

Chapitre 2 : La gestion durable des ressources en eau – Approches et instruments

1. Introduction

La gestion durable de l'eau est un pilier essentiel de la sécurité alimentaire. En effet, l'agriculture utilise environ 70 % de l'eau douce prélevée mondialement. Sans une eau disponible en quantité et en qualité suffisantes, ni les cultures ni l'élevage ne peuvent subvenir aux besoins alimentaires. Or, face à la croissance démographique et au changement climatique, la ressource en eau est soumise à de fortes pressions (surexploitation des nappes, sécheresses plus fréquentes, qualité dégradée, etc.). **Assurer une gestion durable de l'eau** signifie répondre aux besoins présents en eau (pour l'agriculture, la consommation humaine, l'industrie, les écosystèmes) tout en préservant la ressource pour les générations futures. Cela suppose d'améliorer l'efficacité des usages, de protéger les écosystèmes aquatiques et de développer des modes de gouvernance équitables. En lien direct avec la sécurité alimentaire, une meilleure gestion de l'eau permet d'augmenter la production agricole de manière durable : « *L'eau étant un élément vital pour l'agriculture, une meilleure gestion de l'eau est cruciale pour une production alimentaire durable* ». À l'inverse, une mauvaise gestion (gaspillage, pollution, conflit d'usages) menace la productivité agricole et donc l'accès à l'alimentation.

2. Les grandes approches de la gestion durable de l'eau

Plusieurs approches complémentaires guident la gestion durable de l'eau. Parmi les plus importantes figurent : la **Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)**, le **Nexus eau-énergie-alimentation**, la **gestion adaptative** (notamment vis-à-vis du changement climatique) associée aux **solutions fondées sur la nature (SFN)**, ainsi que la **gestion de la demande en eau** et la **gestion des risques** liés à l'eau. Chacune de ces approches apporte un cadre conceptuel pour aborder la complexité de la ressource en eau de façon durable.

2.1. Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

La notion de **GIRE** a émergé sur la scène internationale lors de la Conférence de Dublin en 1992, afin de repenser fondamentalement la manière de gérer l'eau. La GIRE vise à dépasser

les visions sectorielles cloisonnées (agriculture, industrie, eau potable, environnement, etc.) et à adopter une approche **holistique** de la ressource à l'échelle du bassin versant. Le *Partenariat Mondial pour l'Eau* (GWP) la définit comme « *un processus favorisant le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des territoires et des ressources qui s'y rapportent, en vue de maximiser de manière équitable le bien-être économique et social, sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux* ». En d'autres termes, la GIRE cherche à concilier les objectifs de développement socio-économique et de protection des écosystèmes, par une planification intégrée de tous les usages de l'eau.

Concrètement, la GIRE se traduit par : (i) une gestion par bassin versant (un *territoire de l'eau* pertinent où toutes les eaux sont interconnectées) ; (ii) la coordination entre secteurs (agriculture, énergie, santé, environnement...) et entre échelles (du local au national) ; (iii) la participation de l'ensemble des acteurs (usagers, autorités, société civile) à la prise de décision ; et (iv) une prise en compte simultanée des dimensions *environnementales, sociales et économiques* de l'eau.

Les principes d'intégration de la GIRE : La GIRE implique une intégration multi-dimensionnelle :

- **Intégration de toutes les ressources** : considérer l'eau dans toutes ses formes (surface, souterraine, eaux pluviales, usées) ainsi que les milieux aquatiques et les services éco systémiques associés.
- **Intégration des savoirs et expertises** : croiser les connaissances hydrologiques, agronomiques, écologiques, socio-économiques... et les outils de différentes disciplines.
- **Intégration sociale des usages** : prendre en compte l'ensemble des besoins (alimentation en eau, irrigation, usages économiques, besoins des écosystèmes) et harmoniser les usages pour éviter les conflits.
- **Intégration des acteurs** : assurer la participation des usagers, des collectivités et de l'État dans la gouvernance de l'eau (*gestion participative*).

- **Intégration économique** : reconnaître la valeur économique de l'eau et les mécanismes incitatifs (tarification, financement) pour une utilisation efficace et équitable.
- **Intégration spatiale** : gérer l'eau à l'échelle pertinente du **bassin versant**, en cohérence avec les territoires administratifs (du local au bassin hydrographique entier).

Depuis les années 1990, la GIRE a été adoptée dans de nombreux pays via de nouvelles **lois sur l'eau**, la création d'**organismes de bassin** et l'élaboration de **plans nationaux** intégrés. Dans l'Union européenne, par exemple, la Directive-Cadre sur l'Eau (2000) s'inscrit dans cette approche. Cependant, mettre en œuvre la GIRE reste un défi : il faut traduire ces principes en actions concrètes sur le terrain (investissements, concertation locale, etc.), ce qui nécessite des cadres institutionnels adaptés et du **pragmatisme**. Malgré ces difficultés, la GIRE demeure le cadre de référence pour une gestion durable et équitable de l'eau à long terme.

2.2. Nexus eau-énergie-alimentation

L'approche **Nexus eau-énergie-alimentation** (parfois étendue aux écosystèmes, **Nexus WEF** en anglais) a émergé dans les années 2010 pour souligner les **interdépendances étroites** entre ces trois secteurs vitaux. L'eau, l'énergie et l'agriculture sont en effet reliés : l'agriculture a besoin d'eau (et d'énergie pour le pompage, l'irrigation), l'énergie a besoin d'eau (pour le refroidissement des centrales, l'hydroélectricité), et la production alimentaire dépend aussi de l'énergie (machinisme, engrais) tout en fournissant de la biomasse pour des bioénergies. Une décision dans un secteur peut donc avoir des effets sur les autres. Le Nexus propose une **approche systémique**, où l'on analyse ensemble les usages et besoins en eau, en énergie et en alimentation, afin de **maximiser les synergies** et de réduire les conflits entre secteurs. Il s'agit de passer d'une gestion sectorielle en silos à une **gestion coordonnée des ressources naturelles**, en tenant compte des besoins de chaque secteur et de leurs interactions.

Ainsi, au lieu d'optimiser séparément l'eau, l'énergie ou la production agricole, le Nexus cherche des solutions intégrées gagnant-gagnant. Par exemple, l'utilisation de **techniques agricoles moins énergivores et moins consommatrices d'eau** (agroécologie, agrovoltaïsme) peut simultanément économiser de l'eau et de l'énergie tout en maintenant la production alimentaire. De même, la **valorisation des déchets organiques agricoles en bioénergie** peut

fournir de l'énergie renouvelable tout en réduisant la pollution de l'eau. L'objectif est de **minimiser les compromis** ("trade-offs") en **optimisant les synergies** : « *en intégrant ces secteurs dans un cadre commun, le Nexus permet d'assurer une exploitation plus rationnelle des ressources naturelles, réduisant les tensions intersectorielles et créant des co-bénéfices économiques, sociaux et environnementaux* ».

Concrètement, l'approche Nexus se traduit par des outils d'**analyse intégrée** (modèles reliant eau, énergie, alimentation), par la mise en place de **plateformes de gouvernance intersectorielles** (réunissant ministères de l'agriculture, de l'eau, de l'énergie, etc.), et par des **projets pilotes** illustrant ces connexions. Par exemple, un projet de station de dessalement alimentée par des énergies renouvelables pour l'irrigation illustre le Nexus : il répond simultanément aux enjeux d'eau (augmenter la ressource disponible), d'énergie (via du renouvelable pour alimenter l'usine) et d'alimentation (sécuriser l'eau pour l'agriculture). Le Nexus est donc une approche récente qui complète la GIRE en mettant l'accent sur *l'interface entre secteurs*, dans un contexte de développement durable et de changement climatique.

2.3. Gestion adaptative et solutions fondées sur la nature

Face à l'incertitude grandissante (notamment due au changement climatique), la **gestion adaptative** (*adaptive management*) est une approche prônant la **flexibilité** et l'**apprentissage continu** dans la gestion de l'eau. Plutôt que de s'en tenir à des plans figés, la gestion adaptative prévoit d'**ajuster régulièrement les stratégies** en fonction des retours d'expérience, des données de suivi et de l'évolution des conditions hydrologiques. Cette approche itérative « apprendre en faisant » est particulièrement recommandée pour faire face aux conditions changeantes et imprévisibles. Par exemple, dans un bassin soumis à des sécheresses fréquentes, une gestion adaptative mettra en place un suivi des indicateurs (niveau des nappes, débits) et des *seuils de déclenchement* d'actions (restrictions progressives, réallocations) en fonction de l'état de la ressource. Elle implique également d'intégrer l'**incertitude** dans la planification (par des scénarios climatiques variés) et de favoriser la **résilience** du système. Comme le souligne une étude, les principes et outils de la gestion adaptative permettent de s'ajuster « *aux conditions changeantes et incertaines des ressources en eau* ». Cette approche requiert une gouvernance souple, la participation des parties prenantes et un bon système d'information pour être réactive.

De plus en plus, les plans de gestion intègrent cette flexibilité, par exemple via des *plans sécheresse* évolutifs ou des *marges de sécurité* dans les allocations d'eau.

En parallèle, les **Solutions fondées sur la nature (SFN)** – appelées aussi **mesures écosystémiques** gagnent du terrain comme approche durable. Il s'agit d'**utiliser les processus naturels** et les écosystèmes pour répondre aux défis de gestion de l'eau, plutôt que de recourir systématiquement à des infrastructures purement « grises » (barrages, canalisations). Les SFN s'appuient sur les **services rendus par les écosystèmes** (auto-épuration, régulation des crues, recharge des nappes, etc.) et visent des solutions qui « *apportent des réponses concrètes aux grands défis sociétaux (changement climatique, risques naturels, approvisionnement en eau, sécurité alimentaire...), tout en préservant la biodiversité* ». Autrement dit, les SFN offrent un double bénéfice : elles contribuent à la gestion de l'eau et à la protection de l'environnement.

Exemples de solutions fondées sur la nature utiles en gestion de l'eau : la **restauration des zones humides** et des plaines d'inondation permet d'atténuer les crues et d'améliorer la qualité de l'eau (épuration naturelle) ; la **désimperméabilisation et la végétalisation urbaines** (toitures végétales, parcs, noues drainantes) contribuent à absorber les eaux pluviales et à réduire les inondations urbaines; la **renaturation des rivières** (reméandrage, suppression de digues inutiles) redonne de l'espace d'écoulement et atténue les crues tout en restaurant les habitats ; en zone agricole, la **plantation de haies** et l'agroforesterie réduisent le ruissellement et l'érosion, améliorant l'infiltration ; les **infrastructures vertes** comme les **mares et zones de rétention naturelles** stockent l'eau en période humide pour la restituer en période sèche. Ces exemples illustrent que les solutions naturelles sont multiples et souvent combinables aux solutions techniques classiques. Dans le domaine de l'eau, on peut citer l'utilisation de **filtres plantés de roseaux** pour traiter les eaux usées, les **techniques agricoles de conservation des sols** pour mieux utiliser l'eau de pluie, ou encore la **recharge des nappes par des zones d'infiltration paysagères**. L'Office International de l'Eau note ainsi que dans le domaine de l'eau, « *les solutions fondées sur la nature se déclinent en de très nombreuses actions: gestions alternatives des eaux pluviales, pratiques agricoles limitant les écoulements et favorisant l'infiltration, urbanisme durable et perméable, traitements par zones végétalisées, etc.* ». Les SFN incarnent donc une gestion adaptative "par la nature", d'autant plus précieuse dans un contexte de **changement climatique** où il faut à la fois s'adapter (ex. restaurer des mangroves pour se

protéger des tempêtes côtières) et atténuer (ex. préserver des zones humides pour séquestrer du carbone).

Gestion adaptative et **solutions fondées sur la nature** vont de pair pour rendre la gestion de l'eau plus **résiliente** et **durable**. La première fournit une philosophie de gestion flexible sous incertitude, la seconde offre des solutions concrètes basées sur les écosystèmes pour répondre aux besoins en eau tout en renforçant le capital naturel.

2.4. Gestion de la demande en eau et gestion des risques

Outre les approches précédentes, deux orientations pratiques méritent une attention particulière : la **gestion de la demande** d'eau d'une part, et la **gestion des risques hydriques** d'autre part. Ces approches visent à **réduire la pression** sur la ressource et à **anticiper les crises**, complétant ainsi les stratégies plus globales.

2.4.1. Gestion de la demande en eau

La **gestion de la demande en eau** (GDE) consiste à agir sur *les usages* de l'eau plutôt que d'augmenter indéfiniment l'offre. Traditionnellement, face à une demande croissante, on cherchait à mobiliser de nouvelles ressources (construire un barrage, forer de nouveaux puits). La GDE renverse la perspective : « *inciter à un meilleur usage de l'eau avant d'envisager une augmentation de l'offre* ». Il s'agit donc de **maîtriser la consommation** et d'améliorer l'**efficacité** de chaque usage. La GDE comprend l'ensemble des mesures – techniques, économiques, institutionnelles – visant à accroître l'**efficience** de l'utilisation de l'eau dans les différents secteurs (agriculture, industrie, usages domestiques). Concrètement, cela passe par : la **réduction des pertes** (par exemple, réparer les fuites dans les réseaux d'eau potable, améliorer l'entretien des canaux d'irrigation), l'**équipement économe** (adopter des techniques d'irrigation efficaces, des dispositifs d'économie d'eau dans les bâtiments), la **sensibilisation** des usagers (éducation à la sobriété, changement des comportements) et des **incitations économiques** (tarification progressive dissuadant les gros gaspillages, subventions pour l'achat de matériel économe, etc.).

Par exemple, équiper une maison de **dispositifs hydroéconomes** (mousseurs sur les robinets, chasses d'eau à double débit, électroménager économe) peut réduire la consommation jusqu'à 30-40 % sans perte de confort. En agriculture, passer d'une irrigation par submersion à

une **irrigation goutte-à-goutte** peut *doubler* l'efficacité de l'eau d'irrigation : l'efficacité du goutte-à-goutte atteint couramment **90 %** contre **60 %** environ pour l'irrigation gravitaire traditionnelle. Autre exemple, la **réutilisation des eaux usées traitées** pour l'irrigation permet de satisfaire une partie de la demande agricole sans puiser dans les ressources d'eau douce conventionnelles. Toutefois, la GDE ne se limite pas aux innovations techniques : elle comporte aussi une dimension de **gouvernance**. Les politiques de gestion de la demande impliquent souvent de fixer des *objectifs chiffrés* d'économie d'eau, de développer des *plans d'action par secteur*, et de **suivre des indicateurs** (consommation par usager, rendement des réseaux, productivité de l'eau en agriculture, etc.) pour mesurer les progrès. En somme, la GDE vise un usage plus *sobre* et plus *efficace* de chaque goutte d'eau.

En plus d'économiser la ressource, la gestion de la demande apporte d'autres bénéfices : elle retarde ou évite des investissements coûteux (nouveaux forages, stations de traitement), et elle peut favoriser une **meilleure équité d'accès** en libérant de l'eau pour d'autres usages ou d'autres usagers. D'un point de vue social, il importe d'accompagner la GDE par de la sensibilisation et des mesures d'équité (tarifs sociaux, etc.) pour que l'effort ne pénalise pas les plus vulnérables.

2.4.2. *Gestion des risques liés à l'eau*

La **gestion des risques hydriques** concerne principalement les risques de **pénurie** (sécheresses) et d'**excès d'eau** (inondations), exacerbés par le changement climatique. Une gestion durable des ressources en eau doit anticiper ces aléas pour réduire leur impact sur la sécurité alimentaire et les sociétés. On parle souvent de renforcer la **résilience** face aux risques d'origine hydrologique.

Du côté des **sécheresses**, la gestion des risques consiste à élaborer des *plans sécheresse* ou *plans de pénurie* détaillant les mesures à prendre avant et pendant la crise. Cela comprend : la mise en place de *systèmes d'alerte précoce* (surveillance des pluies, des débits, niveaux de nappes), la définition de *seuils* déclenchant des actions (par exemple seuil de débit en deçà duquel on limite certains usages non prioritaires), une *gradation des restrictions* d'usage de l'eau (allant de recommandations d'économie à des interdictions temporaires d'arroser, etc.), et des *mesures structurelles* pour atténuer l'impact (réserves stratégiques d'eau, connexions de secours entre réseaux). L'objectif est de **passer d'une gestion purement réactive en crise à une gestion**

préventive et planifiée. Par exemple, l'**Espagne** et le **Maroc** se sont dotés de plans de gestion de la sécheresse précisant à l'avance le partage de l'eau en cas de déficit. La littérature souligne « *l'importance de la gestion préventive des risques de sécheresse, nécessitant une approche intégrée pour faire face aux crises hydriques* ». Intégrée signifie ici mobiliser à la fois les leviers de demande (économies d'eau) et d'offre (mobiliser des ressources alternatives si possible), coordonner les acteurs (agences de l'eau, agriculteurs, services d'eau potable, etc.) et coupler les mesures d'urgence avec des mesures de long terme (par ex. améliorer le stockage d'eau du sol via l'agroécologie pour mieux encaisser les sécheresses).

Concernant les **inondations**, la gestion des risques passe par l'**aménagement du territoire** (éviter de construire en zones inondables, ou adapter les bâtiments), la **gestion des crues** (zones d'expansion de crue, barrages écrêteurs, systèmes de drainage urbain), des *plans d'alerte* et de protection civile pour évacuer en cas de crue majeure, etc. Là aussi, les **solutions fondées sur la nature** jouent un rôle important : par exemple, restaurer des plaines alluviales permet de stocker plus d'eau de crue en amont et d'éviter des dommages en aval. La Directive Européenne Inondation (2007) incite ainsi à réaliser des *plans de gestion des risques inondation* intégrés au niveau des bassins.

Un autre risque hydrique croissant est la **pollution de l'eau** (risque pour la santé et les usages). La gestion préventive consistera par exemple à protéger les captages d'eau potable (périmètres de protection où certaines activités sont réglementées), à déployer des dispositifs anti-pollution (filtres, bassins tampons), et bien sûr à réduire à la source les polluants (pesticides, rejets industriels).

3. Les instruments de gestion des ressources en eau

Pour mettre en pratique les approches ci-dessus, les gestionnaires de l'eau disposent d'un **panel d'instruments** variés. On peut les classer en plusieurs catégories complémentaires :

- **Instruments juridiques et de gouvernance** (lois, droits d'eau, institutions, régulations)
- **Instruments économiques** (tarification, subventions, *paiements pour services écosystémiques...*)
- **Instruments technologiques** (équipements et infrastructures innovants : irrigation efficiente, recyclage de l'eau, recharge artificielle...)

- **Instruments sociaux et participatifs** (organisations d'usagers, comités de gestion participative, sensibilisation)
- **Instruments informationnels** (données, indicateurs, outils numériques, recherche scientifique)

3.1. Instruments juridiques et de gouvernance

Les outils juridiques forment le cadre dans lequel s'organise la gestion de l'eau. Une **loi sur l'eau** moderne définit généralement : les principes de gestion (eau comme patrimoine commun, droit d'accès pour tous, etc.), le régime de propriété ou d'usage de l'eau, les institutions de gestion et les règles d'allocation de la ressource. La **décentralisation par bassin versant** est un élément clé de gouvernance durable : cela se concrétise par la création d'**organismes de bassin** (tels que les *Agences de l'eau* et *Comités de bassin*) chargés de planifier et coordonner la gestion à l'échelle hydrographique. Ces agences collectent souvent des redevances auprès des usagers et financent des actions de protection et d'économie d'eau. Elles servent également de lieux de concertation entre les différents acteurs d'un bassin (élus, agriculteurs, industriels, associations), jouant un rôle de **médiation** en cas de conflits d'usage.

Un autre instrument juridique important est le système de **droits d'eau** ou de **permis de prélèvement**. Il s'agit d'autorisations administratives ou de titres privatifs donnant le droit d'utiliser un certain volume d'eau, souvent assortis de conditions (période, usage, débit réservé à laisser dans le cours d'eau, etc.). Ce mécanisme permet de **contrôler les volumes prélevés** et d'éviter la surexploitation. Dans certains pays, ces droits peuvent être **échangeables** (marché de l'eau, comme en Australie ou dans l'Ouest des États-Unis) pour allouer l'eau vers les usages à plus haute valeur en période de pénurie. Le cadre juridique fixe aussi des normes de qualité (normes de potabilité, de rejets industriels, etc.) qui influencent grandement la gestion quantitative et qualitative.

La gouvernance de l'eau inclut aussi la **planification stratégique** via des documents cadres (plans hydrologiques, schémas d'aménagement, plans sécheresse, etc.) qui orientent les investissements et les actions sur plusieurs années. Ces plans, lorsqu'ils sont bien conçus, permettent d'intégrer les différents volets (quantité, qualité, écosystèmes) et de fixer des objectifs de durabilité.

Enfin, un aspect gouvernance essentiel est la **participation des parties prenantes**. Au-delà de la présence d'usagers dans les Comités de bassin, on promeut de plus en plus des instances locales telles que les **comités de riverains**, **conseils d'usagers** ou **forums multi-acteurs** pour la gestion de l'eau. Ces espaces participatifs permettent de recueillir le savoir local, d'augmenter l'acceptabilité des mesures et d'encourager une **coresponsabilité**. Par exemple, dans l'irrigation agricole, la création d'**Associations d'Usagers de l'Eau Agricole (AUEA)** (équivalent des *Water User Associations*) a montré son utilité : ces associations gèrent collectivement la distribution de l'eau dans un périmètre irrigué, collectent les redevances d'irrigation et assurent l'entretien des canaux, avec un sens de propriété par les usagers. Initiées au Maroc et dans d'autres pays, les AUEA renforcent la participation et peuvent intégrer des pratiques durables (calendrier tournant d'irrigation, etc.) adaptées aux réalités locales.

Les instruments juridiques et institutionnels établissent les **règles du jeu** (qui peut prélever combien, pour quel usage, avec quelles responsabilités) et les **instances** pour faire appliquer ces règles. Une bonne gouvernance de l'eau repose sur un cadre légal clair, des institutions efficaces et transparentes, et une participation active des acteurs à tous les niveaux. C'est la condition pour que les mesures techniques ou économiques puissent s'implanter durablement et équitablement.

3.2. Instruments économiques

Les mécanismes économiques sont des **leviers puissants** pour orienter les comportements des usagers de l'eau et financer la gestion durable. Le principal instrument est la **tarification de l'eau**. En établissant un prix pour l'eau (que ce soit pour l'irrigation ou l'eau potable), on peut à la fois envoyer un **signal de rareté** (inciter à ne pas gaspiller) et récupérer des fonds pour l'entretien des infrastructures ou la protection de la ressource (*principe « l'eau paie l'eau »*). Les tarifs peuvent être conçus de manière à encourager la sobriété : par exemple via une **tarification progressive par tranches** (le prix au m³ augmente avec le volume consommé) qui pénalise les gros consommateurs.

Dans l'irrigation agricole, l'eau est souvent facturée à un tarif faible, ce qui n'incite pas à l'économie. De plus en plus de pays réfléchissent à introduire une forme de tarification volumétrique en irrigation pour améliorer l'efficacité – tout en préservant la viabilité économique des exploitations agricoles. Des **subventions ciblées** peuvent accompagner ces

changements : par exemple, subventionner l'investissement dans du matériel d'irrigation économe (goutte-à-goutte, sondes d'humidité) afin de réduire la consommation d'eau. L'objectif est d'**aligner les incitations économiques avec l'intérêt environnemental**.

Un autre instrument économique innovant est le recours aux **Paiements pour Services Environnementaux (PSE)** liés à l'eau. Il s'agit de **rémunérer financièrement des acteurs** (souvent des agriculteurs, des propriétaires fonciers) pour des pratiques qui préservent ou restaurent la ressource en eau.

D'autres instruments économiques : les **subventions** peuvent être réorientées pour ne pas encourager le gaspillage (par exemple supprimer une subvention à l'électricité agricole qui incitait à pomper sans contrainte). Des **taxes ou redevances** environnementales peuvent être instaurées sur les rejets polluants, sur les usages qui impactent la ressource (redevance prélèvement, redevance pollution) – c'est le cas en France où les Agences de l'eau perçoivent des redevances sur les prélèvements et sur les effluents, modulées selon les volumes et la toxicité, afin d'inciter à réduire l'empreinte sur la ressource. Dans certains contextes, la **création de marchés de l'eau** allouant des *quotas* échangeables est aussi un instrument économique : cela permet une flexibilité dans l'allocation en fonction de la valeur productive de l'eau (ceux qui ont moins besoin pouvant céder une partie de leur quota à ceux qui ont un besoin critique). L'Australie a mis en place un tel marché dans le bassin du Murray-Darling, avec des résultats mitigés (efficacité économique mais aussi risques de surexploitation si le plafonnement global des quotas est inadéquat).

3.3. Instruments technologiques

La gestion durable de l'eau bénéficie largement des avancées technologiques, qui offrent de nouvelles solutions pour économiser l'eau, augmenter l'offre disponible ou améliorer la qualité. Parmi les instruments technologiques majeurs, on trouve : les **techniques d'irrigation efficaces**, la **réutilisation des eaux usées traitées**, la **recharge artificielle des nappes** et diverses innovations de traitement et de stockage de l'eau.

- **Irrigation efficace** : L'irrigation consomme à elle seule 70 % de l'eau prélevée dans le monde. Améliorer son efficacité a un impact énorme sur la durabilité. Les systèmes modernes tels que l'irrigation **goutte-à-goutte** ou **micro-aspiration** apportent l'eau au

plus près des racines, en contrôlant finement les doses. Leur efficacité d'utilisation de l'eau est très élevée (90-95 % d'eau appliquée réellement utilisée par la plante) comparée aux méthodes gravitaires traditionnelles (inondation ou sillon) dont la moitié ou plus de l'eau peut être perdue par évaporation, ruissellement ou percolation. De nombreux pays ont lancé des programmes de conversion à ces techniques : **le Maroc**, par exemple, via son *Plan National d'Économie d'Eau d'Irrigation*, subventionne l'adoption du goutte-à-goutte dans les périmètres irrigués, entraînant des économies d'eau substantielles et une augmentation de la productivité par mètre cube. En parallèle, l'**irrigation de précision** se développe : sondes tensiométriques dans les champs pour n'irriguer qu'en cas de besoin, pilotage par ordinateur et capteurs météorologiques, etc., ce qui évite les excès d'arrosage. Sur un plan plus structurel, la modernisation passe aussi par le **revêtement des canaux** ou leur remplacement par des conduites fermées pour supprimer les pertes par fuite et infiltration.

- **Réutilisation des eaux usées traitées** : Au lieu de considérer les eaux usées comme un déchet, la vision durable est de les voir comme une **ressource**. Après traitement en station d'épuration, ces effluents peuvent être réutilisés pour certains usages ne nécessitant pas de l'eau potable : irrigation agricole, arrosage d'espaces verts, recharge de nappes, usages industriels (refroidissement, lavage), voire potable indirect (potabilisation via un traitement avancé et mélange en milieu naturel). De nombreux pays arides misent sur la réutilisation (*reuse* en anglais) pour pallier le manque d'eau. **La Tunisie** par exemple a investi dans ce domaine : en 2022, environ **12,2 millions de m³** d'eaux usées épurées ont été réutilisés pour irriguer 2 363 hectares (soit 6 % des eaux usées traitées). L'objectif national est d'augmenter ce taux de réutilisation à 15 % et au-delà dans les décennies à venir, avec un potentiel de 95 000 ha irrigués par ces eaux d'ici 2050. La réutilisation présente le double avantage d'**économiser de l'eau** (chaque m³ réutilisé réduit d'autant les prélèvements dans le milieu naturel) et de **réduire les pollutions** (moins de rejets d'eaux usées dans les rivières). Toutefois, elle nécessite des **infrastructures adaptées** (réseaux séparés, traitement tertiaire pour garantir la salubrité) et une acceptation socio-culturelle (lever les réticences liées à l'utilisation d'eaux usées). Là encore, les avancées technologiques (traitements membranaires, désinfection UV, etc.) permettent d'obtenir une eau recyclée de qualité fiable pour l'irrigation voire la recharge potable. Un exemple

emblématique est celui d'**Israël**, leader mondial, qui réutilise plus de 80 % de ses eaux usées traitées, principalement pour l'irrigation agricole, contribuant ainsi à sa sécurité hydrique.

- **Recharge artificielle des nappes** : Pour lutter contre la baisse des niveaux d'eau souterraine (due à la surexploitation ou à la diminution des pluies efficaces), une solution technologique consiste à **recharger artificiellement les aquifères**. Cela peut se faire par des **bassins d'infiltration**, des **puits d'injection** ou la réalimentation de puits existants. L'idée est de profiter des excédents d'eau en période humide (ou d'utiliser des eaux traitées) pour les stocker dans le sol et les récupérer plus tard. Cette technique, la *Recharge Maîtrisée des Aquifères* (RMA), est utilisée de longue date dans certaines régions. Par exemple, **dans le nord de la France**, dès 1973, le Syndicat des eaux de Dunkerque a mis en place une unité de réalimentation de la nappe de Houlle-Moulle : en période hivernale, de l'eau de surface prélevée dans la rivière voisine est traitée puis infiltrée via un bassin dans l'aquifère de la craie, ce qui permet de « *sécuriser l'alimentation en eau potable de plus de 215 000 habitants* » en anticipant un déficit de recharge naturelle. Cette recharge artificielle de **~3 millions de m³ par an** a durablement soutenu la nappe, bien que les besoins aient diminué récemment grâce aux économies d'eau. D'autres exemples existent : en **Espagne** (plaine côtière de Valence) on utilise les excès d'eau d'irrigation en hiver pour recharger la nappe phréatique ; en **Inde** ou au **Niger**, de petits barrages et diguettes ralentissent le ruissellement des eaux de pluie et augmentent leur infiltration locale, réalimentant les puits villageois ; aux **États-Unis** (Californie, Arizona), des programmes de *groundwater banking* stockent l'eau en aquifère durant les années humides pour la pomper en années sèches. La recharge artificielle est ainsi un instrument de **gestion dynamique** de la ressource en eau, qui peut s'avérer crucial face aux aléas climatiques (on le voit comme un moyen d'adaptation au changement climatique, pour stocker l'eau des épisodes pluvieux intenses et compenser des sécheresses plus longues). Il faut veiller toutefois à la qualité de l'eau injectée (risques de colmatage ou de contamination de la nappe) et à un suivi rigoureux (pour éviter de dépasser la capacité de l'aquifère).

- **Technologies de traitement et de dessalement** : Pour accroître l'offre en eau exploitable, la technologie offre aussi l'option du **dessalement** de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Longtemps coûteux et très énergivore, le dessalement par osmose inverse est devenu plus efficace et se répand dans de nombreux pays souffrant de pénurie d'eau douce (Moyen-Orient, Australie, Espagne, etc.). S'il est alimenté par des énergies renouvelables, il peut s'inscrire dans une perspective durable, bien qu'il faille gérer le rejet de saumures concentrées. Par ailleurs, les **procédés de traitement de l'eau** continuent de s'améliorer : filtration membranaire, désinfection avancée, élimination des micropolluants (charbons actifs, ozonation) – ces innovations permettent de **potabiliser** des eaux de qualité moindre, d'éliminer les polluants émergents, ou encore de **réutiliser** l'eau en boucle fermée dans l'industrie (usines « zéro rejet »). Bien que ces technologies soient pointues, leur diffusion rend possible une utilisation plus *circulaire* et *sobre* de l'eau.

3.4. Instruments sociaux et participatifs

La gestion durable de l'eau n'est pas qu'une affaire d'ingénieurs et d'économistes – c'est aussi un enjeu **social** qui requiert l'implication active des usagers et des communautés. Les instruments "sociaux et participatifs" visent à mobiliser le **capital humain** et social pour mieux gérer la ressource, à travers l'organisation collective, la sensibilisation et la co-décision.

Un instrument clé est la **structuration des usagers en associations ou groupements**. Nous avons évoqué plus haut les **AUEA** (Associations d'Usagers de l'Eau Agricole) au Maroc, qui permettent aux agriculteurs d'une zone irriguée de prendre en charge localement la distribution de l'eau, la maintenance des équipements et de faire remonter leurs besoins. De même, en France, existent des **ASA** (associations syndicales d'arrosage) pour la petite irrigation, ou des **organismes de gestion collective** pour les prélèvements d'eau souterraine agricoles (organisant les tours d'eau en période de pénurie). Ces structures créent de la **coresponsabilité** : les usagers deviennent **gestionnaires** de la ressource à leur niveau, ce qui souvent améliore la compliance aux règles (puisqu'elles sont auto-édictees) et l'entretien des ouvrages. Un dicton bien connu en gestion de l'eau est « *un canal géré par ses usagers ne se casse pas* », soulignant que l'appropriation locale est gage de durabilité.

3.5. Instruments informationnels et outils numériques

Le dernier volet, de plus en plus stratégique, est celui des **instruments informationnels**. Bien gérer l'eau requiert de **bien la connaître** : mesurer, suivre, modéliser, diffuser l'information. Avec les progrès des technologies de l'information et de la télédétection, on dispose aujourd'hui d'outils puissants pour appuyer la décision.

Tout d'abord, l'établissement d'**indicateurs** et de **bilans hydriques** réguliers est essentiel. Un *bilan hydrique* d'un territoire ou d'un bassin versant dresse le calcul des entrées (précipitations, apports amont, importations) et des sorties d'eau (évapotranspiration, écoulement sortant, prélèvements consommés) sur une période donnée. Il permet de quantifier la ressource disponible et d'identifier les déficits. Par exemple, un bilan hydrique annuel d'un bassin irrigué peut montrer que les prélèvements dépassent la recharge naturelle, signalant une trajectoire non durable. Les **comptes de l'eau** (water accounting) sont promus par des institutions comme l'UNESCO pour aider les décideurs à voir où part chaque mètre cube. Associés à cela, des **indicateurs de performance** sont suivis : *rendement des réseaux* (pourcentage d'eau distribuée effectivement utilisée vs volume mis en réseau), *productivité de l'eau* (valeur économique ou production agricole par m³ utilisé), *indice de stress hydrique* (rapport entre la demande et les ressources disponibles), etc. Ces indicateurs donnent des cibles et permettent de vérifier l'efficacité des mesures prises.

Les **systèmes d'information sur l'eau** se sont développés un peu partout. Par exemple, en France, le portail **EauFrance** rassemble les données publiques sur les ressources en eau (débits, qualité chimique, etc.) en open data. À l'échelle globale, la FAO a lancé le portail **WaPOR** – *Water Productivity Open-access Portal* – qui fournit en libre accès des **données satellitaires quasi en temps réel** sur la productivité de l'eau agricole en Afrique et Moyen-Orient. Grâce à l'observation de la Terre, WaPOR mesure l'**évapotranspiration** des cultures et la biomasse produite, permettant de calculer la **productivité de l'eau** (kg de matière récoltée par m³ d'eau consommé). Ce type d'outil numérique innovant est extrêmement utile pour suivre l'efficacité de l'irrigation et repérer les zones à amélioration. D'ailleurs, WaPOR est en cours d'extension mondiale, car « *cet outil technologique fournissant des informations quasiment en temps réel est un bien public numérique permettant d'accroître la productivité de l'eau* ». Les technologies d'**observation satellitaire** offrent également des possibilités de suivi des nappes phréatiques (via

les satellites GRACE qui détectent les variations de masse d'eau souterraine) ou de la qualité des eaux côtières (imagerie haute résolution pour repérer les panaches de pollution).

Autre instrument informationnel : les **modèles de simulation** et logiciels d'aide à la décision. On peut aujourd'hui modéliser le fonctionnement hydrologique d'un bassin, simuler l'impact de telle politique (ex : réduire de 20 % les prélèvements agricoles) sur les débits des rivières, ou tester des scénarios de croissance démographique et climatique. Des outils comme **WEAP** (Water Evaluation and Planning) ou **AQUATOOL** permettent à des gestionnaires de créer des *jumeaux numériques* de leur système hydrique et d'optimiser la répartition de l'eau. La modélisation sert aussi pour la **prévision hydrométéo** : par exemple, Météo et les services hydrologiques utilisent des modèles météo couplés à des modèles hydrologiques pour anticiper les crues (avec plusieurs jours d'avance) ou prévoir l'état des nappes saison à venir, ce qui alerte les gestionnaires pour activer tôt les mesures de restriction si nécessaire.

4. Les outils analytiques en gestion de l'eau

En complément des instruments de gestion, il convient de maîtriser certains **outils analytiques** qui aident à quantifier et évaluer la durabilité de l'utilisation de l'eau. Voici cinq outils importants pour un gestionnaire de l'eau :

- **Le bilan hydrique** : c'est l'outil de base qui consiste à faire la somme de tous les flux d'eau entrants et sortants d'un système donné (parcelle agricole, nappe, bassin versant) sur une période. En agriculture, le bilan hydrique d'une culture suit l'évolution du stock d'eau dans le sol en tenant compte des pluies (entrée), de l'irrigation (entrée), de l'évapotranspiration des plantes (sortie) et du drainage hors de la zone racinaire (sortie). Il permet de connaître le **besoin en eau net** de la culture et de planifier l'irrigation au plus juste. À plus grande échelle, le bilan hydrique d'un bassin calcule la disponibilité en eau renouvelable en comparant les précipitations totales, le ruissellement sortant, l'infiltration, etc. C'est grâce à de tels bilans qu'on peut dire par exemple : « dans ce bassin, sur 100 mm de pluie annuelle, 40 % repartent en évapotranspiration, 10 % en ruissellement de surface, 10 % contribuent à la recharge de la nappe, et 40 % sont prélevés par l'homme pour ses usages ». Un bilan déficitaire (prélèvements > ressources renouvelables) indique

une surexploitation. C'est un outil diagnostique précieux pour orienter les politiques (réduire la demande ou augmenter la ressource).

- **L'empreinte eau (ou empreinte hydrique)** : c'est un indicateur développé au début des années 2000 par le Water Footprint Network (Hoekstra) pour mesurer la **consommation d'eau indirecte** liée à un produit ou une activité. L'empreinte hydrique d'un produit est le volume total d'eau douce consommé *et/ou* pollué pour le fabriquer, en prenant en compte toute la chaîne (c'est un concept proche de l'empreinte carbone mais pour l'eau). On distingue souvent l'empreinte *bleue* (eaux de surface ou souterraines consommées), *verte* (eau de pluie mobilisée) et *grise* (eau nécessaire pour diluer les polluants émis) d'un produit. Par exemple, l'empreinte eau d'un tee-shirt en coton inclura l'eau d'irrigation du coton (empreinte bleue/verte) et l'eau polluée par la teinture (empreinte grise). Un chiffre souvent cité est qu'un **steak de bœuf de 200 g** représente environ **3000 litres d'eau** consommés (pour faire pousser le fourrage, abreuver l'animal, nettoyer...), tandis qu'une tasse de café (~125 ml) « coûte » **130 litres d'eau** si l'on compte l'eau utilisée pour cultiver, transformer et acheminer le café. Pour un **pays**, l'empreinte eau est le volume d'eau utilisé pour la production de tout ce que consomment ses habitants, y compris les produits importés. C'est un indicateur global d'impact : ainsi, un pays importateur de nourriture « délocalise » une partie de sa consommation d'eau à l'étranger (concept d'**eau virtuelle**). L'empreinte hydrique est définie comme « *la mesure de la consommation et de la contamination des ressources d'eau douce pour la production d'un bien ou service* ». Cet outil permet de sensibiliser aux **consommations d'eau cachées** et d'orienter les choix de production ou de consommation. Par exemple, une entreprise peut évaluer l'empreinte eau de sa chaîne d'approvisionnement et découvrir que l'ingrédient X est très gourmand en eau – elle pourrait alors choisir un fournisseur plus efficient ou aider à réduire les besoins. Au niveau des politiques publiques, connaître l'empreinte eau d'une filière agricole peut encourager à la rendre plus efficiente ou à diversifier les cultures vers des moins consommatrices en eau dans les zones arides.
- **La productivité de l'eau** : c'est un outil de performance, très utilisé en agriculture. Elle se définit comme la **quantité de production obtenue par unité d'eau utilisée**. Classiquement, on l'exprime en kg de récolte par mètre cube d'eau (kg/m^3) ou en dollars

par m³ pour une valeur économique. Améliorer la productivité de l'eau signifie « *produire plus avec moins d'eau* ». Cet indicateur peut se calculer à différentes échelles (parcelle, filière, pays). Par exemple, la productivité de l'eau du riz irrigué peut être de l'ordre de 0,4 kg de grain par m³ dans certaines régions traditionnelles, tandis que le blé en agriculture moderne atteint 1 kg/m³ ou plus. Les écarts révèlent des marges d'amélioration. On peut augmenter la productivité de l'eau par de meilleures variétés (qui produisent plus de biomasse par transpiration donnée), par l'irrigation au bon moment (chaque goutte génère du rendement plutôt que d'être perdue) ou par des techniques culturales (réduction des mauvaises herbes qui consomment de l'eau inutilement, etc.). Le portail WaPOR cité plus haut est justement conçu pour évaluer la productivité de l'eau grâce aux données satellitaires, en combinant l'évapotranspiration (proxy de l'eau consommée) et la biomasse ou rendement observé. « *La productivité de l'eau est une mesure de la quantité produite par rapport au volume d'eau consommé* » – c'est donc un indicateur clef pour l'agriculture durable. En pratique, il sert à comparer des systèmes : si une culture A a une productivité de 2 kg/m³ et une culture B de 0,5 kg/m³, cela suggère que la culture A valorise mieux chaque goutte. Toutefois, attention, cet indicateur doit être interprété selon le contexte (la valeur nutritionnelle ou économique peut primer, ou le fait que la culture B est peut-être nécessaire pour d'autres raisons). En contexte de rareté, maximiser la productivité de l'eau est souvent un objectif explicite des politiques agricoles et hydriques.

- **La modélisation simple** : derrière ce terme, on vise l'utilisation d'**outils de modélisation** à complexité raisonnable pour appuyer la gestion locale. Par exemple, une **modélisation pluie-débit** relativement simple peut aider un gestionnaire à estimer la disponibilité future en eau d'un barrage en fonction des scénarios de pluie, ou à évaluer l'impact de la reforestation sur le ruissellement. De même, des modèles *agro-hydrologiques* simulent la croissance des cultures et leur consommation d'eau sous différents calendriers d'irrigation – un outil précieux pour optimiser les tours d'eau. L'expression « modélisation simple » suggère l'idée de modèles *pédagogiques* ou *accessibles* (par opposition à de grosses simulations complexes nécessitant des supercalculateurs). Il peut s'agir de modèles dans un tableur Excel, ou de petits logiciels spécialisés pour les gestionnaires de terrain. Par exemple, un gestionnaire de nappe peut utiliser un modèle hydrogéologique simplifié

pour tester l'effet d'une réduction de 20 % des pompes sur le niveau de la nappe à 5 ans. L'important est d'intégrer le raisonnement systémique (toutes choses égales par ailleurs) et d'**objectiver** les décisions par des chiffres plutôt que de se fier uniquement à l'intuition. Avec l'amélioration de l'interface des outils, de plus en plus de modèles initialement complexes sont rendus « *user-friendly* ». Il existe aussi des modèles participatifs ou des *simulateurs de gestion* qui permettent aux acteurs de jouer différents scénarios (par exemple un *jeu de rôle hydro-économique* où chacun voit les résultats de ses décisions sur une maquette de bassin). En un mot, la modélisation, même simple, aide à *quantifier* les choses et à explorer les « *et si... ?* » avant de passer à l'action réelle.

- **Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)** : ce sont des outils informatiques combinant des **données géoréférencées** (cartes, images satellite, relevés de terrain) et des capacités d'analyse spatiale. En gestion de l'eau, le SIG est omniprésent : cartographier un bassin versant avec ses nappes, ses forages, ses canaux, ses zones inondables, etc., permet une meilleure planification. On peut, grâce aux SIG, identifier les zones à risque (par exemple, croiser la carte des nappes vulnérables à la pollution et la carte des épandages agricoles intensifs pour cibler des actions). Les SIG aident aussi à suivre l'évolution temporelle : on peut superposer des images satellites de différentes dates pour voir l'évolution d'un lac, l'extension de l'irrigation ou l'urbanisation d'une plaine inondable. Ils servent à réaliser des **modèles numériques** : par exemple, un modèle numérique de terrain combiné à des données de précipitations sert à modéliser les écoulements et délimiter les zones inondables de probabilité donnée (cartes de risque). Pour l'irrigation, un SIG permet de gérer le cadastre des parcelles irriguées, de suivre qui a droit à combien d'eau, etc. De plus, de nombreux SIG sont couplés à des outils de gestion courante : les techniciens de rivière ou d'irrigation peuvent embarquer des GPS et tablettes pour relever les problèmes sur le terrain, les synchroniser dans le SIG central, qui devient un véritable *tableau de bord* de la ressource en eau. Avec la démocratisation des outils (QGIS en open-source par ex.) et des données (open data hydrologiques, imagerie gratuite type Landsat/Sentinel), le SIG est devenu un **indispensable couteau suisse** du gestionnaire de l'eau, lui offrant une vision intégrée sur écran de son territoire et la possibilité de faire des analyses croisées complexe de manière assez rapide.

Ces outils analytiques, bien maîtrisés, permettent aux gestionnaires et étudiants en eau d'**objectiver les problèmes** et d'**évaluer les progrès**. Ils sont complémentaires : par exemple, on peut utiliser le SIG pour estimer un bilan hydrique (en délimitant un bassin et en intégrant les données spatiales de pluies), ou coupler un modèle avec des données d'empreinte hydrique pour simuler l'impact d'un changement de culture. L'important est de retenir qu'une gestion durable s'appuie sur des **données et analyses solides** – c'est la base scientifique et rationnelle des décisions, sans toutefois oublier l'aspect humain et politique.