ; Ray et al. 2003). Surtout, le côté natif plus nuageux est aussi le plus éloigné de l'océan, à l'intérieur des terres. Le côté défriché borde la côte. La proximité maritime devrait impliquer l'inverse. Puisqu'on observe le contraire, seule la nature du couvert explique cette différence. Le mécanisme est d'ailleurs cohérent. La rugosité et l'évapotranspiration plus fortes du couvert natif entretiennent des couches turbulentes humides qui favorisent la formation des cumulus, quand la surface défrichée, plus lisse et plus sèche, les inhibe (Nair et al. 2011). Le couvert agit sur le climat local. C'est ici une preuve d'existence, pas une corrélation à interpréter.

Ce témoin établit clairement ce constat, sans pour autant le qualifier. L'effet est robuste sur les nuages, plus incertain sur les précipitations. À l'échelle régionale, le Sud-Ouest australien connaît un déclin pluviométrique de plusieurs décennies, attribué pour l'essentiel à la circulation de grande échelle et au réchauffement (Hawke et al. 2025). Une estimation isolée et contestée impute toutefois 55 à 62 % de ce déclin au seul défrichement (Andrich & Imberger 2013). La barrière démontre donc l'existence du mécanisme, non son poids quantitatif.

C'est pourquoi ce cas referme le chapitre. Le côté natif n'a pas été régénéré, il a seulement été épargné. La preuve naît d'une absence d'action, d'une non-dégradation maintenue durant un siècle, ce qui en fait la démonstration la plus convaincante. Le côté défriché montre ce qui se perd quand le couvert disparaît. Le côté natif, ce qui pourrait être restauré. Ce cas prouve ce que la régénération peut apporter au climat local, cet envers favorable que les trois autres cas ne pouvaient démontrer.

Attribuer nécessite un contrefactuel. Parfois la géographie le fournit, comme cette clôture. Le plus souvent, il faut le construire, par un témoin de terrain, par une mesure instrumentée, ou en agrégeant l'observation jusqu'à l'échelle où la rétroaction devient détectable. Cette construction, méthodique, est précisément ce qu'organise la grille LMDC.

III. La grille d’analyse comparative LMDC

La grille LMDC hiérarchise les preuves selon quatre niveaux, de N1 à N4. À mesure qu'on progresse, l'exigence de preuve s'élève. L'accès à cette preuve glisse du documentaire vers la mesure. Le principe directeur est d'évaluer d'abord des projets, ce qui la distingue des cadres à ambition plus territoriale (LADA-WOCAT ou LDSF). La grille LMDC est néanmoins applicable à des territoires. Ce chapitre précise d'abord le périmètre d'éligibilité, puis l'architecture des niveaux de preuve, enfin la lecture de la trajectoire et de l'échelle.

Une précision de portée s'impose d'emblée. Le protocole compare de nombreux projets à l'aide d'indicateurs communs. Cette lecture d'ensemble est solide pour ce qu'elle établit : situer un projet, le comparer, repérer les écarts. Trancher l'attribution fine sur un site relève d'un autre niveau d'exigence, qui appelle des mesures de terrain. Comparer beaucoup de projets fiabilise la lecture, sans corriger les erreurs isolées qui se compensent dans le nombre. Une faiblesse de méthode commune à tous, en revanche, se retrouve partout sans être repérée. Des mesures de terrain en profondeur, sur quelques sites, servent alors de points de contrôle pour calibrer la lecture à grande échelle.

Un dernier point structure la lecture. La bibliographie constituée souligne la sous-documentation des échecs (cf. A.I.c). Les études ne mesurent pas leur fréquence, mais confirment leur sous-publication. Un ensemble plus large d’échecs existe probablement.

III.a. Périmètre opérationnel

Un projet entre dans la grille selon son aridité. La superficie conditionne la portée de lecture. Le niveau N4, en particulier, suppose une superficie importante.

L'aridité se mesure par l'indice P/PET. On retient les zones dont la valeur est inférieure à 0,65 (cf. B.II.a). On écarte l'hyper-aride (sous 0,05). Les bascules écosystémiques se situent, en aridité (1 - P/PET), vers 0,54, 0,70 et 0,80, soit en P/PET vers 0,46, 0,30 et 0,20 (Berdugo et al. 2020). Cette valeur n'est pas fixe. Elle monte les années humides, descend les années sèches. Un site proche de 0,65 n'est donc ni dedans ni dehors une fois pour toutes. La grille lit une tendance pluriannuelle, pas la valeur d'une seule saison.

Un cas limite échappe à ce critère. Une zone aride par l'indice peut être alimentée par une eau venue d'ailleurs. Le cas des *wetland-in-dryland* est illustré par les marais de Mésopotamie (cf. B.V.c.3). Bassora, avec moins de 150 mm par an, est pourtant une zone humide alimentée par le Tigre et l'Euphrate. Le facteur

limitant devient alors l'aménagement amont transfrontalier. La grille lit ce décalage. Ce cas interroge la frontière opérationnelle des zones arides.

Aucun seuil de superficie n'est universel. La viabilité d'un projet dépend du seuil d'ignition. Un noyau de végétation trop petit ne se maintient pas, alors qu'un noyau suffisamment grand s'auto-entretient. Cette taille critique ne se fixe pas d'avance. Elle se calibre sur chaque site. Plusieurs petits noyaux peuvent l'emporter sur un seul grand (cf. B.VIII.a). La Paani Foundation illustre ce cas d'essaim dans une approche basée sur la collecte de l'eau (cf. A.IV). La portée climatique pose une autre question d'échelle. L'ampleur de l'effet croît avec la superficie. La géométrie compte autant que l'aire. Une vallée encaissée ou une entrée maritime fait apparaître l'effet à plus petite étendue (Millán et al. 2005). Le mesurer demande en revanche une superficie importante.

III.b. Architecture de la grille LMDC

La grille classe les constats selon leur degré de preuve. Un constat fort est difficile à prouver, un constat modeste facile à établir. Les quatre niveaux suivent cet ordre. Le N1 décrit le projet à partir de documents. Le N4 situe le projet dans la dérive climatique de sa zone. Son aspect le plus ambitieux, l'effet du projet sur le climat, ne s'établit que par la mesure et reste un horizon. Du N1 au N4, le constat gagne en portée et perd en facilité de preuve. Cela distingue la grille d'une liste d'indicateurs et la rend transposable à différents projets. Quatre niveaux structurent la lecture.

- **N1, descriptif :** Ce niveau est documentaire et peut généralement être renseigné. Il établit l'existence du cas et ses paramètres.
- **N2, écologique :** Ce niveau porte sur les résultats mesurés du verdissement. Les métriques varient d'une étude à l'autre. Le travail porte sur la normalisation des données et sur la collecte lorsque les études manquent.
- **N3, hydrique et énergétique :** Pour ce niveau pivot, l'accès se focalise sur la mesure instrumentée. La documentation ne livre que des points épars et non comparables.
- **N4, dérive climatique :** Deux formes s'y distinguent. La première, contractuelle, évalue dans la littérature la tendance climatique de fond de la zone, indépendamment du projet. Elle contextualise le projet dans cette tendance sans lui attribuer d'effet. Elle se lit donc en bibliographie quelle que soit la superficie. Elle fournit le fond sur lequel l'attribution se construit. La seconde, hors contrat, est l'effet mesuré de l'intervention sur le climat et d'éventuelles rétroactions. Cette hypothèse de recherche requiert a priori une superficie importante.

L'attribution traverse les quatre niveaux. Sa prise en compte vise à isoler l'impact du projet du reste. Au N2, le verdissement vient soit du CO_2, soit du projet. Au N3, l'eau dépend des arbres et de la végétation et, parfois, de l'extraction (charbon par exemple). Au N4, le climat dépend d'une dérive de fond ou de l'intervention. Sans cette séparation, la trajectoire demeure opaque. L'attribution la plus exigeante concerne donc les niveaux N3 et N4.

Un plafond documentaire existe. Il a deux causes. La première est la couverture. Une bibliographie complète permet de remplir les niveaux N1 et N2, avec des limites. Une harmonisation des données est nécessaire pour comparer les projets. Cette bibliographie ne fournit généralement pas de niveau N3 normalisé. Sa complétude même prouve le plafond. La seconde cause est le biais de publication. La littérature surreprésente le succès. Les deux causes convergent. La mesure comble les manques. Elle renseigne le N3 que la documentation laisse vide. Elle révèle aussi les échecs que la littérature ne documente pas. Pour des cellules vides, les mesures sont nécessaires. L'harmonisation des données est un prérequis systématique.

III.c. Indicateurs par niveaux de la grille

La section précédente a défini les quatre niveaux de la grille. Cette section précise chaque indicateur à son niveau. Pour l'affichage, chaque indicateur paraît à un seul niveau, son niveau principal. Dans le cadre de l'analyse, une même mesure peut en servir plusieurs. Des éléments situent le cas avant toute lecture : sa localisation, son indice d'aridité, son type d'intervention, sa superficie, son mode d'intervention principale (technique ou design) et sa durée. Ils figurent en en-tête de fiche, hors des niveaux.

N1, descriptif. Ce niveau établit l'existence du cas et son cadre. Il est documentaire. Certains constats sont comparables, d'autres demandent un travail de normalisation.

- **Hydrographie et topographie** : Le réseau d'eau et le relief du site. Le relief et les axes d'écoulement viennent d'un modèle de terrain. Le régime d'eau se lit par télédétection, complétée au sol si besoin.
- **Pédologie :** Le substrat, sa texture et son type. Le carbone du sol relèverait du N2, mais aucun suivi comparable n'existe. Le satellite n'en donne qu'un état modélisé. Une mesure terrain, comparée à des témoins non régénérés, reste nécessaire sur quelques sites de référence avant toute lecture élargie.
- **Pluviométrie :** L'apport en eau sur le site. Sa valeur diffère selon la source, station, satellite ou radar. Chaque source porte un biais propre, pas une simple dispersion aléatoire. Cela implique de fixer une référence.

- **Coût à l'hectare :** L'ordre de grandeur économique. Au-delà du prix, l'indicateur renseigne l'intensité en main-d'œuvre et le degré de technicité. Ceci conditionne la réplicabilité et le modèle économique. Le chiffre dépend du contexte salarial et de l'échelle. Surtout, ce chiffre doit être envisagé au regard de la valeur du sol et de sa productivité. Il est souvent extrapolé, faute de données fiables.
- **Gouvernance et ancrage local :** Qui porte le projet et comment. Cet indicateur est précieux pour estimer sa viabilité. Le portage, descendant ou ancré localement, pèse sur la nature des résultats, un gain écologique pouvant survenir sans bénéfice pour les ménages (cf. B.VIII.d.2).
- **Modèle économique :** Ce qui finance l'intervention et sa durée (subvention, marché, paiement pour services ou autofinancement). La source pèse sur la pérennité, un projet sous subvention s'arrête souvent lorsque celle-ci cesse.

N2, écologique. Ce niveau concerne le résultat écologique mesuré. L'indicateur principal est la **performance végétale**, suivie sur une série la plus longue que les données du site permettent. Ainsi, il est possible d'évaluer si le couvert progresse et depuis quand. C'est une mesure produite, non une compilation d'études. Les autres résultats écologiques, quand ils existent en littérature, demandent une normalisation entre métriques hétérogènes.

N3, hydrique et énergétique. Ce niveau est le pivot. Parfois, la mesure existe, mais elle est instrumentée et fermée. La documentation seule ne livre que des points épars. Dans ce cadrage méthodologique, ces cellules restent donc généralement vides (cf. A.IV). Ces indicateurs nécessitent une analyse approfondie.

- **Niveau des nappes :** Le stock d'eau souterrain. Quand des relevés existent et sont exploitables, ils sont épars et hétérogènes. Ils sont donc à unifier. Sinon, le stock se mesure plutôt qu'il ne se compile.
- **Évaluation des flux énergétiques :** L'indicateur distingue une surface qui évapore et rafraîchit de celle qui chauffe. Cette lecture renseigne aussi l'usage de l'eau, qu'un couvert également vert ne suffit pas à comparer d'un site à l'autre. Elle ouvre une lecture du fonctionnement réel. Elle porte sur l'état présent, dans la fenêtre récente où la donnée est fiable.
- **Rosée :** Apport d'eau atmosphérique sans pluie, souvent négligé, mais vital pour la végétation aride basse. Sa formation dépend du refroidissement nocturne de la surface. Rarement suivie de façon systématique, elle s'obtient le plus souvent par la mesure et reste l'une des données les plus complexes à suivre.

N4, dérive climatique. Ce niveau réunit un indicateur, une opération et un horizon. L'indicateur est l'évaluation de la dérive climatique de la zone, par bibliographie. Il situe le projet dans la tendance de fond, sans lui attribuer d'effet. Lire cette dérive ouvre l'attribution au N4, séparer ce que fait le projet de ce que le climat fait seul. L'horizon, hors contrat, est l'effet mesuré de l'intervention sur le climat. Cet effet reste une hypothèse de recherche. Il apparaît dans la lecture des cas, comme la trajectoire en trois temps du désert de Mu Us (cf. A.IV), jamais dans la colonne des indicateurs. Le remplissage au cas par cas fait ressortir les niveaux renseignés et ceux qui restent vides. Les fiches du chapitre suivant déploient cette lecture.

III.d. Forme de trajectoire et échelle de lecture

La grille fige un état par niveau, à un instant donné. Deux dimensions complètent cette lecture. La trajectoire porte sur le temps, l'échelle sur l'espace.

Forme de trajectoire : Un projet n'est pas un état, c'est un mouvement. La grille en enregistre la forme. Certaines trajectoires progressent de façon continue. Certaines se retournent après une phase de déplétion, comme pour le désert de Mu Us. D'autres suivent un cours non souhaité, comme le Bowen Basin. Une trajectoire négative ou un retournement n'est pas à masquer. C'est un résultat, de même qu'une réussite. Ces revers ont leur place dans la grille, là où la littérature ne les publie guère. La vignette renseigne sur la trajectoire en en-tête de fiche.

Échelle de lecture. La lecture d'un projet dépend aussi de l'étendue. Le niveau descriptif et le niveau écologique se lisent à l'échelle du projet. Le niveau climatique demande une étendue plus large. Nos recherches n'ont pas identifié de seuil de surface fixe au-delà duquel cette lecture deviendrait possible. L'échelle compte, sans pouvoir se réduire à une quantification fixe. L'étendue conditionne l'existence de l'effet, la finesse de la donnée conditionne sa lecture.

Un point d'architecture commande l'ordre des niveaux. Le niveau climatique ne se lit pas sans le niveau hydrique et énergétique. L'effet d'un projet sur le climat passe par les échanges d'eau et d'énergie à l'interface entre le sol et l'air. Plusieurs indicateurs en rendent compte. L'évaluation des flux énergétiques de surface est retenue, car cet indicateur discrimine là où le seul couvert ne suffit pas. Tant qu'il n'est pas mesuré, la lecture climatique manque de son intrant principal. Ce niveau n'est pas une étape optionnelle, c'est le préalable du suivant. Mesurer ce partage à la bonne échelle est donc la condition d'accès au niveau le plus exigeant. C'est ce que prépare l'analyse approfondie.

IV. Application : cas d'étude

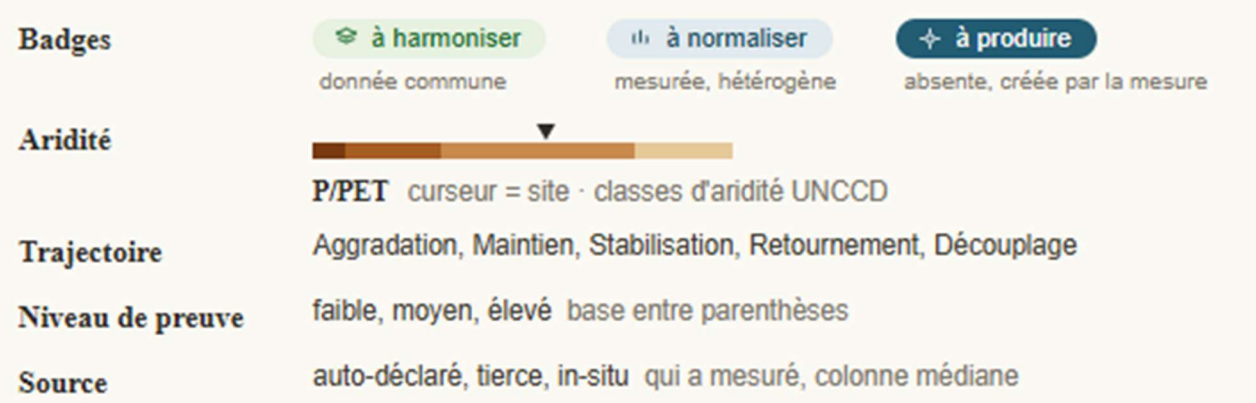
Les neuf fiches qui suivent appliquent la grille à des projets réels. Elles couvrent une diversité de contextes, de techniques et de degrés de maturité. Chacune, sur une page, se lit de la même façon.

L'en-tête situe le cas, sa localisation, son aridité, son type, son étendue, sa durée. La grille déroule les quatre niveaux, du descriptif au climatique. Les badges signalent, pour chaque ligne, si la donnée est commune à harmoniser, mesurée mais hétérogène à normaliser, ou à produire.

La grille se lit aussi en colonnes. La colonne médiane décrit ce que la documentation établit. Elle nomme la source qui l'a mesurée. La colonne de droite, le traitement requis, décrit l'opération qui rendrait la ligne comparable. Au niveau descriptif, cette opération reste légère, harmoniser ou normaliser des données qui existent. Aux niveaux N2-N4, le bilan ne se trouve pas dans la littérature de façon systématique. Il faut alors le produire, par la mesure instrumentée ou satellitaire. Cette concentration du label « à produire » n'est pas une lacune. C'est le plafond documentaire que la fiche enregistre.

Sous la grille, un encadré réunit les données additionnelles. Il rassemble la trajectoire chiffrée du cas, ses contre-exemples, ses suivis indépendants. Cet encadré n'illustre pas seulement. Il esquisse, sur chaque cas, le travail que l'analyse approfondie conduirait pour renseigner les cellules à produire. C'est la lecture croisée déployée au chapitre II sur les cas de référence, ramenée au site. Elle sépare le signal de l'artefact, distingue le flux du stock, lit la trajectoire derrière le couvert. La fiche en livre l'aperçu. La mesure en livrerait la démonstration. La frontière entre les deux est précisément ce que le badge « à produire » enregistre.

La **légende** ci-dessous s'applique aux neuf fiches.



Certains cas sont dispersés, en essaim de chantiers ou de parcelles. Leur emprise ne forme pas un bloc délimité. Nous l'avons alors inférée, selon le critère le moins subjectif disponible : soit nous cumulons les surfaces documentées, soit nous retenons l'emprise revendiquée. La région englobante reste exclue. Ces valeurs sont des estimations signalées comme telles.

C'est précisément cette limite que la grille rend visible. Les cases pleines des deux premiers niveaux renseignent sur les données à notre disposition. Les cases vides des niveaux suivants décrivent ce qui reste à établir. Les fiches situent les lacunes à combler.

Mu Us Sandy Land #44

FICHE PROJET

LOCALISATION Chine du Nord · frange sud du plateau d'Ordos
TRAITEMENT Afforestation, fixation des sables (Trois-Nords)
SURFACE **32 100 – 42 200 km²** DURÉE **≈ 43 ans · bascule ≈ 1986** APPROCHE technique-based
ARIDITÉ **P/PET 0,25–0,45 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Retournement - trajectoire en trois phases vers la récupération

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (TIERCE)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Données de stations ; couverture spatiale inégale	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Cartes, MNT, débits ; sources hétérogènes	à normaliser
	Pédologie	Substrat sableux éolien, faible matière organique	à harmoniser
	Coût à l'hectare	≈ 27 €/ha·an (entretien) ; établissement non standardisé	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	Étatique, subventionnée, descendante	à harmoniser
	Modèle économique	Subvention publique	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Reverdissement documenté ; indices et seuils variables d'une étude à l'autre	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Études ponctuelles ; méthodes hétérogènes	à normaliser
	Évaluation des flux énergétiques	pas d'accès documentaire comparable	à produire
	Suivi de la rosée	pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Tendance pluviométrique contestée (réanalyses)	à harmoniser {débat actif}

NIVEAU DE PREUVE **élevé (séries longues, multi-études)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Nappes en trois phases : stabilité 1987–1998 · déplétion 2003–2010 · récupération 2011–2020. L'effet attribué à la restauration est surestimé de 251 % si l'on néglige charbon et agriculture ; consommation nette ≈ 11,7 mm/an. En zone minière active, nappe sous −70 m.

Jumeau du Loess, Mu Us est l'un des cas où la régénération aride semble vraiment marcher en Chine. Le reverdissement tient, même si l'effet des arbres sur les nappes a longtemps été surestimé. La réserve sur les nappes reste un horizon de recherche, non un démenti du reverdissement.

Justdiggit #65

FICHE PROJET

LOCALISATION Tanzanie · Pembamoto, région de Dodoma · programme Kenya–Tanzanie

TRAITEMENT Cuvettes semi-circulaires de captation, semis, mise en défens concertée

SURFACE **≈ 80 ha mesurés · ≈ 300 000 ha revendiqués** DURÉE **creusement 2018 · suivi ≈ 3,5 ans** APPROCHE technique-based

ARIDITÉ **P/PET ≈ 0,30 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Aggradation fonctionnelle probable - signaux de surface concordants

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (AUTO-DÉCLARÉ)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Données de stations (TMA) ; P ≈ 576 mm/an	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Bas-fonds de Pembamoto, deux sites (≈ 60 et ≈ 19 ha)	à normaliser
	Pédologie	Sols de prairie subtropicale ; non détaillé	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Estimation ≈ 8 €/cuvette (parrainage, non ramené à l'hectare)	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	ONG et communautés paysannes ; mise en défens concertée	à harmoniser
	Modèle économique	ONG philanthropique, mobilisation grand public	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Verdissement en hausse (avant-après, 4 témoins)	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Stock d'eau de surface en hausse ; nappe non documentée	à normaliser
	Évaluation des flux énergétiques	Refroidissement constaté ; sa cause énergétique n'est pas analysée	à produire
	Suivi de la rosée	pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Tendance régionale est-africaine, à lire en bibliographie	à harmoniser

NIVEAU DE PREUVE **élevé (avant-après, 4 sites témoins, multi-capteurs)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Sur ≈ 3,5 ans et ≈ 80 ha, signaux de surface concordants (van der Vliet et al. 2024 : verdissement ≈ 50 %, humidité ≈ +13 %, refroidissement ≈ −0,5 °C). Mesure de tierce partie, mais co-signée par l'opérateur et l'imageur ; couche profonde et ressort énergétique non tranchés. Dérive régionale débattue : les pluies est-africaines s'assèchent dans les observations quand les modèles projettent l'inverse.

À Pembamoto, le suivi satellite contrôlé de Justdiggit montre des signaux de surface concordants, verdissement, eau et fraîcheur. La démonstration tient à l'échelle du site, mais le ressort énergétique et la profondeur restent à mesurer.

Parc agroforestier de Niakhar #66

FICHE PROJET

LOCALISATION Sénégal · Sob, observatoire de Niakhar (bassin arachidier du Sine-Saloum)

TRAITEMENT Rétention de Faidherbia, rotation mil/arachide, élevage

SURFACE **≈ 115 km² (bassin de Sob)** DURÉE **parc ancien · flux 2018–2023** APPROCHE technique-based

ARIDITÉ **P/PET ≈ 0,37 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Maintien fonctionnel - en zone dégradée, écart positif au contrefactuel

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (IN-SITU)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Stations 1950–2015 ; P ≈ 550 mm/an, déficit 1970–2009	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Bassins de Sob (115 km²) et Diohine (96 km²) ; exutoire vers le Sine-Saloum	à normaliser
	Pédologie	Sols sableux (≈ 80 % sable), pauvres en matière organique	à normaliser
	Coût à l'hectare	Estimation 14–50 $/ha (type RNA, hors main-d'œuvre)	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	Système paysan sereer ; observatoire CIRAD/IRD	à harmoniser
	Modèle économique	Vivrier (mil), arachide de rente, fourrage et bois ; élevage	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Îlot de fertilité ; arbre ≈ 23 % de la production primaire ; puits net de carbone mesuré	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Phréatophyte ; usage d'eau ≈ recharge ≈ 5 % de la pluie ; nappe ≈ 6 m, salinisée	à normaliser
	Évaluation des flux énergétiques	Flux de surface mesurés in-situ (tour de flux, 2018–2023)	à normaliser
	Suivi de la rosée	pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Sécheresse 1970–2009, reprise pluviométrique partielle ; recharge sahélienne en hausse (paradoxe), salinisation locale à Sob	à harmoniser

NIVEAU DE PREUVE **élevé (instrumentation in-situ, tour de flux 2018–2023 ; contrefactuel local implicite, sans témoin apparié)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Le couplage surface-climat est modélisé, non mesuré à l'échelle du paysage ; la densité optimale reste contexte-dépendante (≈ 7–13 arbres/ha) et le modèle force la nappe à saturation, ce qui majore l'effet simulé (Gaglo et al. 2025). Sans témoin apparié, la profondeur N3 caractérise le fonctionnement, non l'attribution (Ba et al. 2026).

Système paysan ancien, le parc de Niakhar est l'une des agroforesteries arides les mieux instrumentées au monde. Il ne progresse pas, il tient, là où le bassin arachidier se dégrade et se salinise. Sa valeur est ce contraste documenté, dont le bilan eau-énergie fin reste à établir à l'échelle du paysage.

AlVelAl #31

FICHE PROJET

LOCALISATION Espagne · Altiplano Estepario (sud-est)

TRAITEMENT Agroforesterie amandiers, couverts permanents, swales/terrasses

SURFACE **~10 000 ha traités (≈100 km²) · 1 M ha** DURÉE **2014–présent (~10 ans)** APPROCHE design-based

ARIDITÉ **P/PET 0,25–0,50 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Aggradation fonctionnelle - à l'échelle de la parcelle, effet de paysage non établi

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (TIERCE)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Semi-aride, ~350 mm en événements torrentiels	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Haut plateau steppique ; ruissellement capté (swales, terrasses)	à normaliser
	Pédologie	Sols d'agroécosystèmes ligneux (amandiers), dégradés	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Financement global (52,6 M$ / 10 ans) ; non standardisé	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	Association de producteurs (AlVelAl) + Commonland ; 490 membres	à harmoniser
	Modèle économique	Filière amande bio régénérative (« 4 returns ») ; primes	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Qualité du sol restaurée ; comparaison appariée régénératif/ conventionnel	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Pas d'accès documentaire	à produire
	Évaluation des flux énergétiques	Pas d'accès documentaire	à produire
	Suivi de la rosée	Pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Méditerranée, hotspot d'assèchement ; à lire en bibliographie	à harmoniser

NIVEAU DE PREUVE **moyen-élevé (N2 vérifié académiquement sur 9 fermes ; hors échelle territoriale ; N3 absent)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Un des cas les mieux documentés du panel, sol vérifié académiquement sur fermes appariées (Soto 2021). La preuve reste pourtant à l'échelle de l'échantillon, 9 fermes pour 1 M ha visés ; le carbone du sol y reste un différentiel de parcelle, non un flux de paysage. L'angle mort N3-N4 n'est pas un défaut de rigueur.

Vitrine du mouvement régénératif méditerranéen, AlVelAl est un cas de praticiens, porté par les agriculteurs et solidement documenté sur le sol et le social. La preuve reste pourtant à l'échelle de l'échantillon : quelques fermes mesurées alors qu'un million d'hectares sont visés. L'effet de paysage et le bilan eau-énergie restent à établir.

Cebolla Canyon #64

FICHE PROJET

LOCALISATION États-Unis · Nouveau-Mexique, Cebolla Canyon · zone humide de source en zone aride (wetland in dryland)

TRAITEMENT Structures basses de rétention, reméandrage induit, seuils rocheux, approche Zeedyk

SURFACE **~6,13 ha (cœur 4,13 ha) · corridor ~11 km** DURÉE **2008–2015** APPROCHE design-based

ARIDITÉ **≈ 0,20–0,35 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Aggradation hydrique - zone humide fonctionnelle

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (TIERCE)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Semi-aride, mousson estivale	à harmoniser
	Hydrographie / topographie	Canyon gréseux, lit reméandré	à harmoniser
	Pédologie	Alluvions, capture sédimentaire	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Non chiffré, bénévolat et agence	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	USGS, BLM, praticiens, bénévoles	à harmoniser
	Modèle économique	Subvention publique, bénévolat	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Verdissement ~1,5× vs abords	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Remontée inférée, non mesurée	à produire
	Évaluation des flux énergétiques	Pas d'accès documentaire	à produire
	Suivi de la rosée	Pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Réchauffement, sécheresse pluri-décennale (SW US)	à harmoniser

NIVEAU DE PREUVE **élevé (contrefactuel 89 ans aérien + 40 ans satellite)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Sous-zone restaurée : humidité ~3,5× supérieure aux abords. Évapotranspiration estimée à 140–151 % des précipitations, signature d'une eau importée. Le verdissement déborde la zone gérée, par redistribution latérale (Petrakis et al. 2026).

Cas au contrefactuel le mieux documenté du corpus, Cebolla adosse une restauration de zone humide à près de quatre-vingt-dix ans de contrefactuel et à l'USGS. La fonction semble s'auto-entretenir, même si le bilan hydrique fin reste à mesurer. Il ouvre une famille de cas du Sud-Ouest américain, structures basses et seuils de rétention, à explorer à plus grande échelle.

Bowen Basin #42

FICHE PROJET

LOCALISATION Australie · Queensland central, bassin du Bowen (mines de charbon à ciel ouvert)
TRAITEMENT Reconstruction de relief de stériles, régalage de terre végétale, ensemencement
SURFACE **étendue non consolidée** DURÉE **réhab. 2–22 ans** APPROCHE technique-based
ARIDITÉ **P/PET 0,20–0,50 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Découplage - couvert restauré, fonction non atteinte, risque de seconde dégradation

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (TIERCE)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Stations BoM, gradient régional	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Reliefs de stériles ; pentes accentuées	à normaliser
	Pédologie	Stériles : pH/CE élevés, faible MO	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Pas d'accès documentaire	à produire
	Gouvernance & ancrage	Privé, producteurs de charbon, obligation réglementaire	à harmoniser
	Modèle économique	Provision financière réglementaire	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Couvert établi, dominé par le buffel	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Pas d'accès comparable	à produire
	Évaluation des flux énergétiques	Pas d'accès documentaire	à produire
	Suivi de la rosée	Pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Tendance régionale (Queensland), à lire en bibliographie	à harmoniser

NIVEAU DE PREUVE **élevé (sites appariés, 2–22 ans)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Découplage couvert/fonction : pentes 2,5 à 7× plus raides que les cibles, sols à pH/CE élevés, ressemblance avec l'écosystème natif visé restée très faible (Erskine & Fletcher 2013). Le buffel, dopé par la fertilisation, verrouille une trajectoire mono-spécifique exposée au feu, classée dysfonction écologique (DCCEEW 2026). Contraste : à Meandu, convergence projetée à 16–36 ans (Ngugi et al. 2018).

Réhabilité par des producteurs de charbon sous obligation réglementaire, le Bowen Basin met à l'épreuve la régénération conduite par l'industrie, un front nécessaire. Le couvert est restauré, mais la fonction ne l'est pas : pentes trop raides, sols hostiles et buffel envahissant verrouillent un écosystème dysfonctionnel. Le dispositif produit l'inverse de ce qu'il vise.

Al Baydha #12

FICHE PROJET

LOCALISATION Arabie saoudite · Hijaz, escarpement de la mer Rouge
TRAITEMENT Captation pluviale, terrasses, restauration ligneuse
SURFACE **~40 ha (pilote)** DURÉE **2009–2017 (apports cessés 2016)** APPROCHE design-based
ARIDITÉ **P/PET < 0,10 · aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Aggradation fonctionnelle probable - auto-entretien à valider

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (AUTO-DÉCLARÉ)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Aride ; stations éparses	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Escarpement, oueds ; entrée mer Rouge	à normaliser
	Pédologie	Caillouteux, sols à croûte (battance)	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Non publié ; non standardisé	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	Privé + bédouins ; financement royal	à harmoniser
	Modèle économique	Subvention privée et royale	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Reverdissement (Cabrol 2023)	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Pas d'accès documentaire	à produire
	Évaluation des flux énergétiques	Pas d'accès documentaire	à produire
	Suivi de la rosée	Pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Tendance régionale (Hijaz), à lire en bibliographie	à harmoniser

NIVEAU DE PREUVE **faible (pas de vérification académique sur le site)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Seul suivi indépendant : indice de verdissement satellite (Landsat/Sentinel) 2012–2023, produit par LMDC ; signal maintenu après 2016. Auto-entretien à valider : à Al-Qirw (Zampieri 2023), un reverdissement géré voisin s'est effondré à l'arrêt de la gestion ; contraste académiquement vérifié en Badia jordanienne (Strohmeier 2021 ; Haddad 2022 ; Tatsumi 2021).

Portée par Neal Spackman, Al Baydha est une initiative pilote, soignée dans sa conception, sans preuve publiée. Le cas incarne la tension entre praticiens engagés et exigence scientifique : un travail sérieux, qu'il reste à étayer par la mesure. D'après les derniers relevés LMDC, le verdissement se maintient, à confirmer depuis l'arrêt des apports en 2016.

Paani Foundation #17

FICHE PROJET

LOCALISATION Inde · Maharashtra · plateau du Deccan semi-aride

TRAITEMENT Mobilisation communautaire compétitive, récolte d'eau (tranchées, nala bunds, mares)

SURFACE **≈ 500 km² · essaim (≈ 1 300 villages)** DURÉE **2016–2019 (Water Cup)** APPROCHE technique-based

ARIDITÉ **P/PET 0,20–0,45 · semi-aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Aggradation de surface probable - bilan hydrique net indéterminé

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (AUTO-DÉCLARÉ)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Semi-aride, mousson erratique ; déficit 2018	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Plateau du Deccan ; micro-bassins villageois	à normaliser
	Pédologie	Sols agricoles dégradés (regur basaltique)	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Non standardisé ; travail bénévole	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	Fondation (Aamir Khan), conseils de village, ONG techniques partenaires	à harmoniser
	Modèle économique	Compétition (Water Cup) et prix ; subvention privée, État	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Verdissement auto-déclaré ; preuve de concept indépendante à Garavadi (Cabrol 2022)	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Auto-évaluation interne, nappe en recul (Paani 2019), sans mesure indépendante	à produire
	Évaluation des flux énergétiques	pas d'accès documentaire (échelle essaim)	à produire
	Suivi de la rosée	pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Tendance régionale du Deccan, à lire en bibliographie	à harmoniser {débat actif}

NIVEAU DE PREUVE **faible (auto-déclaré ; pas de vérification académique hydrologique)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Pour le seul signal indépendant, le node de Garavadi, le verdissement se maintient et la surface se rafraîchit, à un village sur des milliers. L'auto-évaluation Paani 2019 montre la nappe en recul malgré le programme. Le paradoxe du watershed development (Glendenning 2012 ; Dashora 2022) l'établit : verdissement et recharge locale peuvent coexister avec un bilan net négatif.

Relayée jusque sur YouTube par Andrew Millison, la Paani Foundation a fait creuser des milliers de villages par compétition. Garavadi en donne une preuve de concept indépendante, mais l'auto-évaluation montre les nappes reculer. Évaluer l'impact d'un essaim de noyaux à cette échelle, c'est précisément ce que la mesure devrait trancher.

Telteca #28

FICHE PROJET

LOCALISATION Argentine · Réserve Telteca, Lavalle (Mendoza) · Monte central

TRAITEMENT Protection légale du couvert et régulation du prélèvement ; exclusion expérimentale au pâturage (2018)

SURFACE **≈ 20 400 ha (loi 5061)** DURÉE **depuis 1985 · exclusion 2018** APPROCHE technique-based

ARIDITÉ **P/PET ≈ 0,13 · aride**

FORME DE TRAJECTOIRE

Stabilisation - forêt native préservée, issue de l'exclusion 2018 non établie

	INDICATEUR	ÉTAT DOCUMENTAIRE (TIERCE)	TRAITEMENT REQUIS
N1 DESCRIPTIF	Régime pluviométrique	Stations IADIZA ; P ≈ 155–160 mm/an, très variable	à normaliser
	Hydrographie / topographie	Plaine alluviale sableuse ; système dunes-vallées NNO-SSE	à harmoniser
	Pédologie	Sables éoliens, limons-argiles en bas-fonds ; pauvre en azote	à harmoniser
	Coût à l'hectare	Conservation publique, pas d'opération chiffrée à l'hectare	à harmoniser
	Gouvernance & ancrage	Réserve provinciale (1985) ; communautés huarpe ; prélèvement de bois encadré	à harmoniser
	Modèle économique	Subsistance (caprins, bois, algarrobo) ; pas de modèle de projet	à harmoniser
N2 ÉCOLOGIQUE	Performance végétale	Algarrobal mesuré (plusieurs études) ; récupération sous exclusion, non publiée	à produire
N3 HYDRIQUE & ÉNERGÉTIQUE	Niveau des nappes / stock d'eau	Nappe suivie in situ (2011–2017) ; couplage couvert-nappe documenté (sites appariés)	à normaliser
	Évaluation des flux énergétiques	pas d'accès documentaire	à produire
	Suivi de la rosée	pas d'accès documentaire	à produire
N4 DÉRIVE CLIMATIQUE	Dérive climatique de la zone	Réchauffement régional ; sécheresse andine réduit la recharge	à harmoniser

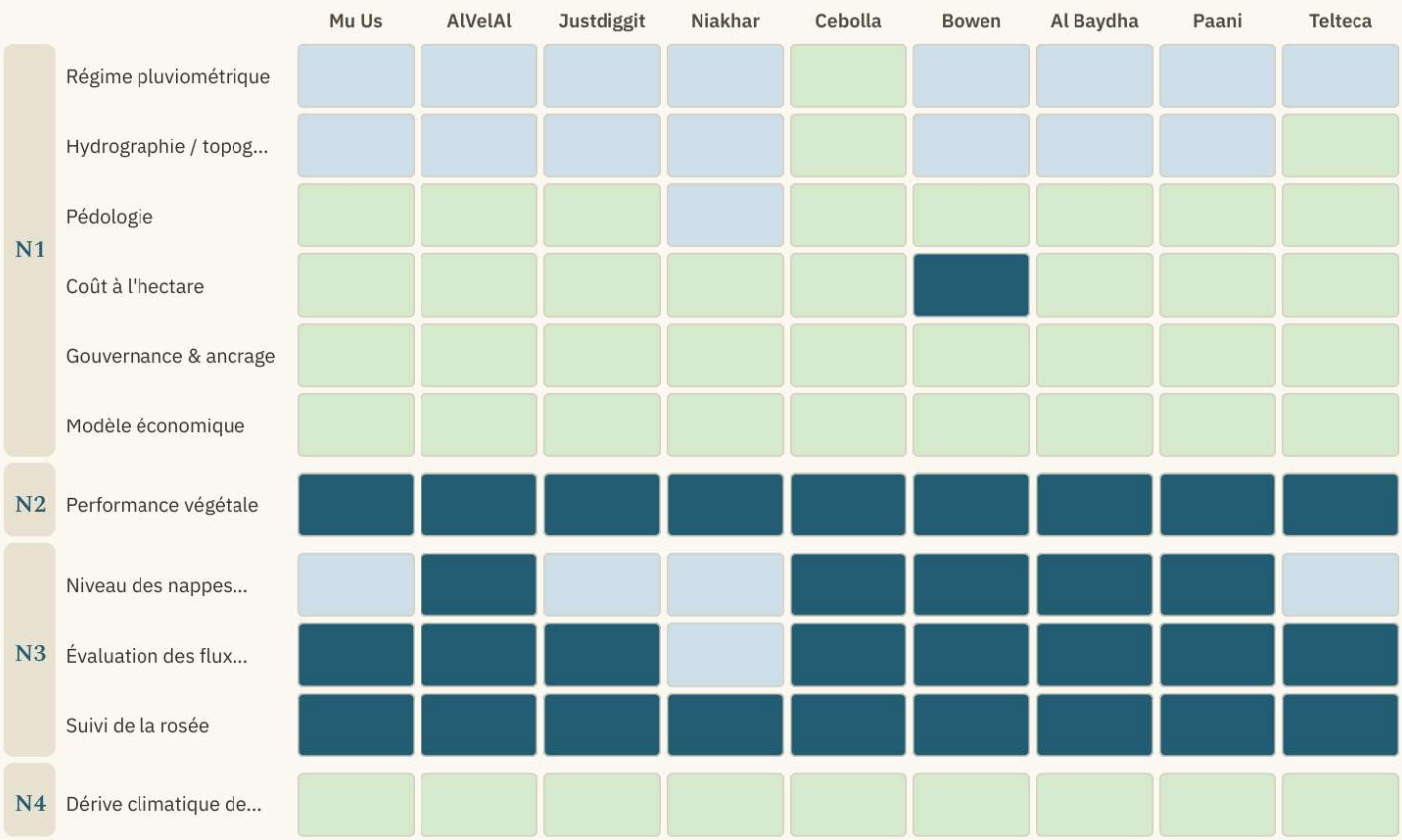
NIVEAU DE PREUVE **moyen-élevé (mesure tierce sur sites appariés ; pas d'avant-après de restauration)**

DONNÉES ADDITIONNELLES

Gradient spatial d'états, cœur préservé, dégradation autour des stations d'élevage. Le couplage est documenté sur sites appariés, perturber la végétation rompt le lien surface-nappe et laisse l'eau migrer vers l'aquifère (Meglioli et al. 2014).

Telteca conserve un algarrobal natif du Monte, protégé depuis 1985, avec une exclusion au pâturage testée depuis 2018. Son intérêt tient au couplage couvert-nappe mesuré sur sites appariés, où une végétation semblable peut masquer des fonctionnements hydriques opposés. C'est le cas qui montre pourquoi lire la surface ne suffit pas sans mesurer l'eau.

Ces neuf cas ont été sélectionnés pour être contrastés. Ils couvrent ainsi des contextes arides distincts, des approches qui vont du design conçu à la technique appliquée, des tailles de l'essaim de parcelles au grand bloc, et des maturités inégales. Cette variété est voulue.



Cette grille n'est pas un échantillon représentatif, mais un éventail de projets. Malgré cet écart, la matrice fait apparaître un trait commun. Au niveau hydrique et énergétique, sur presque tous les cas, la donnée manque dans la littérature et reste à produire. C'est la frontière entre ce qui se lit et ce qui se mesure, et elle résiste à la diversité des situations. Quelques cellules font exception, des relevés épars y existent déjà, seulement à unifier. Le projet Cebolla se distingue au descriptif, renseigné de bout en bout par une source tierce.

V. Qualifier la régénération : synthèse et perspectives

La grille a été appliquée à neuf cas. La régénération s'y lit comme la remise en marche d'un ensemble d'êtres vivants. L'attribution en est la méthode, pas l'objet. Le chapitre établit d'abord ce que la grille démontre. Il ouvre ensuite ce qu'elle laisse en horizon.

V.a. Qualifier la régénération : apports de la grille

La grille lit la régénération à partir d'une trame commune. Sa valeur tient à la densité de la comparaison, pas à un cas parfait. Lire les variables ensemble sépare la régénération du simple verdissement chanceux. Cette lecture croisée a une fonction précise. Elle protège le jugement contre le biais d'un indice isolé. En effet, quatre erreurs existent autour d'une mesure isolée. Elles trompent dans les deux sens, par excès comme par défaut.

Qu'un couvert soit vert ne signifie pas qu'il fonctionne. Une pratique agricole intensive peut faire monter l'indice de verdure sans systématiquement enrichir le système. L'indice atteint sa cible sans que la fonction suive. La loi de Goodhart trouve ici une illustration : une mesure devenue cible cesse d'être fiable. Lire plusieurs indices ensemble permet de parer à cet effet. Une variable peut être truquée, c'est plus difficile de le faire pour un faisceau cohérent d'indicateurs.

La mesure peut aussi être trompeuse pour un projet, une variable cachée ajoutant un coût externe. Au Mu Us, la gravimétrie pèse une masse totale. Or, l'extraction du charbon abaisse la nappe pendant qu'on plante. Une fois le charbon et l'irrigation retirés, le coût en eau imputable aux arbres se réduit. Ainsi, la lecture croisée établit l'impact réel des arbres. Ici, la rigueur méthodologique protège une régénération bien réelle d'un reproche partiellement infondé.

Parfois, un signal positif va à l'encontre de la trajectoire souhaitée. Dans le cas spécifique du Sud-Ouest nigérien, les nappes sont montées pendant les sécheresses, sans que le couvert puisse l'expliquer. La cause, le défrichement, a concentré le ruissellement vers les mares. Un bon résultat peut donc porter une mauvaise cause.

Le succès apparent entame parfois le capital. Au Thar, une part du verdissement vient du pompage. La nappe sollicitée se reconstitue trop lentement pour compenser le prélèvement. La grille ne condamne pas ce prélèvement. Elle le rend lisible. Sur la trajectoire, le même geste peut avoir deux sens. Il épuise la ressource ou il amorce une relance. Traiter ce débat relève des préconisations, pas du cadrage méthodologique, et le temps permettra de dire si un nouvel état d'équilibre, fonctionnel et pérenne, existe.

Face à ces quatre écueils relevés, croiser les variables d'un même projet fait surgir ce qu'un indice seul masque. C'est la valeur propre d'une méthodologie d'évaluation basée sur plusieurs indicateurs permettant d'effectuer des recoupements afin d'augmenter le degré de certitude.

Une faille plus profonde demeure, pas sur le signal, mais sur la référence utilisée pour analyser les projets. Le choc agronomique du XXe siècle (drainage, retournement des prairies, alourdissement des engins, accélération de la sélection génétique en contexte dégradé, notamment) a considérablement endommagé les sols et les capacités des plantes. Or l'état du sol pèse sur le climat local. Ce phénomène s'est produit avant l'ère satellitaire. Nous posons l'hypothèse que ses effets climatiques sont sensiblement sous-évalués. L'état de référence est donc dégradé. La documentation ne peut pas le corriger seule. Il faut mesurer vers l'avant, sans viser un hypothétique état de référence. La trajectoire devient la seule cible possible. Le choix posé au début de la revue bibliographique cesse d'être un parti pris et devient une nécessité.

Le Bunny Fence reste le seul cas où la géographie a tracé le témoin que les autres réclament. C'est le côté vivant qui forme les nuages, pourtant le plus éloigné de la mer. Ce que régénère un projet, c'est le vivant en fonctionnement.

V.b. Qualifier la régénération : horizons

La section précédente s'est refermée sur une preuve nette. Celles-ci sont rares. La plupart des cas s'arrêtent au plafond documentaire, le niveau N3. Au-delà s'ouvrent des horizons, non des lacunes. Chacun est une propriété d'un processus qu'un instantané manque. La grille les aborde. Elle ne les tranche pas.

Ce qui devient lisible dépend de l'échelle. Les neuf cas couvrent une large plage de superficie. De Cebolla à Mu Us, elle va de 0,06 à 37 000 km².



La lecture interne d'un projet ne dit pas tout de son effet sur le climat local. Une question d'échelle s'ouvre. L'effet dépend-il de l'étendue de la zone restaurée et de son agencement ? Nos recherches n'ont pas identifié de seuil de surface fixe. Le champ a délaissé le seuil absolu. L'effet est gouverné par la structure spatiale du

contraste de surface. Superficie et configuration agissent de concert. L'organisation spatiale de la rugosité et la position dans la continuité du paysage sont donc des éléments essentiels. L'optimum dépend de la configuration autant que de l'étendue (Patton et al. 2005 ; van Heerwaarden et al. 2014).

La dépendance spatiale n'est pas l'affaire d'un seul terrain. Elle revient à travers le gradient aride. En Afrique de l'Ouest, la couverture nuageuse et l'amorce convective augmentent au-dessus du couvert. Vingt ans d'observation rendent l'écart significatif au-delà de 121 km² (Ruijsch et al. 2025). Cette emprise marque une lisibilité, non un seuil. L'effet dépend aussi de l'agencement du couvert (Ruijsch et al. 2026). En Méditerranée semi-aride, le relief et l'entrée maritime conditionnent le déclenchement (Millán et al. 2005). Le relief ajoute une dimension absente du cas ouest-africain. Dans la péninsule arabique, des modèles d'afforestation à grande échelle accroissent la précipitation simulée (Branch & Wulfmeyer 2019 ; Yosef et al. 2018). Le nuage au-dessus du couvert apporte a minima l'ombre. L'impact sur la pluie est une hypothèse à examiner projet par projet.

Cette absence de seuil n'est pas une lacune. C'est une propriété du phénomène. Mesurer le partage à la bonne échelle devient alors le préalable obligé. Aucune de ces études ne tranche pour un projet donné. L'effet dépend de l'étendue, de l'agencement et de la position dans le flux. La littérature ouvre la question sans la trancher pour les cas que la grille lit. De là vient le besoin d'analyses ciblées qui permettraient de qualifier, au cas par cas, si et à quelle échelle l'effet devient lisible. C'est le pas vers l'analyse fine, conduite sur quelques ancres. Au-delà s'ouvre l'horizon climatique, le plus exigeant de tous.

La seconde condition tient à la finesse de la donnée. Une surface assez vaste produit l'effet. Une donnée trop grossière ne le voit pas. Le lire demande une mesure produite pour le site, quand la donnée publique peut le manquer.

Le potentiel de régénération s'y ajoute. Il dépend lui aussi de la référence choisie. Si la ligne de base est dégradée, le potentiel réel dépasse ce que dit l'archive. Nous le posons en hypothèse.

Le couvert vivant s'organise dans l'espace. Plusieurs noyaux distribués peuvent l'emporter sur un front continu. Cela est établi à l'échelle de la parcelle dans le volet B. Que cet avantage tienne en se déplaçant vers l'échelle du paysage reste une hypothèse. Elle est cohérente, mais encore à démontrer en aride réel. La mesure spatiale rend observables l'arrangement des noyaux et leur coalescence dans le temps. La grille pose la question de la transposition de cette logique pour des initiatives humaines. Ces noyaux sont portés par des gens, village après village. Cette nucléation et la mobilisation sociale forment une même dynamique. La Paani Foundation l'incarne, un essaim de « chantiers oasis » porté par une mobilisation

de masse. La grille enregistre le social au niveau N1. Elle ne tranche pas la gouvernance.

La grille lit le bilan hydrique et énergétique local. La cascade qui porte l'eau de la parcelle à la région reste un horizon (cf. B.VIII.c.2). Elle s'ouvre à une étendue plus large qu'un projet isolé. Le niveau climatique demeure le plus exigeant. Il reste un horizon de recherche, pas un niveau tranché. Parmi les indicateurs du couplage entre la surface et le climat figure le recyclage des précipitations. C'est le plus profond de ces horizons. Le champ en tient l'hypothèse. L'instrumentation lui manque, comme le souligne l'USGS (Norman et al. 2026).

Ces horizons partagent une exigence. Aucun ne se lit dans la documentation seule. Tous demandent une mesure fine, produite pour le site, menée sur quelques cas pilotes. C'est précisément l'objet de l'analyse approfondie.

Deux constats de position referment le chapitre. L'école qui pense le couplage sol-végétation-atmosphère se concentre autour d'universités belges et néerlandaises. La bibliométrie sur l'étude des *dryland* l'intègre peu, alors qu'elle travaille la frontière de ces horizons. La doctrine française des Eaux et Forêts l'avait pressentie au XIXe siècle, mais son extrapolation coloniale dépassait de loin sa validité. L'intuition est confirmée aux échelles régionales modernes (Van der Ent et al. 2010). C'est une lignée, pas une revendication. Les cadres conceptuels existent. L'instrumentation manque. LMDC comprend et expose la manière de la fournir.

On ne restaure pas vers un état perdu. On remet le vivant à l'œuvre. La grille en mesure les trajectoires, fidèle à ce parti pris (cf. B.I).

Annexe volet A — Bibliographie

56 références citées dans le livrable, corps et fiches projet, vérifiées dans la base maître.

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

Andrich & Imberger (2013). The effect of land clearing on rainfall and fresh water resources in Western Australia: a multi-functional sustainability analysis. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology.* Consulter

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

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

Chen, S., Tian, L., Zhang, B., Zhang, G., Zhang, F., Yang, K. et al. (2023). Quantifying the impact of large-scale afforestation on the atmospheric water cycle during rainy season over the Chinese Loess Plateau. *Journal of Hydrology.* Consulter

Chen, X. et al. (2024). 65% cover is the sustainable vegetation threshold on the Loess Plateau. *Environ. Sci. Ecotechnol.* 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. (2022). Hydrologic and Cost–Benefit Analysis of Multiple Check Dams in Catchments of Ephemeral Streams, Rajasthan, India. *Water (MDPI).* Consulter

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (DCCEEW) (2026). Ecosystem degradation, habitat loss and species decline in arid and semi-arid Australia due to the invasion of buffel grass (Cenchrus ciliaris and C. pennisetiformis). *Australian Government — DCCEEW (threat abatement advice).* Consulter

Descroix, L. et al. (2018). Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanian strip: an updated review. *Water (MDPI).* 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

Favreau et al. (2009). Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research, 45(7):W00A16.* Consulter

Feng X. et al. (2016). Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change.* Consulter

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

Gaglo E.K., Chaste E., Luyssaert S., Roupsard O. et al. (2025). Sensitivity of a Sahelian groundwater-based agroforestry system to tree density and water availability using the land surface model ORCHIDEE (r7949). *Geoscientific Model Development 18(23):9541-9563.* Consulter

Giannini, A. & Kaplan, A. (2015). Dominant role of greenhouse-gas forcing in the recovery of Sahel rainfall. *Nature Climate Change.* Consulter

Glendenning, C. J., van Ogtrop, F. F., Mishra, A. K. et al. (2012). Balancing watershed and local scale impacts of rain water harvesting in India — a review. *Agricultural Water Management.* 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

Hawke et al. (2025). A Review of Drivers of Cool Season Rainfall in Southwest Western Australia. *WIREs Climate Change, 16(6):e70028.* Consulter

Lal R. (2019). Carbon Cycling in Global Drylands. *Current Climate Change Reports.* 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

Lyons (2002). Clouds prefer native vegetation. *Meteorology and Atmospheric Physics, 80(1-4):131–140.* Consulter

Makarieva et al. (2023). The role of ecosystem transpiration in creating alternate moisture regimes by influencing atmospheric moisture convergence. *Global Change Biology, 29(9):2536–2556.* Consulter

Makarieva, A.M., Nefiodov, A.V. et al. (2026). On the methodology for assessing vegetation impacts on the atmospheric branch of the hydrological cycle. *arXiv preprint (physics.ao-ph), arXiv:2604.09510.* Consulter

Meglioli, P.A., Aranibar, J.N., Villagra, P.E., Alvarez, J.A. & Jobbágy, E.G. (2014). Livestock stations as foci of groundwater recharge and nitrate leaching in a sandy desert of the Central Monte, Argentina. *Ecohydrology, 7(2): 600–611.* 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

Mishra, V., Limaye, A.S., Doehnert, F., Policastro, R., Hassan, D., Ndiaye, M.T.Y., Van Abel, N., Johnson, K., Grange, J., Coffey, K. & Rashid, A. (2023). Assessing impact of agroecological interventions in Niger through remotely sensed changes in vegetation. *Scientific Reports.* Consulter

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

Nair et al. (2011). The role of land use change on the development and evolution of the west coast trough, convective clouds, and precipitation in Southwest Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116:D07103.* 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

Nnamchi H. C., & Fiedler S. (2026). Anthropogenic aerosols override greenhouse gases in Sahel climate change. *Communications Earth & Environment.* Consulter

Norman, L.M., Pollock, M.M., Dominguez, F., Crimmins, M.A., Lawrence, D. & Dettinger, M. (2026). Restoring dryland water cycles for precipitation feedback and climate stability; a review. *Frontiers in Environmental Science, 14 (Sec. Freshwater Science).* 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

Patton, E. G., Sullivan, P. P. & Moeng, C.-H. (2005). The influence of idealized heterogeneity on wet and dry planetary boundary layers coupled to the land surface. *Journal of the Atmospheric Sciences, 62(7), 2078–2097.* Consulter

Petrakis, R.E., Norman, L.M., McGraw, M., Carson, S., Sponholtz, C., Weber, C., & Zeedyk, B.D. (2026). Regreening, restoring, and reconnecting a southwestern wetland ecosystem – the Zeedyk wetland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* Consulter

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

Ray et al. (2003). Effects of land use in Southwest Australia: 1. Observations of cumulus cloudiness and energy fluxes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D14):4414.* Consulter

Ruijsch, J., Taylor, C. M., Hutjes, R. W. A. & Teuling, A. J. (2025). Scale-dependent cloud enhancement from land restoration in West African drylands. *Communications Earth & Environment 6(1):174.* Consulter

Ruijsch, J., Teuling, A. J., Taylor, C. M., Steeneveld, G. J. & Hutjes, R. W. A. (2026). Clustered land restoration projects increase cloud formation in West African drylands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131(2):e2025JD044393.* Consulter

Scanlon, B.R., Rateb, A., Anyamba, A. et al. (2022). Linkages between GRACE water storage, hydrologic extremes, and climate teleconnections in major African aquifers. *Environmental Research Letters.* Consulter

Shackelford et al. (2021). Drivers of seedling establishment success in dryland restoration. *Nature Ecology & Evolution.* Consulter

Shen et al. (2025). Disentangling ecological restoration's impact on terrestrial water storage. *Geophysical Research Letters (AGU).* 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

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

Tian, L., Zhang, B., Chen, S., Wang, X., Ma, X. & Pan, B. (2022). Large-scale afforestation enhances precipitation by intensifying the atmospheric water cycle over the Chinese Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 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 Heerwaarden, C. C., Mellado, J. P. & De Lozar, A. (2014). Scaling laws for the heterogeneously heated free convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences, 71(11), 3975–4000.* Consulter

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

Yosef G. et al. (2018). Large-scale semi-arid afforestation can enhance precipitation and carbon sequestration potential. *Scientific Reports.* Consulter

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

Zhang, Y. et al. (2026). Mining and vegetation greening jointly drive groundwater depletion (Loess). *GIScience & Remote Sensing.* Consulter