

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SETIF 1 FERHAT ABBAS

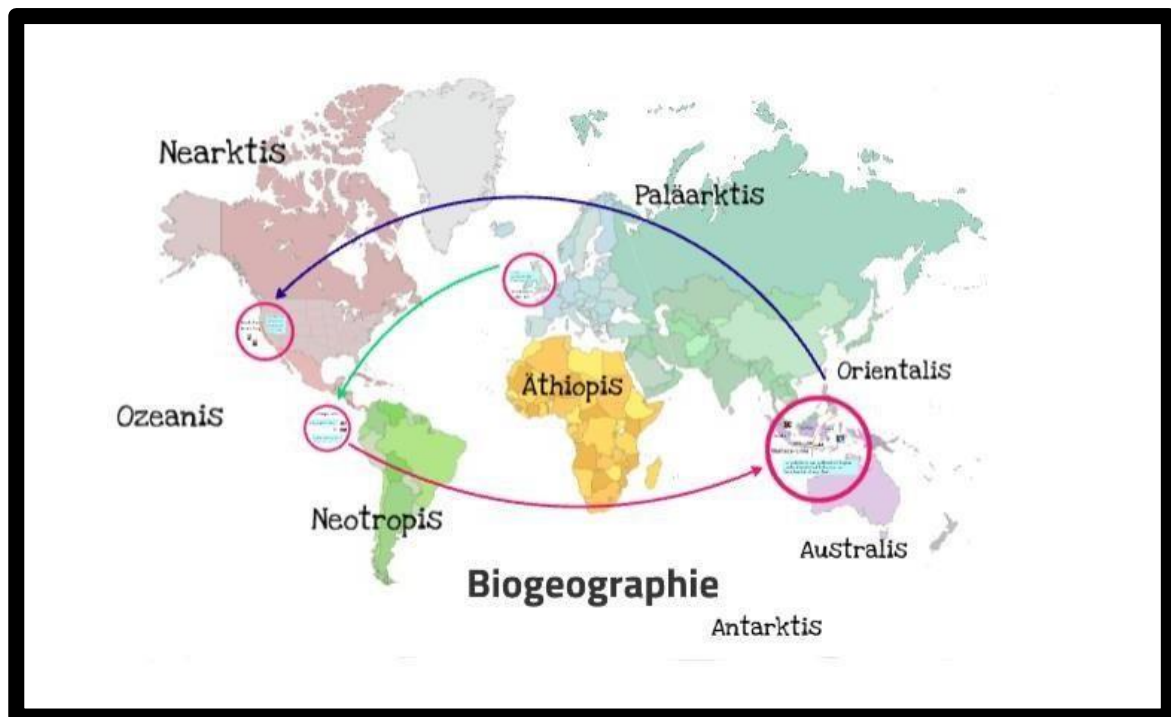
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département d'Écologie et Environnement

POLYCOPIE DE COURS

Matière : Biogéographie

Enseignement destiné aux étudiants de Master 2

« Biodiversité et physiologie végétale »



Rédigé par : Dr. GHIT Karima  
Maître de conférences classe B  
Département d'Écologie et Environnement  
Année universitaire 2025-2026

## Fiche pédagogique du module

|                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| Intitulé             | Biodiversité et physiologie végétale |
| Semestre             | 3                                    |
| Unité d'enseignement | Méthodologique 3                     |
| Matière              | Biogéographie                        |
| Crédits              | 2                                    |
| Coefficient          | 2                                    |

### Objectifs de l'enseignement :

- Connaître les caractéristiques des zones arides et semi arides surtout en Algérie
- Comprendre les effets du climat sur la végétation.
- Dans un premier temps, l'Enseignement permettra d'approfondir les critères de définition et de distinction des variantes des différents types de bioclimats méditerranéens ; ce qui permettra de décrire les principales formations végétales méditerranéennes, qu'il s'agisse des forêts feuillues et résineuses, des "matorrals" (maquis, garrigues), des pelouses et prairies (causses, bords des oueds...).

### Connaissances préalables recommandées :

Cette matière nécessite des connaissances en écologie, botanique, (déjà requis en Licence et en Master S1).

### Contenu de la matière :

#### Milieus arides et semi-arides

#### 1ère Partie : Caractérisation de l'Aridité

1°) Définition de l'aridité

2°) Mesures de l'aridité

3°) Typologie des déserts

\* Déserts zonaux

\* Déserts côtiers

- \* Déserts d'Abri
- \* Déserts continentaux
- 4°) Histoire des déserts
- \* Variation climatique
- \* Problème de sécheresse
- \* Action anthropique

## **2ème Partie : Les Modèles**

- 1°) Modèles rocheux
- 2°) Modèles dunaires
- 3°) Réseau hydrographique

## **3ème Partie : Adaptation du vivant**

- 1°) Adaptation physiologique (Végétation...)
- 2°) Adaptation humaine
- \* Exploitation traditionnelle (problème des Nappes fossiles...)
- \* Tentatives d'Aménagement (Nouvelles technologies, Epuisement des nappes...)

## **Biogéographie de l'espace méditerranéen**

Définition et distinction des variantes des différents types de bioclimats méditerranéens

- Principales formations végétales méditerranéennes, qu'il s'agisse des forêts feuillues et résineuses, des "matorrals" (maquis, garrigues), des pelouses et prairies (causses, bords des oueds...)
- Milieux naturels
- Milieux anthropisés
- Effets du climat méditerranéen sur les systèmes hydriques, sols, végétations, agriculture

## **Références**

- CHAUVET, Michel et OLIVIER, Louis, 1993. La biodiversité, enjeu planétaire. Sang de la terre, 416 p
- ARNOULD Paul et SIMON Laurent, 2008. Géographie de l'environnement. Belin, 307 p.
- BLANDIN Patrick, 2009. De la protection de la nature au pilotage de

la biodiversité. Quae, 120p.

- QUEZEL Pierre et MEDAIL Frédéric, 2004. Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier, 572 p.
- Riedacker. 1993. Physiologie Des Arbres Et Arbustes en Zones Arides Et Semi-Arides : Séminaire, Paris-Nancy, 20 Mars-6 Avril 1990. John Libbey Eurotext, 489 pages.
- Adolphe Laurent Joanne. Géographie de l'Algérie. C. Lacour, 170 pages.

# Table des matières

## Liste des figures

## Liste des tableaux

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Avant-Propos</b> .....                                                                         | 1  |
| <b>Introduction</b> .....                                                                         | 3  |
| <b>Chapitre I : Milieux arides et semi-arides</b> .....                                           | 5  |
| <b>A. 1ère Partie : Généralités sur les milieux arides et semi-arides</b> .....                   | 5  |
| 1. Définition de l'aridité .....                                                                  | 6  |
| 2. Mesures de l'aridité et indices bioclimatiques .....                                           | 10 |
| 3. Typologie fonctionnelle des déserts .....                                                      | 13 |
| 3.1. Déserts zonaux .....                                                                         | 14 |
| 3.2. Déserts côtiers .....                                                                        | 15 |
| 3.3. Déserts d'Abri .....                                                                         | 16 |
| 3.4. Déserts continentaux.....                                                                    | 17 |
| 4. Histoire climatique des déserts et fluctuations sahariennes .....                              | 19 |
| 4.1. Variation climatique .....                                                                   | 20 |
| 4.2. Problème de sécheresse .....                                                                 | 22 |
| 4.3. Action anthropique .....                                                                     | 24 |
| <b>B. 2ème Partie : Les modèles (Géomorphologie des milieux secs)</b> .....                       | 28 |
| 1. Modèles rocheux .....                                                                          | 29 |
| 2. Modèles dunaires .....                                                                         | 31 |
| 3. Réseau hydrographique .....                                                                    | 34 |
| <b>C. 3ème Partie : Adaptation du vivant</b> .....                                                | 36 |
| 1. Adaptation physiologique (Végétation).....                                                     | 37 |
| 2. Adaptation humaine .....                                                                       | 40 |
| 2.1. Exploitation traditionnelle (problème des nappes fossiles...).....                           | 41 |
| 2.2. Tentatives d'aménagement (Nouvelles technologies, épuisement des nappes...) .....            | 43 |
| <b>Chapitre II : Biogéographie de l'espace méditerranéen</b> .....                                | 47 |
| 1. Définition et distinction des variantes des différents types de bioclimats méditerranéens..... | 47 |
| 1.1. Principaux systèmes de distinction bioclimatique .....                                       | 47 |
| 1.2. Variantes thermiques : thermotypes et étagement altitudinal .....                            | 48 |
| 1.3. Variantes ombriques : ombrotypes et degré d'humidité .....                                   | 48 |
| 1.4. Application au cadre algérien .....                                                          | 49 |
| 2. Principales formations végétales méditerranéennes .....                                        | 51 |
| 2.1. Forêts de feuillues méditerranéennes .....                                                   | 51 |
| 2.2. Forêts de résineux méditerranéennes.....                                                     | 51 |
| 2.3. Matorrals : maquis et garrigues.....                                                         | 52 |
| 2.4. Pelouses et prairies méditerranéennes .....                                                  | 53 |
| 2.5. Formations des bords des oueds et des cours d'eau méditerranéens .....                       | 55 |
| 3. Milieux naturels .....                                                                         | 56 |

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. Milieux anthropisés .....</b>                                                                       | <b>57</b> |
| <b>5. Effets du climat méditerranéen sur les systèmes hydriques, sols, végétations, agriculture .....</b> | <b>60</b> |
| <b>Conclusion .....</b>                                                                                   | <b>64</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>                                                                  | <b>66</b> |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.</b> Distinction entre l'aridité, la sécheresse, l'aridification et la désertification (UNCCD, 1994) .....                                                                                                                          | 7  |
| <b>Figure 2.</b> Seuils de référence de l'indice d'aridité ( $AI = P/PET$ ) utilisés pour la délimitation des grandes classes bioclimatiques (IPCC, 2022 ; Zomer et al., 2022).....                                                             | 8  |
| <b>Figure 3.</b> Carte mondiale de l'indice d'aridité ( $AI$ ) et répartition des zones arides pour la période 1991–2020 (UNCCD <i>Science-Policy Interface</i> (SPI), 2024).....                                                               | 8  |
| <b>Figure 4.</b> Répartition mondiale des principaux déserts tropicaux et subtropicaux (Adaptée d'après Whitford & Duval 2020).....                                                                                                             | 15 |
| <b>Figure 5.</b> Les principaux déserts côtiers du monde d'après Nicholson (2011).....                                                                                                                                                          | 16 |
| <b>Figure 6.</b> Les déserts d'abri (effet d'ombre pluviométrique) d'après Ritter (2006).....                                                                                                                                                   | 17 |
| <b>Figure 7.</b> Les Déserts continentaux d'après Thomas (2024) .....                                                                                                                                                                           | 18 |
| <b>Figure 8.</b> Schéma simplifié d'une organisation géomorphologique typique en milieu aride : relief rocheux, pédiment, cône alluvial, oued et erg(King, 1949 ; Tooth, 2000 ; Lancaster, 2023). .....                                         | 29 |
| <b>Figure 9.</b> Principaux types morphologiques de dunes éoliennes (Walker,1992) .....                                                                                                                                                         | 32 |
| <b>Figure 10.</b> Comparaison synthétique des réponses adaptatives des plantes et des sociétés humaines au déficit hydrique en milieux arides et semi-arides d'après Ward (2016).....                                                           | 37 |
| <b>Figure 11.</b> Interactions systémiques entre climat méditerranéen, hydrosystèmes, sols, végétation, agriculture et pressions anthropiques (Lionello et al., 2006 ; MedECC, 2020, 2024 ; García-Ruiz et al., 2013 ; Essa et al., 2023) ..... | 62 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1.</b> Système de classification climatique selon l'indice d'aridité (AI), avec exemples de régions algériennes (IPCC, 2022). .....                                                                | 09 |
| <b>Tableau 2.</b> Principaux indices mobilisés pour l'étude de l'aridité et des bioclimats méditerranéens. ....                                                                                               | 12 |
| <b>Tableau 3.</b> Typologie simplifiée des déserts selon leur mécanisme dominant (Walker, 1992 ; Lancaster, 2023). .....                                                                                      | 14 |
| <b>Tableau 4.</b> Comparaison synthétique des principaux modèles des régions sèches (Parsons & Abrahams, 2009 ; Lancaster, 2023 ; Tooth, 2000). .....                                                         | 34 |
| <b>Tableau 5.</b> Grandes stratégies physiologiques de réponse des végétaux à la sécheresse (Kooyers, 2015 ; Flexas et <i>al.</i> , (2014) ; Haghpanah et <i>al.</i> , (2024) ; Gilman & Edwards, 2020) ..... | 38 |
| <b>Tableau 6.</b> Comparaison synthétique des principaux systèmes d'adaptation humaine aux milieux arides (Idda et <i>al.</i> (2021) ; Bensaada & Remini (2017) ; UN-Water (2021).....                        | 43 |
| <b>Tableau 7.</b> Logique hiérarchique simplifiée des catégories bioclimatiques méditerranéennes (Daget, (1977a, 1977b) ; FAO & Plan Bleu (2018) ; Pesaresi et <i>al.</i> , 2014). 50. ....                   | 50 |
| <b>Tableau 8.</b> Comparaison synthétique entre maquis et garrigue (Casals et <i>al.</i> , 2023).....                                                                                                         | 54 |
| <b>Tableau 9.</b> Comparaison synthétique entre milieux naturels et milieux anthropisés en contexte méditerranéen (Vogiatzakis et <i>al.</i> , 2006 ; Pardini & Nori, 2011 ; MedECC,2024) .....               | 59 |
| <b>Tableau 10.</b> Synthèse des principaux effets du climat méditerranéen sur les socio-écosystèmes (MedECC, (2020, 2024) ; García-Ruiz et <i>al.</i> , 2013 ; Claro et <i>al.</i> , 2024).....               | 63 |

# Avant-Propos

Ce polycopié accompagne l'enseignement du module de Biogéographie, dispensé au troisième semestre du Master II « Biodiversité et physiologie végétale » du département de Biologie et Physiologie Végétale de l'Université Sétif 1 Ferhat Abbas. Conformément aux objectifs pédagogiques fixés pour cette unité d'enseignement méthodologique, il se propose d'offrir aux étudiants un socle de connaissances à la fois structuré et approfondi sur l'analyse spatiale du vivant — avec une attention privilégiée portée aux contextes arides, semi-arides et méditerranéens.

Notre ambition avec ce support est double. Il s'agit, premièrement, d'assurer la cohérence scientifique et didactique des contenus effectivement enseignés en amphithéâtre ; deuxièmement, de mettre à disposition un ouvrage de référence facilitant l'appropriation des concepts fondamentaux de la biogéographie contemporaine. À cet égard, l'articulation entre les déterminants climatiques, édaphiques et anthropiques — et la manière dont ils façonnent la distribution des formations végétales — a fait l'objet d'un soin tout particulier.

Le document s'organise en deux grandes parties. La première s'intéresse aux milieux arides et semi-arides, en privilégiant le cas algérien. On y trouvera les concepts fondamentaux d'aridité, les méthodes de sa quantification, ainsi que la typologie des déserts. Une perspective historique y est intégrée, rendant compte des mutations climatiques et de l'amplification des impacts anthropiques. Les dimensions géomorphologiques ne sont pas négligées : modèles rocheux et dunaires, réseaux hydrographiques y sont analysés en détail. Cette partie s'achève sur une réflexion approfondie concernant les stratégies d'adaptation du vivant — qu'il s'agisse des mécanismes physiologiques mis en œuvre par les plantes ou des modes d'exploitation des ressources naturelles développés par les populations humaines.

La seconde partie ouvre sur la biogéographie de l'espace méditerranéen. Elle met en lumière la diversité et la complexité des bioclimats qui le structurent. L'objectif ici est de faire découvrir aux étudiants les différentes variantes bioclimatiques et de leur faire saisir l'influence de celles-ci sur les grandes formations végétales : forêts de feuillus et de conifères, formations de type matorral — maquis et garrigues — mais également pelouses et prairies. Une attention toute spéciale est portée à la distinction entre milieux naturels et milieux anthropisés, ainsi qu'à l'analyse des interactions entre climat méditerranéen, systèmes hydriques, sols et pratiques agricoles.

Ce cours s'appuie sur un corpus bibliographique solidement établi en écologie et en biogéographie. Les travaux de Quézel et Médail (2004), d'Arnould et Simon (2008) ou encore de

Blandin (2009) en constituent les piliers — autant de références incontournables pour qui souhaite comprendre les dynamiques environnementales à différentes échelles d'analyse.

En définitive, ce document entend doter les étudiants des compétences nécessaires pour appréhender les enjeux actuels de la biodiversité, de la gestion des écosystèmes et des changements globaux, en les invitant à adopter une démarche intégrée et critique des relations entre sociétés humaines et environnement.

---

## Introduction

La biogéographie se définit comme une discipline de synthèse : elle s'attache à comprendre la répartition spatiale des êtres vivants et des formations végétales à l'échelle du globe, en croisant constamment les contraintes environnementales et les dynamiques historiques. Dans les milieux arides, semi-arides et méditerranéens, cette répartition porte l'empreinte déterminante des facteurs climatiques — la disponibilité en eau et les régimes thermiques, avant tout — qui contraignent fortement la composition floristique et l'organisation des écosystèmes. C'est précisément parce que ces milieux présentent une variabilité marquée et une vulnérabilité particulière qu'ils offrent un terrain d'étude exceptionnel pour saisir les interactions entre climat, sol, végétation et activités humaines.

L'analyse biogéographique des zones arides et semi-arides — et singulièrement dans le contexte algérien — révèle des contraintes écologiques majeures liées à l'aridité. Cette dernière, caractérisée par un déficit hydrique structurel, peut être évaluée à l'aide de plusieurs indices bioclimatiques permettant de discriminer des gradients allant du subhumide sec à l'hyper-aride. De telles conditions extrêmes ont favorisé l'émergence de formations végétales très spécifiques, dominées par des espèces xérophiles aux adaptations morphologiques, physiologiques et phénologiques remarquables. La diversité des déserts — qu'ils soient zonaux, côtiers, d'abri ou continentaux — témoigne par ailleurs d'une combinaison complexe de facteurs géographiques, climatiques et géomorphologiques dont l'évolution s'inscrit dans la longue durée des fluctuations climatiques et dans celle, plus récente, des pressions anthropiques (Quézel & Médail, 2004). Les estimations spatiales contemporaines de l'indice d'aridité permettent d'ailleurs d'affiner considérablement la cartographie des transitions entre domaines méditerranéens, steppiques et désertiques (Zomer *et al.*, 2022 ; IPCC, 2019 ; Derdous *et al.*, 2021).

Mais le climat ne dit pas tout. L'organisation des paysages arides dépend également de processus géomorphologiques complexes — formation des models rocheux et dunaires, structuration des réseaux hydrographiques le plus souvent temporaires, avec leurs écoulements éphémères et leurs bassins endoréiques. Ces éléments dessinent une mosaïque d'habitats aux contours variables qui infléchit directement la répartition des communautés végétales. Face à ces contraintes, les stratégies d'adaptation du vivant prennent une importance capitale. Les plantes déploient des mécanismes physiologiques ingénieux : réduction de la transpiration, stockage de l'eau, cycles de vie raccourcis. Les sociétés humaines, de leur côté, ont élaboré des systèmes d'aménagement socio-hydrauliques et des pratiques agropastorales spécifiques pour optimiser l'exploitation de ressources par essence limitées — les nappes fossiles en premier lieu (Riedacker, 1993 ; Tooth, 2000 ; Idda *et al.*, 2021 ; Lancaster, 2023 ; Haghanah *et al.*, 2024).

Parallèlement, l'espace méditerranéen se présente comme un modèle biogéographique d'une grande complexité, traversé par une hétérogénéité climatique et écologique prononcée. L'alternance de précipitations saisonnières et de sécheresses estivales détermine une diversité de bioclimats particulièrement riche, qui se traduit par une variété impressionnante de formations végétales. On le constate dans les forêts feuillues et résineuses, dans les formations de type matorral — maquis et garrigues — mais aussi dans les pelouses, les prairies et les formations riveraines : toutes témoignent de l'influence combinée des facteurs naturels et des interventions humaines. L'étude biogéographique de cet ensemble exige donc une lecture conjointe où bioclimat, topographie, substrat, histoire des usages et dynamique contemporaine des paysages entrent en résonance (Lionello et *al.*, 2006 ; Rundel et *al.*, 2016 ; MedECC, 2020). Dès lors, distinguer rigoureusement milieux naturels et milieux anthropisés apparaît indispensable pour comprendre les dynamiques actuelles de la végétation et les processus de dégradation ou, à l'inverse, de résilience des écosystèmes (Arnould & Simon, 2008).

Il faut bien voir que le climat méditerranéen agit de manière déterminante — et pas seulement sur la végétation. Il conditionne également les systèmes hydriques, les sols et les pratiques agricoles. Ces interactions entre les différents compartiments du milieu illustrent la complexité des socio-écosystèmes méditerranéens, particulièrement vulnérables face au réchauffement régional, à l'intensification des sécheresses et aux pressions croissantes sur l'eau et les terres (Essa et *al.*, 2023 ; MedECC, 2024 ; García-Ruiz et *al.*, 2013). Des pressions que les activités humaines structurent, d'ailleurs, depuis des millénaires. C'est pourquoi la démarche biogéographique permet d'analyser les transformations des paysages, d'identifier les facteurs de vulnérabilité et de mieux saisir les enjeux de la gestion durable des ressources naturelles (Blandin, 2009).

Ce module vise ainsi à fournir aux étudiants les outils conceptuels et analytiques leur permettant d'interpréter la répartition des formations végétales à la lumière des contraintes bioclimatiques et des dynamiques environnementales. Il conjugue une approche descriptive et une approche explicative, mobilisant les acquis en écologie et en botanique pour approfondir la compréhension des relations entre climat, sol, végétation et action humaine. En centrant son propos sur les milieux arides, semi-arides et méditerranéens, il aborde les défis scientifiques et environnementaux spécifiques au contexte algérien et méditerranéen.

En somme, la biogéographie apparaît comme un champ disciplinaire essentiel pour qui veut comprendre les relations complexes entre les êtres vivants et leur milieu, et pour qui souhaite étudier les évolutions de la biodiversité sous le double effet des changements globaux et des pressions croissantes exercées par les activités humaines.

## Chapitre I : Milieux arides et semi-arides

### A. 1ère Partie : Généralités sur les milieux arides et semi-arides

La rareté de l'eau constitue le trait dominant des zones arides. Cette pénurie structurelle affecte l'ensemble des écosystèmes, qu'ils soient naturels ou aménagés, et place des limites sévères à la production végétale et animale — élevage, cultures, bois, fourrage. Elle impacte également la fourniture des services écosystémiques sur lesquels dépendent les populations (FAO, 2019). Depuis des millénaires, ces territoires se sont façonnés sous l'effet conjugué de faibles précipitations, de sécheresses récurrentes et de vagues de chaleur intenses, auxquels s'ajoutent les activités humaines : usage du feu, pâturage, collecte de bois et de produits forestiers non ligneux (PFNL), travail du sol (FAO, 2019). Les sols qui s'y développent, généralement vulnérables à l'érosion éolienne et hydrique, subissent une altération minérale poussée et se révèlent peu fertiles — leur couche arable contient rarement beaucoup de matière organique (Lal, 2004). On rencontre ces zones arides dans la plupart des biomes et des régions climatiques de la planète ; elles représentent aujourd'hui 41 % de la superficie terrestre mondiale (Safriel et *al.*, 2005).

Toute lecture biogéographique des milieux secs exige au préalable d'appréhender l'aridité dans sa dimension propre. La répartition des formations végétales, la structure des couverts biologiques, le fonctionnement des sols, les modalités de circulation de l'eau et les dynamiques d'occupation du sol sont en effet étroitement subordonnés à l'intensité et à la durée du déficit hydrique climatique (Reynolds et *al.*, 2007 ; Maestre et *al.*, 2021). Dans les espaces méditerranéens, arides et semi-arides, comprendre l'aridité permet d'identifier les grands cadres bioclimatiques ; il devient alors possible d'interpréter la distribution des steppes, des matorrals, des pelouses xériques, des fourrés pré-sahariens et des formations désertiques. La biogéographie des zones sèches repose sur une idée à la fois simple et fondamentale : ce n'est pas la quantité de pluie en soi qui détermine la disponibilité en eau pour la biosphère, mais bien le rapport entre les apports hydriques et la demande évaporative de l'atmosphère (Zomer et *al.*, 2022).

#### **Encadré 1 — Pourquoi l'aridité est-elle un concept central en biogéographie ?**

En biogéographie, l'aridité ne se résume pas à une faible pluviométrie. Elle résulte d'un ensemble de facteurs climatiques et environnementaux qui contrôlent la disponibilité en eau des organismes. Celle-ci dépend non seulement des précipitations, mais aussi de la température, de l'évapotranspiration potentielle, de la répartition des pluies au cours de l'année, des propriétés des sols et des conditions atmosphériques. Ces facteurs expliquent largement la diversité des écosystèmes que l'on observe dans les régions arides.

## 1. Définition de l'aridité

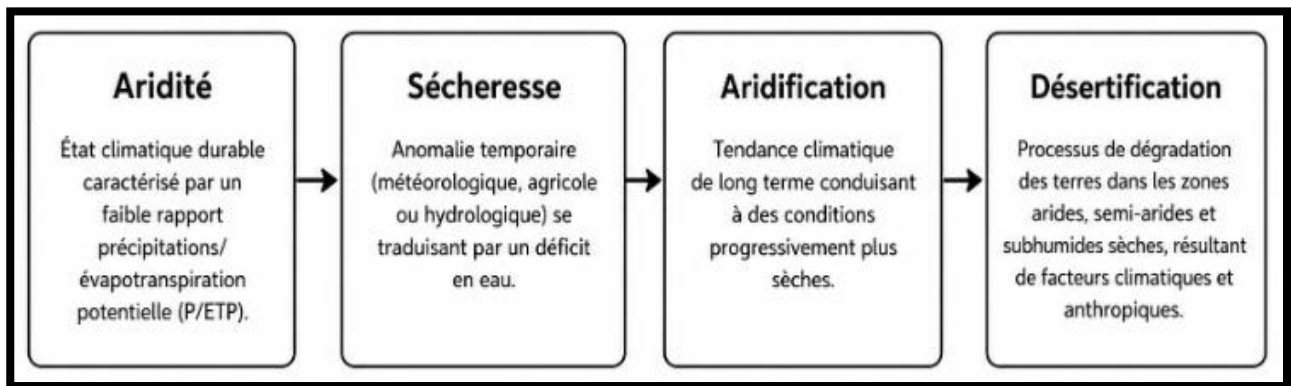
Au sens climatologique, l'aridité correspond au degré selon lequel un climat manque de l'humidité effective nécessaire à la vie. Le Glossary of Meteorology de l'American Meteorological Society a proposé cette définition, en insistant sur la notion d'« humidité effective » — autrement dit, la fraction du bilan hydrique réellement utilisable pour le fonctionnement biologique et écologique. L'aridité ne se limite donc pas à la rareté des précipitations : elle exprime un déséquilibre persistant entre l'eau reçue et l'eau potentiellement perdue par évaporation et transpiration. Dans les zones très arides, l'évapotranspiration potentielle excède systématiquement les précipitations, ce qui engendre un déficit hydrique permanent — allant parfois jusqu'à la quasi-absence totale d'eau disponible (UNCCD, 2024). Sous l'angle biogéographique, l'aridité désigne un état climatique structurel qui sélectionne des flores xérophiiles, impose aux organismes des stratégies de résistance ou d'évitement de la sécheresse, et restreint l'extension des formations végétales les plus exigeantes en eau (Zomer et *al.*, 2022).

Du point de vue des précipitations, on constate classiquement que la plupart des déserts terrestres reçoivent moins de 250 mm de pluie par an — même si des exceptions existent (Meigs, 1953). Les estimations récentes de l'UNCCD indiquent qu'environ 40,6 % des terres émergées (hors Antarctique) relèvent aujourd'hui d'un climat aride ou semi-aride, couvrant un spectre qui va des milieux subhumides aux zones hyperarides (Safriel et *al.*, 2005 ; UNCCD, 2024). En Méditerranée nord-africaine, la ceinture méridionale de climat semi-aride — de type steppique — fait transition vers les zones sahariennes hyperarides. De manière générale, plus l'indice d'aridité d'une région s'accroît — c'est-à-dire plus le ratio précipitations sur évapotranspiration se réduit —, plus les conditions imposent une contrainte hydrique permanente et sévère aux écosystèmes : végétation xérophyte, sols pauvres, faune spécialisée (Serrano et *al.*, 2020 ; Eyvaz & Albahnasawi, 2023).

La figure 01 ci-après distingue rigoureusement l'aridité des notions voisines, que l'usage courant tend parfois à confondre (UNCCD, 1994) :

- ✓ **La sécheresse** se définit comme une période de temps sec suffisamment prolongée pour provoquer un grave déséquilibre hydrologique (Organisation météorologique mondiale, OMM, 1992). Pour la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, il s'agit du phénomène naturel survenant lorsque les précipitations s'écartent nettement en dessous des niveaux habituellement enregistrés, entraînant de graves déséquilibres hydrologiques aux conséquences néfastes sur les systèmes de production des ressources terrestres (UNCCD, 1994).

- ✓ **La désertification**, n'est ni un synonyme de désert, ni un équivalent d'aridité. Selon la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, elle correspond à une dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, sous l'effet combiné de facteurs climatiques et anthropiques (UNCCD, 1994).
- ✓ **L'aridification** renvoie quant à elle à une tendance durable vers des conditions plus sèches. Cette notion est aujourd'hui largement débattue dans le contexte du changement climatique, à l'interface entre variabilité climatique, augmentation des températures et hausse de la demande évaporative (UNCCD, 1994 ; NIDIS, 2023).



**Figure 01.** Distinction entre l'aridité, la sécheresse, l'aridification et la désertification (UNCCD, 1994).

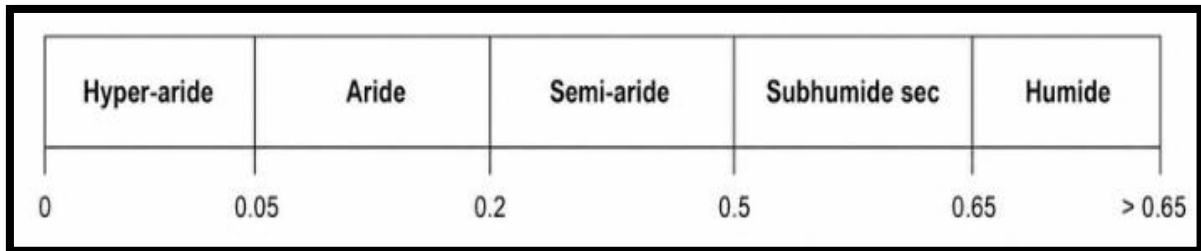
Dans la littérature scientifique actuelle, l'indice d'aridité (*AI*) constitue la définition opérationnelle la plus couramment adoptée pour délimiter les terres sèches. Il s'exprime comme le rapport entre les précipitations moyennes annuelles (*P*) et l'évapotranspiration potentielle (*PET*) : (UNEP, 1992 ; Zomer et al., 2022) :

$$AI = \frac{P}{PET}$$

Plus cette valeur se rapproche de zéro, plus le climat s'avère aride — le déficit hydrique climatique devient alors intense. Les terres sèches (*drylands*) correspondent généralement aux régions où  $AI < 0,65$ , selon la classification établie par l'UNEP (1992) et reprise par l'IPCC (2022). Il convient toutefois de noter que l'étendue spatiale estimée de ces *drylands* fluctue selon la base climatique mobilisée et la période de référence retenue. L'IPCC (2022) distingue ensuite les classes suivantes, illustrées par la figure 02 :

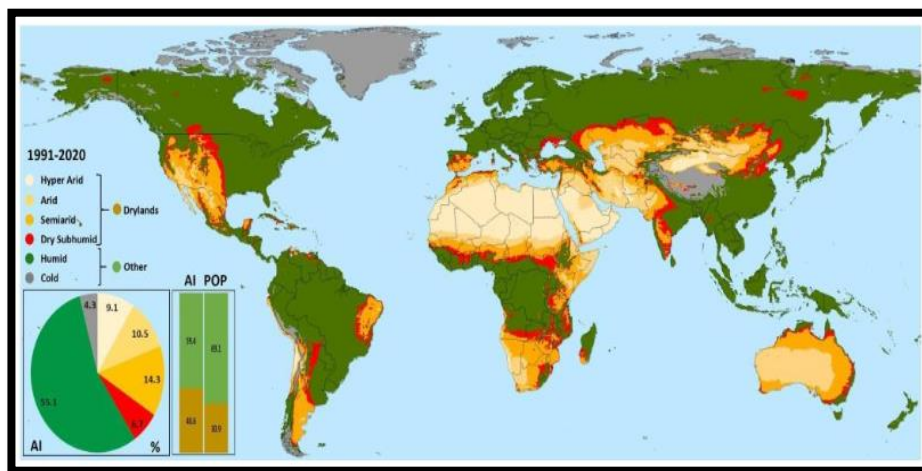
|                                             |                                    |
|---------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Subhumide sec</b> $0,50 < AI \leq 0,65,$ | <b>Aride</b> $0,05 < AI \leq 0,20$ |
| <b>Semi-aride</b> $0,20 < AI \leq 0,50,$    | <b>Hyper-aride</b> $AI < 0,05.$    |

Cette classification présente un intérêt particulier en biogéographie, car elle traduit directement — à l'échelle régionale comme mondiale — l'intensité du déficit hydrique climatique (UNEP, 1992 ; IPCC, 2022 ; Zomer et al., 2022) (l'UNEP, 1992 ; IPCC, 2022 ; Zomer et al., 2022).



**Figure 02.** Seuils de référence de l'indice d'aridité ( $AI = P/PET$ ) utilisés pour la délimitation des grandes classes bioclimatiques (IPCC, 2022 ; Zomer et al., 2022).

Pour saisir la répartition spatiale des terres arides à l'échelle planétaire, le *Science-Policy Interface* (SPI) de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification a évalué l'évolution mondiale et régionale des zones sèches à partir des variations de l'indice d'aridité entre le milieu du XXe siècle et l'année 2020. La figure 03 présente la carte mondiale de l'aridité établie pour la période 1991-2020. Elle révèle que les terres arides représentent 40,6 % de la superficie des terres émergées de la planète, hors Antarctique.



**Figure 03.** Carte mondiale de l'indice d'aridité ( $AI$ ) et répartition des zones arides pour la période **1991–2020** (UNCCD *Science-Policy Interface* (SPI), 2024)

Les régions hyper-arides occupent 9,1 % de cette superficie. Elles englobent notamment les déserts de l'Atacama, du Sahara, du Namib, de la péninsule Arabique, ainsi que les déserts de Chine et de Mongolie. Les zones arides, semi-arides et subhumides sèches se répartissent sur plusieurs continents : sud-est des États-Unis, Mexique, Brésil, bassin méditerranéen, et une grande partie de l'Afrique et de l'Asie.

L'Océanie détient la plus forte proportion de terres arides, avec 88 % de sa superficie concernée. En revanche, l'Afrique et l'Asie comptent les plus vastes étendues absolues de terres arides, couvrant respectivement plus de 21 millions de km<sup>2</sup> et 16 millions de km<sup>2</sup>.

À l'échelle planétaire, plus de la moitié des terres émergées relèvent de la classe humide de l'indice d'aridité — soit 55,1 % de la superficie terrestre (49,5 % en incluant l'Antarctique). Parallèlement, 4,3 % des terres (14,0 % avec l'Antarctique) appartiennent à la classe froide, comprenant le Groenland, le plateau de l'Himalaya et les régions de très hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

À titre de référence, le United Nations Environment Programme (PNUE) a également proposé un système de classification climatique (tableau 01) fondé sur les valeurs de l'indice d'aridité (figure 02). Cette grille offre une interprétation cohérente de la gamme des conditions de disponibilité en eau, permettant d'établir une correspondance entre les valeurs numériques de l'AI et les réalités écologiques observées sur le terrain : structure de la végétation, productivité biologique, fonctionnement des écosystèmes. L'intégration de ces différentes classifications (FAO, IPCC, PNUE) contribue ainsi à une compréhension fine et standardisée des gradients d'aridité, facilitant les comparaisons interrégionales et les analyses diachroniques dans le contexte des changements climatiques globaux.

**Tableau 01.** Système de classification climatique selon l'indice d'aridité (AI), avec exemples de régions algériennes

| Classe bioclimatique | Intervalle de l'AI    | Interprétation biogéographique générale                                                                                                                             | Exemples de régions ou de villes en Algérie*                            |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hyper-aride</b>   | $AI < 0,05$           | Déficit hydrique extrême, précipitations très faibles, végétation très discontinue ; déserts chauds ou froids dominés par des formations sahariennes très ouvertes. | Ain Salah, Tamanrasset, Bordj Badji Mokhtar, Tin Zaouatine, Adrar (sud) |
| <b>Aride</b>         | $0,05 < AI \leq 0,20$ | Stress hydrique permanent ; steppes désertiques, regs, hamadas et formations xérophytiques ouvertes ; agriculture limitée aux oasis ou aux zones irriguées.         | Ouargla, Ghardaïa, El Meniaa, Timimoun, Béchar, El Oued                 |

|                      |                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                       |
|----------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Semi-aride</b>    | $0,20 < AI \leq 0,50$ | Forte variabilité interannuelle des précipitations ; steppes, matorrals xériques et systèmes agropastoraux fragiles, sensibles aux sécheresses récurrentes.                        | Djelfa, Sétif, M'Sila, Laghouat, Tiaret, Saïda, Batna                 |
| <b>Subhumide sec</b> | $0,50 < AI \leq 0,65$ | Zone de transition vers les milieux plus productifs ; couvert végétal plus continu mais forte sensibilité aux sécheresses saisonnières.                                            | Tlemcen, Constantine, Médéa, Guelma, Mascara, Souk Ahras              |
| <b>Humide</b>        | $AI > 0,65$           | Disponibilité hydrique relativement élevée ; forêts méditerranéennes, maquis et milieux montagnards ; ces territoires ne sont généralement pas classés parmi les <i>drylands</i> . | El Tarf, Jijel, Skikda (littoral), Béjaïa (littoral), Akfadou, Edough |

(IPCC, 2022)

En Algérie, la notion d'aridité revêt une importance structurelle majeure. Les travaux consacrés au nord du pays mettent en évidence la prégnance des conditions semi-arides sur de vastes secteurs. À l'échelle nationale, les études révèlent un double gradient d'aridification : un gradient **Nord-Sud**, qui marque la transition entre le domaine méditerranéen et le domaine saharien, et un gradient **Est-Ouest**, lié aux contrastes pluviométriques et thermiques régionaux. Les zones littorales et montagnardes du Nord-Est demeurent relativement plus humides, tandis que l'Oranie, le Sud-Oranais, les Hautes Plaines steppiques et, a fortiori, le Sahara, expriment des conditions nettement plus sévères (Derdous et *al.*, 2020 ; Derdous et *al.*, 2021 ; Ghodbane & Berrached, 2020).

## 2. Mesures de l'aridité et indices bioclimatiques

Réduire la mesure de l'aridité à un simple total pluviométrique annuel serait une erreur méthodologique. Deux régions recevant des quantités de pluie comparables peuvent en effet subir des niveaux de contrainte hydrique très différents selon la température, le vent, le rayonnement, l'humidité relative, la durée de la saison sèche et l'évapotranspiration potentielle. C'est précisément pour cette raison que la climatologie et la biogéographie ont développé une pluralité d'indices (tableau 02), chacun répondant à un objectif spécifique : délimitation bioclimatique, comparaison interrégionale, diagnostic saisonnier de la sécheresse, lecture des étages de végétation, ou suivi des tendances temporelles (Middleton & Thomas, 1997 ; Girvetz & Zganjar, 2014).

**L'indice d'aridité UNEP/FAO** représente aujourd'hui la mesure la plus robuste et la plus utilisée à grande échelle. Fondé sur le rapport P/PET, il présente un intérêt méthodologique

considérable : il met directement en relation l'**offre hydrique** (précipitations) et la **demande atmosphérique** (évapotranspiration potentielle). Cette dernière est généralement calculée à partir de l'équation de référence FAO Penman-Monteith, diffusée dans le document FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, qui constitue une référence internationale pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence. Du point de vue biogéographique, l'avantage de cet indice réside dans sa comparabilité spatiale et dans sa capacité à rendre compte du stress hydrique réel bien mieux qu'un simple seuil pluviométrique (Allen et *al.*, 1998 ; Zomer et *al.*, 2022).

À côté de cette approche, la climatologie classique a largement recours à l'**indice de De Martonne**, particulièrement pertinent lorsque les données climatiques disponibles se font rares. Sa formule s'écrit :

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10}$$

Où ( $P$ ) représente la précipitation annuelle en millimètres et ( $T$ ) la température moyenne annuelle en degrés Celsius. Cet indice offre l'avantage d'être simple, facile à calculer et applicable à partir de séries stationnelles relativement élémentaires. Il a été abondamment mobilisé dans les études régionales d'aridité, notamment dans les contextes méditerranéens et nord-africains. Sa simplicité constitue cependant aussi sa limite : il ne prend pas explicitement en compte le rayonnement, le vent ni l'humidité atmosphérique — pourtant déterminants dans la demande évaporative (De Martonne, 1926 ; Derdous et *al.*, 2021).

En Algérie, l'indice de De Martonne reste fréquemment utilisé, précisément parce qu'il permet de produire des cartographies comparatives fiables à partir des réseaux météorologiques classiques. L'étude de Derdous et *al.* (2021) montre que cet indice demeure pertinent pour la classification climatique du nord algérien, tout en soulignant la nécessité d'une lecture prudente lorsqu'il s'agit d'inférer directement les effets écologiques fins. Le mémoire de Ghodbane et Berrached, consacré à la cartographie nationale de l'aridité entre 2010 et 2019, confirme l'intérêt du De Martonne pour mettre en évidence les gradients spatiaux. Il rappelle néanmoins que cet indice n'intègre pas l'ensemble des facteurs conditionnant l'aridité effectivement ressentie par la végétation : exposition, ensoleillement, structure des sols et dynamique de l'évapotranspiration (Derdous et *al.*, 2021 ; Ghodbane & Berrached, 2020).

Dans les régions méditerranéennes, où la saisonnalité climatique constitue un trait structurant majeur, l'aridité doit également être appréhendée à l'échelle **intra-annuelle**. C'est dans cette perspective que Bagnouls et Gaussen ont proposé le célèbre critère du mois sec : un mois est biologiquement sec lorsque les précipitations mensuelles ( $P$ ) sont inférieures ou égales au

double de la température moyenne mensuelle ( $T$ ), soit  $P \leq 2T$ . Ce critère, qui fonde les diagrammes ombrothermiques, s'avère particulièrement pertinent pour l'analyse des climats méditerranéens, car il renseigne sur la durée de la saison sèche — paramètre essentiel pour expliquer la distribution des formations sclérophylles, des matorrals, des steppes et des pelouses xériques (Bagnouls & Gaussen, 1953-1957 ; Daget, 1977a).

Toujours dans le domaine méditerranéen, le **quotient pluviothermique d'Emberger** occupe une place de choix. Tel qu'analysé par Daget, ce système permet de distinguer des étages bioclimatiques allant du saharien ou péraride jusqu'au périmètre humide, en mobilisant conjointement la pluviométrie annuelle et les extrêmes thermiques. Son intérêt biogéographique est considérable, puisqu'il articule directement climat et étages de végétation — ce qui explique son usage étendu dans les études portant sur le chêne vert, le pistachier lentisque, le pin d'Alep et, plus largement, sur les ensembles végétaux circum-méditerranéens. L'apport d'Emberger ne se limite donc pas à une dimension classificatoire ; il possède aussi une valeur explicative, en ce qu'il éclaire les relations entre climat, thermicité et structuration floristique (Daget, 1977b ; Dardous et *al.*, 2021).

D'un point de vue méthodologique, aucun indice ne saurait prétendre résumer à lui seul la totalité du fonctionnement écohydrologique d'un milieu. Le choix de l'indicateur dépend étroitement de la question posée. L'indice  $P/PET$  s'avère particulièrement adapté aux comparaisons globales et au suivi des terres sèches. Le De Martonne reste utile pour les analyses régionales lorsque les données se font limitées. Bagnouls-Gaussen renseigne avec finesse sur la sécheresse estivale. Emberger convient particulièrement bien aux bioclimats méditerranéens. Les travaux de Girvetz et Zganjar montrent d'ailleurs que différentes mesures de l'aridité peuvent produire des lectures distinctes selon que l'on s'intéresse à la dimension météorologique, agricole ou hydrologique du déficit en eau. Ainsi, en biogéographie, la rigueur ne consiste pas à retenir un indice unique, mais à sélectionner l'outil le plus pertinent au regard de l'échelle, du biome et de la problématique étudiés (Girvetz & Zganjar, 2014 ; Zomer et *al.*, 2022).

**Tableau 02.** Principaux indices mobilisés pour l'étude de l'aridité et des bioclimats méditerranéens

| Indice                           | Formule        | Échelle / usage principal                                              | Limites                                                        |
|----------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Indice d'aridité UNEP/FAO</b> | $AI = P / PET$ | Comparaisons régionales et globales ; cartographie des <i>drylands</i> | Dépend du calcul de $PET$ et de la période climatique retenue. |

|                         |                                  |                                                                         |                                                                                         |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>De Martonne</b>      | $IDM = P / (T + 10)$             | Analyses régionales à partir de séries climatiques simples              | N'intègre pas explicitement le vent, le rayonnement ni l'humidité atmosphérique.        |
| <b>Bagnouls–Gausson</b> | Mois sec si $P \leq 2T$          | Analyse de la saison sèche intra-annuelle et diagrammes ombrothermiques | Approche mensuelle descriptive, peu adaptée aux comparaisons globales.                  |
| <b>Emberger (Q2)</b>    | $Q2 \approx 2000P / (M^2 - m^2)$ | Étage bioclimatique méditerranéen et relation climat-végétation         | La formulation varie selon les auteurs ; $M$ et $m$ doivent être correctement exprimés. |

(Allen et al., 1998 ; Daget, 1977a-1977b ; De Martonne, 1926 ; Zomer et al., 2022).

### Encadré 2 — Complémentarité des indices

Aucun indice ne suffit à lui seul pour rendre compte de toutes les dimensions de l'aridité. Chacun met l'accent sur une composante particulière du fonctionnement des milieux secs, qu'il s'agisse du bilan hydrique annuel, de la répartition saisonnière des prélèvements, de la demande évaporative de l'atmosphère ou des relations entre le climat et la végétation. C'est pourquoi on utilise souvent plusieurs indices de manière complémentaire afin de mieux caractériser les différents contextes bioclimatiques.

### 3. Typologie fonctionnelle des déserts

Le désert n'est ni un espace uniforme ni le simple résultat d'une pluviométrie défailante. Il naît de combinaisons spécifiques entre circulation atmosphérique, continentalité, effets orographiques, géomorphologie, histoire climatique et pressions humaines — ces dernières pouvant ensuite modifier le fonctionnement ou accentuer les processus de désertification. La typologie et l'histoire des déserts méritent donc d'être abordées comme une lecture dynamique des systèmes terrestres, et non comme une nomenclature figée.

Le tableau 03 propose une classification des espaces désertiques qui ne repose pas seulement sur le degré d'aridité, mais surtout sur les **mécanismes atmosphériques** et **géographiques** à l'origine de cette aridité. Une telle démarche s'avère indispensable en biogéographie, car elle permet de comprendre pourquoi des déserts très différents par leur flore, leur fonctionnement et leur physionomie peuvent partager une même faiblesse pluviométrique.

Dans une typologie simplifiée fondée sur les mécanismes dominants de formation, on regroupe généralement les principaux déserts en quatre grandes catégories : les déserts subtropicaux (zonaux), les déserts côtiers, les déserts d'ombre pluviométrique et les déserts continentaux. D'autres classifications distinguent également des déserts de mousson, des déserts polaires et des paléodéserts. Le USGS rappelle d'ailleurs que les déserts sont classés d'après leur localisation géographique et le régime atmosphérique dominant qui entretient leur sécheresse (Walker, 1992).

**Tableau 03.** Typologie simplifiée des déserts selon leur mécanisme dominant

| Type de désert                        | Mécanisme dominant                                                                     | Exemples                                                                                  | Traits biogéographiques saillants                                                                |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Désert Zonal subtropical</b>       | Subsidence anticyclonique subtropicale, ciel clair et déficit hydrique chronique       | Sahara, Arabie, Australie intérieure                                                      | Forte continuité spatiale du déficit hydrique ; vastes surfaces de regs, hamadas et ergs.        |
| <b>Déserts Côtiers</b>                | Courants froids, inversion thermique, brouillards littoraux avec pluies très rares     | Namib, Atacama                                                                            | Hyperaridité pluviométrique mais ressources écologiques liées au brouillard.                     |
| <b>Déserts d'ombre pluviométrique</b> | Effet orographique sur les masses d'air                                                | Grand Bassin (États-Unis), Dépression de Turpan (Chine), Plateau de Patagonie (Argentine) | Contrastes rapides entre versant humide et versant sec ; forte différenciation régionale.        |
| <b>Déserts Continentaux</b>           | Éloignement des océans, forte continentalité et bassins intérieurs souvent endoréiques | Gobi, bassins d'Asie centrale                                                             | Faibles pluies mais fortes amplitudes thermiques ; association stress hydrique / froid hivernal. |

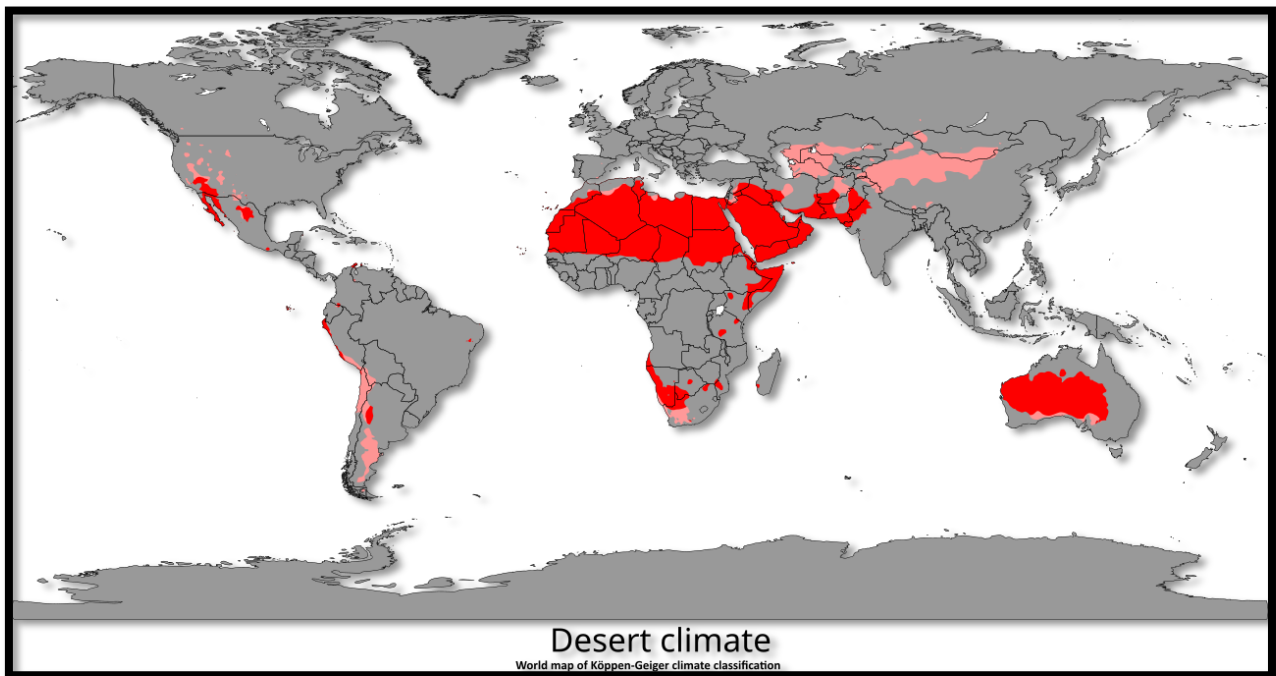
(Walker, 1992 ; Lancaster, 2023).

### 3.1. Déserts zonaux

Les **déserts zonaux** correspondent aux grands déserts subtropicaux liés à la circulation générale de l'atmosphère. On les retrouve principalement entre 15° et 30° de latitude, dans les secteurs dominés par les anticyclones subtropicaux et les branches descendantes de la cellule de Hadley. L'air y est en mouvement descendant, ce qui inhibe les ascendances convectives, réduit la nébulosité et limite fortement la formation des pluies.

La répartition mondiale de ces déserts zonaux, illustrée par la figure 04, met en évidence une organisation latitudinale caractéristique qui dessine une ceinture quasi continue de zones arides à l'échelle planétaire. Cette structuration spatiale concerne notamment le Sahara, la péninsule Arabique, les déserts australiens ainsi que certaines parties du Kalahari — autant d'exemples emblématiques de déserts subtropicaux (Walker, 1992 ; Whitford & Duval, 2020).

Sur le plan biogéographique, ces déserts se distinguent par des bilans hydriques durablement négatifs, une végétation clairsemée, des surfaces souvent dominées par des regs, des ergs, des hamadas ou des plaines caillouteuses. On y observe également une forte sélection d'espèces xérophytes, halophytes ou éphémères opportunistes. Le Sahara algérien relève principalement de cette logique zonale. Son immense extension, sa très forte évaporation et sa rareté pluviométrique en font un exemple majeur de désert subtropical, où la continuité spatiale du déficit hydrique structure la répartition des formations sahariennes et pré-sahariennes (Walker, 1992 ; Whitford & Duval, 2020).



**Figure 04.** Répartition mondiale des principaux déserts tropicaux et subtropicaux. (Adaptée d'après Whitford & Duval (2020).

### 3.2. Déserts côtiers

Les **déserts côtiers** (figure 05) occupent généralement les façades occidentales des continents, à proximité des tropiques. Ce qui les rend originaux, c'est qu'ils associent une pluviométrie extrêmement faible à la présence fréquente de brouillards, de stratus bas et d'humidité atmosphérique marine. Leur fonctionnement s'explique par l'action combinée des anticyclones subtropicaux, des courants océaniques froids et des inversions thermiques basses qui stabilisent l'atmosphère et empêchent le déclenchement des précipitations. Le Namib et l'Atacama en constituent les exemples les plus classiques (Nicholson, 2011 ; Whitford & Duval, 2020).

Du point de vue biogéographique, les déserts côtiers sont particulièrement instructifs : ils démontrent que l'hyperaridité pluviométrique n'exclut pas toute ressource en eau. Les brouillards

peuvent en effet représenter des apports hydriques écologiquement significatifs, soutenant localement des communautés dépendantes du *fog* — cryptogames, invertébrés spécialisés et flores endémiques capables de capter l'humidité atmosphérique. L'Atacama offre un cas extrême : certaines portions peuvent rester pendant de très longues années sans pluie mesurable, alors que des brouillards côtiers persistent de façon récurrente. Le Namib présente lui aussi des systèmes biologiques étroitement liés aux brumes marines (Mitchell et *al.*, 2020 ; Jung et *al.*, 2020).

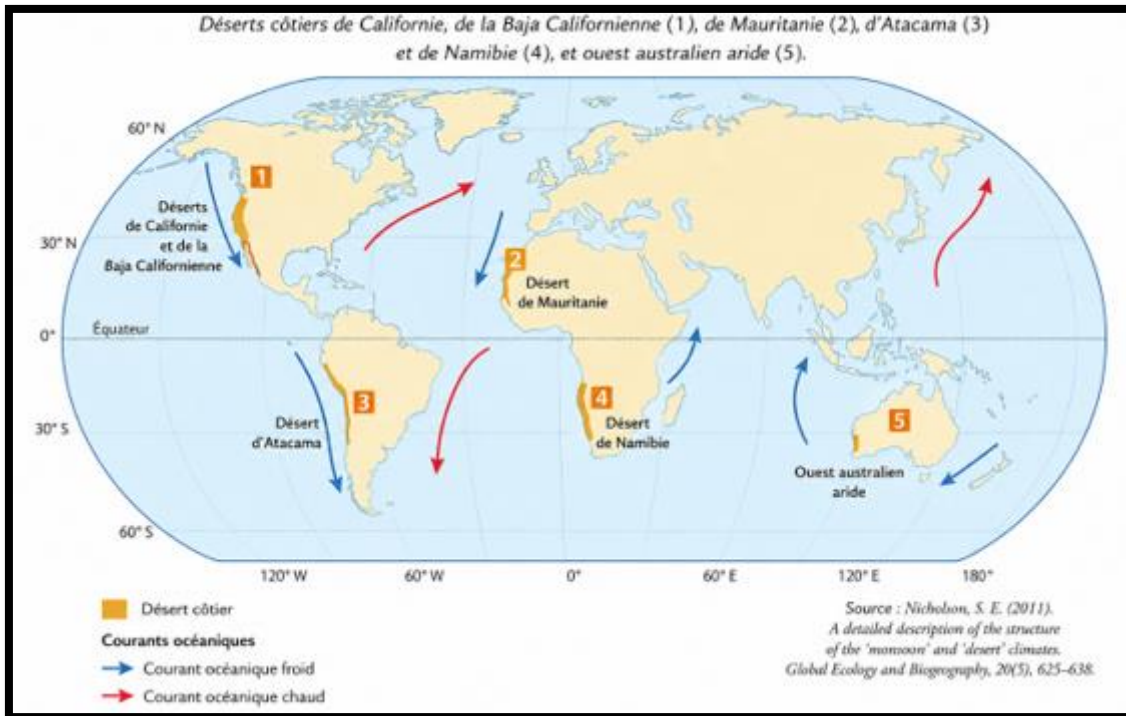


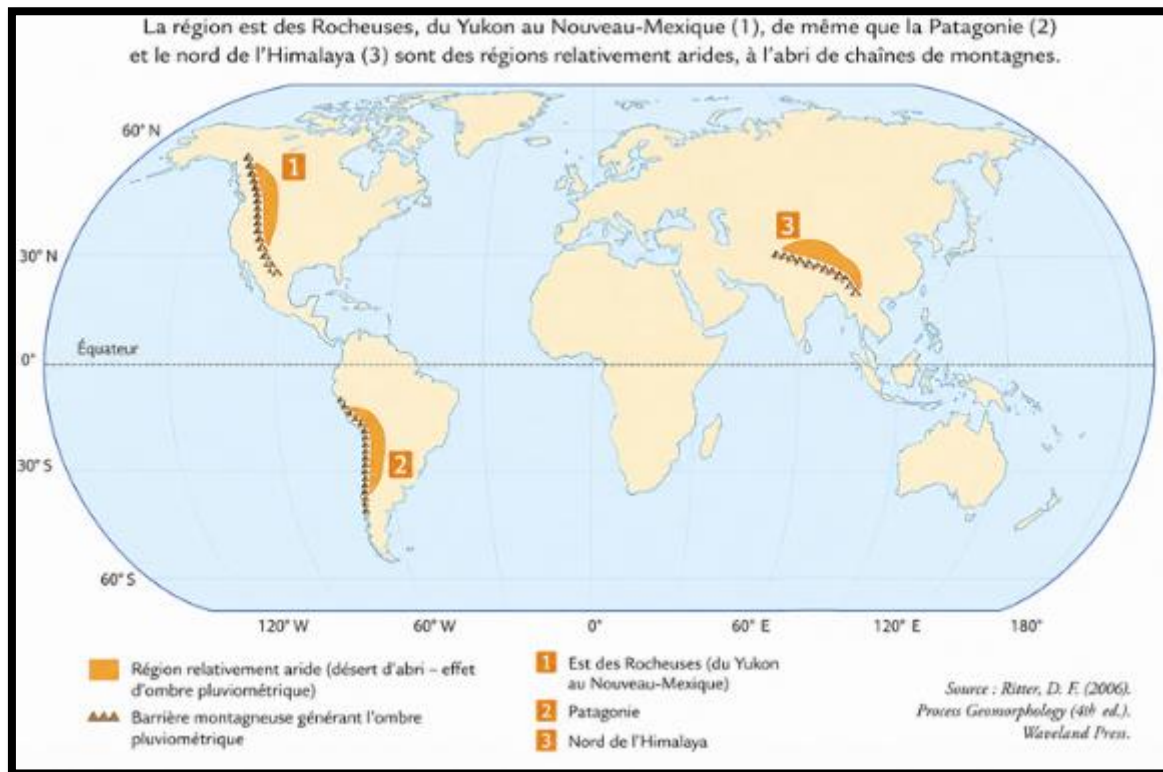
Figure 05. Principaux déserts côtiers du monde d'après Nicholson (2011)

### 3.3. Déserts d'Abri

Les **déserts d'abri**, ou **déserts d'ombre pluviométrique** (figure 06), résultent d'un mécanisme orographique. Lorsqu'une masse d'air humide rencontre une chaîne montagneuse, elle s'élève sur le versant au vent, se refroidit, se condense et précipite ; l'air redescend ensuite sur le versant sous le vent en se réchauffant adiabatiquement, ce qui réduit fortement son humidité relative et crée un secteur sec. Le désert naît ainsi dans la « zone d'ombre » pluviométrique produite par le relief. Le USGS classe explicitement ce type sous l'appellation de *rain shadow deserts* (Walker, 1992).

Ces déserts illustrent parfaitement le rôle déterminant du relief dans la différenciation biogéographique régionale. Sur de courtes distances, on peut observer un passage rapide entre des versants relativement humides à végétation plus dense, et des secteurs sous les vents dominés par des steppes xériques ou de véritables paysages désertiques. Les déserts situés sous l'influence d'importants massifs asiatiques offrent des exemples remarquables de cette dynamique, parfois

combinée à la continentalité — comme dans les bassins intérieurs du Xinjiang, notamment les bassins de Turpan et du Tarim. Ici, l'aridité n'est pas seulement un produit de la latitude : elle dépend aussi de l'organisation topographique régionale (Walker, 1992).



**Figure 06.** Les déserts d'abri (effet d'ombre pluviométrique) d'après Ritter (2006)

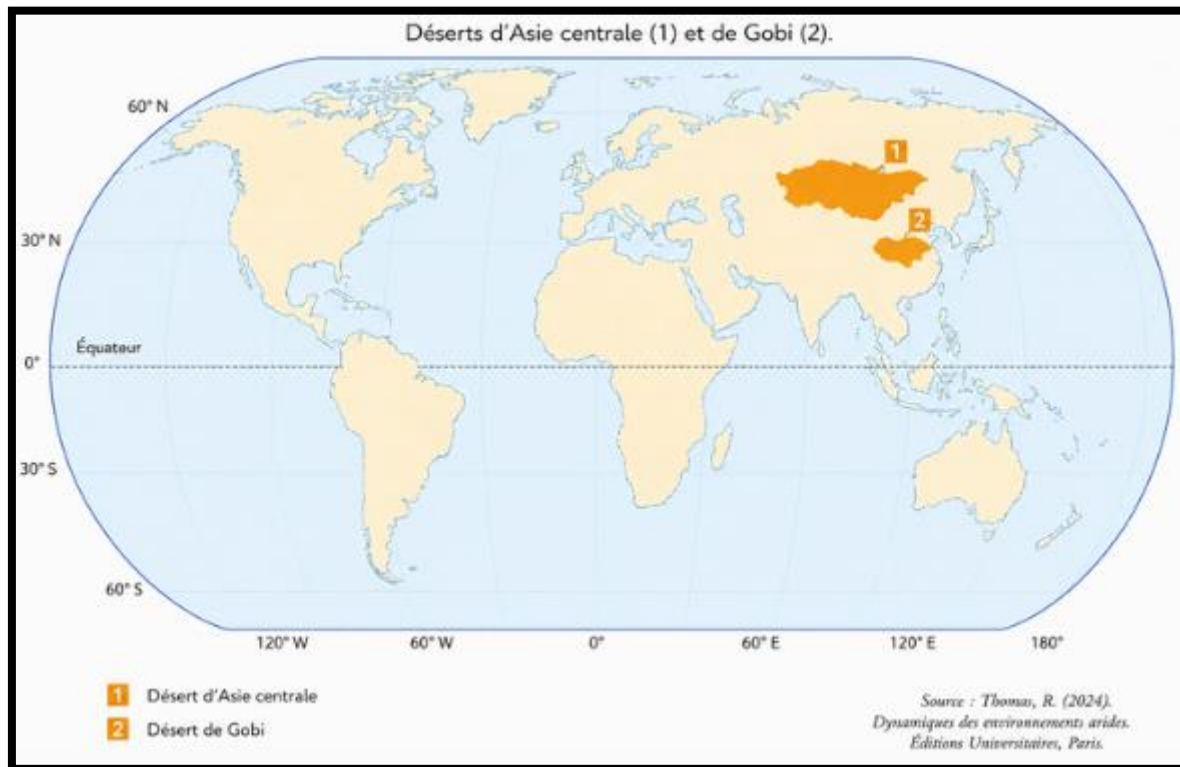
### 3.4. Déserts continentaux

Les **déserts continentaux**, représentés dans la figure 07, sont des déserts d'intérieur, éloignés des sources océaniques d'humidité. Leur aridité découle principalement de la continentalité — c'est-à-dire de la distance aux mers, qui entraîne un épuisement progressif des masses d'air humides au cours de leur trajet au-dessus des continents. Cette situation s'accompagne fréquemment de bassins endoréiques (à drainage interne) et de régions de moyenne latitudes caractérisées par une forte amplitude thermique annuelle (Thomas & Middleton, 2011 ; Thomas, 2024). Le **U.S. Geological Survey (USGS)** décrit ces déserts comme des déserts de moyenne latitude, généralement situés dans des bassins continentaux éloignés des océans, où les précipitations sont faibles et les contrastes thermiques saisonniers particulièrement marqués.

Le **désert de Gobi** constitue un exemple représentatif de ce type. Situé entre le sud de la Mongolie et le nord de la Chine, il se caractérise par un climat fortement continental : hivers rigoureux, étés chauds, et une très forte amplitude thermique annuelle. Les précipitations y demeurent généralement inférieures à 200 mm par an. Son aridité résulte principalement de son éloignement des océans, auquel s'ajoute l'effet des barrières montagneuses d'Asie centrale qui

limitent l'arrivée des masses d'air humides (Thomas, 2024 ; Middleton, 2009).

Cette combinaison de facteurs climatiques confère au Gobi une identité biogéographique singulière : les organismes qui y vivent doivent être adaptés simultanément au déficit hydrique et aux températures hivernales extrêmement basses. Cette dualité distingue nettement ses écosystèmes de ceux des déserts chauds subtropicaux tels que le Sahara ou la péninsule Arabique (Thomas, 2024).



**Figure 07.** Les Déserts continentaux d'après Thomas (2024)

Ainsi, la typologie des déserts révèle que le terme « désert » recouvre une diversité de trajectoires climatogénétiques. Un désert peut être subtropical et zonal, maritime et côtier, orographique et d'abri, ou encore continental et thermiquement extrême. Dans certains cas, plusieurs mécanismes climatiques agissent simultanément pour façonner les conditions d'aridité. Cette approche typologique est fondamentale en biogéographie, car elle évite de réduire les milieux désertiques à une simple faiblesse des précipitations et permet d'expliquer la diversité des paysages, des sols, des hydrosystèmes temporaires et des communautés biologiques qui caractérisent les régions arides (Thomas, 2024 ; Maestre et al., 2021).

**Encadré 3 — Définition multifactorielle du désert**

Les déserts sont des systèmes environnementaux dont le fonctionnement résulte de l'interaction de facteurs climatiques, géomorphologiques, hydrologiques et biologiques. Si la rareté des précipitations en est une caractéristique majeure, elle ne suffit pas à elle seule pour expliquer l'aridité. C'est l'ensemble des bilans hydriques, de la circulation atmosphérique, des effets orographiques, de la continentalité, des courants océaniques, des brouillards côtiers, des propriétés des sols et de la couverture biologique qui fait la diversité des milieux désertiques.

**4. Histoire climatique des déserts et fluctuations sahariennes**

L'histoire des déserts ne saurait être envisagée comme celle de territoires figés dans un état permanent de sécheresse. En biogéographie, ces milieux sont plutôt considérés comme des systèmes dynamiques dont l'évolution résulte de l'action conjointe de nombreux facteurs : circulation atmosphérique, forçages orbitaux, organisation des reliefs, configuration des bassins marins, disponibilité des ressources en eau, propriétés des sols et, plus récemment, influence croissante des sociétés humaines (Claussen et *al.*, 2017 ; Thomas, 2024).

- Cette dynamique s'exprime à différentes échelles temporelles. Au cours des temps géologiques, certains déserts se sont progressivement individualisés sous l'effet des réorganisations tectoniques et des modifications de la circulation océanique (Thomas, 2024) ;
- À l'échelle du Quaternaire, ces espaces ont connu des alternances marquées de phases d'expansion, de rétraction et même de reverdissement temporaire (Claussen et *al.*, 2017) ;
- Plus près de nous, durant les périodes historiques, les marges désertiques ont été profondément remodelées par les activités pastorales, agricoles et hydrauliques, qui ont contribué à transformer durablement les paysages (Wright, 2017).

Une telle approche diachronique occupe une place centrale en biogéographie. Elle met en évidence que les paysages arides observés aujourd'hui en Algérie — qu'il s'agisse des Hautes Plaines steppiques, des régions présahariennes ou du Sahara septentrional — sont le résultat d'une longue coévolution entre les conditions climatiques, les dynamiques de la végétation et les modes d'occupation humaine. Les paysages actuels constituent ainsi l'héritage d'une succession de transformations qui se sont étalées sur plusieurs milliers, voire plusieurs millions d'années

---

(Gasse, 2000 ; Zhang et *al.*, 2014 ; Kröpelin et *al.*, 2008).

#### 4.1. Variation climatique

La compréhension de l'histoire des déserts repose avant tout sur l'étude des variations climatiques de longue durée. Les grands déserts subtropicaux actuels ne se sont pas formés brutalement ; ils représentent l'aboutissement de processus anciens, parfois engagés depuis plusieurs millions d'années, en lien avec l'évolution de la circulation atmosphérique globale.

Le cas du Sahara illustre parfaitement cette complexité. La date de mise en place du désert fait encore l'objet de discussions au sein de la communauté scientifique. Pendant longtemps, les chercheurs ont considéré que le Sahara moderne résultait essentiellement d'une désertification relativement récente, particulièrement marquée au Quaternaire. Des recherches paléoclimatiques plus récentes proposent toutefois un scénario différent, en faisant remonter une phase majeure d'aridification au Miocène supérieur, il y a environ 7 millions d'années. Cette évolution serait liée à la réduction progressive de la Téthys, qui aurait modifié l'extension vers le nord de la mousson africaine et profondément transformé le régime climatique du nord du continent. Il convient néanmoins de souligner que cette question demeure ouverte. L'ancienneté du Sahara varie en effet selon le critère retenu : apparition des premières conditions arides, installation de l'hyperaridité régionale ou mise en place du désert contemporain tel qu'il est identifié aujourd'hui (Zhang et *al.*, 2014 ; Holmes, 2008).

Les archives paléohydrologiques et paléoécologiques montrent qu'au cours du Quaternaire, l'Afrique du Nord a connu des fluctuations climatiques d'une ampleur considérable. Les alternances glaciaires et interglaciaires, les variations de l'insolation induites par les paramètres orbitaux terrestres ainsi que les réorganisations des interactions entre l'océan et l'atmosphère ont modifié à plusieurs reprises la vigueur de la mousson africaine. Ces changements se sont directement traduits par des déplacements des limites entre les domaines humides, semi-arides et arides.

Les travaux de Gasse montrent que l'évolution hydrologique de l'Afrique tropicale et subtropicale depuis le Dernier Maximum Glaciaire ne peut être réduite à une simple succession de périodes sèches et humides. Elle correspond plutôt à une série de transitions parfois rapides, voire abruptes, résultant d'interactions complexes entre les forçages orbitaux, la dynamique océanique, la circulation atmosphérique et les rétroactions des surfaces continentales. Dans cette perspective, le désert apparaît comme une configuration bioclimatique évolutive, dont les limites peuvent avancer, reculer ou se réorganiser au gré des modifications du système climatique global (Gasse, 2000).

L'épisode du « **Sahara vert** » constitue l'exemple le plus emblématique de cette variabilité. Cette phase humide africaine, qui s'est développée durant l'Holocène ancien et moyen, est généralement située entre 10 000 et 4 000 ans BP, bien que sa chronologie puisse légèrement varier selon les archives utilisées. À cette époque, une large partie de l'actuel Sahara était occupée par des lacs, des zones marécageuses, des réseaux hydrographiques permanents ou temporaires ainsi que par des formations végétales nettement plus développées qu'aujourd'hui. Les données issues des sédiments lacustres, des analyses polliniques et des marqueurs isotopiques indiquent que des savanes, des steppes herbacées ainsi que des formations ligneuses d'affinité tropicale et sahélienne colonisaient alors des régions désormais soumises à une hyperaridité marquée.

Les recherches de Kröpelin et *al.* apportent un éclairage particulièrement important sur cette évolution. En étudiant le Sahara oriental, ces auteurs ont mis en évidence une transformation progressive des écosystèmes au cours des 6 000 dernières années. Les arbres tropicaux ont d'abord régressé, suivis des graminées sahéliennes. À partir d'environ 4 300 ans BP, la mobilisation éolienne des poussières s'est nettement intensifiée, avant qu'un régime désertique comparable à celui observé aujourd'hui ne s'établisse vers 2 700 ans BP. Cette reconstitution montre que la désertification naturelle ne s'est pas nécessairement produite sous la forme d'un changement brutal. Dans de nombreux secteurs, elle s'est au contraire déroulée progressivement, au rythme de transitions écologiques successives, ponctuées par des seuils hydrologiques propres aux différents contextes régionaux (Kröpelin et *al.*, 2008 ; Gasse, 2000).

Les conséquences biogéographiques de cette variabilité climatique ont été considérables. Les fluctuations du climat ont remodelé la répartition des grands biomes, déplacé les écotones séparant steppes, savanes et déserts, favorisé temporairement l'expansion de taxons mésophiles, puis entraîné leur recul lorsque les contraintes hydriques se sont accentuées. Elles ont également influencé les trajectoires des populations humaines, les itinéraires pastoraux ainsi que les modes d'occupation et de mise en valeur des territoires.

Les marges sahariennes et présahariennes de l'Algérie doivent ainsi être interprétées comme des espaces où subsistent de nombreux héritages paléoclimatiques. La structure actuelle de la végétation, l'organisation des sols et le fonctionnement des réseaux de drainage conservent encore les traces des fluctuations hydrologiques intervenues durant l'Holocène et les périodes post-holocènes. En définitive, les variations climatiques constituent le principal cadre d'interprétation de l'histoire des déserts. Elles n'en fournissent toutefois pas une explication exhaustive, car les épisodes d'aridité ne prennent pleinement leur signification écologique qu'à travers la répétition des sécheresses et les réponses des écosystèmes aux contraintes hydriques qui en résultent (Gasse, 2000 ; Kröpelin et *al.*, 2008 ; UNCCD, 2024).

## 4.2. Problème de sécheresse

Dans l'étude de l'histoire des déserts, il est indispensable de distinguer clairement la sécheresse de l'aridité, deux notions souvent confondues alors qu'elles renvoient à des réalités climatiques différentes. L'aridité correspond à une caractéristique durable du climat. Elle définit des territoires où, de manière permanente, les précipitations demeurent inférieures à la demande évaporative. La sécheresse relève, au contraire, d'un phénomène temporaire. Elle traduit une anomalie hydrique qui peut survenir aussi bien dans un environnement habituellement humide que dans une région déjà aride. Cette distinction revêt une importance fondamentale en biogéographie, puisqu'elle permet de ne pas assimiler un état climatique permanent à une crise hydroclimatique ponctuelle. Les travaux récents consacrés au bassin méditerranéen distinguent généralement trois formes de sécheresse. La **sécheresse météorologique** résulte d'un déficit de précipitations ; la **sécheresse agricole** apparaît lorsque l'humidité du sol devient insuffisante pour assurer le développement normal de la végétation ; enfin, la **sécheresse hydrologique** se manifeste par une diminution des écoulements de surface, des réserves souterraines et des volumes stockés dans les réservoirs. Ces différentes formes sont étroitement liées. Le plus souvent, elles se succèdent progressivement selon une logique de cascade, sous l'effet de la durée du déficit pluviométrique et de l'intensité de la demande évaporative (Essa et *al.*, 2023 ; IPCC, 2019).

D'un point de vue biogéographique, la sécheresse devient véritablement problématique lorsqu'elle ne constitue plus une simple fluctuation du climat, mais qu'elle entraîne une réorganisation durable du fonctionnement des écosystèmes. La répétition des épisodes secs, ou leur prolongation dans le temps, réduit progressivement l'humidité des sols, limite la production primaire et compromet la régénération des espèces ligneuses comme des formations herbacées. À cela s'ajoutent des mortalités végétales parfois différées, une sensibilité accrue aux incendies dans les écosystèmes méditerranéens ainsi qu'une intensification des processus d'érosion, qu'ils soient éoliens ou hydriques, dès lors que le couvert végétal perd sa continuité. Cette évolution est particulièrement préoccupante dans les régions semi-arides, où les écosystèmes fonctionnent déjà à proximité de seuils écologiques critiques. Les observations récentes réalisées à l'échelle du bassin méditerranéen montrent d'ailleurs une augmentation à la fois de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Cette tendance est particulièrement marquée dans la partie méridionale de la Méditerranée, c'est-à-dire dans les pays d'Afrique du Nord. Pour les steppes algériennes, les matorrals xériques, les formations à alfa ainsi que les végétations pré-sahariennes, les conséquences sont directes, car la capacité de ces milieux à résister aux perturbations dépend étroitement de la variabilité interannuelle des précipitations (Essa et *al.*,

2023).

Il convient néanmoins d'apporter une précision essentielle : toute sécheresse ne conduit pas nécessairement à un processus de désertification. Comme le rappelle l'IPCC, un épisode sec, même marqué, ne signifie pas à lui seul qu'une dégradation irréversible est engagée. De nombreux écosystèmes des *drylands* possèdent en effet une capacité de récupération qui leur permet de retrouver un fonctionnement proche de l'état initial lorsque les conditions pluviométriques redeviennent favorables. En revanche, cette capacité de résilience peut être dépassée lorsque les sécheresses deviennent plus fréquentes, s'installent sur de longues périodes ou atteignent une intensité exceptionnelle. Dans ces conditions, la végétation ne parvient plus à se reconstituer efficacement, ouvrant la voie à une dégradation durable des sols, des parcours et de la biodiversité. C'est précisément cette transition, qui conduit d'une variabilité climatique normale à une perte durable de résilience écologique, qui constitue le véritable enjeu biogéographique de la sécheresse. Les conclusions récentes de la UNCCD sur le dessèchement des terres à l'échelle mondiale s'inscrivent dans cette perspective. Elles montrent que l'extension de l'aridité représente désormais une menace majeure pour les écosystèmes, les ressources en eau et la sécurité alimentaire dans de nombreuses régions du globe. Cette évolution rappelle que l'histoire des déserts ne relève pas uniquement des temps géologiques : elle se poursuit aujourd'hui dans le contexte du réchauffement climatique contemporain (IPCC, 2019 ; UNCCD, 2024).

La compréhension du phénomène se complexifie encore lorsque la sécheresse interagit avec les activités humaines. Les recherches consacrées à la « sécheresse anthropique » montrent que l'intensité d'un déficit hydrique ne dépend pas exclusivement des conditions climatiques. Elle résulte également des choix de gestion des sociétés. La surexploitation des nappes souterraines, l'extension de cultures peu adaptées aux contraintes locales, la modification des écoulements naturels, la disparition des couverts végétaux protecteurs ou encore une gestion non durable des ressources en eau et des sols contribuent à amplifier les effets d'un manque de précipitations. Dans les milieux arides et semi-arides, la sécheresse ne peut donc plus être considérée comme la simple conséquence d'une insuffisance de pluie. Elle devient un phénomène complexe, situé à l'interface entre les processus climatiques, les pratiques techniques, les dynamiques économiques et les modes de gouvernance. Cette lecture est particulièrement pertinente pour les marges steppiques algériennes, où les déficits pluviométriques voient fréquemment leurs effets renforcés par les profondes transformations des systèmes pastoraux et agraires intervenues au cours des dernières décennies (AghaKouchak et *al.*, 2021 ; IPCC, 2019).

### 4.3. Action anthropique

Toute approche contemporaine de l'histoire des déserts doit intégrer le rôle des sociétés humaines. Dans son acception scientifique actuelle, la désertification ne peut être expliquée par une relation de cause à effet unique. Elle résulte d'un ensemble d'interactions complexes entre les contraintes imposées par le climat et les modes d'occupation et d'exploitation des territoires, lesquels s'expriment simultanément à différentes échelles, depuis le niveau local jusqu'aux dynamiques globales. Les travaux de Geist et Lambin ont largement contribué à cette lecture systémique en montrant que les trajectoires de désertification s'expliquent généralement par la combinaison de plusieurs catégories de facteurs (Geist & Lambin, 2004) :

- Les causes dites immédiates regroupent principalement l'extension des terres cultivées, le surpâturage, le développement des infrastructures et le déboisement (Geist & Lambin, 2004) ;
- En amont de ces processus se trouvent des facteurs plus profonds, parmi lesquels figurent la croissance démographique, les politiques publiques, les régimes fonciers, les mécanismes de marché, la pauvreté, l'intégration économique ainsi que diverses influences exercées à distance (Geist & Lambin, 2004).

Cette interprétation est confortée par les évaluations de l'IPCC. Dans un contexte de changement climatique, l'institution identifie en effet plusieurs moteurs anthropiques majeurs de la désertification, notamment l'expansion des surfaces agricoles, l'adoption de pratiques de gestion non durables, l'intensification des pressions exercées sur les terres et la surexploitation des ressources en eau. Ces différents facteurs n'agissent pas isolément ; ils se renforcent mutuellement et accentuent la vulnérabilité des milieux déjà soumis à des contraintes climatiques importantes (Geist & Lambin, 2004 ; IPCC, 2019).

En Algérie, l'analyse de ces mécanismes ne peut être dissociée de leur profondeur historique. Pendant longtemps, les hautes plaines steppiques ont été structurées par des systèmes pastoraux mobiles, fondés sur le nomadisme et la transhumance. Cette mobilité permettait une adaptation relativement efficace à la forte variabilité spatiale et temporelle des ressources fourragères. Au fil des décennies, cet équilibre s'est progressivement transformé sous l'effet de plusieurs évolutions concomitantes : la sédentarisation des populations pastorales, l'augmentation de la population, les mutations des régimes fonciers, l'extension des agglomérations, la motorisation des déplacements, les changements intervenus dans les politiques d'aménagement ainsi qu'une pression de plus en plus forte sur les parcours. Hadeid a mis en évidence les dimensions historiques, économiques et sociales de cette rupture dans les

hautes plaines occidentales. De leur côté, Boussaïd et Schmitz ont montré que la sédentarisation des éleveurs, associée à la privatisation foncière, avait profondément modifié les relations entre les sociétés et le géosystème steppique. Plus récemment, Haichour, Nedjimi et Benabdeli ont rappelé que la steppe algérienne demeure confrontée à une tension permanente entre l'intensification des pressions anthropiques et les exigences de sa préservation à long terme (Hadeid, 2008 ; Boussaïd & Schmitz, 2022 ; Haichour et *al.*, 2023).

Parmi les facteurs d'origine humaine les plus fréquemment évoqués figure le **surpâturage**. Ses effets dépassent largement la seule consommation de la ressource fourragère. Il entraîne une diminution du recouvrement végétal, favorise les espèces les moins appréciées ou les plus résistantes au piétinement, simplifie la composition floristique, augmente la proportion de sol nu, réduit les stocks de matière organique et accélère les processus d'érosion. Les recherches conduites par Martínez-Valderrama et ses collaborateurs dans les steppes algériennes montrent que de nombreux parcours sont engagés dans une dynamique de dégradation liée à une surcharge pastorale, phénomène encore aggravé par des modalités de gestion inadaptées. Cette analyse conduit à une conclusion essentielle : la désertification ne résulte pas uniquement d'un effectif animal trop élevé. Elle traduit avant tout un déséquilibre entre la charge pastorale, la productivité effective des milieux, l'organisation économique des systèmes d'élevage et les politiques publiques qui les encadrent (Martínez-Valderrama et *al.*, 2018).

La **mise en culture de secteurs steppiques insuffisamment adaptés** constitue un autre processus majeur de dégradation. Les observations réalisées dans la région de Laghouat en offrent une illustration particulièrement convaincante. Houyou et *al.* (2016) ont montré que la conversion de formations steppiques en céréaliculture pluviale, dans un contexte marqué par de faibles précipitations, des sols sableux et une couverture végétale limitée, s'accompagnait d'une très forte sensibilité à l'érosion éolienne. Les pertes de sol mesurées dépassaient largement les seuils généralement admis comme tolérables, ce qui a conduit les auteurs à qualifier ce mode d'exploitation de non durable. D'un point de vue biogéographique, cet exemple met clairement en évidence les risques associés au transfert de modèles agricoles vers des milieux dont les contraintes climatiques et édaphiques ne permettent pas le maintien d'un couvert végétal suffisamment protecteur (Houyou et *al.*, 2016).

L'influence des activités humaines apparaît également à travers les **transformations progressives de la composition et de la structure des paysages végétaux**. Le suivi de longue durée réalisé par Slimani, Aidoud et Rozé sur un parcours steppique de Rogassa montre qu'une simple mise en défens ne suffit pas nécessairement à inverser les processus régressifs lorsque le contexte environnemental demeure globalement défavorable. Entre 1976 et 2006, les auteurs ont

observé une diminution du couvert végétal pérenne ainsi qu'une baisse de la matière organique des sols. Au terme de cette évolution, *Stipa tenacissima*, espèce emblématique des steppes nord-africaines, avait disparu de la zone étudiée. Ce résultat souligne le caractère profondément systémique de la désertification. Les effets du pâturage, de la sécheresse, des propriétés du sol et des dégradations héritées s'y combinent étroitement, sans qu'aucun de ces facteurs puisse être considéré isolément. Les recherches plus récentes menées dans le Hodna méridional conduisent à des conclusions comparables, en mettant en évidence l'action conjointe des déficits pluviométriques et des pressions anthropiques dans la dégradation des parcours arides (Slimani et al., 2010 ; Sahnouni & Abdesselam, 2023).

L'action humaine ne remplace donc pas l'influence du climat ; elle en modifie l'expression, l'intensité et parfois même la rapidité. Dans les environnements arides et semi-arides, les activités humaines agissent fréquemment comme un **facteur amplificateur** des contraintes climatiques. Elles fragilisent les couverts végétaux, accélèrent les processus d'érosion, perturbent les équilibres hydriques et réduisent progressivement la capacité des écosystèmes à retrouver leur fonctionnement initial après une perturbation. Toutefois, les sociétés peuvent également jouer un rôle inverse lorsque les modes de gestion privilégient la durabilité. La restauration des parcours, l'organisation raisonnée du repos pastoral, la lutte contre l'érosion ou encore l'adaptation des systèmes de production constituent autant de leviers susceptibles de renforcer la résilience des milieux. L'histoire des déserts doit ainsi être envisagée comme une histoire commune du climat et des sociétés. Comprendre les paysages désertiques revient à analyser simultanément les fluctuations anciennes de la mousson, les épisodes de sécheresse, les héritages paléoécologiques et les choix contemporains qui orientent l'occupation, l'exploitation et la gestion des territoires (Geist & Lambin, 2004 ; IPCC, 2019 ; UNCCD, 2024).

#### Encadré 4 — Sahara vert et variabilité paléoécologique des paysages sahariens

Les reconstitutions paléoenvironnementales montrent que le Sahara a connu d'importantes fluctuations au cours de l'Holocène. Durant la Période humide africaine, des conditions plus humides ont favorisé la présence de lacs, l'extension des réseaux hydrographiques et le développement de formations végétales de type savane, steppe et prairie dans des régions aujourd'hui hyperarides. Ces connaissances reposent sur l'analyse de plusieurs archives paléoenvironnementales, notamment les sédiments lacustres, les pollens fossiles, les diatomées et les analyses isotopiques. Elles mettent en évidence le caractère dynamique des paysages sahariens et les déplacements des limites écologiques au fil des variations climatiques.

En Algérie, cet héritage est encore perceptible à travers les paléodrainages, les dépôts alluviaux, les piémonts et les gradients de végétation observés dans les marges présahariennes.

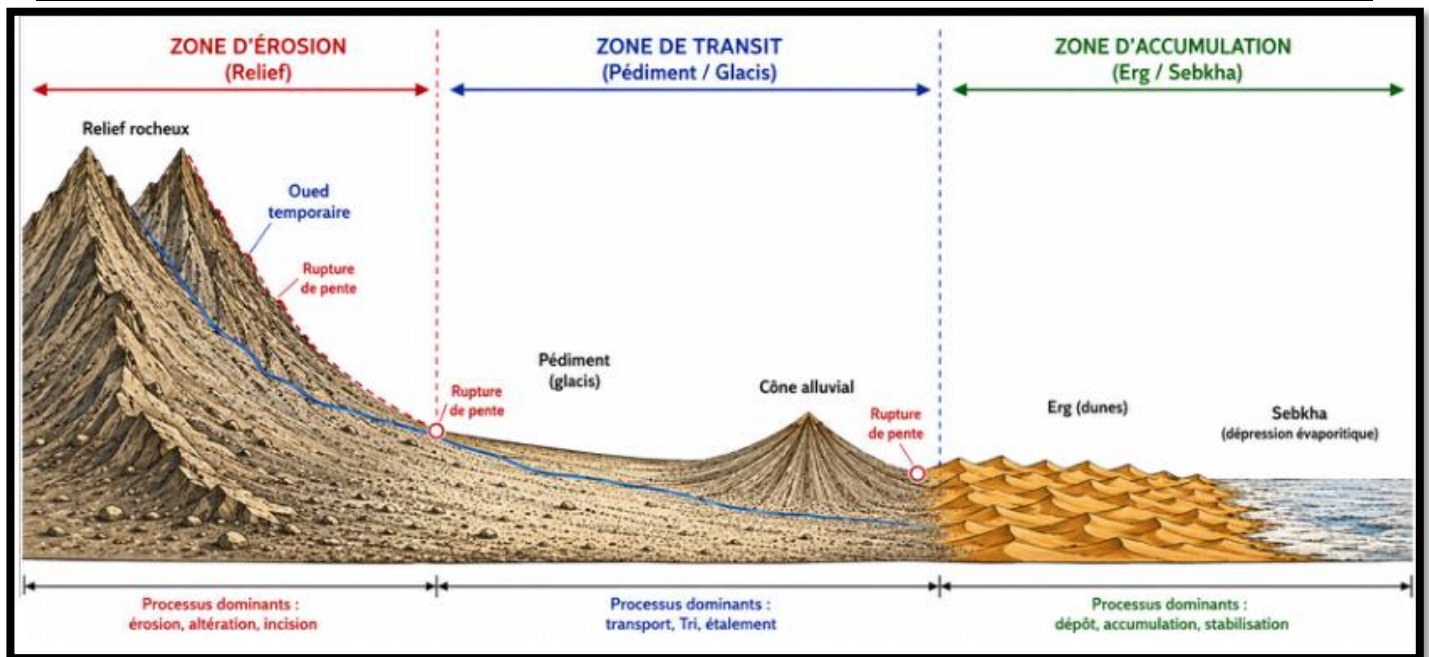
La désertification actuelle ne constitue donc pas une simple répétition des changements climatiques passés ; elle résulte de l'interaction entre ces héritages environnementaux, le réchauffement climatique contemporain et les pressions exercées par les activités humaines.

**B. 2ème Partie : Les modèles (Géomorphologie des milieux secs)**

L'étude des modèles géomorphologiques constitue un volet essentiel de la biogéographie des milieux arides et semi-arides. En effet, les formes du relief y exercent une influence déterminante sur la circulation de l'eau, la redistribution des sédiments et des sels, la répartition des organismes vivants, la dynamique de la végétation ainsi que les modalités d'occupation biologique de l'espace. Les variations parfois très faibles de la topographie suffisent à créer des contrastes environnementaux marqués, à l'origine d'une forte hétérogénéité des habitats et des peuplements végétaux. Cette diversité s'observe notamment dans les oueds, les piémonts, les glacis et les dépressions endoréiques.

La morphogenèse de ces environnements résulte de l'action conjointe de plusieurs processus qui interagissent en permanence : l'altération mécanique et saline des roches, des épisodes de ruissellement peu fréquents mais souvent très énergétiques, le transport éolien, la déflation, l'abrasion, la formation d'encroûtements superficiels ainsi que la redistribution des particules fines. Les paysages désertiques apparaissent ainsi comme de véritables mosaïques géomorphologiques où se combinent les effets du substrat, de la pente, du vent, des écoulements intermittents et des héritages paléoclimatiques. Ils sont donc loin de correspondre à des espaces uniformément « secs » ou homogènes (Parsons & Abrahams, 2009 ; Lancaster, 2023 ; Tooth, 2000).

À l'échelle des régions arides, ces différentes formes s'organisent généralement selon une succession spatiale relativement caractéristique, qui s'étend des reliefs sources jusqu'aux secteurs d'accumulation sableuse. Cette organisation fonctionnelle, présentée dans la figure 08, met en évidence le rôle majeur du gradient amont-aval dans la répartition des processus géomorphologiques, des transferts sédimentaires et des zones de dépôt.



**Figure 08.** Schéma simplifié d'une organisation géomorphologique typique en milieu aride : relief rocheux, pédiment, cône alluvial, oued et erg (King, 1949 ; Tooth, 2000 ; Lancaster, 2023).

### 1. Les modèles rocheux

Les modèles rocheux regroupent l'ensemble des formes du relief façonnées directement dans la roche en place ou dans des manteaux détritiques peu épais sous l'action conjointe des processus d'altération et d'érosion. Dans les régions arides, ces formes occupent une place prépondérante, car la faible densité du couvert végétal et la discontinuité des sols laissent fréquemment le substrat rocheux à découvert. Leur morphologie dépend de nombreux facteurs qui agissent simultanément : la nature de la roche, son degré de fracturation, l'orientation des diaclases, les amplitudes thermiques journalières, la circulation des sels ainsi que les écoulements en nappe générés par des pluies brèves mais souvent très intenses. L'image classique du désert comme un milieu presque exclusivement façonné par le vent est aujourd'hui largement dépassée. Les recherches montrent que l'évolution des piémonts et des versants rocheux résulte également de l'action du ruissellement diffus, des *sheetfloods* et du recul progressif des fronts de versant (King, 1949 ; Parsons & Abrahams, 2009).

Parmi les principales formes associées à ces paysages figurent les **pédiments** et les **glacis rocheux** :

- Le **pédiment** est une surface rocheuse faiblement inclinée qui se développe au pied des reliefs. Il constitue une zone de transition entre les écoulements concentrés provenant des versants et les écoulements en nappe qui caractérisent les bas-piémonts. Dès les travaux fondateurs de

King, cette forme a été reconnue comme l'un des éléments structurants des paysages désertiques, car elle traduit une organisation particulière du ruissellement et du transport des matériaux solides dans des contextes où les précipitations sont rares et très irrégulières (King, 1949). À l'échelle des piémonts arides, les pédiments s'articulent fréquemment avec des glacis d'accumulation, des cônes de déjection et des bajadas, assurant une transition progressive entre les reliefs montagneux et les dépressions internes. Leur intérêt dépasse le seul domaine géomorphologique. En contrôlant l'épaisseur des sols, la circulation des eaux superficielles et la localisation des couloirs de végétation diffuse, ils jouent également un rôle majeur dans l'organisation des écosystèmes (King, 1949 ; Tooth, 2000).

- Une autre catégorie importante est représentée par les **reliefs résiduels**, parmi lesquels figurent les inselbergs, les dômes rocheux et les reliefs ruiniformes. Les inselbergs correspondent à des reliefs isolés qui dominent les surfaces d'aplanissement ou les piémonts. Leur formation résulte d'une érosion différentielle de longue durée, étroitement liée à la résistance des roches, à leur structure interne ainsi qu'aux processus successifs d'altération profonde puis de décapage. L'exemple du Gross Spitzkoppe, dans le désert du Namib, montre que ces reliefs demeurent des formes en évolution. Les travaux de Matmon et *al.* (2013) mettent en évidence un abaissement relativement lent des surfaces sommitales, tandis que les parois connaissent un recul plus rapide, traduisant une évolution par retrait latéral des versants. Les auteurs soulignent également un aspect essentiel du point de vue biogéographique : le ruissellement issu des pentes rocheuses concentre l'eau au pied des inselbergs, créant localement des conditions plus favorables au développement de la vie grâce à une meilleure disponibilité hydrique et à une redistribution localisée des sédiments (Matmon et *al.*, 2013).

Les déserts rocheux présentent également plusieurs formes spectaculaires liées à l'érosion éolienne :

- ✓ Les **yardangs** comptent parmi les plus caractéristiques. Ding et *al.* (2020) les décrivent comme des crêtes allongées séparées par des couloirs, sculptées dans des matériaux cohésifs sous l'action combinée de la déflation et de l'abrasion éolienne. Leur silhouette est généralement fuselée, souvent comparée à un « dos de baleine ». Ces reliefs se développent préférentiellement dans les régions arides à hyperarides, en particulier sur d'anciens dépôts lacustres, fluviolacustres ou sur des substrats tendres sensibles à l'érosion différentielle. Les yardangs illustrent ainsi le fait que les paysages désertiques résultent d'une interaction étroite entre les héritages sédimentaires, la circulation atmosphérique et l'action sélective du vent. Ils ne peuvent donc être interprétés comme de simples formes aérodynamiques indépendantes de leur contexte géologique (Ding et *al.*, 2020).
- ✓ À une échelle plus réduite, les **tafoni** et les autres formes d'altération alvéolaire témoignent de

l'importance de l'altération saline dans les milieux secs. Selon French et Guglielmin, les tafoni correspondent à des cavités présentant une ouverture arquée, des parois concaves et des bords souvent en surplomb. Ils peuvent affecter différentes lithologies, mais sont particulièrement fréquents dans les roches grenues. Leur développement repose sur plusieurs conditions récurrentes : la présence de sels, un contexte aride et une forte évaporation ou sublimation. À ces facteurs peuvent s'ajouter, selon les situations, les contrastes thermiques et certaines influences biologiques. D'un point de vue pédagogique, ces formes illustrent parfaitement que l'altération des roches en milieu aride ne relève pas uniquement de la thermoclastie. Les processus de dissolution, de migration puis de cristallisation des sels jouent un rôle déterminant dans la désagrégation des matériaux rocheux et dans la formation des microreliefs désertiques (French & Guglielmin, 2021).

Sur le plan écologique, les modèles rocheux génèrent une forte hétérogénéité à l'échelle locale. Les dalles rocheuses, les fractures, les replats structuraux, les piémonts caillouteux ou encore les fonds d'oueds rocheux concentrent, redistribuent ou évacuent l'eau selon des modalités très contrastées. Dans le Sahara central algérien, Benhouhou et *al.* (2003) ont montré que les différents types d'oueds du Tassili n'Ajjer — rocheux, graveleux, sablo-graveleux et sableux — abritent des communautés végétales distinctes. Ces observations confirment que la géomorphologie exerce une influence directe sur la composition floristique et sur l'organisation des habitats. Les modèles rocheux ne constituent donc pas uniquement des formes minérales du paysage : ils participent pleinement à la différenciation écologique, offrent des refuges à la biodiversité et orientent la circulation de l'eau dans les milieux arides (Benhouhou et *al.*, 2003 ; Matmon et *al.*, 2013).

## 2. Les modèles dunaires

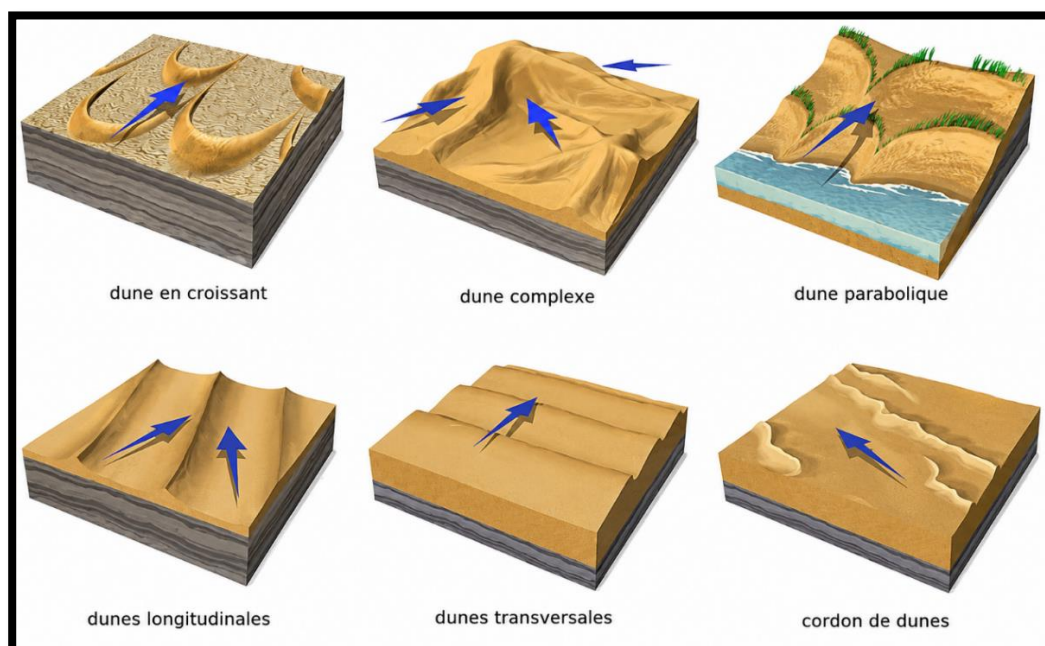
Les modèles dunaires correspondent aux formes du relief édifiées par l'accumulation de sable sous l'action du vent. Leur mise en place nécessite la combinaison de plusieurs conditions : l'existence d'un stock sableux susceptible d'être mobilisé, des vents suffisamment énergétiques pour mettre les grains en mouvement par saltation, un espace favorable à leur accumulation et une faible influence des facteurs de stabilisation, tels que l'humidité superficielle ou la couverture végétale. Les recherches récentes montrent que les champs de dunes fonctionnent comme des **systèmes auto-organisés** dont l'évolution demeure étroitement contrôlée par les conditions environnementales. Les travaux de Kocurek et Ewing ont notamment montré que le régime des vents détermine les principaux types de formes dunaires, tandis que les interactions entre les dunes contribuent progressivement à l'organisation spatiale de l'ensemble du champ. Par la suite, Ewing et Kocurek ont précisé que la géométrie des zones sources, l'importance de l'alimentation sédimentaire et le contexte géomorphologique exercent également une influence déterminante

sur la morphologie finale des champs dunaires (Kocurek & Ewing, 2005 ; Ewing & Kocurek, 2010 ; Lancaster, 2023).

La classification morphologique des dunes repose principalement sur leur forme, leur orientation et les conditions de vent ainsi que d'alimentation en sable qui président à leur développement :

- ✓ Les **dunes en croissant**, ou **barkhanes**, se forment généralement lorsque l'apport sableux est limité et que les vents soufflent de manière relativement unidirectionnelle.
- ✓ Les **dunes transversales** apparaissent sous l'influence de vents dominants réguliers, mais dans des contextes où la disponibilité en sable est plus importante.
- ✓ Les **dunes linéaires** ou **longitudinales** sont généralement associées à des régimes de vents bidirectionnels ou obliques.
- ✓ Les **dunes étoilées** se développent dans des environnements soumis à des vents multidirectionnels accompagnés d'une forte accumulation de sable.
- ✓ Les **dunes paraboliques**, enfin, sont fortement conditionnées par la présence de la végétation, qui participe à leur stabilisation partielle.

Selon Lancaster, cette diversité morphologique (figure 09) résulte principalement de la variabilité directionnelle du transport éolien, modulée par la quantité de sable disponible et par le degré de couverture végétale. Plus récemment, Courrech du Pont et *al.* (2024) soulignent que la compréhension des paysages dunaires nécessite d'associer les approches descriptives classiques à l'analyse morphodynamique et aux principes de la mécanique des fluides (Lancaster, 2023 ; Courrech du Pont et *al.*, 2024).



**Figure 09.** Principaux types morphologiques de dunes éoliennes (Walker, 1992)

Du point de vue de leur fonctionnement, les dunes constituent des formes mobiles dont l'évolution résulte d'un équilibre permanent entre plusieurs processus. L'érosion affecte la face exposée au vent, les grains sont transportés par saltation et reptation, puis se déposent sur le versant sous le vent, où ils provoquent fréquemment de petites avalanches. Cette mobilité n'est cependant ni constante ni homogène. Elle dépend des variations du régime des vents, de la disponibilité des sédiments, de la topographie, de l'humidité du substrat et du développement de la végétation. Ainsi, un même désert peut réunir des dunes actives, des dunes semi-fixées et des dunes héritées de périodes climatiques plus anciennes, aujourd'hui stabilisées. Cette distinction est essentielle en biogéographie, puisque le degré de mobilité des sables contrôle directement la continuité des habitats, l'installation des espèces psammophiles, la dynamique des nebkas ainsi que la possibilité d'implantation de formations végétales plus durables (Ewing & Kocurek, 2010 ; Lancaster, 2023 ; Miri et al., 2017).

Le Sahara algérien offre plusieurs exemples remarquables de cette diversité morphologique à grande échelle. Dans le **Grand Erg Oriental**, Telbisz et Keszler distinguent quatre grands ensembles : de vastes dunes linéaires ramifiées, des complexes associant dunes étoilées et dômes largement espacés, des réseaux dominés par des dunes en croissant, ainsi que de grandes dunes étoilées très rapprochées. Dans la partie méridionale de l'erg, les plus hautes dunes atteignent en moyenne 90 à 100 mètres, traduisant une accumulation sableuse particulièrement importante. Les auteurs montrent également que certains motifs dunaires reflètent fidèlement le régime de vent actuel, tandis que d'autres conservent l'empreinte de circulations atmosphériques plus anciennes, mettant ainsi en évidence l'intérêt paléoenvironnemental des grands ergs sahariens (Telbisz & Keszler, 2018).

Au-delà de leur intérêt géomorphologique, les modèles dunaires présentent une forte dimension écologique et appliquée. Les secteurs où les sables demeurent très mobiles limitent fortement l'installation de la végétation, alors que les dunes stabilisées ou semi-stabilisées peuvent accueillir des communautés végétales plus diversifiées, composées notamment d'espèces ligneuses et herbacées fixatrices. Les transitions entre dunes actives, interdunes et marges dunaires constituent ainsi de véritables gradients écologiques. Dans les espaces habités ou mis en valeur, la migration des dunes représente également une contrainte majeure, susceptible d'affecter les routes, les palmeraies, les périmètres irrigués et les zones d'habitat. Cette réalité explique le recours croissant à la télédétection et au suivi morphométrique dans les stratégies d'aménagement et de gestion des régions sahariennes (Telbisz & Keszler, 2018 ; Miri et al., 2017).

biogéographiques entre les modèles rocheux et les modèles dunaires, le tableau 04 présente une comparaison synthétique des caractéristiques essentielles de ces deux grands ensembles géomorphologiques des milieux désertiques.

**Tableau 04.** Comparaison synthétique des principaux modèles des régions sèches

| Dimension comparée             | Modèles rocheux                                                            | Modèles dunaires                                                                       |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Substrat dominant</b>       | Roche en place, dépôts grossiers, piémonts                                 | Sables meubles mobilisables par le vent                                                |
| <b>Processus majeurs</b>       | Altération mécanique et saline, ruissellement en nappe, recul des versants | Saltation, reptation, avalanche de face d'abri, réorganisation par le régime des vents |
| <b>Formes typiques</b>         | Pédiments, glacis, inselbergs, yardangs, tafoni                            | Barkhanes, dunes transversales, linéaires, étoilées, paraboliques                      |
| <b>Effets biogéographiques</b> | Canalisation de l'eau et habitats de piémont                               | Mobilité ou stabilisation des sables, gradients entre dunes et interdunes              |
| <b>Enjeux appliqués</b>        | Érosion, ruissellement concentré, stabilité des versants                   | Ensablement des routes, palmeraies et périmètres irrigués ; fixation dunaire           |

(Parsons & Abrahams, 2009 ; Lancaster, 2023 ; Tooth, 2000).

### 3. Le réseau hydrographique

Dans les milieux arides et semi-arides, le réseau hydrographique se distingue par un fonctionnement très différent de celui observé dans les régions humides. Les écoulements y sont généralement **discontinus, temporaires** et étroitement liés à des épisodes pluviométriques rares, mais souvent particulièrement intenses. Comme le souligne Stephen Tooth, les rivières des *drylands*, bien que rarement en eau, jouent un rôle fondamental dans le transfert de l'eau, des sédiments et des matières dissoutes. Leur importance géomorphologique est donc considérable, malgré la faible fréquence des écoulements. Les réseaux hydrographiques désertiques se caractérisent avant tout par l'irrégularité de leur fonctionnement, la violence des crues, les pertes importantes par infiltration et la fragmentation longitudinale des chenaux (Tooth, 2000).

Dans ces environnements, les cours d'eau non permanents prennent le plus souvent la forme d'oueds, de chenaux éphémères ou d'écoulements de piémont. Leur lit demeure sec pendant de longues périodes avant d'être parcouru par des crues soudaines capables de remodeler profondément les berges, le chenal et les dépôts alluviaux. À l'échelle des bassins arides, les

perdes d'eau par infiltration dans le sous-sol, la dispersion latérale des écoulements sur les cônes alluviaux et la recharge des nappes constituent des processus essentiels du fonctionnement hydrologique. L'oued Mekerra, dans le nord-ouest de l'Algérie, illustre bien cette dynamique. Les travaux d'Atallah et *al.* (2016) rappellent que ces oueds représentent une ressource indispensable pour les régions semi-arides, tout en constituant une source de risque en raison des crues éclair. Les auteurs montrent également que les caractéristiques géomorphologiques et lithologiques du bassin versant contribuent à atténuer certains pics de crue, tandis que les infiltrations dans le lit participent efficacement à l'amortissement des hydrogrammes (Atallah et *al.*, 2016).

Une autre caractéristique majeure des régions sèches réside dans l'importance des **bassins endoréiques**, c'est-à-dire des bassins fermés dont les eaux n'atteignent jamais l'océan. Selon Yapiyev et *al.* (2017), ces systèmes, largement répandus dans les milieux arides et semi-arides, convergent vers des lacs terminaux, des plaines d'épandage, des *playas*, des chotts ou des sebkhas, où les eaux disparaissent progressivement sous l'effet de l'évaporation, de l'infiltration ou de la transpiration. Cette organisation favorise le développement de dépressions salées, de sols gypseux ou halomorphes et d'écosystèmes hydrographiques particulièrement sensibles aux fluctuations climatiques. En Afrique du Nord, et plus particulièrement en Algérie, le fonctionnement endoréique constitue l'un des principaux facteurs d'organisation des Hautes Plaines steppiques et des bassins internes du Sahara (Yapiyev et *al.*, 2017).

Le Bas-Sahara algérien offre une illustration particulièrement intéressante de cette diversité hydrographique. Les travaux de Ballais (2010), montrent que certaines représentations anciennes d'« **oueds mythiques** » ne résistent pas aux analyses géomorphologiques actuelles. L'auteur distingue trois grandes catégories de réseaux :

- Des **oueds fonctionnels** alimentés principalement par les reliefs de l'Atlas saharien ;
- Des **oueds fossiles** récemment mis en évidence dans plusieurs secteurs, notamment dans la région du Souf ;
- Enfin **les écoulements artificialisés** ou **devenus permanents** sous l'effet des rejets provenant des oasis et des agglomérations.

Cette distinction rappelle qu'un réseau hydrographique désertique ne peut être interprété à partir des seules cartes hydrographiques contemporaines. Son analyse doit également intégrer les paléodrainages, les chenaux fossiles, les écoulements modifiés par les activités humaines ainsi que les transformations hydrauliques récentes (Ballais, 2010).

Au-delà de leur fonctionnement hydrologique, les oueds et les chenaux temporaires occupent une place essentielle dans l'organisation écologique des milieux arides. Bien que leurs écoulements soient intermittents, ils concentrent l'humidité, les sédiments fins, la matière organique et une part importante de la biodiversité régionale. Les recherches de Stromberg *et al.* (2017) montrent que les ripisylves associées aux chenaux éphémères peuvent présenter une biomasse ligneuse plus importante ainsi qu'une richesse spécifique supérieure à celles des milieux environnants. Cette relation est également observée dans le Sahara algérien. Benhouhou *et al.* (2003) ont mis en évidence que les différents types d'oueds du Tassili n'Ajjer correspondent à des habitats distincts, chacun étant associé à des communautés végétales particulières. Dans les paysages désertiques, le réseau hydrographique ne remplit donc pas uniquement une fonction de drainage : il constitue également un ensemble de **corridors écologiques**, de refuges biologiques et de zones privilégiées de redistribution de l'eau, indispensables au maintien de la végétation (Stromberg *et al.*, 2017 ; Benhouhou *et al.*, 2003).

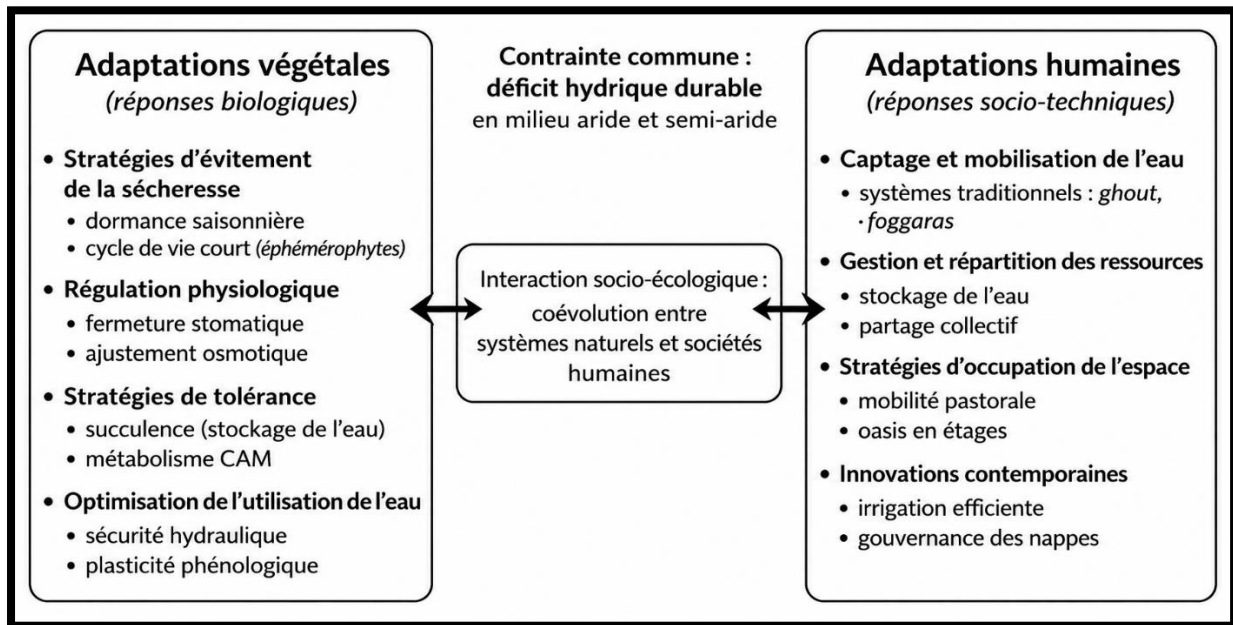
#### Encadré 5 — Idée clé pour le terrain

Dans les milieux arides, chaque unité géomorphologique possède des caractéristiques hydrologiques, édaphiques et topographiques qui lui sont propres. Les oueds, les piémonts graveleux, les glacis, les rebords dunaires ou les dépressions salées offrent ainsi des conditions écologiques contrastées, expliquant la répartition de la végétation et des usages humains. L'identification de ces unités morpho-écologiques constitue donc une étape essentielle de l'observation de terrain et permet de mieux comprendre l'organisation spatiale des paysages désertiques.

### C. 3ème Partie : Adaptation du vivant

Dans les milieux arides et semi-arides, la persistance du vivant repose avant tout sur sa capacité d'adaptation. Les faibles précipitations, leur forte variabilité d'une année à l'autre, l'intensité de l'évapotranspiration, les amplitudes thermiques quotidiennes et saisonnières, la faible teneur en matière organique des sols ainsi que la discontinuité des écoulements de surface imposent un ensemble de contraintes particulièrement exigeantes. Dans un tel contexte, survivre ne consiste pas uniquement à résister au déficit hydrique. Les végétaux mobilisent des réponses morphologiques, physiologiques, biochimiques et phénologiques étroitement coordonnées, tandis que les sociétés humaines développent, depuis longtemps, des techniques de captage, de stockage, de répartition et d'économie de l'eau associées à des formes d'organisation adaptées à ces environnements. Cette double approche est fondamentale en biogéographie, car les paysages arides actuels, notamment en Algérie, résultent d'une longue coévolution entre les contraintes

climatiques, les réponses du couvert végétal et les innovations mises en œuvre par les sociétés humaines (Kooyers, 2015 ; Haghpanah *et al.*, 2024 ; Idda *et al.*, 2021).



**Figure 10.** Comparaison synthétique des réponses adaptatives des plantes et des sociétés humaines au déficit hydrique en milieux arides et semi-arides d'après Ward (2016)

### 1. Adaptation physiologique (Végétation)

L'adaptation physiologique des plantes aux conditions d'aridité s'organise traditionnellement autour de trois grandes stratégies fonctionnelles (tableau 05) :

- ✓ L'échappement à la sécheresse ;
  - ✓ L'évitement de la déshydratation ;
  - ✓ La tolérance au déficit hydrique.
- **L'échappement** correspond à un cycle biologique particulièrement rapide, permettant aux plantes d'assurer leur croissance, leur floraison et leur fructification durant la courte période favorable qui suit les précipitations. Cette stratégie caractérise notamment de nombreux thérophytes des régions désertiques et steppiques.
- À l'inverse, **l'évitement** regroupe les mécanismes qui réduisent les pertes en eau et retardent la déshydratation des tissus,
- Quant à **la tolérance**, elle traduit l'aptitude des végétaux à maintenir une partie de leur activité métabolique malgré une diminution importante du potentiel hydrique. Cette classification demeure une référence en écophysiologie végétale, car elle permet de comprendre les différences fonctionnelles observées entre les annuelles éphémères, les sous-arbrisseaux steppiques, les ligneux sclérophylles méditerranéens et les espèces succulentes des milieux les plus secs.

(Kooyers, 2015 ; Nour et *al.*, 2024).

**Tableau 05.** Grandes stratégies physiologiques de réponse des végétaux à la sécheresse

| Registre adaptatif        | Principe fonctionnel                                              | Exemples de traits associés                                                     | Portée biogéographique                                                              |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Échappement</b>        | Boucler le cycle biologique durant la fenêtre humide              | Thérophytes, germination rapide, floraison précoce                              | Important dans les déserts et steppes à forte variabilité interannuelle             |
| <b>Évitement</b>          | Limiter la déshydratation                                         | Fermeture stomatique, feuilles réduites, cuticule épaisse, enracinement profond | Dominant chez de nombreux ligneux xérophiles et sclérophylls                        |
| <b>Tolérance</b>          | Maintenir certaines fonctions malgré un faible potentiel hydrique | Ajustement osmotique, systèmes antioxydants, sécurité hydraulique               | Crucial chez les pérennes des milieux semi-arides                                   |
| <b>Voies spécialisées</b> | Améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau                     | Succulence, CAM, parfois C4 selon les taxons                                    | Particulièrement visibles dans certains milieux très chauds et saisonnièrement secs |

(Kooyers, 2015 ; Flexas et *al.*, (2014) ; Haghpanah et *al.*, (2024) ; Gilman & Edwards, 2020).

Parmi les premières réponses déclenchées face au déficit hydrique figure la **régulation stomatique**. Une fermeture partielle, voire anticipée, des stomates limite les pertes d'eau par transpiration et protège les tissus contre une déshydratation excessive. Cette réponse s'accompagne toutefois d'une réduction de l'entrée du dioxyde de carbone, ce qui freine temporairement l'activité photosynthétique. Les synthèses récentes montrent que ce mécanisme s'intègre dans un ensemble plus large de réponses physiologiques coordonnées comprenant :

- L'Ajustement osmotique par accumulation de solutés compatibles,
- L'Activation de systèmes antioxydants pour limiter les dommages oxydatifs,
- La Synthèse de protéines protectrices telles que les déhydrins, ainsi qu'une régulation hormonale largement dominée par l'acide abscissique.

Dans les flores désertiques, ces processus sont complétés par une organisation hydraulique spécifique des racines, des tiges et des feuilles, qui sécurise le transport de l'eau tout en réduisant le risque d'embolie du xylème lors des épisodes de sécheresse intense (Haghpanah et *al.*, 2024 ; Takahashi et *al.*, 2020 ; Li et *al.*, 2018).

L'**ajustement osmotique** occupe une place essentielle dans cet ensemble de mécanismes. En abaissant le potentiel osmotique des cellules, il permet aux tissus de conserver leur turgescence alors même que la disponibilité en eau atteint des niveaux incompatibles avec la survie d'espèces mésophiles. Cette capacité explique la persistance, et parfois le maintien d'une activité photosynthétique résiduelle, chez de nombreuses plantes xérophytes à la fin de la saison sèche. Parallèlement, la répartition de la biomasse évolue souvent en faveur du système racinaire. L'augmentation de la biomasse souterraine, ou plus précisément du rapport racines/parties aériennes, améliore l'accès à des réserves en eau plus profondes ou plus stables dans le temps. Dans les écosystèmes méditerranéens soumis à une longue sécheresse estivale, ces ajustements jouent un rôle déterminant dans la survie des ligneux sclérophylles et des espèces pérennes des steppes (Nour et *al.*, 2024 ; Haghpanah et *al.*, 2024 ; Li et *al.*, 2018).

Les formations végétales méditerranéennes et pré-steppiques illustrent particulièrement bien ces stratégies d'adaptation. Selon la synthèse de Flexas et *al.* (2014), la photosynthèse y est principalement limitée par deux périodes critiques : les basses températures hivernales et, plus encore, la sécheresse estivale, dont la durée varie généralement d'un à six mois selon les conditions locales. Les auteurs montrent également que les espèces sclérophylles présentent, en règle générale, une conductance stomatique relativement faible mais une efficacité intrinsèque élevée dans l'utilisation de l'eau. Cette combinaison constitue un avantage adaptatif majeur dans les milieux où la demande évaporative est importante. Chez des espèces telles que *Quercus ilex*, *Pistacia lentiscus* ou *Pinus halepensis*, la baisse estivale de l'activité photosynthétique ne traduit pas un arrêt complet du fonctionnement physiologique ; elle reflète plutôt une réorganisation progressive des échanges gazeux, des mécanismes de photoprotection et du fonctionnement hydrique (Flexas et *al.*, 2014).

Les travaux de Forner, Valladares et Aranda (2018), confirment cette diversité des réponses adaptatives en montrant que les espèces méditerranéennes se répartissent selon un continuum allant des stratégies d'évitement à celles de tolérance. Lorsque la sécheresse devient sévère, les espèces qualifiées d'« évitantes » réduisent fortement leur assimilation du carbone par une fermeture stomatique rapide. À l'opposé, des espèces plus tolérantes, comme *Quercus ilex*, conservent davantage leur turgescence foliaire grâce à une modulation plus efficace de leur potentiel osmotique durant l'été. Cette plasticité saisonnière conditionne largement le maintien des formations à chêne vert, des pinèdes à pin d'Alep, des peuplements à pistachier lentisque ainsi que de nombreux matorrals établis sur des substrats pauvres et fortement desséchants (Forner et *al.*, 2018).

Une autre stratégie adaptative particulièrement remarquable repose sur la **photosynthèse**

**CAM** (*Crassulacean Acid Metabolism*). Chez de nombreuses plantes succulentes, ce métabolisme permet de fixer le CO<sub>2</sub> pendant la nuit, lorsque les stomates peuvent rester ouverts tout en limitant fortement les pertes en eau. Les synthèses récentes soulignent que ce fonctionnement améliore considérablement l'efficacité d'utilisation de l'eau dans les milieux semi-arides, très chauds ou soumis à une sécheresse saisonnière marquée. Il est fréquemment associé à d'autres caractères adaptatifs tels que la succulence des tissus, l'épaississement de la cuticule, la réduction de la surface foliaire ou encore le développement de tiges photosynthétiques. Même si ce métabolisme ne caractérise pas l'ensemble des flores arides, il illustre parfaitement le fait que l'adaptation à la sécheresse ne repose pas uniquement sur une diminution de la transpiration. Elle peut également impliquer une profonde réorganisation du rythme quotidien des échanges entre le carbone et l'eau (Gilman & Edwards, 2020 ; Perron *et al.*, 2024).

En définitive, l'adaptation physiologique des végétaux des régions arides et semi-arides doit être envisagée comme un ensemble cohérent de mécanismes complémentaires. Les caractéristiques foliaires, l'architecture des systèmes racinaires, la régulation stomatique, les ajustements osmotiques, la sécurité hydraulique, les métabolismes photosynthétiques spécialisés ainsi que la plasticité phénologique fonctionnent de manière intégrée plutôt qu'isolée. Leur combinaison varie selon les espèces, les conditions édaphiques, les bioclimats et la durée des périodes de sécheresse, expliquant ainsi la diversité des formations végétales, depuis les steppes herbacées discontinues jusqu'aux matorrals méditerranéens, aux fourrés xérophiles, à la végétation des oueds ou aux communautés strictement désertiques. Pour l'étudiant en biogéographie, l'idée essentielle est que l'aridité ne sélectionne pas une stratégie unique de survie, mais un ensemble de réponses fonctionnelles dont la composition dépend à la fois de l'intensité du stress hydrique et de la prévisibilité des ressources en eau (Kooyers, 2015 ; Flexas *et al.*, 2014 ; Nour *et al.*, 2024).

## 2. Adaptation humaine

Dans les régions arides, l'adaptation des sociétés humaines répond au même objectif fondamental que celle des végétaux : limiter les effets du déficit hydrique et exploiter au mieux les fortes disparités spatiales de la ressource en eau. Toutefois, les réponses mises en œuvre par l'homme relèvent d'une tout autre logique. Elles s'expriment à travers des savoir-faire techniques, des règles collectives, des institutions, mais aussi des choix d'implantation et d'organisation des territoires. Dans le Sahara algérien, les oasis illustrent parfaitement cette capacité d'adaptation. Bien plus que de simples espaces agricoles, elles constituent de véritables systèmes sociohydrauliques, où le captage, la répartition, l'entretien et la transmission de l'eau

obéissent à des règles collectivement établies. Leur histoire montre que la pérennité des établissements humains en milieu hyperaride dépend autant de la maîtrise des ouvrages hydrauliques que des mécanismes sociaux qui encadrent leur fonctionnement et leur gestion (Idda et al., 2021).

### 2.1. Exploitation traditionnelle (problème des nappes fossiles...)

Les techniques traditionnelles de mobilisation de l'eau développées dans le Sahara algérien témoignent d'une remarquable capacité d'adaptation aux contraintes imposées par le désert (tableau 06). Dans la région du Souf, le système des **ghouts** repose sur un principe original : les cultivateurs creusent de larges dépressions dans les dunes afin d'installer les dattiers au plus près de la nappe phréatique, ce qui permet leur alimentation en eau sans recourir au pompage mécanique. La FAO rappelle que cette pratique, attestée depuis le XVe siècle, favorise une agriculture stratifiée (*multilayered*) associant palmiers dattiers, arbres fruitiers et cultures basses. Elle contribue également au maintien d'une biodiversité locale tout en limitant les prélèvements énergétiques. Cette forme d'agriculture montre qu'en milieu aride, l'adaptation ne consiste pas nécessairement à augmenter les volumes d'eau prélevés ; elle peut aussi reposer sur une meilleure adéquation entre le système de culture et la disponibilité naturelle de la ressource. Une telle organisation n'est possible que grâce à une connaissance approfondie du comportement des sables, des vents et des fluctuations de la nappe phréatique (Mebrouk et al., 2014).

À côté des ghouts, les **foggaras** constituent l'autre grande innovation hydraulique traditionnelle du Sahara (tableau 06). Il s'agit de galeries souterraines faiblement inclinées, jalonnées de puits d'aération et d'entretien, qui captent la partie supérieure de la nappe et acheminent l'eau jusqu'aux jardins oasiens uniquement sous l'effet de la gravité. Les recherches consacrées aux régions du Touat, du Gourara et du Tidikelt montrent que la foggara dépasse largement le simple statut d'ouvrage hydraulique. Elle s'inscrit dans un véritable système de gouvernance fondé sur la répartition des droits d'eau, l'entretien collectif des infrastructures et une gestion communautaire de la ressource. Idda et al. (2021) soulignent d'ailleurs que les foggaras encore en activité ne doivent pas être considérées comme des vestiges d'un passé révolu. Leur maintien s'explique précisément par leur capacité à intégrer des ajustements techniques et organisationnels répondant aux évolutions contemporaines, tout en conservant les principes hérités des pratiques traditionnelles (Idda et al., 2021 ; Bensaada & Remini, 2017).

Aujourd'hui, ces systèmes sont toutefois confrontés à une difficulté majeure : l'exploitation croissante des nappes fossiles. Le **Système Aquifère du Sahara Septentrional**, partagé entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, couvre une superficie supérieure à un million de kilomètres carrés et comprend principalement deux grands réservoirs : le Continental Intercalaire

et le Complexe Terminal. Les documents publiés par l'OSS montrent que ces aquifères renferment des volumes d'eau considérables, mais que leur renouvellement demeure très limité. Ils indiquent également que les prélèvements réalisés par forage sont passés, en quelques décennies, d'environ 0,6 à 2,5 milliards de mètres cubes par an. Cette intensification de l'exploitation s'accompagne de risques croissants d'abaissement du niveau piézométrique, de diminution de l'artésianisme, de salinisation des eaux et de tarissement progressif de certains exutoires. Certes, plusieurs études isotopiques mettent en évidence l'existence de recharges locales ou particulièrement lentes, ce qui conduit à nuancer le qualificatif de « fossile ». Il n'en demeure pas moins que, dans une grande partie du Sahara, ces aquifères se comportent davantage comme un capital hydrique faiblement renouvelable que comme une ressource régulièrement reconstituée à l'échelle annuelle (OSS, 2004 ; Saïdi *et al.*, 2011 ; UN-Water, 2021).

Les tensions deviennent particulièrement visibles lorsque les techniques modernes de forage se superposent aux dispositifs hydrauliques traditionnels. Les travaux de Bensaada et Remini consacrés à la région de Timimoun montrent que l'implantation de forages profonds à proximité d'une foggara peut entraîner un abaissement du niveau piézométrique, provoquant une diminution progressive du débit, voire l'assèchement complet de la galerie drainante. La FAO rapporte une évolution comparable dans les systèmes de ghouts, aujourd'hui fragilisés par des pompages intensifs qui conduisent soit à un rabattement excessif de la nappe, soit à des problèmes de drainage. Ces observations illustrent une réalité essentielle : les systèmes hydrauliques traditionnels ont été conçus pour fonctionner dans un équilibre hydrodynamique relativement stable. Lorsque les prélèvements dépassent les capacités de renouvellement de la ressource ou modifient profondément le fonctionnement des nappes, leur logique gravitaire perd son efficacité et leur pérennité se trouve directement compromise (Bensaada & Remini, 2017).

**Tableau 06.** Comparaison synthétique des principaux systèmes d'adaptation humaine aux milieux arides

| <b>Système / approche</b> | <b>Principe</b>                                                     | <b>Atout principal</b>                         | <b>Limite ou risque</b>                                             |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Ghout                     | Culture au contact de la nappe par cuvettes creusées dans les dunes | Faible besoin énergétique ; microclimat oasien | Sensibilité au rabattement de la nappe et aux problèmes de drainage |
| Foggara                   | Galerie drainante gravitaire avec puits d'entretien                 | Distribution collective et régulière de l'eau  | Vulnérable aux forages profonds et à la baisse piézométrique        |

|                           |                                                             |                                                  |                                                                            |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Pastoralisme mobile       | Ajustement spatial à l'hétérogénéité des ressources         | Flexibilité face à la variabilité climatique     | Affaibli par la sédentarisation et la privatisation foncière               |
| Forages / pivots modernes | Pompage profond et irrigation mécanisée                     | Intensification de la production                 | Surexploitation des aquifères, salinisation, coûts énergétiques croissants |
| Gestion durable intégrée  | Combinaison de sobriété hydrique, innovation et gouvernance | Compatibilité avec la résilience socioécologique | Suppose régulation, données partagées et arbitrages territoriaux           |

(Idda et al. (2021) ; Bensaada & Remini (2017) ; UN-Water (2021).

## 2.2. Tentatives d'aménagement (Nouvelles technologies, épuisement des nappes...)

À partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les pays sahariens ont engagé d'importants programmes d'aménagement destinés à accroître la production agricole grâce à l'exploitation des ressources en eau souterraine, au développement de l'irrigation motorisée et à la mise en culture d'espaces situés en dehors des oasis traditionnelles. En Algérie, cette dynamique s'est traduite par le recours massif aux nappes profondes, l'implantation de systèmes d'irrigation par pivot et l'ouverture de vastes périmètres de « nouvelles mises en valeur » agricoles. Comme le souligne Battesti (2018), ces transformations s'inscrivent dans un modèle d'agribusiness fondé sur l'exploitation intensive des eaux souterraines, souvent à l'écart des organisations oasiennes héritées des pratiques anciennes. Si cette modernisation a permis, dans certains secteurs, d'augmenter sensiblement les productions agricoles, elle a également entraîné de profondes mutations des paysages, des structures foncières, de l'organisation du travail ainsi que des équilibres hydrologiques (Battesti, 2018 ; Kendouci et al., 2013).

L'apport des **nouvelles technologies d'irrigation** ne peut toutefois être apprécié de manière exclusivement positive ou négative. Les systèmes d'irrigation localisée, certaines variantes du goutte-à-goutte, les outils de suivi géospatial, les bases de données hydrogéologiques, les systèmes d'information géographique (**SIG**) et, plus récemment, les observations satellitaires permettant de suivre les variations du stockage des eaux souterraines constituent autant d'outils susceptibles d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et d'affiner la connaissance de la ressource. Les travaux menés par Ould Rebai et al. (2024) illustrent également la capacité d'innovation développée localement dans le Sahara algérien. Les auteurs montrent que des pivots artisanaux, de dimensions plus modestes et de coût réduit, ont été conçus afin de répondre aux besoins de l'horticulture précoce. Selon leurs estimations, près

de 40 000 pivots artisanaux, couvrant chacun environ un hectare, assureraient l'irrigation d'environ 35 % de la production nationale de pomme de terre. Les performances hydrauliques de ces équipements demeurent néanmoins perfectibles, notamment en ce qui concerne le positionnement des asperseurs et le réglage des buses, deux paramètres déterminants pour améliorer l'uniformité de distribution de l'eau (Ould Rebai et *al.*, 2024).

Malgré ces progrès techniques, les politiques d'aménagement se heurtent à une contrainte majeure : **l'épuisement progressif des nappes profondes** lorsque leur exploitation dépasse durablement les capacités naturelles de renouvellement. À cet égard, le Système Aquifère du Sahara Septentrional est aujourd'hui considéré par les organismes internationaux comme une ressource particulièrement vulnérable, en raison de l'augmentation continue des prélèvements observés depuis plusieurs décennies. Selon UN-Water, les volumes d'eau prélevés atteignent désormais environ trois fois le niveau estimé de la recharge naturelle. Cette surexploitation se traduit déjà, ou risque de se traduire à moyen terme, par une diminution des niveaux piézométriques, une hausse des coûts énergétiques liés au pompage, une salinisation progressive des eaux et des sols, la disparition de certains écoulements naturels ainsi qu'une fragilisation croissante des écosystèmes humides sahariens. À une échelle plus locale, l'étude réalisée dans la région de Béchar met en évidence des rabattements rapides des nappes et le tarissement de plusieurs sources sous l'effet de l'intensification des prélèvements, confirmant ainsi le caractère cumulatif des impacts associés à la surexploitation des ressources souterraines (UN-Water, 2021 ; Kendouci et *al.*, 2023 ; OSS, 2004).

Dans cette perspective, l'enjeu biogéographique ne consiste pas à déterminer si la modernisation technique est souhaitable en elle-même, mais à identifier les **conditions dans lesquelles elle peut demeurer compatible avec la durabilité des socioécosystèmes arides**. L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation, le contrôle des volumes pompés, le recours à la télédétection, le développement de modèles hydrogéologiques partagés ainsi que le renforcement des mécanismes de gouvernance transfrontalière représentent des leviers importants pour optimiser la gestion de la ressource. Ces avancées ne sauraient cependant compenser, sur le long terme, un régime de prélèvements excédant les capacités du système aquifère. Les oasis algériennes comme les nouveaux périmètres agricoles sahariens illustrent ainsi l'un des paradoxes majeurs des milieux arides : les innovations techniques augmentent les possibilités d'exploitation des ressources, mais elles peuvent simultanément accentuer la vulnérabilité des territoires lorsqu'elles ne s'accompagnent pas d'une régulation adaptée des usages de l'eau, du foncier et des équilibres écologiques. Dans cette optique, l'adaptation contemporaine ne doit pas être envisagée comme une rupture avec les savoir-faire traditionnels, mais plutôt comme une articulation raisonnée entre les innovations technologiques, la sobriété dans l'utilisation de l'eau

et la préservation durable des nappes profondes (Idda et *al.*, 2021 ; Ould Rebai et *al.*, 2024 ; UN-Water, 2021).

En définitive, l'étude de l'adaptation du vivant aux milieux arides et semi-arides met en évidence un principe fondamental de la biogéographie : la persistance de la vie dans des contextes marqués par le déficit hydrique repose avant tout sur une gestion efficace des flux d'eau, qu'ils concernent les organismes végétaux ou les sociétés humaines. Chez les plantes, cette gestion mobilise plusieurs mécanismes complémentaires, parmi lesquels la régulation stomatique, l'ajustement osmotique, le maintien de la sécurité hydraulique, la plasticité phénologique et, dans certains cas, des voies photosynthétiques spécialisées telles que le métabolisme CAM. Les sociétés humaines, quant à elles, ont développé des systèmes hydroagricoles particulièrement ingénieux, à l'image de la **foggara** ou du **ghout**, avant de recourir à des aménagements modernes offrant des capacités de production bien supérieures, mais exerçant également une pression accrue sur les nappes souterraines. Dans le contexte algérien, cette analyse constitue une grille de lecture essentielle pour comprendre l'organisation des paysages steppiques, présahariens et sahariens. La répartition de la végétation, la structure des oasis et la pérennité des aménagements dépendent en effet, en dernière analyse, des modalités selon lesquelles la ressource en eau est gérée, à la fois sur les plans biologique et sociétal (Flexas et *al.*, 2014 ; OSS, 2004).

#### **Encadré 6 — Application au territoire algérien**

La durabilité des socioécosystèmes sahariens algériens repose moins sur la seule quantité théorique d'eau disponible que sur les interactions entre la ressource, les techniques mises en œuvre pour la mobiliser et les modalités de gouvernance qui encadrent son utilisation. Les grands aquifères profonds du Sahara, en particulier le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), sont en mesure de soutenir, à court terme, une intensification des activités agricoles. En revanche, lorsque les prélèvements excèdent durablement les capacités de renouvellement des nappes ou qu'ils perturbent les équilibres hydrogéologiques locaux, cette dynamique peut devenir un facteur de vulnérabilité pour les socioécosystèmes. Ce risque est d'autant plus marqué que le recul des systèmes traditionnels de gestion de l'eau s'accompagne d'une gouvernance insuffisamment coordonnée et intégrée.

## Chapitre II : Biogéographie de l'espace méditerranéen

L'espace méditerranéen constitue, en biogéographie, un ensemble de référence parce qu'il associe une forte originalité climatique, une très longue histoire des interactions homme-milieu, et une très grande diversité floristique et paysagère. À l'échelle mondiale, le biome méditerranéen ne se réduit pas au seul bassin méditerranéen, mais c'est dans ce dernier que l'on observe la combinaison la plus complexe entre gradients thermiques, contrastes pluviométriques, effets de relief, diversité édaphique et anthropisation plurimillénaire. Il en résulte une mosaïque de forêts, de matorrals, de pelouses, de prairies temporaires, de formations ripariennes et de systèmes de transition vers les steppes et les milieux arides. La compréhension de cet espace suppose donc une lecture bioclimatique fine, car les formations végétales méditerranéennes sont étroitement commandées par la distribution saisonnière des pluies, l'intensité de la sécheresse estivale et la disponibilité effective en eau dans les sols (Lionello et *al.*, 2006 ; Rundel et *al.*, 2016).

### 1. Définition et distinction des variantes des différents types de bioclimats méditerranéens

#### 1.1. Définition générale du bioclimat méditerranéen

Le bioclimat méditerranéen se définit d'abord par une combinaison saisonnière très particulière : des étés chauds à très chauds et secs, et des hivers doux à relativement frais, plus humides, durant lesquels se concentre l'essentiel de la pluviométrie annuelle. Cette distribution saisonnière des pluies, plus encore que le total pluviométrique brut, constitue le trait distinctif fondamental du monde méditerranéen. Dans les classifications climatiques globales, cette organisation correspond au climat méditerranéen de type *Cs* au sens de Köppen, avec des variantes à été chaud (*Csa*) ou tempéré (*Csb*), tandis que la tradition biogéographique méditerranéenne insiste davantage sur la relation entre climat et végétation potentielle (Lionello et *al.*, 2006 ; Deitch et *al.*, 2017).

Cette définition reste cependant insuffisante si elle n'est pas complétée par une approche bioclimatique. En effet, comme l'a souligné Daget, la caractéristique essentielle des régions méditerranéennes est bien la sécheresse relative de l'été associée à des hivers doux, mais la zone soumise au climat méditerranéen est loin d'être homogène ; elle se subdivise en formes climatiques nombreuses, variables selon les températures, le degré d'humidité, la continentalité et l'altitude (Daget, 1977 ; Roumieux et *al.*, 2010). Autrement dit, il n'existe pas **un** climat méditerranéen unique, mais un **ensemble de variantes bioclimatiques méditerranéennes**, dont

la distinction est indispensable pour comprendre les contrastes entre subéraies humides, chênaies vertes subhumides, pinèdes thermo-méditerranéennes, matorrals semi-arides et pelouses montagnardes supra- à oroméditerranéennes.

### 1.2. Les principaux systèmes de distinction bioclimatique

Dans l'école méditerranéenne francophone, la distinction des variantes bioclimatiques a longtemps reposé sur le quotient pluviothermique d'Emberger, particulièrement adapté aux régions à sécheresse estivale marquée, puis sur les précisions apportées par Daget et par les auteurs ayant travaillé sur les limites effectives de l'aire méditerranéenne. Cette tradition a été très influente au Maghreb et en Algérie, où les étages bioclimatiques ont été largement utilisés pour relier directement climat, séries de végétation et potentialités forestières ou pastorales (Daget, 1977 ; Roumieux et *al.*, 2010).

Les approches contemporaines, notamment celles dérivées du système bioclimatique global de Rivas-Martínez, ont prolongé cette logique en traduisant les continus climatiques en catégories discrètes à forte valeur écologique. Bracho-Estévez et *al.* (2023) rappellent que ce système permet de catégoriser les territoires en **étages bioclimatiques** à partir de variables thermiques et pluviométriques, et qu'il est particulièrement utile pour établir des inférences sur les communautés écologiques et le fonctionnement des écosystèmes dans l'ensemble du bassin méditerranéen. Dans cette perspective, le bioclimat méditerranéen n'est plus seulement décrit comme une ambiance climatique générale, mais comme un système hiérarchisé de **thermotypes** et d'**ombrotypes**, dont les combinaisons définissent des étages bioclimatiques distincts (Bracho-Estévez et *al.*, 2023 ; Pesaresi et *al.*, 2014).

### 1.3. Les variantes thermiques : thermotypes et étagement altitudinal

La distinction thermique interne du monde méditerranéen repose sur la notion de **thermotype**, c'est-à-dire la catégorie thermique d'un climat, établie à partir d'indices thermiques tels que l'indice de thermicité, l'indice de thermicité compensé et la température positive annuelle. Le rapport FAO–Plan Bleu sur l'état des forêts méditerranéennes rappelle qu'un thermotype correspond à une catégorie thermique du climat et qu'une séquence altitudinale ou latitudinale de thermotypes est reconnue dans chaque macrobioclimat, y compris le macrobioclimat méditerranéen (Plan Bleu, 2018).

Dans le macrobioclimat méditerranéen, les thermotypes classiquement distingués sont (tableau 07) : l'**inframéditerranéen**, le **thermoméditerranéen**, le **mésoméditerranéen**, le **supraméditerranéen**, l'**oroméditerranéen** et le **cryoroméditerranéen**. Ces catégories ne correspondent pas à de simples seuils abstraits : elles traduisent un changement progressif de l'ambiance bioclimatique avec l'altitude ou la latitude, donc des modifications très nettes de la végétation potentielle. Les thermotypes bas, notamment infra- et thermoméditerranéens, favorisent les formations thermophiles et xérophiles ; les étages méso- et supraméditerranéens correspondent plus volontiers aux chênaies, pinèdes et mosaïques forestières ou préforestières ; les niveaux oro- et cryoroméditerranéens accueillent des formations montagnardes ouvertes ou des boisements plus discontinus, selon l'humidité disponible et la rigueur thermique (FAO & Plan Bleu, 2018).

#### 1.4. Les variantes ombriques : ombrotypes et degré d'humidité

À côté du gradient thermique, le gradient d'humidité est fondamental. Les **ombrotypes** catégorisent les niveaux de précipitation utile par rapport à la demande climatique. Le rapport FAO–Plan Bleu indique que les ombrotypes sont établis à partir d'indices ombrothermiques, particulièrement pertinents pour la relation entre climat et végétation, et distingue les catégories suivantes : ultrahyperaride, hyperaride, aride, semi-aride, sec, subhumide, humide, hyperhumide et ultrahyperhumide. Dans le cadre strict des milieux forestiers méditerranéens, toutes ces catégories ne permettent pas le maintien du couvert arboré ; mais leur usage est décisif pour décrire la transition entre forêts denses, forêts claires, matorrals, pelouses xériques et formations présteppiques (FAO & Plan Bleu, 2018).

Le bassin méditerranéen présente ainsi une **grande amplitude bioclimatique**. Bracho-Estévez et *al.* insistent sur le fait qu'il s'agit d'un point chaud de biodiversité marqué par une large variabilité bioclimatique, ce qui explique que des étages méditerranéens très humides puissent coexister, à l'échelle régionale, avec des secteurs semi-arides voire arides. Cette hétérogénéité explique que les paysages méditerranéens ne soient pas uniformément forestiers : les formes de végétation y sont continuellement réordonnées par la combinaison locale du thermotype, de l'ombrotype, de la topographie et du substrat (Bracho-Estévez et *al.*, 2023 ; Vennetier et *al.*, 2008).

**Tableau 7.** Logique hiérarchique simplifiée des catégories bioclimatiques méditerranéennes

| <b>Gradient bioclimatique</b> | <b>Catégories usuelles</b>                                                                                            | <b>Signification écologique</b>                                                         |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Thermotype</b>             | Inframéditerranéen, thermoméditerranéen, mésoméditerranéen, supraméditerranéen, oroméditerranéen, cryoroméditerranéen | Exprime le cadre thermique et l'étagement altitudinal ou latitudinal.                   |
| <b>Ombrotype</b>              | Aride, semi-aride, sec, subhumide, humide, hyperhumide (avec variantes extrêmes)                                      | Exprime le degré d'humidité utile pour l'interprétation de la végétation.               |
| <b>Bioclimat / étage</b>      | Combinaison d'un thermotype et d'un ombrotype                                                                         | Permet de relier directement climat, séries de végétation et potentialités écologiques. |

(Daget, (1977a, 1977b) ; FAO & Plan Bleu (2018) ; Pesaresi et *al.*, 2014).

### 1.5. Application au cadre algérien

Dans le contexte algérien, cette lecture bioclimatique est particulièrement féconde. Le nord du pays appartient largement au domaine méditerranéen, mais sous des variantes très contrastées. Les travaux sur les chênaies vertes montrent que *Quercus ilex* s'étend, en Algérie du Nord, le long d'un gradient combinant aridité croissante et pressions anthropiques, ce qui confirme que la végétation méditerranéenne algérienne ne peut être comprise qu'en relation avec les contrastes bioclimatiques régionaux (Ihaddaden et *al.*, 2013 ; Dahmani-Megrerouche, 2002).

La tradition bioclimatique appliquée à l'Algérie a d'ailleurs largement retenu, sur base embergérienne, cinq grands étages utiles pour l'interprétation phytogéographique : saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide, ensuite nuancés par les variantes thermiques de l'hiver. Dans l'enseignement de la biogéographie, cette grille demeure très opératoire, car elle permet de lire le passage progressif entre les ensembles forestiers et préforestiers du Tell littoral et montagnard, les formations plus ouvertes du semi-aride, puis les marges steppiques et présahariennes (Daget, 1977).

#### **Encadré 7 — Lecture simplifiée pour l'Algérie du Nord**

Dans le cadre algérien, la lecture bioclimatique doit combiner au minimum trois gradients : un gradient latitudinal du Tell vers les Hautes Plaines et les marges présahariennes ; un gradient altitudinal lié aux reliefs littoraux et montagnards ; et un gradient est-ouest reflétant des contrastes de pluviométrie et de continentalité. C'est l'emboîtement de ces

gradients qui explique la juxtaposition régionale de subéraies humides, de chênaies vertes subhumides, de pinèdes sèches et de formations steppiques.

## 2. Les principales formations végétales méditerranéennes

### 2.1. Principes généraux de répartition des formations végétales méditerranéennes

La végétation méditerranéenne ne doit jamais être lue comme une juxtaposition arbitraire de types physiologiques. Elle résulte d'une hiérarchie de contraintes écologiques dans laquelle la **disponibilité en eau** joue un rôle central. Vennetier et *al.* (2008) soulignent ainsi que la disponibilité hydrique est l'un des facteurs majeurs expliquant la composition floristique et la croissance végétale dans les régions méditerranéennes. Cette contrainte hydrique s'articule avec l'altitude, l'exposition, la profondeur des sols, la nature géologique, la fréquence des incendies et l'histoire agropastorale pour produire des mosaïques extrêmement fines de formations forestières, arbustives et herbacées (Vennetier et *al.*, 2008 ; Rundel et *al.*, 2016).

### 2.2. Les forêts de feuillues méditerranéennes

Les forêts feuillues méditerranéennes regroupent en réalité deux grands ensembles écologiquement distincts. Le premier est celui des **forêts sempervirentes sclérophylles**, dominées par des chênes à feuilles persistantes, en particulier *Quercus ilex*, espèce majeure du monde méditerranéen occidental. Le second est celui des **forêts caducifoliées ou semi-caducifoliées**, plus liées aux variantes fraîches et relativement humides du bioclimat, souvent dans les étages méso- à supraméditerranéens ou dans les situations topographiques favorables. Sheffer rappelle que les paysages méditerranéens sont composés d'une mosaïque d'écosystèmes de pins et de chênes, dont la composition et la distribution ont fluctué sous l'effet des changements climatiques et des successions secondaires ; les forêts de chênes caducifoliés se sont notamment développées durant des phases plus chaudes et humides, tandis que la mise en place du climat méditerranéen bi-saisonnier a favorisé l'expansion des formes sclérophylles (Sheffer, 2012).

En Algérie, la chênaie verte occupe une place biogéographique majeure. Dahmani-Megrerouche insiste sur le fait que le chêne vert figure parmi les essences forestières les plus importantes de la région méditerranéenne et que l'analyse de ses peuplements en Algérie permet d'évaluer, à plusieurs échelles, les relations entre diversité de la chênaie, climat et substrat. La chênaie verte doit donc être présentée aux étudiants comme une formation-clé du domaine

méditerranéen algérien, à la fois par son extension, sa valeur écologique, son rôle de protection des sols et sa sensibilité aux perturbations (Dahmani-Megrerouche, 2002).

Le **chêne-liège** (*Quercus suber*) appartient lui aussi aux grandes formations feuillues méditerranéennes, mais sa niche écologique est plus exigeante. Les données de l'Atlas d'Algérie et de Tunisie indiquent qu'en Algérie et en Tunisie il prospère surtout dans les régions recevant au moins environ 60 cm de pluie annuelle, sur sols siliceux, souvent issus de roches cristallines, éruptives ou gréseuses, et qu'il trouve des conditions particulièrement favorables dans les secteurs littoraux et montagneux humides de Kabylie et de Kroumirie. Cette exigence édaphique et climatique explique que la subéraie soit un excellent indicateur des variantes les plus humides à subhumides du bioclimat méditerranéen occidental.

### 2.3. Les forêts de résineux méditerranéennes

Les forêts résineuses occupent une place décisive dans les paysages méditerranéens, mais leur signification biogéographique varie selon les espèces. Certaines pinèdes sont climaciques ou subclimaciques dans les milieux secs, d'autres relèvent de dynamiques post-perturbation, de successions secondaires, de reboisements ou de mosaïques mixtes avec les chênaies. Sheffer souligne d'ailleurs que l'extension des pins dans le bassin méditerranéen s'est fortement accrue au cours des deux derniers siècles sous l'effet combiné des reboisements et des successions secondaires après abandon des terres agricoles, ce qui a contribué à la constitution de mosaïques pin-chêne désormais caractéristiques de nombreux paysages méditerranéens (Sheffer, 2012).

Dans la Méditerranée occidentale semi-aride, le **pin d'Alep** (*Pinus halepensis*) constitue l'une des espèces les plus représentatives. Bentouati et Bariteau rappellent qu'en Algérie la forêt de pin d'Alep couvre plus de 850 000 ha, ce qui en fait une essence structurante du paysage forestier national. Cette importance spatiale, jointe à sa tolérance aux conditions sèches, explique sa fréquence dans les bioclimats thermo- à mésoméditerranéens secs ou semi-arides, ainsi que dans les systèmes de transition vers les montagnes présahariennes (Bentouati & Bariteau, 2005).

Les travaux de Vicente et *al.* (2018) montrent en outre que *Quercus ilex* et *Pinus halepensis* sont parmi les espèces les plus représentatives des environnements méditerranéens limités par l'eau, ce qui explique leur importance dans la compréhension des bilans hydriques forestiers. Dans le cas algérien, on peut donc enseigner que la pinède de pin d'Alep n'est pas seulement une formation résineuse parmi d'autres : elle constitue un excellent révélateur de

l'ajustement entre sécheresse estivale, sols pauvres, incendies, usages pastoraux et dynamiques de reconstitution forestière (Vicente et *al.*, 2018 ; Bentouati & Bariteau, 2005).

#### 2.4. Les matorrals : maquis et garrigues

Le terme **matorral** désigne, au sens large, les formations arbustives et sous-arbustives sclérophylles du monde méditerranéen. Il ne s'agit pas d'un simple synonyme de dégradation : dans certains contextes, ces formations constituent des structures stables imposées par le climat, le sol ou la topographie ; dans d'autres, elles correspondent à des stades dynamiques post-forestiers ou post-incendie. Casals et *al.* (2023) rappellent que les *shrublands* méditerranéens de l'Ouest du bassin sont dominés par des espèces ligneuses arbustives généralement inférieures à 2–3 m, à feuilles petites, persistantes, coriaces et épaisses, et qu'ils peuvent être soit des formations permanentes lorsque le climat ou le sol empêchent l'installation d'un couvert arboré dense, soit des états intermédiaires liés à l'histoire des usages, aux incendies ou à l'embroussaillage post-agricole (Casals et *al.*, 2023).

La distinction entre **maquis** et **garrigue** (tableau 08) reste classique et impérativement utile. Le Parc national des Calanques résume bien cette différence : la garrigue se développe surtout sur sols calcaires, avec une végétation plus basse et plus ouverte ; le maquis, au contraire, se forme sur substrats acides ou siliceux, avec une physionomie plus dense, plus fermée et souvent difficilement pénétrable. La garrigue est fréquemment associée à des taxons comme le chêne kermès, le romarin, les cistes, le thym ou *Aphyllanthes monspeliensis*, tandis que le maquis accueille davantage l'arbousier, les bruyères, certains cistes et le myrte. Cette opposition doit toutefois être enseignée comme une **tendance structurale et édaphique**, non comme une frontière absolue, car les mosaïques de terrain sont souvent complexes (Casals et *al.*, 2023).

Du point de vue dynamique, le matorral constitue une formation essentielle dans les trajectoires de la végétation méditerranéenne. Il peut résulter d'une régression des forêts sous l'effet du feu, du pâturage, du défrichement ancien ou de l'érosion des sols, mais aussi représenter une étape de recolonisation ligneuse après abandon agricole. Dans cette perspective, il faut éviter de le présenter comme une végétation « secondaire » au sens simpliste du terme : dans les secteurs xérothermiques, le matorral peut être une formation durable et écologiquement fonctionnelle, jouant un rôle majeur dans la protection des sols, la biodiversité, le fourrage arbustif et la résilience post-perturbation (Casals et *al.*, 2023 ; Sheffer, 2012).

**Tableau 8.** Comparaison synthétique entre maquis et garrigue

| Critère                           | Maquis                                               | Garrigue                                                                                  |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Substrat dominant</b>          | Souvent acide ou siliceux                            | Généralement calcaire                                                                     |
| <b>Structure</b>                  | Plus dense, plus haute, physionomie souvent fermée   | Plus basse, plus ouverte et discontinue                                                   |
| <b>Espèces fréquemment citées</b> | Arbousier, bruyères, myrte, cistes                   | Chêne kermès, romarin, thym, cistes, <i>Aphyllanthes monspeliensis</i>                    |
| <b>Interprétation dynamique</b>   | Peut être stable ou post-forestier selon le contexte | Souvent liée à des milieux xérocalcicoles et à des trajectoires de régression / ouverture |
| <b>Intérêt biogéographique</b>    | Marqueur de conditions édaphiques et d'usages        | Bon indicateur de xéricité, de substrat et de perturbation                                |

(Casals et *al.*, 2023).

## 2.5. Les pelouses et prairies méditerranéennes

Les **pelouses et prairies méditerranéennes** correspondent à un ensemble très divers de formations herbacées, depuis les pelouses sèches calcicoles jusqu'aux prairies annuelles temporaires, en passant par les *herblands* montagnards et les gazons plus ou moins thérophytisés des espaces pastoraux. Rundel et *al.* (2016) rappellent que les écosystèmes méditerranéens comprennent, aux côtés des boisements et des *shrublands*, des formations herbacées et des *grasslands* qui participent pleinement à la diversité structurale du biome méditerranéen. Ces ensembles sont particulièrement sensibles aux variations climatiques, à l'abandon des usages, au surpâturage et aux changements édaphiques (Rundel et *al.*, 2016).

Molina et *al.* (2023) montrent que les pelouses méditerranéennes annuelles font partie des formations les plus riches en diversité à l'échelle mondiale, et qu'elles occupent une place majeure dans la dynamique de succession des paysages méditerranéens, notamment après abandon agricole. Dans le bassin européen occidental, ces pelouses comprennent une grande diversité de végétations, souvent riches en thérophytes et en espèces herbacées de petite taille ; elles sont particulièrement importantes sur sols pauvres, acides ou superficiels, mais aussi dans les milieux ouverts entretenus historiquement par le pastoralisme (Molina et *al.*, 2023).

Il est utile de distinguer les **pelouses xériques des causses et plateaux calcaires**, généralement basses, ouvertes, très riches en chaméphytes et hémicryptophytes, des **prairies temporaires plus fraîches** ou des tapis herbacés liés aux dépressions humides saisonnières. À l'échelle algérienne et maghrébine, il faut également insister sur les formes de transition entre pelouses méditerranéennes, formations thérophytiques printanières et steppes à dominante herbacée ou sous-frutescente dans les bioclimats les plus secs. Cette continuité écologique explique que certaines pelouses méditerranéennes soient très sensibles à la thérophytisation et aux dynamiques de régression sous contrainte climatique et anthropique (Molina et *al.*, 2023 ; Casals et *al.*, 2023).

## 2.6. Les formations des bords des oueds et des cours d'eau méditerranéens

Les **bords des oueds**, torrents et cours d'eau méditerranéens constituent des formations très particulières, car ils introduisent dans le paysage sec des conditions locales de disponibilité en eau, d'accumulation alluviale et de perturbation hydrologique qui différencient fortement la flore riveraine de la flore environnante. Ferreira et Aguiar montrent que la végétation aquatique et riparienne des cours d'eau méditerranéens présente des structures et des compositions floristiques distinctes de celles des systèmes fluviaux mésiques, précisément en raison du caractère intermittent, irrégulier et fortement saisonnier des écoulements méditerranéens (Ferreira & Aguiar, 2006).

Ces formations ripariennes accueillent souvent des ligneux hygrophiles, des héliophytes, des herbacées nitrophiles ou rudérales, ainsi qu'une flore plus mésophile que celle des versants adjacents. Elles jouent un rôle majeur comme **corridors écologiques**, zones de refuge, axes de dispersion et espaces de concentration de la biomasse dans les environnements méditerranéens secs. Dans le cadre algérien, les bordures d'oueds, les bas-fonds et certaines plaines alluviales temporaires doivent donc être présentés comme des unités biogéographiques à part entière, dont la végétation dépend à la fois du régime hydrologique, de la granulométrie alluviale, des crues, du pâturage et des prélèvements anthropiques (Ferreira & Aguiar, 2006 ; Benslama et *al.*, 2010).

Ainsi, La biogéographie de l'espace méditerranéen repose sur une articulation étroite entre bioclimat et végétation. La distinction des variantes bioclimatiques méditerranéennes exige de raisonner simultanément en termes de sécheresse estivale, de thermotypes, d'ombrotypes, d'altitude, de continentalité et de contexte édaphique. Les formations végétales qui en résultent — forêts feuillues sempervirentes ou caducifoliées, forêts résineuses, matorrals, pelouses, prairies et végétation riveraine — ne sont pas des catégories figées, mais des expressions

dynamiques d'équilibres climatiques, pédologiques et anthropiques. Cette lecture permet de comprendre pourquoi l'Algérie, à la charnière entre domaine méditerranéen, steppique et saharien, offre un terrain d'observation privilégié des transitions biogéographiques méditerranéennes, depuis les chênaies et pinèdes du Tell jusqu'aux mosaïques préforestières, steppiques et présahariennes des marges méridionales (Dahmani-Megrerouche, 2002 ; Bentouati & Bariteau, 2005 ; Vennetier *et al.*, 2008).

#### **Encadré 8 — Ce qu'il faut retenir sur les formations méditerranéennes**

Les forêts, matorrals, pelouses et formations ripariennes méditerranéennes ne sont pas des catégories fixes. Il faut les analyser comme des états dynamiques situés dans des trajectoires écologiques, bioclimatiques et socio-historiques. Une même formation peut ainsi être climacique dans un contexte, post-perturbation dans un autre, ou relever d'une mosaïque entretenue par les usages.

### **3. Les milieux naturels**

Dans l'espace méditerranéen, les milieux naturels correspondent à des ensembles écologiques où la structure du paysage demeure d'abord commandée par les facteurs biophysiques — climat, relief, lithologie, hydrologie, sols et dynamique de la végétation — même si, dans la plupart des cas, ces milieux portent aussi la marque d'interventions humaines anciennes. Il convient donc d'éviter une opposition trop rigide entre « naturel » et « anthropisé » : la Méditerranée est à la fois un haut lieu de diversité biologique et un espace de coévolution ancienne entre sociétés et écosystèmes. La littérature de référence rappelle que les écosystèmes méditerranéens rivalisent avec les systèmes tropicaux pour la richesse floristique et que le bassin méditerranéen abrite environ 25 000 espèces végétales, dont près de la moitié sont endémiques, ce qui explique son statut de hotspot biogéographique majeur (Vogiatzakis *et al.*, 2006 ; Rundel *et al.*, 2016).

Sur le plan paysager, les milieux naturels méditerranéens forment une mosaïque complexe de forêts sclérophylles et caducifoliées, de pinèdes, de formations arbustives, de pelouses et prairies, de zones humides, de ripisylves, de falaises littorales, de dunes côtières et de milieux montagnards. Cette diversité résulte de l'emboîtement des gradients d'humidité, de température, d'altitude et de substrat, mais aussi de la grande variabilité spatiale des perturbations naturelles, notamment les sécheresses, les crues torrentielles, les incendies et l'érosion. Dans le bassin méditerranéen, la distribution de ces milieux naturels ne peut donc être comprise qu'à

partir d'une lecture intégrée du bioclimat et de la géomorphologie, ce qui justifie pleinement leur place centrale dans un enseignement de biogéographie végétale (Rundel et *al.*, 2016 ; MedECC, 2020).

Dans le cadre algérien, cette diversité naturelle est particulièrement visible dans les marges telliennes et littorales du Nord-Est, où coexistent forêts méditerranéennes, marais littoraux, dunes, lacs, oueds temporaires et formations arbustives de substitution. Le complexe de Guerbès-Senhadja, classé site Ramsar en 2001, a ainsi été décrit comme un réservoir majeur de biodiversité faunistique et floristique à origines biogéographiques diverses ; il illustre la valeur patrimoniale des zones humides méditerranéennes algériennes, à l'interface entre milieux dulçaquicoles, marécageux, forestiers et littoraux (Toubal et *al.*, 2014). De même, le site de Beni-Belaid, en Petite Kabylie, montre que les zones humides du Nord-Est algérien présentent une grande richesse spécifique et coenologique, avec plusieurs communautés végétales distribuées selon des gradients d'hydrologie et de perturbation (Bouldjedri et *al.*, 2011).

Les milieux naturels méditerranéens algériens comprennent aussi les systèmes dunaires côtiers, dont l'intérêt biogéographique est double : ils constituent à la fois des habitats spécialisés, souvent riches en taxons adaptés à la mobilité sableuse, à la salinité et à la sécheresse, et des interfaces écologiques très sensibles aux perturbations. L'étude consacrée aux dunes littorales méditerranéennes de Jijel montre bien que la diversité végétale de ces systèmes dépend étroitement des facteurs environnementaux, mais aussi de l'impact humain, ce qui confirme le caractère à la fois fragile et hautement différencié de ces milieux (Younsi & Bouziane, 2023). En somme, les milieux naturels méditerranéens doivent être enseignés non comme des ensembles homogènes, mais comme des systèmes écologiques hiérarchisés et fortement hétérogènes, où les variations fines du climat et du substrat se traduisent immédiatement dans l'organisation de la végétation et des habitats (Younsi & Bouziane, 2023 ; Vogiatzakis et *al.*, 2006).

#### 4. Les milieux anthropisés

Les milieux anthropisés correspondent aux espaces dont la structure, le fonctionnement et la physionomie résultent d'une transformation durable par les activités humaines. Dans le bassin méditerranéen, cette anthropisation est ancienne, profonde et multiforme : défrichement, culture, élevage, pastoralisme, mise en terrasse, incendies répétés, prélèvements ligneux, urbanisation, drainage, barrages, extraction de matériaux et équipements touristiques ont remodelé les paysages depuis des siècles, voire des millénaires. De ce fait, une grande part des paysages méditerranéens contemporains doit être comprise comme une coproduction entre

processus écologiques et usages sociaux du territoire (Vogiatzakis et *al.*, 2006 ; Bardadi et *al.*, 2021).

Cependant, l'anthropisation ne signifie pas mécaniquement appauvrissement écologique. Dans de nombreux cas, les systèmes agrosylvopastoraux traditionnels ont produit des paysages en mosaïque favorables à une biodiversité élevée, grâce à l'imbrication de formations arborées, arbustives, herbacées et cultivées. Les travaux sur les systèmes agro-sylvo-pastoraux méditerranéens montrent que l'intégration des arbres, des cultures et du bétail peut soutenir des formes d'exploitation relativement durables, tout en générant des services environnementaux et paysagers. Dans le nord du bassin, ces systèmes ont longtemps reposé sur l'intégration entre forêts, plantations arborées, cultures herbacées et pâturage ; dans le sud méditerranéen, les formes de pastoralisme mobile ont également structuré les maquis, les parcours et les marges cultivées (Pardini & Nori, 2011). De même, l'étude de Bagella et *al.* (2014) met en évidence que des usages contrastés dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux méditerranéens produisent des patrons de diversité végétale et microbienne fortement différenciés, ce qui rappelle que l'hétérogénéité d'usage est elle-même un facteur biogéographique (Bagella et *al.*, 2014 ; Pardini & Nori, 2011).

Néanmoins, lorsque l'intensification, la fragmentation ou l'artificialisation dépassent certains seuils, les milieux anthropisés deviennent des espaces de vulnérabilité écologique accrue. Dans la région de Tlemcen, les changements d'occupation du sol ont été associés à des activités anthropiques multiples et à une fragilisation de certains secteurs naturels. Bardadi et *al.* (2021) soulignent ainsi que, malgré l'importance du capital forestier régional, les pressions humaines, les changements d'usage et la vulnérabilité des terrains imposent des stratégies rigoureuses de protection et d'aménagement (Bardadi et *al.*, 2021). Dans les zones humides du Nord-Est algérien, l'anthropisation se traduit par des défrichements, des incendies, du surpâturage, des sablières, des pompages et une fragmentation croissante des habitats, avec régression du couvert végétal naturel et développement de groupements de substitution tels que maquis, broussailles et pelouses (Toubal et *al.*, 2014).

L'exemple de la plaine orientale de la Mitidja est particulièrement instructif pour l'enseignement de la biogéographie appliquée. Bellout, Vaz et Penfound montrent que l'expansion urbaine périphérique autour d'Alger a entraîné des impacts directs sur les terres agricoles, des changements d'usage du sol, une dégradation foncière et une vulnérabilité accrue des écosystèmes. Dans cette perspective, le milieu anthropisé méditerranéen n'est pas seulement un espace cultivé ; il devient un espace de concurrence entre fonctions agricoles, urbaines,

industrielles et infrastructurelles, où les héritages paysagers peuvent être rapidement dissous par la croissance métropolitaine (Bellout et *al.*, 2020). De manière convergente, le cas de Beni-Belaid montre que l'agriculture, le surpâturage et les pompages excessifs peuvent altérer en très peu de temps des zones humides pourtant de très haute valeur patrimoniale (Bouldjedri et *al.*, 2011).

Ainsi, les milieux anthropisés méditerranéens doivent être interprétés selon une logique de gradient. À une extrémité se trouvent les paysages traditionnels relativement intégrés, souvent multifonctionnels et encore capables de soutenir une biodiversité importante ; à l'autre, les espaces soumis à une artificialisation rapide, à une intensification agricole mal maîtrisée ou à une fragmentation poussée, où les équilibres écologiques se dégradent. Cette distinction est essentielle, car elle permet de montrer que l'anthropisation n'est pas un état uniforme, mais un processus à intensité variable, dont les effets dépendent des formes de gestion, des temporalités d'usage et du contexte bioclimatique (Bagella et *al.*, 2014 ; MedECC, 2024).

**Tableau 9.** Comparaison synthétique entre milieux naturels et milieux anthropisés en contexte méditerranéen

| <b>Dimension</b>                  | <b>Milieux naturels</b>                                                  | <b>Milieux anthropisés</b>                                                   |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Structure dominante</b>        | Commande principalement biophysique                                      | Commande fortement remaniée par les usages et les infrastructures            |
| <b>Hétérogénéité</b>              | Liée aux gradients naturels, au relief, au substrat et aux perturbations | Liée aux pratiques agricoles, pastorales, urbaines et touristiques           |
| <b>Services écologiques</b>       | Réservoirs de biodiversité, protection des sols, régulation hydrique     | Peuvent rester élevés dans les mosaïques agrosylvopastorales traditionnelles |
| <b>Vulnérabilités principales</b> | Sécheresse, incendies, fragmentation, espèces invasives                  | Artificialisation, intensification, surpâturage, pompage, étalement urbain   |
| <b>Lecture biogéographique</b>    | Référence pour l'analyse des potentialités et des héritages écologiques  | Révélateurs des trajectoires de transformation paysagère                     |

(Vogiatzakis et *al.*, 2006 ; Pardini & Nori, 2011 ; MedECC, 2024).

**Encadré 9 — Cas algériens particulièrement instructifs**

Les zones humides de Guerbès-Senhadja et de Beni-Belaid, les dunes littorales de Jijel, les paysages de la Mitidja orientale et les mosaïques forestières / préforestières du Nord-Est algérien fournissent des exemples particulièrement parlants des interactions entre patrimoine naturel, usages du sol, urbanisation, fragmentation et conservation.

**5. Effets du climat méditerranéen sur les systèmes hydriques, sols, végétations, agriculture**

Le climat méditerranéen exerce des effets systémiques sur les composantes fondamentales des socioécosystèmes régionaux. La combinaison d'étés chauds et secs, d'une forte variabilité interannuelle des précipitations, de pluies souvent concentrées sous forme d'épisodes intenses et d'une demande évaporative élevée façonne l'ensemble des bilans hydriques, des dynamiques pédologiques, des physiologies végétales et des systèmes de production. Les évaluations récentes de MedECC identifient la Méditerranée comme un hotspot du changement climatique, marqué par un réchauffement supérieur à la moyenne mondiale, des modifications de la distribution des pluies, une augmentation de la durée et de l'intensité des sécheresses, et une vulnérabilité élevée de l'eau, de l'agriculture et des écosystèmes (MedECC, 2020 ; MedECC, 2024).

Sur les **systèmes hydriques**, l'effet majeur du climat méditerranéen est la dissymétrie saisonnière des ressources : l'eau est relativement abondante pendant une partie de la saison fraîche, puis devient fortement déficitaire au cours de l'été, au moment même où la demande atmosphérique et biologique atteint son maximum. Sous l'effet du changement climatique, cette contrainte s'intensifie. Noto et *al.* (2023) soulignent que l'une des conséquences les plus importantes, notamment dans les régions méridionales du bassin, est l'aggravation de la rareté de l'eau par diminution des écoulements de surface et des niveaux de nappes. Essa et *al.* (2023) montrent en outre une tendance significative à l'augmentation des sécheresses agricoles et hydrologiques en Méditerranée, avec un signal plus marqué dans les pays sud-méditerranéens et nord-africains. Les synthèses de MedECC confirment que les zones humides et les écosystèmes ripariens méditerranéens sont particulièrement exposés aux perturbations du cycle de l'eau, ce qui affecte leur structure, leur fonctionnement et leur rôle de réservoirs de biodiversité (Noto et *al.*, 2023 ; Essa et *al.*, 2023 ; MedECC, 2024).

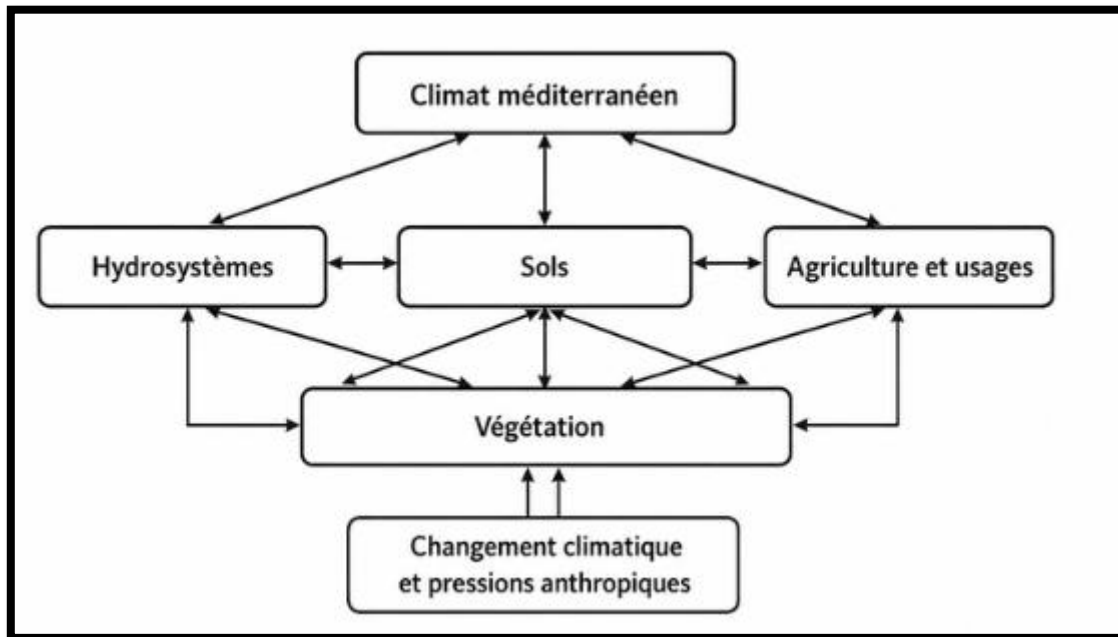
Sur les **sols**, le climat méditerranéen agit par une double contrainte. D'une part, la sécheresse estivale réduit l'activité biologique et fragilise la couverture végétale ; d'autre part,

les pluies intenses de l'automne et du printemps peuvent déclencher des ruissellements concentrés, du ravinement, des pertes en sol et des dynamiques de badlands, surtout sur terrains en pente, nus ou dégradés. García-Ruiz et *al.* (2013) rappellent que l'érosion est particulièrement répandue dans les paysages méditerranéens en raison de la combinaison entre faibles pluies annuelles, averses intenses, longues sécheresses, forte évapotranspiration, versants raides, incendies, surpâturage et pratiques agricoles. MedECC souligne en outre que les usages inadaptés du sol, la déforestation et l'érosion réduisent la capacité d'infiltration et de rétention de l'eau, aggravant simultanément le risque de crues rapides, la baisse de qualité des eaux et la dégradation des terres (García-Ruiz et *al.*, 2013 ; MedECC, 2024).

Sur les **végétations**, le climat méditerranéen sélectionne des organismes capables de supporter la sécheresse estivale, mais cette adaptation n'implique pas une invulnérabilité. Les évaluations récentes montrent qu'une augmentation conjointe de l'aridité, des sécheresses, des incendies, des invasions biologiques, de la pollution et des changements d'usage du sol peut dépasser la résilience de nombreux écosystèmes méditerranéens, en altérant leur structure, leur fonctionnement et les services qu'ils rendent. Cette évolution se traduit par des dépérissements localisés, des régressions forestières, des substitutions par des formations arbustives ou herbacées plus xérophiles, des modifications phénologiques et une reconfiguration de la composition floristique. Dans les zones humides algériennes, les travaux de Toubal et *al.* (2014) montrent déjà que les pressions combinées entraînent l'appauvrissement floristique et le remplacement de certaines formations naturelles par des groupements de substitution (Toubal et *al.*, 2014 ; Peñuelas et *al.*, 2017 ; MedECC, 2020).

Sur l'**agriculture**, enfin, le climat méditerranéen impose une forte dépendance à la variabilité des pluies, ce qui rend les systèmes pluviaux particulièrement sensibles aux sécheresses et les systèmes irrigués fortement dépendants de ressources en eau déjà contraintes. Les synthèses récentes montrent que les tendances au réchauffement et au dessèchement du bassin aggravent la rareté de l'eau agricole et menacent la production. Le rapport MedECC sur le nexus eau-énergie-alimentation-écosystèmes souligne que la baisse des disponibilités hydriques et le stress thermique affecteront des cultures majeures telles que l'olivier, la vigne, les céréales, les fruits et les légumes, avec des effets variables selon les pays, les scénarios et les espèces cultivées. La revue systématique de Claro et *al.* (2024) conclut de même que l'évolution future de la disponibilité en eau agricole constitue l'un des enjeux structurants du bassin méditerranéen sous changement climatique. En Algérie, cette question revêt une importance particulière dans les plaines littorales et sublittorales, où l'urbanisation, l'irrigation, la

concurrence intersectorielle et la dégradation des sols viennent s'ajouter à la contrainte climatique proprement dite (Claro et *al.*, 2024 ; MedECC, 2024 ; Bellout et *al.*, 2020).



**Figure 11.** Interactions systémiques entre climat méditerranéen, hydrosystèmes, sols, végétation, agriculture et pressions anthropiques (Lionello et *al.*, 2006 ; MedECC, 2020, 2024 ; García-Ruiz et *al.*, 2013 ; Essa et *al.*, 2023).

Ce schéma (figure 11), illustre l'organisation fonctionnelle d'un socioécosystème méditerranéen, structuré par le climat méditerranéen, qui conditionne les hydrosystèmes, les sols et la végétation. Ces composantes interagissent étroitement et soutiennent les systèmes agricoles ainsi que les usages humains. En retour, les activités anthropiques exercent des pressions sur les milieux, contribuant à des rétroactions locales et globales amplifiées par le changement climatique. L'ensemble met en évidence un système dynamique caractérisé par des interactions multiscalaires et des boucles de rétroaction complexes.

En définitive, l'effet du climat méditerranéen ne doit jamais être envisagé isolément. Il agit à travers des chaînes de causalité où se combinent disponibilité en eau, état des sols, physiologie végétale, formes d'usage du territoire et intensité des pressions humaines. C'est précisément cette imbrication qui fait de l'espace méditerranéen, et de l'Algérie du Nord en particulier, un laboratoire biogéographique exceptionnel pour comprendre les transitions entre milieux naturels, milieux anthropisés et systèmes socioécologiques vulnérables au changement global (MedECC, 2020 ; MedECC, 2024 ; Bardadi et *al.*, 2021).

Le tableau 10 ci-dessous propose une synthèse intégrée des principaux effets du climat méditerranéen sur les socioécosystèmes, en articulant les processus climatiques dominants avec leurs répercussions biogéographiques majeures. Caractérisé par une forte saisonnalité des

précipitations, une sécheresse estivale marquée et une variabilité interannuelle élevée, le climat méditerranéen constitue un facteur structurant des dynamiques hydrologiques, pédologiques, biologiques et socio-économiques. Cette organisation particulière des contraintes climatiques induit des réponses différenciées selon les compartiments étudiés, allant de la vulnérabilité accrue des hydrosystèmes et des sols à des transformations notables des couvertures végétales et des systèmes agricoles. En mettant en relation ces effets avec leurs conséquences spatiales et fonctionnelles, cela permet de souligner l'intensification des pressions sur les ressources naturelles et la nécessité d'une gestion territoriale intégrée, adaptée aux spécificités et aux fragilités des socioécosystèmes méditerranéens (MedECC, (2020—2024) ; García-Ruiz et *al.*, 2013 ; Claro et *al.*, 2024).

**Tableau 10.** Synthèse des principaux effets du climat méditerranéen sur les socioécosystèmes

| Compartiment                | Effets du climat méditerranéen                                                             | Conséquences biogéographiques majeures                                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hydrosystèmes</b>        | Ressources concentrées en saison fraîche, étiage estival marqué, sécheresses hydrologiques | Vulnérabilité des zones humides, oueds temporaires et nappes ; concurrence accrue entre usages      |
| <b>Sols</b>                 | Sécheresse estivale + pluies intenses saisonnières                                         | Érosion, ravinement, baisse d'infiltration, perte de fertilité et dégradation des terres            |
| <b>Végétation</b>           | Sélection d'espèces sclérophylles et xérophytes, forte sensibilité aux extrêmes            | Dépérissements localisés, substitutions floristiques, augmentation du risque incendie               |
| <b>Agriculture</b>          | Forte dépendance à la variabilité des pluies et à l'irrigation                             | Stress hydrique croissant, tensions sur l'eau agricole, vulnérabilité des cultures méditerranéennes |
| <b>Gestion territoriale</b> | Multiplication des arbitrages entre conservation, production et urbanisation               | Besoin d'approches intégrées eau-sol-biodiversité-usages                                            |

(MedECC, (2020, 2024) ; García-Ruiz et *al.*, 2013 ; Claro et *al.*, 2024).

#### **Encadré 10 — Conclusion opérationnelle pour l'aménagement**

Dans l'espace méditerranéen, la gestion durable ne peut être pensée séparément pour l'eau, les sols, les forêts, les parcours, l'agriculture et l'urbanisation. L'enjeu central réside dans l'intégration des politiques sectorielles afin de réduire les rétroactions négatives entre surexploitation hydrique, dégradation des sols, régression de la végétation et vulnérabilité socioéconomique.

## **Conclusion**

Le module de Biogéographie constitue un élément fondamental dans la formation des étudiants de Master 2 en Biodiversité et physiologie végétale, dans la mesure où il leur permet d'acquérir une compréhension approfondie de la répartition du vivant à la surface du globe, ainsi que des relations étroites qui unissent les organismes à leurs milieux. La biogéographie englobe en effet l'étude des grands ensembles climatiques, des formations végétales, des gradients écologiques, des processus historiques et actuels de distribution des espèces, ainsi que des interactions entre facteurs naturels et actions humaines. À travers cet enseignement, les étudiants développent une vision intégrée des paysages naturels, des milieux arides, semi-arides et méditerranéens, et des mécanismes qui expliquent la structure et la dynamique de la biodiversité.

La compréhension des fondements de la biogéographie est indispensable pour analyser les grandes problématiques environnementales contemporaines, telles que les changements climatiques, la désertification, la dégradation des habitats, l'érosion de la biodiversité et la transformation des écosystèmes sous l'effet des activités anthropiques. Ce module fournit ainsi aux étudiants les bases scientifiques nécessaires pour interpréter les effets du climat sur la végétation, distinguer les variantes bioclimatiques méditerranéennes, comprendre l'organisation des milieux arides et semi-arides, et évaluer les conséquences écologiques des mutations environnementales. Il contribue également au développement de l'esprit critique, de la capacité d'analyse et du raisonnement scientifique, compétences essentielles pour la recherche, l'expertise écologique et la gestion durable des territoires.

Dans un contexte mondial marqué par l'intensification des pressions exercées sur les milieux naturels, le rôle des spécialistes en écologie, biodiversité et sciences de l'environnement devient de plus en plus déterminant. Le module de biogéographie prépare ainsi les étudiants à appréhender les enjeux liés à la conservation des écosystèmes, à la valorisation des ressources naturelles et à l'aménagement raisonné des espaces fragiles. Il met également en évidence la responsabilité scientifique et éthique qui incombe aux futurs chercheurs, gestionnaires et enseignants face à la nécessité de préserver les équilibres écologiques et le patrimoine naturel, en particulier dans les régions méditerranéennes et arides où les vulnérabilités écologiques sont particulièrement marquées.

En définitive, le module de Biogéographie ne saurait être considéré comme un simple enseignement théorique ; il représente une base essentielle pour toute formation avancée en biodiversité, physiologie végétale, écologie et environnement. Il permet de mieux saisir la

complexité de l'organisation du vivant dans l'espace, de comprendre les interactions entre les facteurs climatiques, édaphiques, biologiques et humains, et de former des étudiants capables d'analyser les territoires avec rigueur, responsabilité et discernement. Par cette approche globale, il contribue à former des cadres et des chercheurs conscients des défis environnementaux actuels et aptes à participer activement à la protection, à la gestion et à la restauration des écosystèmes.

**Références bibliographiques**

AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Anjileli, H., Azarderakhsh, M., Chiang, F., Hassanzadeh, E., Huning, L. S., Mallakpour, I., Martinez, A., Mazdidasni, O., Moftakhari, H., Norouzi, H., Sadegh, M., Sadeqi, D., Van Loon, A. F., & Wanders, N. (2021). Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 59(2), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm>

American Meteorological Society. (s. d.). *Aridity*. In *Glossary of Meteorology*. Consulté le 15 avril 2026, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/aridity/>

Aouadi, A., Khaznadar, M., & Aouadi, H. (2010). La relance du chêne-liège dans le Plan national de reboisement en Algérie. *Forêt Méditerranéenne*, 31(1), 45–54. <https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-1623-la-relance-du-chene-liege-dans-le-plan-national-de-reboisement-en-algerie>

Atallah, M., Hazzab, A., Seddini, A., Ghenaïm, A., & Korichi, K. (2016). Hydraulic flood routing in an ephemeral channel: Wadi Mekerra, Algeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0237-0>

Bagella, S., Filigheddu, R., Caria, M. C., Girlanda, M., & Roggero, P. P. (2014). Contrasting land uses in Mediterranean agro-silvo-pastoral systems generated patchy diversity patterns of vascular plants and below-ground microorganisms. *Comptes Rendus Biologies*, 337(12), 717–724. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2014.09.005>

Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957). Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*, 66(355), 193–220. <https://doi.org/10.3406/geo.1957.18273>

Ballais, J.-L. (2010). Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara algérien. *Physio-Géo*, 4, 107–127. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1173>

Bardadi, A., Souidi, Z., Cohen, M., & Amara, M. (2021). Land use/land cover changes in the Tlemcen region (Algeria) and classification of fragile areas. *Sustainability*, 13(14), 7761. <https://doi.org/10.3390/su13147761>

Battesti, V. (2018). New reading of Saharan agricultural transformation: Continuities of ancient oases and their extensions (Algeria). *World Development*, 107, 210–223.

<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.026>

Bellout, A., Vaz, E., & Penfound, E. (2020). Rethinking agricultural land use in Algiers: A spatial analysis of the Eastern Mitidja Plain. *Habitat International*, 104, 102239.

<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102239>

Benhouhou, S. S., Boucheneb, N., Kerzabi, Q., & Sassi, O. (2003). Plant communities of several wadi types in the Tassili N’Ajjjer, Central Sahara, Algeria. *Phytocoenologia*, 33(1), 49–69. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2003/0033-0049>

Bensaada, M., & Remini, B. (2017). Water wells’ exploitation and its impact on the drying up of foggaras: The case of the foggara of M’ghaer, Timimoune, District of Adrar, Algeria.

*Applied Water Science*, 7, 349–359. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0250-2>

Bentouati, A., & Bariteau, M. (2005). Une sylviculture pour le pin d’Alep des Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 26(4), 315–321. [https://www.foret-](https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-963-une-sylviculture-pour-le-pin-d-alep-des-aures-algerie-)

[mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-963-une-sylviculture-pour-le-pin-d-alep-des-aures-algerie-](https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-963-une-sylviculture-pour-le-pin-d-alep-des-aures-algerie-)

Bernard, A., & De Flotte de Roquevaire, R. (1925). *Atlas d’Algérie et de Tunisie. IV. Carte de la végétation*. Cinumed. <https://cinumed.mmsh.univ-aix.fr/en/collection/item/81501-atlas-d-algerie-et-de-tunisie-iv-carte-de-la-vegetation?offset=7>

Bouldjedri, M., de Bélair, G., Mayache, B., & Muller, S. D. (2011). Menaces et conservation des zones humides d’Afrique du Nord : le cas du site Ramsar de Beni-Belaid (NE algérien).

*Comptes Rendus Biologies*, 334(10), 757–772. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2011.06.009>

Boussaïd, A., & Schmitz, S. (2022). The social driving forces of desertification in the high Algerian steppe plains. *Croatian Geographical Bulletin*, 84(2), 75–91.

<https://doi.org/10.21861/hgg.2022.84.02.05>

Bracho-Estévez, C. A., Acevedo-Limón, L., Rumeu, B., & González-Varo, J. P. (2023). Pisos bioclimáticos para la Cuenca Mediterránea como capas SIG de acceso abierto.

*Ecosistemas*, 32(3), 2571. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2571>

Britannica. (s. d.). *Gobi: Climate*. Consulté le 15 avril 2026,

<https://www.britannica.com/place/Gobi/Climate>

Britannica. (s. d.). *Tropical and subtropical desert climate*. Consulté le 15 avril 2026,

<https://www.britannica.com/science/tropical-and-subtropical-desert-climate>

Casals, P., Gabriel, E., De Cáceres, M., Ríos, A. I., Albà, C., Barbé, M., Castellnou, M., &

Castro, X. (2023). Composition and structure of Mediterranean shrublands for fuel

characterization. *Annals of Forest Science*, 80, 23. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01190-y>

Claro, A. M., Fonseca, A., Fraga, H., & Santos, J. A. (2024). Future agricultural water

availability in Mediterranean countries under climate change: A systematic review. *Water*,

16(17), 2484. <https://doi.org/10.3390/w16172484>

Courrech du Pont, S., Rubin, D. M., Narteau, C., Lapôtre, M. G. A., Day, M., Claudin, P.,

Livingstone, I., Telfer, M. W., Radebaugh, J., Gadal, C., Gunn, A., Hesp, P. A., Carpy, S.,

Bristow, C. S., Baas, A. C. W., Ewing, R. C., & Wiggs, G. F. S. (2024). Complementary

classifications of aeolian dunes based on morphology, dynamics, and fluid mechanics. *Earth-*

*Science Reviews*, 255, 104772. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104772>

Daget, P. (1977a). Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation.

*Vegetatio*, 34(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/BF00119883>

Daget, P. (1977b). Le bioclimat méditerranéen : Analyse des formes climatiques par le système

d'Emberger. *Vegetatio*, 34, 87–103. <https://doi.org/10.1007/BF00054477>

Dahmani-Megrerouche, M. (2002). Typologie et dynamique des chênaies vertes en Algérie.

*Forêt Méditerranéenne*, 23(2), 117–132. <https://www.foret->

[mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-801-typologie-et-dynamique-des-chenai-es-vertes-en-](https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-801-typologie-et-dynamique-des-chenai-es-vertes-en-algerie)

[algerie](https://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-801-typologie-et-dynamique-des-chenai-es-vertes-en-algerie)

De Martonne, E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridité. *La*

*Météorologie*, 449–458. <https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb416126391>

Deitch, M. J., Sapundjieff, M. J., & Feirer, S. T. (2017). Characterizing precipitation variability

and trends in the world's Mediterranean-climate areas. *Water*, 9(4), 259.

<https://doi.org/10.3390/w9040259>

Derdous, O., Bouguerra, H., Tachi, S. E., & Bouamrane, A. (2020). A monitoring of the spatial

and temporal evolutions of aridity in northern Algeria. *Theoretical and Applied Climatology*,

142, 1191–1198. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03339-5>

Derdous, O., Tachi, S. E., & Bouguerra, H. (2021). Spatial distribution and evaluation of aridity indices in Northern Algeria. *Arid Land Research and Management*, 35(1), 1–14.

<https://doi.org/10.1080/15324982.2020.1796841>

Ding, Z., Zhao, J., Wang, J., & Lai, Z. (2020). Yardangs on Earth and implications to Mars: A review. *Geomorphology*, 364, 107230. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107230>

Essa, Y. H., Hirschi, M., Thiery, W., El-Kenawy, A. M., & Yang, C. (2023). Drought characteristics in Mediterranean under future climate change. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 133. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00458-4>

Ewing, R. C., & Kocurek, G. (2010). Aeolian dune-field pattern boundary conditions. *Geomorphology*, 114(3), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.015>

Ferreira, M. T., & Aguiar, F. C. (2006). Riparian and aquatic vegetation in Mediterranean-type streams (western Iberia). *Limnetica*, 25(1–2), 411–424. <https://doi.org/10.23818/limn.25.29>

Flexas, J., Diaz-Espejo, A., Gago, J., Gallé, A., Galmés, J., Gulías, J., & Medrano, H. (2014). Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.002>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. d.). *Ghout oasis system El Oued, Algeria. Globally Important Agricultural Heritage Systems*. Consulté le 15 avril 2026, <https://www.fao.org/giahs/around-the-world/detail/algeria-ghout-oasis-system/en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. d.). *What are drylands?* Consulté le 15 avril 2026, <https://www.fao.org/dryland-forestry/background/what-are-drylands/en/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2005). *Utilisation des engrais par culture en Algérie*. <https://www.fao.org/4/y5953f/y5953f00.htm>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & Plan Bleu. (2018). *State of Mediterranean forests 2018*. <https://openknowledge.fao.org/3/CA2081EN/ca2081en.PDF>

Forner, A., Valladares, F., & Aranda, I. (2018). Mediterranean trees coping with severe drought: Avoidance might not be safe. *Environmental and Experimental Botany*, 155, 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.006>

French, H., & Guglielmin, M. (2021). Tafoni weathering is an azonal process: Examples from Antarctica, Sardinia and Australia. *Geomorphology*, 375, 107556.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107556>

García-Alvarado, J. J., Bello-Rodríguez, V., González-Mancebo, J. M., & Del Arco, M. J. (2024). Updating knowledge of vegetation belts on a complex oceanic island after 20 years under the effect of climate change. *Biodiversity and Conservation*, 33, 2441–2463.

<https://doi.org/10.1007/s10531-024-02864-3>

García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20–36.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>

Gasse, F. (2000). Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 19(1–5), 189–211. [https://doi.org/10.1016/S0277-](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00061-X)

[3791\(99\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00061-X)

Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2004). Dynamic causal patterns of desertification. *BioScience*, 54(9), 817–829. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0817:DCPOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0817:DCPOD]2.0.CO;2)

Ghodbane, F. Z., & Berrached, S. (2020). *Contribution à l'étude des variations spatio-temporelles de l'aridité en Algérie* (Mémoire de master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, Algérie). <https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/2808248468679031.pdf>

Gilman, I. S., & Edwards, E. J. (2020). Crassulacean acid metabolism. *Current Biology*, 30(2), R57–R62. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.11.073>

Girvetz, E. H., & Zganjar, C. (2014). Dissecting indices of aridity for assessing the impacts of global climate change. *Climatic Change*, 126(3–4), 469–483. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1218-9>

Hadeid, M. (2008). Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : Le cas des hautes plaines occidentales algériennes. *Vertigo*, 8(1).

<https://doi.org/10.4000/vertigo.5368>

Haghpanah, M., Hashemipetroudi, S., Arzani, A., & Araniti, F. (2024). Drought tolerance in plants: Physiological and molecular responses. *Plants*, 13(21), 2962.

<https://doi.org/10.3390/plants13212962>

Haichour, S., Nedjimi, B., & Benabdeli, K. (2023). La steppe algérienne, entre pressions anthropogènes et sauvegarde durable / The Algerian steppe: Between anthropogenic pressures and sustainable conservation. *Ecologia Mediterranea*, 49(1), 69–81.

<https://doi.org/10.3406/ecmed.2023.2195>

Holmes, J. A. (2008). Ecology: How the Sahara became dry. *Science*, 320(5877), 752–753.

<https://doi.org/10.1126/science.1158105>

Houyou, Z., Biolders, C. L., Benhorma, H. A., Dellal, A., & Boutmedjet, A. (2016). Evidence of strong land degradation by wind erosion as a result of rainfed cropping in the Algerian steppe: A case study at Laghouat. *Land Degradation & Development*, 27(8), 1788–1796.

<https://doi.org/10.1002/ldr.2295>

Idda, S., Bonté, B., Kuper, M., & Mansour, H. (2021). Revealing the foggara as a living irrigation system through an institutional analysis: Evidence from oases in the Algerian Sahara. *International Journal of the Commons*, 15(1), 431–448. <https://doi.org/10.5334/ijc.1128>

Ihaddaden, A., Velázquez, E., Rey Benayas, J. M., & Kadi-Hanifi, H. (2013). Climate and vegetation structure determine plant diversity in *Quercus ilex* woodlands along an aridity and land use gradient in Northern Algeria. *Flora*, 208(4), 268–284.

<https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.03.009>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (Chapitre 3 : Desertification). <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-3/>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). Figure 3.1: Geographical distribution of drylands, delimited based on the aridity index (AI). In *Special report on climate change and land*. [https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-3/3-1-the-nature-of-desertification/3-1-1-introduction/c3\\_figure-3-1/](https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-3/3-1-the-nature-of-desertification/3-1-1-introduction/c3_figure-3-1/)

- Kendouci, M. A., Mebarki, S., & Kharroubi, B. (2023). Investigation of overexploitation groundwater in arid areas: Case of the lower Jurassic aquifer, Bechar province Southwest of Algeria. *Applied Water Science*, 13, 102. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01904-7>
- King, L. (1949). The pediment landform: Some current problems. *Geological Magazine*, 86(4), 245–250. <https://doi.org/10.1017/S0016756800074665>
- Kocurek, G., & Ewing, R. C. (2005). Aeolian dune field self-organization: Implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. *Geomorphology*, 72(1–4), 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.05.005>
- Kooyers, N. J. (2015). The evolution of drought escape and avoidance in natural herbaceous populations. *Plant Science*, 234, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.02.012>
- Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, A.-M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J.-P., Fagot, M., Rumes, B., Russell, J. M., Darius, F., Conley, D. J., Schuster, M., von Suchodoletz, H., & Engstrom, D. R. (2008). Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science*, 320(5877), 765–768. <https://doi.org/10.1126/science.1154913>
- Lancaster, N. (2023). *Geomorphology of desert dunes* (2e éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108355568>
- Li, S., Su, P., Zhang, H., Zhou, Z., Shi, R., & Gou, W. (2018). Hydraulic conductivity characteristics of desert plant organs: Coping with drought tolerance strategy. *Water*, 10(8), 1036. <https://doi.org/10.3390/w10081036>
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., Ulbrich, U., & Xoplaki, E. (2006). The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. In P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, & R. Boscolo (Éds.), *Mediterranean climate variability* (Developments in Earth and Environmental Sciences, vol. 4, pp. 1–26). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Alcalá, F. J., Sanjuán, M. E., Ruiz, A., Hirche, A., & Puigdefábregas, J. (2018). Doomed to collapse: Why Algerian steppe rangelands

are overgrazed and some lessons to help land-use transitions. *Science of the Total Environment*, 613–614, 1489–1497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.058>

Matmon, A., Mushkin, A., Enzel, Y., Grodek, T., Arnold, M., Aumaître, G., Bourlès, D., & Keddadouche, K. (2013). Erosion of a granite inselberg, Gross Spitzkoppe, Namib Desert. *Geomorphology*, 201, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.005>

Mebrouk, N., Hassani, M. I., & Mahammed, D. (2014). Traditional techniques of underground water catchment in the Algerian Sahara. *Journal of Scientific Research and Reports*, 3(8), 1067–1078. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/8959>

MedECC. (2020). *Climate and environmental change in the Mediterranean Basin – Current situation and risks for the future: First Mediterranean assessment report* (W. Cramer, J. Guiot, & K. Marini, Éds.). Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4768833>

MedECC. (2024). *Interlinking climate change with the water-energy-food-ecosystems (WEFE) nexus in the Mediterranean Basin* (P. Drobinski, M. G. Rivera-Ferre, M. Abdel Monem, F. Driouech, W. Cramer, J. Guiot, J. C. Gattacceca, & K. Marini, Éds.). MedECC Reports. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13365388>

Meddour, R., Meddour-Sahar, O., & Derridj, A. (2015). Structural and floristic features of a *Pinus halepensis* Mill. forest on coastal dune of the Zemmouri Sahel (Algiers, Algeria). *Biocenoses*, 6(1), 20–28. <https://asjp.cerist.dz/en/article/45196>

Miri, A., Dragovich, D., & Dong, Z. (2017). Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. *Scientific Reports*, 7, 12831. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13084-x>

Molina, J. A., Martín-Sanz, J. P., Valverde-Asenjo, I., Sánchez-Jiménez, A., et al. (2023). Mediterranean grassland succession as an indicator of changes in ecosystem biodiversity and functionality. *Biodiversity and Conservation*, 32, 95–118. <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02481-y>

National Integrated Drought Information System. (2023). *Drought assessment in a changing climate: Priority actions & research needs*. [https://www.drought.gov/sites/default/files/2023-11/Drought-Assessment-Changing-Climate-Report-11-2023\\_0.pdf](https://www.drought.gov/sites/default/files/2023-11/Drought-Assessment-Changing-Climate-Report-11-2023_0.pdf)

Noto, L. V., Cipolla, G., Pumo, D., & Francipane, A. (2023). Climate change in the Mediterranean Basin (Part II): A review of challenges and uncertainties in climate change modeling and impact analyses. *Water Resources Management*, 37, 2307–2323.

<https://doi.org/10.1007/s11269-023-03444-w>

Nour, M. M., Aljabi, H. R., Al-Huqail, A. A., Horneburg, B., Mohammed, A. E., & Alotaibi, M. O. (2024). Drought responses and adaptation in plants differing in life-form. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1452427. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1452427>

Observatoire du Sahara et du Sahel. (2004). *North-Western Sahara Aquifer System: Hydrogeology* (Vol. II). OSS. [https://oss-online.org/en/releases/OSS-SASS\\_HYDROGEOLOGY](https://oss-online.org/en/releases/OSS-SASS_HYDROGEOLOGY)

Ould Rebai, A., Hartani, T., Kuper, M., Molle, B., Bouarfa, S., & Laib, K. (2024). An engineering approach to support user-led innovation in improving the performance of artisanal irrigation pivots in the Algerian Sahara. *Agricultural Water Management*, 306, 109201.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109201>

Parc national des Calanques. (s. d.). *Garrigue et maquis*. Consulté le 15 avril 2026,

<https://www.calanques-parcnational.fr/fr/garrigue-et-maquis>

Pardini, A., & Nori, M. (2011). Agro-silvo-pastoral systems in Italy: Integration and diversification. *Pastoralism: Research, Policy and Practice*, 1, 26.

<https://doi.org/10.1186/2041-7136-1-26>

Parsons, A. J., & Abrahams, A. D. (Éds.). (2009). *Geomorphology of desert environments* (2e éd.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9>

Perron, N., Kirst, M., & Chen, S. (2024). Bringing CAM photosynthesis to the table: Paving the way for resilient and productive agricultural systems in a changing climate. *Plant Communications*, 5(3), 100772.

<https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100772>

Pesaresi, S., Galdenzi, D., Biondi, E., & Casavecchia, S. (2014). Bioclimate of Italy: Application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 10(4), 538–553.

<https://doi.org/10.1080/17445647.2014.891472>

- Roumieux, C., Raccasi, G., Franquet, E., Sandoz, A., Torre, F., & Metge, G. (2010). Actualisation des limites de l'aire du bioclimat méditerranéen selon les critères de Daget (1977). *Ecologia Mediterranea*, 36(2), 17–24. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2010.1363>
- Rundel, P. W., Arroyo, M. T. K., Cowling, R. M., Keeley, J. E., Lamont, B. B., & Vargas, P. (2016). Mediterranean biomes: Evolution of their vegetation, floras, and climate. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 47, 383–407. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032330>
- Sahnouni, R., & Abdesselam, S. (2023). Arid rangeland degradation and its driving forces in Southern Hodna, Algeria. *Journal of Landscape Ecology*, 16(2), 114–128. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0013>
- Saïdi, S., Zouari, K., Marc, V., Béji, R., & Mamou, A. (2011). An assessment of recharge possibility to North-Western Sahara Aquifer System (NWSAS) using environmental isotopes. *Journal of Hydrology*, 398(3–4), 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.004>
- Sheffer, E. (2012). A review of the development of Mediterranean pine–oak ecosystems after land abandonment and afforestation: Are they novel ecosystems? *Annals of Forest Science*, 69, 429–443. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0181-0>
- Slimani, H., Aidoud, A., & Rozé, F. (2010). 30 years of protection and monitoring of a steppe rangeland undergoing desertification. *Journal of Arid Environments*, 74(6), 685–691. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.10.015>
- Stromberg, J. C., Setaro, D. L., Gallo, E. L., Lohse, K. A., & Meixner, T. (2017). Riparian vegetation of ephemeral streams. *Journal of Arid Environments*, 138, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.004>
- Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (2020). Drought stress responses and resistance in plants: From cellular responses to long-distance intercellular communication. *Frontiers in Plant Science*, 11, 556972. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972>
- Telbisz, T., & Keszler, O. (2018). DEM-based morphometry of large-scale sand dune patterns in the Grand Erg Oriental (Northern Sahara Desert, Africa). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 382. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3738-5>

- Tooth, S. (2000). Process, form and change in dryland rivers: A review of recent research. *Earth-Science Reviews*, 51(1–4), 67–107. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00014-3)
- Toubal, O., Boussehaba, A., Toubal, A., & Samraoui, B. (2014). Biodiversité méditerranéenne et changements globaux : cas du complexe de zones humides de Guerbès-Senhadja (Algérie). *Physio-Géo*, 8, 273–295. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.4217>
- UN-Water. (2021, 7 janvier). *Assessment of the water-food-energy-ecosystems nexus in the North Western Sahara Aquifer System*. <https://www.unwater.org/news/assessment-water-food-energy-ecosystems%C2%A0nexus-north-western-sahara-aquifer-system>
- United Nations Convention to Combat Desertification. (1994). *United Nations Convention to Combat Desertification*. [https://catalogue.unccd.int/936\\_UNCCD\\_Convention\\_ENG.pdf](https://catalogue.unccd.int/936_UNCCD_Convention_ENG.pdf)
- United Nations Convention to Combat Desertification. (2024). *The global threat of drying lands: Regional and global aridity trends and future projections*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/9789295128163>
- United States Geological Survey. (s. d.). *Types of deserts*. Consulté le 15 avril 2026, <https://pubs.usgs.gov/gip/deserts/types/>
- United States Geological Survey. (s. d.). *What is a desert?* Consulté le 15 avril 2026, <https://pubs.usgs.gov/gip/deserts/what/>
- Vennetier, M., Ripert, C., Maille, E., Blanc, L., Torre, F., Roche, P., Tatoni, T., & Brun, J.-J. (2008). A new bioclimatic model calibrated with vegetation for Mediterranean forest areas. *Annals of Forest Science*, 65, 711. <https://doi.org/10.1051/forest:2008050>
- Vicente, E., Vilagrosa, A., Ruiz-Yanetti, S., Manrique-Alba, À., González-Sanchís, M., Moutahir, H., Chirino, E., Del Campo, A., & Bellot, J. (2018). Water balance of *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. forests in semiarid climates: A review in a climate change context. *Forests*, 9(7), 426. <https://doi.org/10.3390/f9070426>
- Vogiatzakis, I. N., Mannion, A. M., & Griffiths, G. H. (2006). Mediterranean ecosystems: Problems and tools for conservation. *Progress in Physical Geography*, 30(2), 175–200. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp472ra>

Yapiyev, V., Sagintayev, Z., Inglezakis, V. J., Samarkhanov, K., & Verhoef, A. (2017).

Essentials of endorheic basins and lakes: A review in the context of current and future water resource management and mitigation activities in Central Asia. *Water*, 9(10), 798.

<https://doi.org/10.3390/w9100798>

Younsi, S. E., & Bouziane, Z. (2023). Plant diversity in Mediterranean coastal dune systems subjected to anthropogenic disturbances. *Biodiversity: Research and Conservation*, 72, 25–38.

<https://doi.org/10.14746/biorc.2023.72.4>

Zhang, Z., Ramstein, G., Schuster, M., Li, C., Contoux, C., & Yan, Q. (2014). Aridification of the Sahara desert caused by Tethys Sea shrinkage during the Late Miocene. *Nature*, 513(7518), 401–404.

<https://doi.org/10.1038/nature13705>

Zomer, R. J., Xu, J., & Trabucco, A. (2022). Version 3 of the Global Aridity Index and

Potential Evapotranspiration Database. *Scientific Data*, 9, 409. [https://doi.org/10.1038/s41597-](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01493-1)

[022-01493-1](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01493-1)