

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Hydrocarbures, des Énergies Renouvelables, des Sciences
de la Terre et de l'Univers
Département des Énergies Renouvelables



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Présenté par : ATTIA Oumayma

Thème

**Optimisation de l'irrigation agricole durable par un
système intelligent à énergie solaire intégrant des
polymères hydro-rétenteurs**

Soutenu publiquement

Le : 08/06/2026

Devant le jury :

Dr. ABADA Zhour

MCA President

UKM-Ouargla

Dr. NECIB Hichem

MCA Encadreur

UKM-Ouargla

Dr. ZOUBEIDI Chahinaz

MCA Examineur

UKM-Ouargla

Année Universitaire : 2025 /2026

Dédicaces

Louange à Allah, qui a illuminé nos chemins après les épreuves, nous a accordé la force lorsque la fatigue nous accablait, et nous a permis d'atteindre cette étape après un long parcours de patience et de persévérance.

À Lui reviennent nos premiers mots de gratitude, car Il a toujours été présent à chaque étape, connaissant les silences du cœur, voyant les combats invisibles de l'âme, et offrant la force lorsque tout semblait vaciller.

À moi-même, pour chaque bataille menée en silence, chaque moment de doute surmonté, et chaque pas accompli malgré la fatigue.

À ma petite maman...

À cette présence qui ressemblait à un refuge dans mes jours les plus lourds, à cette tendresse silencieuse qui réparait mes faiblesses sans même prononcer un mot. Tu as été cette lumière discrète qui m'accompagnait lorsque tout devenait difficile, ce cœur sincère qui croyait en moi même dans mes moments de doute. Dans ton affection, je trouvais la paix ; dans ton soutien, le courage de continuer ; et dans ton regard, la force de ne jamais abandonner. Il existe des êtres que la vie nous offre comme une miséricorde... et tu es, sans doute, l'une des plus belles bénédictions de ma vie.

À mes chers parents...

À ceux dont l'amour a toujours été mon premier refuge, et dont les prières ont accompagné chacun de mes pas. Merci pour votre patience, vos sacrifices silencieux, votre confiance et votre soutien dans les moments les plus difficiles. Vous m'avez appris que la réussite se construit avec courage, persévérance et dignité. Aucun mot ne pourra exprimer pleinement l'immensité de ma gratitude et de mon respect envers vous.

Et à toutes les personnes qui m'ont soutenue, de près ou de loin, par une parole sincère, une prière ou un geste bienveillant.

Remerciements

Louange à Allah, par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent, Lui qui a illuminé mon chemin à chaque étape et m'a accordé la force ainsi que la patience nécessaire pour atteindre cette étape après un long parcours d'efforts et de persévérance.

*J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadrant, **Dr. NECIB Hichem**, qui a cru en mon projet dès ses premières idées et m'a accompagnée grâce à ses orientations précieuses et ses conseils avisés. Son soutien scientifique a constitué une véritable source de motivation dans l'aboutissement de ce travail.*

*Je remercie également Monsieur **AZIB Salim** pour son soutien à cette étude, notamment à travers la mise à disposition des graines de quinoa et de l'appareil de mesure de l'humidité utilisés lors de l'expérimentation.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à **Dr. BELATRACHE Djamel**, dont la confiance et le soutien ont joué un rôle essentiel dans l'acceptation de mon sujet et dans l'encouragement à poursuivre ce projet avec détermination.*

*Toute ma reconnaissance va également à **Dr. ABADA Zhour**, enseignante remarquable et modèle de générosité intellectuelle et humaine, qui restera parmi les personnes les plus marquantes de mon parcours universitaire.*

*Mes sincères remerciements s'adressent aussi au personnel administratif, notamment Madame **Smahan**, pour leur disponibilité, leur bienveillance et leur aide précieuse tout au long de cette période.*

*Je n'oublie pas d'adresser mes remerciements à l'ensemble des enseignants ainsi qu'à l'administration du département, en particulier **Dr. GhARBI Ibrahim**, pour leur soutien constant et leur engagement auprès des étudiants durant tout leur parcours universitaire.*

Table des matières

Dédicaces	I
Remercement	II
Table des matières	III
Liste des figures	V
Liste de tableaux	VII
Liste des abréviations	VIII
Introduction générale	1

Chapitre 01 : Agriculture durable et irrigation solaire intelligente

1.1. Introduction.....	4
1.2. Agriculture durable face aux défis de l'eau et de l'énergie.....	4
1.2.1. Concept de l'agriculture durable.....	4
1.2.2. Enjeux de l'agriculture durable et apport des technologies modernes	4
1.3. Enjeux et rationalisation des ressources en eau en agriculture.....	5
1.4. Systèmes d'irrigation agricole.....	6
1.4.1. Objectifs de l'irrigation agricole.....	6
1.4.2. Types de systèmes d'irrigation agricole.....	6
1.4.3. Comparaison des systèmes d'irrigation selon l'efficacité de l'utilisation de l'eau	9
1.5. Énergie solaire dans le secteur agricole.....	10
1.5.1. L'énergie solaire.....	10
1.5.2. Avantages de l'utilisation de l'énergie solaire en agriculture	11
1.6. Systèmes d'irrigation alimentés par l'énergie solaire	12
1.6.1. Pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire	12
1.6.2. Contribution de l'énergie solaire à l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation	14
1.7. Vers des systèmes d'irrigation intelligents et durables.....	15
1.7.1. Concept d'irrigation intelligente.....	15

1.7.2.	Importance du contrôle de l'irrigation par les technologies modernes.....	15
1.8.	Conclusion.....	16

Chapitre 2 :Les polymères hydro-rétenteurs et leur rôle dans l'amélioration de l'efficacité hydrique des sols agricoles

2.1.	Introduction.....	18
2.2.	Polymères : Concepts fondamentaux.....	18
2.2.1.	Concept des polymères	18
2.2.2.	Classification des polymères	18
2.2.3.	Propriétés physiques et chimiques des polymères	20
2.3.	Polymères hydro-rétenteurs (Hydrogels).....	21
2.3.1.	Concepts des polymères hydro-rétenteurs	21
2.3.2.	Mécanisme d'absorption et de rétention de l'eau	21
2.3.3.	Types de polymères hydro-rétenteurs	22
2.3.4.	Les Polymères Super Absorbants (SAP)	24
2.4.	Impact des hydrogels sur les propriétés physico-chimiques des sols agricoles.....	25
2.4.1.	Dynamique de rétention et de libération prolongée de l'eau	25
2.4.2.	Amélioration de la structure granulaire et de la porosité du sol	26
2.5.	Rôle des polymères hydro-rétenteurs dans l'amélioration de l'efficacité hydrique.....	27
2.6.	Applications des polymères hydro-rétenteurs en agriculture.....	28
2.7.	Limites et défis liés à l'utilisation des polymères hydro-rétenteurs.....	29
2.8.	Études antérieures.....	30
2.9.	Conclusion.....	34

Chapitre 03 : Conception du système d'irrigation intelligent et étude expérimentale des performances hydriques

3.1.	Introduction.....	36
3.2.	Modélisation et Simulation Numérique du Système de Contrôle.....	36
3.2.1.	Environnement de Développement Virtuel.....	36
3.2.2.	Conception Ingénierique et Schéma Électronique	36

3.2.3.	Logique Logicielle et Algorithme de Décision.....	37
3.2.4.	Analyse des Résultats de Simulation et Validation du Concept.....	38
3.3.	Réalisation matérielle du prototype (modèle réduit).....	39
3.3.1.	Architecture hardware et spécifications techniques des composants.....	39
3.3.2.	Conception de l'autonomie énergétique par solution photovoltaïque	41
3.3.3.	Assemblage structurel et gestion technique du câblage.....	42
3.4.	Instrumentation de mesure de référence.....	43
3.4.1.	Caractérisation du système intelligent Zigbee et de la passerelle (Gateway)....	43
3.4.2.	Avantages du monitoring à distance pour un suivi continu	44
3.4.3.	Protocole opérationnel de mise en œuvre et synchronisation mobile.....	44
3.5.	Matériels et méthodologie de l'étude expérimentale.....	45
3.5.1.	Inventaire des ressources matérielles et des équipements	45
3.5.2.	Agent rétenteur d'eau basé sur le polymère SAP comme alternative technique	47
3.5.3.	Le polymère superabsorbant (SAP) comme agent rétenteur d'eau alternatif.....	47
3.6.	Protocoles de collecte de données.....	48
3.6.1.	Expérience I : Étude de la rétention hydrique sur 48 heures.....	48
3.6.2.	Expérience II : Analyse de la dynamique d'évaporation et du stress hydrique dans des substrats à caractère sec et semi-sec.....	51
3.7.	Résultats expérimentaux et représentations graphiques.....	53
3.7.1.	Cas 0% de polymère (échantillon témoin).....	53
3.7.2.	Cas 1% de polymère	56
3.7.3.	Cas 2% de polymère	59
3.7.4.	Cas 3% de polymère	62
3.8.	Évaluation de la consommation et du taux d'économie d'eau.....	65
3.9.	Synthèse comparative des résultats	66
3.10.	Étude de l'impact du polymère superabsorbant (SAP) sur la conception d'un système de pompage solaire.....	67
3.11.	Discussion technico-économique du système proposé	69
3.12.	Limites de l'étude expérimentale et difficultés rencontrées.....	70
3.13.	Conclusion.....	68

Conclusion général.....	73
Références.....	76
Résumé	

Liste des figures

Figure 1.1 : L'irrigation par submersion	7
Figure 1.2 : L'irrigation par sillons	8
Figure 1.3 : L'irrigation par aspersion	8
Figure 1.4 : L'irrigation goutte à goutte	9
Figure 1.5 : Schéma du système de pompage de l'eau alimenté par l'énergie solaire	14
Figure 2.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	18
Figure 2.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	18
Figure 2.3 : Mécanisme d'absorption, de gonflement et de rétention de l'eau dans les H	22
Figure 2.4 : Morphologie granulaire d'un polymère super absorbant (SAP) à l'état sec	24
Figure 2.5 : Variation de la capacité d'absorption d'eau du SAP sous différents niveaux de salinité	31
Figure 2.6 : Effet de l'ajout du SAP sur la capacité de rétention hydrique du sol.	31
Figure 2.7 : Effet de l'hydrogel sur la structure poreuse des sols sableux	32
Figure 2.8 : Comparaison des propriétés hydriques des gels SAP issus des couches pour bébés et du gel agricole Aquasorb dans le sable	33
Figure 3.1 : Interface de la plateforme Tinkercad Circuits	36
Figure 3.2: Schéma électronique du système	37
Figure 3.3 : Organigramme de l'algorithme de décision.....	38
Figure 3.5: Simulation État d'arrêt (sol saturé)	39
Figure 3.6 : Présentation des éléments électroniques du système	41
Figure 3.7 : Vue globale du prototype final assemblé.	43
Figure 3.8 : Architecture du système Zigbee et Gateway	44
Figure 3.9 : Interface Tuya Smart et extraction de données	45
Figure 3.10 : Matériels de préparation expérimentale.....	47
Figure 3.11 : Matériels et dispositifs utilisés pour l'extraction du polymère superabsorbant.	48
Figure 3.12 : État final après 48h (rétention hydrique)	50
Figure 3.13 : Réalisation pratique de l'expérience et préparation des échantillons	52
Figure 3.14 : Évolution de la masse du sol (0% SAP)	54
Figure 3.15 : Évolution de l'humidité du sol (0% SAP)	54
Figure 3.16: Développement des plantes (0% SAP)	55

Figure 3.17 : Évolution de la masse du sol (1% SAP)	57
Figure 3.18 : Évolution de l'humidité du sol (1% SAP)	57
Figure 3.19 : Développement des plantes (1% SAP)	58
Figure 3.20 : Évolution de la masse du sol (2% SAP)	60
Figure 3.21 : Évolution de l'humidité du sol (2% SAP)	60
Figure 3.22: Développement des plantes (2% SAP)	61
Figure 3.23 : Évolution de la masse du sol (3% SAP)	63
Figure 3.24 : Évolution de l'humidité du sol (3% SAP)	63
Figure 3.25: Développement des plantes (3% SAP)	63
Figure 3.26: Interface de l'application de conception du système de pompage solaire utilisée dans cette étude.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison des performances des systèmes d'irrigation selon l'efficience hydrique	10
Tableau 1.2 : Potentiel solaire en Algérie	11
Tableau 2.1: Synthèse des classifications des polymères et leur pertinence pour les hydrogels agricoles	30
Tableau 2.2 : Comparaison synthétique des différents types d'hydrogels à usage agricole hydrique	36
Tableau 3.1 : Résultats de l'étude de la rétention hydrique sur 48 heures hydrique	49
Tableau 3.2 : Quantités des matériaux utilisés dans les différents échantillons expérimentaux hydrique	52
Tableau 3.3 : Évolution de la masse et de l'humidité du sol (0% SAP) hydrique	53
Tableau 3.4 : Évolution de la masse et de l'humidité du sol (1% SAP) hydrique	56
Tableau 3.5 : Évolution de la masse et de l'humidité du sol (2% SAP) hydrique	59
Tableau 3.6 : Évolution de la masse et de l'humidité du sol (3% SAP) hydrique	62
Tableau 3.7 : Résultats de la consommation d'eau et du taux d'économie.....	66
Tableau 3.8 : Influence du SAP sur le comportement hydrique	66
Tableau 3.9 : Données hydrauliques utilisées dans les simulations.....	69
Tableau 3.10 : Résultats de conception du système de pompage solaire pour différentes concentrationsSAP.....	69

Liste des abréviations

TWh	Térawatt-heure
KWh	Kilowatt-heure
DNI	Direct Normal Irradiance (Irradiance Directe Normale)
GHI	Global Horizontal Irradiation (Irradiation Globale Horizontale)
DC	Direct Current (Courant Continu)
AC	Alternating Current (Courant Alternatif)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables)
FAO	Food and Agriculture Organizations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
WUE	Water Use Efficiency (Efficience de l'Utilisation de l'Eau)
LED	Light Emitting Diode (Diode Electroluminescent)
IDE	Integrated Development Environment (Environnement de Développement Intégré)
SAP	Super Absorbent Polymer (Polymère Super Absorbant)

Introduction Générale

Introduction Générale

L'agriculture représente un secteur essentiel pour assurer la sécurité alimentaire et le développement durable. Cependant, elle fait aujourd'hui face à plusieurs défis majeurs, notamment la diminution des ressources en eau, l'augmentation des périodes de sécheresse et les effets du changement climatique. Ces contraintes sont particulièrement importantes dans les régions arides et semi-arides, où la gestion rationnelle de l'eau devient une nécessité pour maintenir une production agricole efficace. [1]

En Algérie, la disponibilité limitée des ressources hydriques et la forte dépendance aux eaux souterraines rendent indispensable le développement de nouvelles stratégies d'irrigation permettant de réduire les pertes d'eau et d'améliorer la performance des systèmes agricoles. Dans ce contexte, l'utilisation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, représente une solution adaptée grâce au potentiel solaire important du pays, permettant d'alimenter les équipements d'irrigation tout en réduisant la consommation énergétique. [2]

Au-delà du système d'irrigation, l'efficacité de l'utilisation de l'eau dépend également de la capacité du sol à retenir l'humidité. Les sols présentant une faible capacité de rétention hydrique entraînent des pertes d'eau importantes et nécessitent des apports d'irrigation plus fréquents. Ainsi, l'utilisation de matériaux innovants tels que les polymères hydro-rétenteurs (SAP), capables d'absorber, de stocker et de restituer progressivement l'eau aux plantes, représente une approche prometteuse pour améliorer la disponibilité hydrique du sol..

Par ailleurs, les systèmes d'irrigation intelligents basés sur la surveillance des paramètres du sol, notamment l'humidité, permettent d'adapter les apports d'eau aux besoins réels des cultures. L'intégration de ces technologies avec l'énergie solaire et les polymères hydro-rétenteurs offre une solution globale visant à optimiser l'utilisation des ressources hydriques et énergétiques dans le domaine agricole.

Dans cette perspective, la problématique de cette étude est formulée comme suit :
Dans quelle mesure l'intégration des polymères hydro-rétenteurs dans un système d'irrigation solaire intelligent peut-elle améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et de l'énergie dans les cultures agricoles ?

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail intitulé :
«Optimisation de l'irrigation agricole durable par un système intelligent à énergie solaire intégrant des polymères hydro-rétenteurs ».

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire a été structuré en trois chapitres principaux :
Le premier chapitre aborde les concepts généraux liés à l'agriculture durable, aux ressources en

eau, aux systèmes d'irrigation ainsi qu'à l'énergie solaire et ses applications dans le domaine agricole, tout en introduisant les systèmes d'irrigation intelligents.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des polymères hydrorétenteurs, de leurs propriétés physiques et chimiques, de leurs mécanismes de rétention d'eau ainsi que de leurs principales applications dans les sols agricoles.

Le troisième chapitre traite de la partie pratique de l'étude, comprenant la conception et la réalisation du système proposé, la méthodologie expérimentale adoptée ainsi que la présentation et l'analyse des résultats relatifs à l'impact des polymères SAP sur la dynamique de rétention d'eau.

Enfin, cette étude s'achève par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus, tout en mettant en évidence l'importance de l'intégration de l'énergie solaire et des polymères hydrorétenteurs dans les systèmes d'irrigation intelligents afin d'optimiser l'exploitation des ressources hydriques et énergétiques dans le domaine agricole.

Chapitre01 :

Agriculture durable et irrigation
solaire intelligente

1.1. Introduction

Le secteur agricole fait face à une transformation majeure imposée par la rareté des ressources en eau et les effets des changements climatiques. Face à ces défis, l'adoption d'une approche durable conciliant productivité et préservation des ressources naturelles devient impérative.

L'intégration de technologies innovantes, telles que les systèmes d'irrigation intelligents alimentés par l'énergie solaire, offre des solutions prometteuses pour optimiser l'usage de l'eau tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles. [1]

Ce chapitre explore les fondements de l'agriculture durable ainsi que le rôle des technologies solaires dans l'amélioration de l'efficacité hydrique.

1.2. Agriculture durable face aux défis de l'eau et de l'énergie

L'agriculture durable repose sur une gestion intégrée des ressources biologiques et techniques visant à assurer la sécurité alimentaire tout en minimisant l'impact environnemental. Le concept du nexus eau-énergie-alimentation met en évidence la corrélation étroite entre ces trois ressources dont l'optimisation est essentielle pour garantir la durabilité des systèmes agricoles et la conservation des ressources naturelles dans les régions arides. [3]

1.2.1. Concept de l'agriculture durable

L'agriculture durable est un système de production agricole intégré qui vise à satisfaire les besoins actuels de la société en matière de production alimentaire et de fibres, tout en préservant la santé de l'environnement et des ressources naturelles pour les générations futures. Ce système repose sur une gestion raisonnée des sols, de l'eau et des ressources biologiques, ainsi que sur l'adoption de pratiques agricoles permettant de réduire l'impact environnemental et d'améliorer l'efficacité dans l'utilisation des ressources, tout en garantissant la viabilité économique des exploitations agricoles et l'équité sociale des communautés rurales [2] [3].

1.2.2. Enjeux de l'agriculture durable et apport des technologies modernes

L'agriculture durable constitue une réponse stratégique face aux enjeux auxquels sont confrontées les zones arides et semi-arides, caractérisées par la rareté de l'eau, des conditions climatiques contraignantes et la dégradation des sols. Ces facteurs limitent l'efficacité des systèmes agricoles conventionnels, rendant nécessaire l'adoption de pratiques adaptées afin d'assurer la pérennité de la production tout en préservant les ressources naturelles [4].

D'un point de vue environnemental, cette approche repose sur des techniques telles que l'agriculture de conservation, la fertilisation organique, la gestion de l'humidité des sols et l'utilisation de méthodes d'irrigation performantes. Ces pratiques permettent de réduire les

pertes en eau, de maintenir la fertilité des sols et de limiter les phénomènes de désertification [5].

L'apport des technologies modernes constitue un levier essentiel pour renforcer la durabilité des systèmes agricoles. L'agriculture de précision, les capteurs, les drones et les systèmes d'information géographique offrent un suivi précis des cultures et des sols, permettant une gestion optimisée des ressources en eau et des intrants agricoles. Par ailleurs, les avancées en biotechnologie et en amélioration variétale contribuent à renforcer la résistance des cultures face aux stress climatiques et à améliorer la productivité [6].

Sur le plan socio-économique, l'intégration des technologies favorise la réduction des coûts de production, l'amélioration de la rentabilité des exploitations et le renforcement de la sécurité alimentaire. Elle participe également au développement rural et à une meilleure adaptation aux changements climatiques grâce à une gestion plus efficace des risques agricoles [5]

1.3. Enjeux et rationalisation des ressources en eau en agriculture

L'eau constitue le pilier fondamental de la production agricole, mais sa rareté représente l'un des défis majeurs dans le sud de l'Algérie. Le climat aride, l'insuffisance des précipitations et la pression croissante sur les eaux souterraines rendent la sécurité hydrique fragile, exposant les cultures à des risques de baisse de rendement. Face à ces enjeux, la rationalisation de l'utilisation de l'eau devient impérative pour assurer la durabilité du secteur [7]. Cette démarche repose sur une approche intégrée combinant les leviers stratégiques suivants

❖ Techniques d'irrigation modernes

Le goutte-à-goutte et l'irrigation intelligente par aspersion permettent d'apporter l'eau directement aux racines, réduisant les pertes et améliorant la productivité et la qualité des cultures.

❖ Collecte et stockage de l'eau

La récupération des eaux de pluie dans des réservoirs ou des bassins fournit une source fiable en période de sécheresse et réduit la dépendance aux ressources limitées.

❖ Planification de l'irrigation

Déterminer le moment et la quantité d'eau nécessaire selon le type de culture, son stade de développement et les conditions du sol et du climat permet d'éviter le gaspillage et d'améliorer l'efficacité de l'eau.

❖ Amélioration de la santé des sols

L'utilisation d'engrais organiques, le paillage et les cultures de couverture augmentent la capacité du sol à retenir l'humidité et réduisent le besoin de fréquents arrosages.

❖ **Intégration de la technologie et de la gestion**

Combiner les techniques d'irrigation modernes avec une gestion intelligente des ressources, l'amélioration des sols et le choix de cultures résistantes à la sécheresse permet de créer un **système intégré qui préserve l'eau et garantit une production durable. [8]**

1.4. Systèmes d'irrigation agricole

L'irrigation regroupe l'ensemble des techniques permettant d'apporter artificiellement de l'eau aux cultures. Le choix du système dépend des caractéristiques du sol, des conditions climatiques et des besoins spécifiques des plantes, dans le but d'assurer une gestion optimale des ressources hydriques.

Une irrigation bien maîtrisée contribue à améliorer la productivité agricole tout en réduisant les pertes en eau, ce qui représente un enjeu majeur dans les régions confrontées à la rareté des ressources hydriques. [9]

1.4.1. Objectifs de l'irrigation agricole

L'irrigation agricole constitue une technique fondamentale qui consiste à fournir de l'eau aux plantes de manière artificielle afin de compenser le déficit en ressources hydriques naturelles et de garantir la disponibilité de l'humidité nécessaire à leur croissance et à leur développement à travers les différentes phases de leur cycle vital [10]. Elle poursuit plusieurs objectifs essentiels

- ❖ Amélioration de la productivité : assurer un apport régulier en eau aux cultures afin de garantir une croissance stable et des rendements de qualité.
- ❖ Gestion rationnelle des ressources en eau : utiliser les ressources hydriques de manière efficace en réduisant les pertes et en maintenant un équilibre optimal de l'humidité du sol.
- ❖ Protection de l'environnement : contribuer au maintien de l'équilibre environnemental en réduisant le stress hydrique et en améliorant les conditions microclimatiques.
- ❖ Amélioration des propriétés du sol : lessiver les sels accumulés et améliorer la structure physique et chimique du sol afin de favoriser le développement des racines.
- ❖ Optimisation des opérations agricoles : assurer une humidité adéquate du sol facilitant les travaux agricoles et améliorant l'efficacité de l'exploitation. [11]

1.4.2. Types de systèmes d'irrigation agricole

Le choix d'un système d'irrigation est déterminé par les conditions pédoclimatiques, la topographie du terrain et les exigences spécifiques des cultures. On distingue généralement trois catégories principales de systèmes d'irrigation, chacune présentant des caractéristiques techniques et des niveaux d'efficacité hydrique différents

➤ **Les systèmes d'irrigation de surface**

L'irrigation de surface repose sur la distribution de l'eau à la surface du sol, où elle s'écoule sous l'effet de la gravité avant de s'infiltrer dans le sol. Elle représente l'un des systèmes d'irrigation les plus anciens et les plus largement utilisés, en particulier dans les régions disposant de ressources en eau de surface. Malgré sa simplicité et son faible coût, ce système engendre des pertes d'eau importantes dues à l'évaporation, à l'infiltration profonde et au manque de contrôle de la répartition de l'eau.

L'irrigation de surface comprend plusieurs méthodes, dont les principales sont :

- L'irrigation par submersion

Elle consiste à recouvrir le sol d'une lame d'eau pendant une durée déterminée, permettant sa saturation jusqu'à la profondeur souhaitée (comme l'illustre la figure 1.1). Cette méthode est utilisée sur des terrains plats et pour certaines cultures tolérant l'excès d'eau. Toutefois, elle nécessite de grandes quantités d'eau et peut provoquer des problèmes de dégradation du sol en cas de mauvaise gestion.



Figure 1.1 : L'irrigation par submersion[12]

- L'irrigation par sillons

Ce système repose sur l'acheminement de l'eau à travers des sillons creusés entre les rangées de cultures, permettant son infiltration vers la zone racinaire (tel que présenté à la figure 1.2). Il est couramment utilisé pour les cultures en lignes telles que le maïs et la pomme de terre.

Comparé à l'irrigation par submersion, il offre une meilleure maîtrise de l'eau, bien que certaines pertes subsistent.



Figure1.2 : L'irrigation par sillons [13]

- L'irrigation par ruissellement

Elle consiste à faire circuler une fine couche d'eau sur une parcelle présentant une pente faible et régulière. Ce système se caractérise par sa simplicité, cependant son efficacité dépend fortement de la nature du sol et de la topographie du terrain.

➤ **Les systèmes d'irrigation par aspersion**

L'irrigation par aspersion consiste à distribuer l'eau sous forme de fines gouttelettes à l'aide d'asperseurs fonctionnant sous pression, de manière à reproduire une pluie artificielle (comme illustré à la figure1.3). Ce système permet une répartition plus uniforme de l'eau et s'adapte aux terrains non nivelés.

Il est utilisé pour une grande diversité de cultures, mais il requiert une source d'énergie pour le fonctionnement des équipements et reste sensible aux conditions climatiques, notamment au vent et aux températures élevées



Figure1.3 : L'irrigation par aspersion [14]

➤ Les systèmes d'irrigation localisée

L'irrigation localisée est considérée comme un système moderne, dans lequel l'eau est apportée directement à proximité des racines des plantes, en faibles quantités et de façon fréquente. Cette technique permet de réduire les pertes d'eau et d'améliorer l'efficacité de son utilisation.

Parmi ses principales formes, on distingue :

- L'irrigation goutte à goutte

Il s'agit de l'un des systèmes d'irrigation les plus performants, assurant un apport précis de l'eau directement au niveau de la zone racinaire (comme l'indique la figure 1.4). Il se caractérise par une économie significative de l'eau et une amélioration des rendements agricoles. Toutefois, il nécessite une bonne qualité de l'eau ainsi qu'un système de filtration efficace pour éviter l'obstruction des goutteurs



Figure 1.4 : L'irrigation goutte à goutte [15]

- L'irrigation par micro-aspiration

Ce système constitue une solution intermédiaire entre l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte. Il est principalement utilisé dans l'arboriculture et les cultures sous serre, et permet un meilleur contrôle des apports en eau tout en limitant les pertes hydriques. [16]

1.4.3. Comparaison des systèmes d'irrigation selon l'efficacité de l'utilisation de l'eau

L'efficacité de l'utilisation de l'eau varie en fonction du système d'irrigation adopté, car le mode de distribution de l'eau influence directement l'ampleur des pertes hydriques ainsi que le niveau d'absorption par la plante. Comme l'illustre le tableau (1.1), l'efficacité de l'utilisation de l'eau varie selon le système d'irrigation adopté. L'irrigation de surface est considérée comme l'un des systèmes les moins efficaces, en raison de l'écoulement de l'eau à la surface du sol, ce

qui entraîne d'importantes pertes dues à l'évaporation, au ruissellement et à l'infiltration profonde.

L'irrigation par aspersion présente une efficacité moyenne par rapport à l'irrigation de surface. Bien qu'elle permette une répartition plus homogène de l'eau, elle demeure exposée à des pertes hydriques causées par l'action du vent et les températures élevées, ce qui réduit son efficacité dans certaines conditions climatiques.

En revanche, l'irrigation localisée, notamment l'irrigation goutte à goutte, constitue l'un des systèmes les plus performants en matière d'utilisation de l'eau. Elle permet un apport direct et maîtrisé de l'eau au niveau de la zone racinaire, réduisant ainsi les pertes hydriques et améliorant l'efficacité de l'irrigation. Ce système est particulièrement adapté aux régions confrontées à la rareté des ressources en eau, comme c'est le cas de nombreuses zones agricoles en Algérie.

Tableau 1.1 : Comparaison des performances des systèmes d'irrigation selon l'efficience hydrique

Système d'irrigation	Efficacité de l'utilisation de l'eau	Principales causes des pertes
Irrigation de surface	Faible	Évaporation, ruissellement, infiltration profonde
Irrigation par aspersion	Moyenne	Effet du vent, évaporation pendant l'aspersion
Irrigation localisée (goutte à goutte)	Élevée	Pertes très limitées en cas de bonne gestion

1.5. Énergie solaire dans le secteur agricole

L'intégration de l'énergie solaire dans le secteur agricole constitue une réponse stratégique aux enjeux liés à la sécurité énergétique et hydrique, en particulier dans les régions arides et sahariennes. L'abondance du rayonnement solaire dans ces zones offre une alternative durable aux énergies fossiles pour l'alimentation des systèmes de pompage des eaux souterraines. Cette transition énergétique permet non seulement de réduire les coûts d'exploitation et l'empreinte carbone, mais aussi d'assurer la continuité des activités agricoles dans les zones isolées, renforçant ainsi la résilience et la durabilité des systèmes de production. [17]

1.5.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire constitue une source d'énergie renouvelable pouvant être exploitée dans le secteur agricole, en particulier dans les régions arides et sahariennes caractérisées par la rareté des ressources en eau et des besoins élevés en irrigation. Son utilisation repose sur la conversion

du rayonnement solaire en énergie électrique ou thermique à l'aide de différentes technologies. Les systèmes photovoltaïques, basés sur des cellules généralement fabriquées à partir de silicium, permettent de transformer directement la lumière solaire en électricité, notamment pour alimenter les équipements agricoles tels que les systèmes de pompage et d'irrigation. Par ailleurs, les systèmes solaires à concentration utilisent des miroirs pour focaliser le rayonnement solaire et produire de la chaleur destinée à la génération d'électricité ou à d'autres applications. Grâce à sa situation géographique et à l'étendue de ses zones désertiques, l'Algérie dispose d'un potentiel solaire important, estimé à environ 13,9 TWh/an. La durée moyenne annuelle d'ensoleillement atteint environ 2650 heures dans les régions côtières, 3 000 heures dans les hauts plateaux et près de 3 500 heures dans les régions sahariennes. Les valeurs moyennes annuelles de l'irradiance directe normale (DNI) s'élèvent respectivement à 1700, 1900 et 2650 kWh/m²/an, (voir tableau 1.2). Tandis que l'irradiance globale horizontale (GHI) varie entre 2100 kWh/m²/an au nord et 2 400 kWh/m²/an au sud du pays, ce qui confirme la forte aptitude des régions arides au développement des applications solaires dans le domaine agricole. [18]

Tableau 1.2 : Potentiel solaire en Algérie [18]

Région	Nord du pays		Sahara	Unité
	Littoral	Hauts plateaux		
Superficie	4	10	86	%
Durée moyenne d'ensoleillement	2650	3000	3500	Heures/an
Énergie annuelle moyenne reçue	1700	1900	2650	KWh/m ²
Irradiation horizontale globale moyenne (GHI)	2100	2100	2400	KWh/m ² /an

1.5.2. Avantages de l'utilisation de l'énergie solaire en agriculture

L'adoption de l'énergie solaire dans le secteur agricole, en particulier dans les zones arides et semi-arides, s'inscrit dans une approche visant à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes agricoles et à réduire leur dépendance aux sources d'énergie conventionnelles. Dans ce contexte, l'énergie solaire présente plusieurs avantages techniques, économiques et environnementaux

- ❖ Durabilité environnementale : Source d'énergie renouvelable, propre et inépuisable, contribuant à la réduction des émissions polluantes.
- ❖ Autonomie énergétique : Diminution de la dépendance aux réseaux électriques et aux combustibles fossiles, notamment dans les zones isolées.
- ❖ Rentabilité économique : Réduction des coûts liés à l'énergie, améliorant la performance économique des exploitations agricoles.
- ❖ Efficience des systèmes d'irrigation : Fonctionnement stable et adapté des systèmes de pompage en fonction des besoins hydriques des cultures.
- ❖ Valorisation de l'espace agricole : Exploitation optimale des surfaces disponibles pour l'installation des équipements solaires sans affecter la production.[19]

1.6. Systèmes d'irrigation alimentés par l'énergie solaire

Les systèmes d'irrigation alimentés par l'énergie solaire constituent une solution moderne pour le secteur agricole, notamment dans les zones arides et semi-arides caractérisées par des besoins élevés en irrigation.

Ils reposent sur l'exploitation de l'énergie solaire pour assurer le fonctionnement des opérations de pompage de l'eau, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles.

Ces systèmes présentent un intérêt particulier dans les milieux sahariens en raison de l'abondance du rayonnement solaire et de sa concordance avec les besoins en eau. Ils contribuent également à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la réduction des coûts d'exploitation, favorisant ainsi la durabilité des activités agricoles. [20]

1.6.1. Pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire

Le pompage de l'eau par énergie solaire repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de panneaux photovoltaïques, permettant d'alimenter des pompes hydrauliques pour l'extraction de l'eau à partir de diverses sources. Ce système constitue l'une des applications majeures de l'énergie solaire dans le secteur agricole, notamment dans les zones arides et semi-arides caractérisées par un accès limité à l'électricité et par le coût élevé des combustibles fossiles.

Le principe de fonctionnement du système de pompage solaire consiste à produire directement de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques lors de la disponibilité du rayonnement solaire. L'énergie produite est ensuite acheminée vers un dispositif de commande ou un onduleur, chargé de réguler la tension et le courant électriques afin de répondre aux exigences de fonctionnement de la pompe. Celle-ci assure ensuite l'aspiration et le refoulement de l'eau

à travers les conduites vers un réservoir de stockage ou directement vers le système d'irrigation, selon la conception du système et les besoins de l'exploitation agricole.

Le système de pompage de l'eau par énergie solaire repose sur un ensemble de composants techniques fonctionnant de manière intégrée afin de garantir la conversion de l'énergie solaire en énergie utilisable pour l'entraînement des pompes hydrauliques. Les principaux composants sont les suivants :

❖ Les panneaux photovoltaïques

Ils assurent la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique sous forme de courant continu (DC).

❖ L'onduleur électrique

Il permet de transformer le courant continu (DC) en courant alternatif (AC), compatible avec le fonctionnement de la pompe.

❖ Les pompes hydrauliques

Elles comprennent les pompes de surface, utilisées lorsque la source d'eau est peu profonde, et les pompes immergées, employées pour les forages profonds. Ces dernières sont les plus répandues dans les zones arides et désertiques en raison de leur adaptation à l'exploitation des eaux souterraines.

❖ Le réseau de conduites

Il assure le transport de l'eau depuis la source vers les différents points d'utilisation, notamment les systèmes d'irrigation ou les réservoirs de stockage.

❖ Le réservoir de stockage

Il permet d'assurer la disponibilité de l'eau en l'absence de rayonnement solaire et de garantir la continuité de l'approvisionnement.

❖ Les dispositifs de commande

Ils régulent le fonctionnement de la pompe et la protègent contre les défaillances électriques ou les dommages liés au fonctionnement à sec. [21]

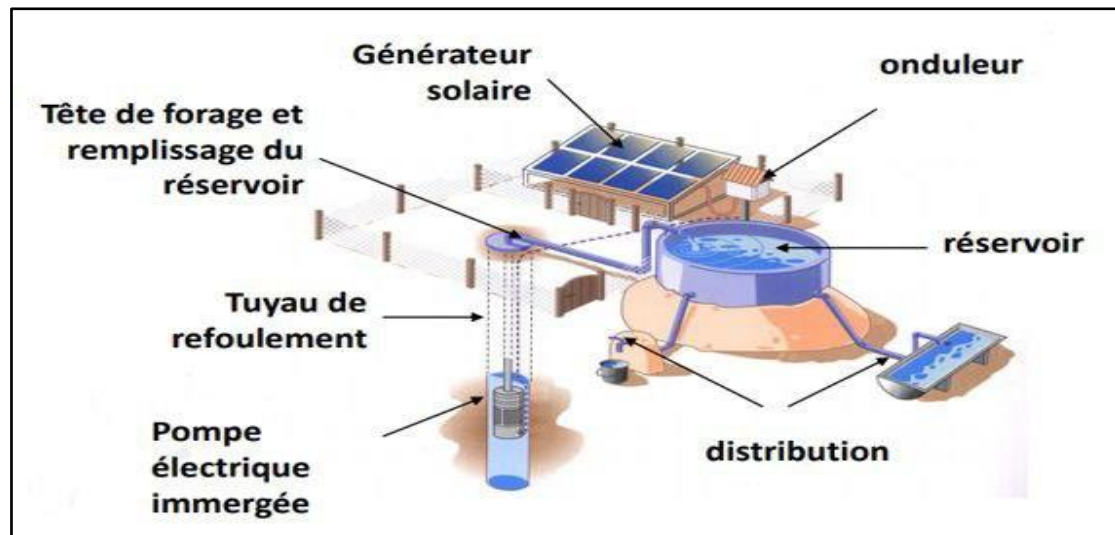


Figure1.5 : Schéma du système de pompage de l'eau alimenté par l'énergie solaire [22]

Les rapports et études publiés par les organisations internationales, notamment l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), indiquent que les systèmes de pompage solaire contribuent à la réduction des coûts d'exploitation à moyen et long terme, en raison de l'absence de dépenses liées au carburant et de la faiblesse des besoins en maintenance. Ces systèmes constituent également une solution fiable pour l'approvisionnement en eau dans les zones isolées, favorisant ainsi la durabilité des activités agricoles dans les régions arides et semi-arides.

1.6.2. Contribution de l'énergie solaire à l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation

L'intégration de l'énergie solaire contribue à l'amélioration de l'efficacité hydrique en assurant une autonomie énergétique garantissant la continuité et la stabilité des opérations de pompage, ce qui permet un meilleur contrôle des volumes d'eau destinés à l'irrigation.

Elle favorise également l'adoption de systèmes d'irrigation performants, notamment l'irrigation goutte-à-goutte, qui nécessite une pression constante pour assurer une distribution précise et efficace de l'eau.

Par ailleurs, la concordance entre les périodes de forte irradiation solaire et les besoins hydriques des cultures liés à la transpiration permet d'optimiser l'utilisation des ressources en eau et d'améliorer l'efficacité globale des systèmes d'irrigation. [23]

1.7. Vers des systèmes d'irrigation intelligents et durables

Face à la rareté de l'eau et aux changements climatiques, l'adoption de technologies avancées devient impérative. Les systèmes d'irrigation intelligents, basés sur l'intégration du numérique, constituent une solution stratégique pour optimiser les performances hydriques et assurer la durabilité agricole [24]

1.7.1. Concept d'irrigation intelligente

L'irrigation intelligente est définie comme un système avancé de gestion des opérations d'irrigation reposant sur l'utilisation de capteurs, de données climatiques et de modèles des besoins hydriques des cultures, afin de déterminer avec une grande précision les quantités d'eau et les périodes d'irrigation. Selon la définition de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'irrigation intelligente vise à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau en adaptant les apports hydriques aux besoins réels des plantes, ce qui permet de réduire les pertes en eau et d'augmenter l'efficacité de la production agricole. Ce type d'irrigation se caractérise par sa flexibilité et sa capacité d'adaptation aux variations environnementales, comparativement aux méthodes d'irrigation traditionnelles. [25]

1.7.2. Importance du contrôle de l'irrigation par les technologies modernes

Le contrôle de l'irrigation à l'aide des technologies modernes revêt une importance croissante face aux défis hydriques et environnementaux auxquels est confronté le secteur agricole.

- ❖ Rationalisation des ressources en eau : Réduire les pertes en ajustant les apports hydriques aux besoins réels des cultures «sur la base des données du sol et du climat.
- ❖ Amélioration de la productivité : Assurer un apport en eau au moment opportun des différentes phases de croissance pour garantir des rendements de qualité.
- ❖ Réduction des coûts économiques : Diminuer la consommation d'eau et d'énergie «ce qui entraîne une baisse directe des coûts d'exploitation.
- ❖ Limitation de la dégradation des sols : Réduire les risques de salinisation et d'érosion grâce à un contrôle précis des volumes d'irrigation.
- ❖ Adaptation aux changements climatiques : Ajuster les programmes d'irrigation en fonction des variations environnementales (sécheresse «températures élevées).
- ❖ Optimisation de la prise de décision : Fournir des données fiables facilitant la gestion de l'exploitation et réduisant le recours aux estimations traditionnelles. [26]

1.8. Conclusion

En conclusion, l'agriculture durable repose sur une gestion efficace des ressources en eau et en énergie, notamment à travers l'adoption de systèmes d'irrigation performants et l'intégration de l'énergie solaire. Ces approches contribuent à améliorer la gestion des ressources hydriques, à réduire les coûts énergétiques et à renforcer la durabilité des systèmes agricoles, en particulier dans les zones arides et semi-arides.

Cependant, l'optimisation de l'efficacité hydrique ne dépend pas uniquement des technologies d'irrigation, mais également des propriétés du sol et de sa capacité à retenir l'eau. Dans ce contexte, le recours à des solutions innovantes, telles que les polymères hydro-rétenteurs, apparaît comme un levier essentiel pour améliorer la disponibilité de l'eau au niveau racinaire, ouvrant ainsi la voie à une approche complémentaire centrée sur l'optimisation des propriétés du sol.

Chapitre 02 :

Les polymères hydro-rétenteurs
et leur rôle dans l'amélioration
de l'efficacité hydrique des sols
agricoles

2.1. Introduction

L'Algérie fait face à des défis croissants liés à la rareté des ressources en eau, notamment dans le secteur agricole, pilier essentiel de l'économie nationale. Le climat aride et semi-aride limite la disponibilité en eau, ce qui affecte la fertilité des sols et la productivité des cultures. Ainsi, une gestion rationnelle de l'eau devient indispensable pour assurer une agriculture durable. Face à ces enjeux, l'adoption de solutions innovantes pour une gestion rationnelle de l'eau est cruciale. Les hydrogels se distinguent par leur capacité exceptionnelle à stocker l'eau et à la restituer progressivement selon les besoins des cultures. Cela contribue à limiter les pertes en eau et à améliorer son efficacité d'utilisation, ce qui a un impact positif sur la croissance des cultures.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les polymères hydro-rétenteurs et leur rôle dans l'amélioration de l'efficacité hydrique des sols agricoles. Il aborde leurs concepts fondamentaux, leurs propriétés, leurs mécanismes de fonctionnement, ainsi que leurs applications et leurs limites.

2.2. Polymères : Concepts fondamentaux

2.2.1. Concept des polymères

Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, caractérisée par une masse molaire élevée. Il est formé par l'enchaînement covalent d'un grand nombre d'unités répétitives appelées monomères, issues d'une réaction de polymérisation.

Exemple : l'éthylène $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ conduit au polyéthylène $-\text{[CH}_2-\text{CH}_2\text{]}_n-$

Ces unités répétitives, appelées motifs structuraux, se répètent le long de la chaîne macromoléculaire et déterminent les propriétés physiques et chimiques du polymère. [27]

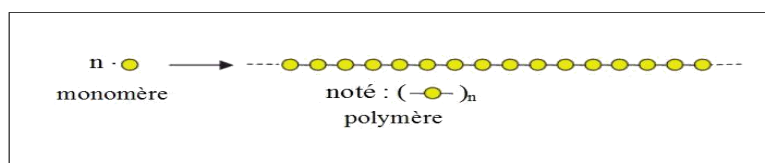


Figure2.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [28]

Par ailleurs, le degré de polymérisation (DP) correspond au nombre d'unités répétitives présentes dans la chaîne. Ce paramètre joue un rôle important puisqu'il détermine en grande partie la masse molaire ainsi que les caractéristiques du matériau obtenu. [27]

2.2.2. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment le nombre de motifs, l'architecture des chaînes, la stéréochimie, l'origine ainsi que le comportement thermique. Cette

diversité de classification permet de mieux comprendre leurs propriétés et leurs domaines d'application. Comme le montre le tableau 2.2, chaque critère met en évidence des caractéristiques spécifiques influençant directement les performances des polymères, en particulier dans le cas des hydrogels [27].

Tableau 2.1: Synthèse des classifications des polymères et leur pertinence pour les hydrogels agricoles[27].

Critère de Classification	Types de Polymères	Caractéristiques Principales	Importance pour les Hydrogels
Selon le nombre de motifs	Homopolymères / Copolymères	Un seul type de monomère vs association de deux ou plusieurs monomères.	Les copolymères permettent de combiner absorption et résistance.
Selon l'architecture	Linéaires / Ramifiés / Réticulés	Chaînes simples, avec branches, ou connectées en réseau 3D.	La réticulation est indispensable pour former la structure de l'hydrogel.
Selon la stéréoisométrie	Isotactique / Syndiotactique / Atactique	Disposition spatiale des substituants le long de la chaîne.	Influence la cristallinité et la capacité de gonflement.
Selon l'origine	Naturels / Artificiels / Synthétiques	Issus de la biomasse, modifiés chimiquement, ou 100% pétrochimiques.	Détermine la biodégradabilité dans le sol agricole.
Selon le comportement	Thermoplastiques / Thermodurcissables / Élastomères	Réaction à la chaleur (fusion vs décomposition) et élasticité.	Les hydrogels se comportent souvent comme des réseaux élastiques gonflants.

Bien que cette classification générale illustre la diversité des matériaux polymères, l'accent est mis principalement sur les polymères réticulés. En effet, la structure tridimensionnelle issue de la réticulation confère aux hydrogels leur propriété fondamentale, à savoir leur capacité à absorber de grandes quantités d'eau sans se dissoudre comme l'illustre la figure. Par ailleurs, le choix entre polymères naturels et synthétiques constitue un enjeu majeur dans le cadre de

L'agriculture durable, en permettant de concilier performance technique et biodégradabilité dans le sol.

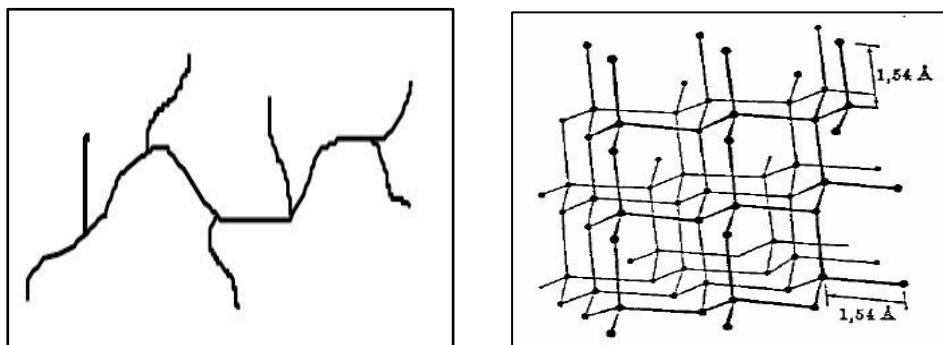


Figure 2.2 : Structure tridimensionnelle d'un polymère réticulé.

2.2.3. Propriétés physiques et chimiques des polymères

Les polymères constituent une classe importante de matériaux, caractérisée par une grande diversité de propriétés physiques et chimiques, ce qui les rend adaptés à de multiples applications dans différents secteurs industriels. Ces propriétés dépendent directement de la structure macromoléculaire du polymère, de la nature des monomères qui le composent, ainsi que des interactions entre les chaînes polymériques. De plus, les conditions environnementales, telles que la température et l'humidité, influencent fortement le comportement et les performances des polymères, ce qui rend l'étude de ces propriétés essentielle pour comprendre leurs capacités et leurs limitations. [29]

➤ Propriétés physiques des polymères

Les propriétés physiques des polymères dépendent de plusieurs facteurs fondamentaux, notamment la longueur des chaînes polymériques, leur organisation (linéaire, ramifiée ou réticulée) et l'intensité des interactions inter-chaînes. Ces propriétés déterminent le comportement du polymère lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou optiques, ainsi que la facilité de son traitement et de son utilisation dans les applications industrielles.

❖ Propriétés mécaniques

Les polymères présentent une large variété de comportements mécaniques, allant de matériaux rigides et fragiles à des matériaux souples et élastiques. Ces propriétés sont fortement influencées par la masse molaire et la structure des chaînes polymériques.

❖ Propriétés thermiques

Le comportement thermique est défini par la capacité du polymère à passer d'un état rigide à un état souple ou liquide sous l'effet de la température. Ces paramètres sont essentiels pour déterminer les conditions d'utilisation des polymères en milieu naturel [30].

➤ **Propriétés chimiques des polymères**

Les propriétés chimiques des polymères sont liées à la nature des liaisons chimiques, aux groupements fonctionnels présents dans la chaîne macromoléculaire ainsi qu'aux interactions entre chaînes.

❖ **Résistance chimique et Solubilité**

Les polymères présentent une résistance variable face aux agents chimiques (acides, bases). Pour les hydrogels, l'insolubilité est une propriété clé résultant de leur structure réticulée.

❖ **Stabilité chimique**

Certains polymères présentent une grande stabilité, tandis que d'autres peuvent être sensibles à des facteurs externes tels que l'oxygène ou les rayonnements ultraviolets.

❖ **Dégradation**

Les polymères peuvent subir divers processus de dégradation (thermique, chimique ou photochimique). Ces phénomènes entraînent une rupture des chaînes et une altération progressive des propriétés du matériau, un facteur crucial pour la biodégradabilité en agriculture. [31]

2.3. Polymères hydro-rétenteurs (Hydrogels)

Les polymères hydro-rétenteurs font partie des matériaux ayant suscité un intérêt croissant ces dernières années, en raison de leurs propriétés particulières et de la diversité de leurs domaines d'application. Ces matériaux ont contribué à apporter des solutions efficaces dans plusieurs secteurs, notamment ceux liés à la gestion de l'eau, ce qui en fait un sujet d'étude et de recherche en constante évolution. [32]

2.3.1. Définition des polymères hydro-rétenteurs

Les polymères hydro-rétenteurs, communément appelés hydrogels, sont des matériaux polymériques constitués de réseaux tridimensionnels réticulés, capables d'absorber et de retenir des quantités importantes d'eau ou de solutions aqueuses sans se dissoudre. Cette propriété est due à la présence de groupes fonctionnels hydrophiles au sein de leur structure, qui favorisent l'interaction avec l'eau et induisent un phénomène de gonflement. Grâce à leur structure stable et à leur forte capacité de rétention, ces polymères sont largement utilisés dans divers domaines, notamment en agriculture pour améliorer la disponibilité en eau dans le sol. [33]

2.3.2. Mécanisme d'absorption et de rétention de l'eau

Le principe d'absorption et de rétention de l'eau par les polymères hydro-rétenteurs repose principalement sur la structure tridimensionnelle réticulée de leurs chaînes polymériques hydrophiles. Au contact de l'eau, les groupes fonctionnels hydrophiles, tels que les groupes

hydroxyle ($-OH$), carboxyle ($-COOH$) et amide ($-CONH_2$), interagissent avec les molécules d'eau, favorisant ainsi une meilleure diffusion et pénétration au sein du réseau polymérique [30].

Ce processus conduit à un phénomène de gonflement (swelling), caractérisé par une augmentation significative du volume du polymère sans dissolution. Cette capacité est assurée par la présence de liaisons de réticulation qui empêchent la dispersion des chaînes polymériques dans le milieu aqueux [34].

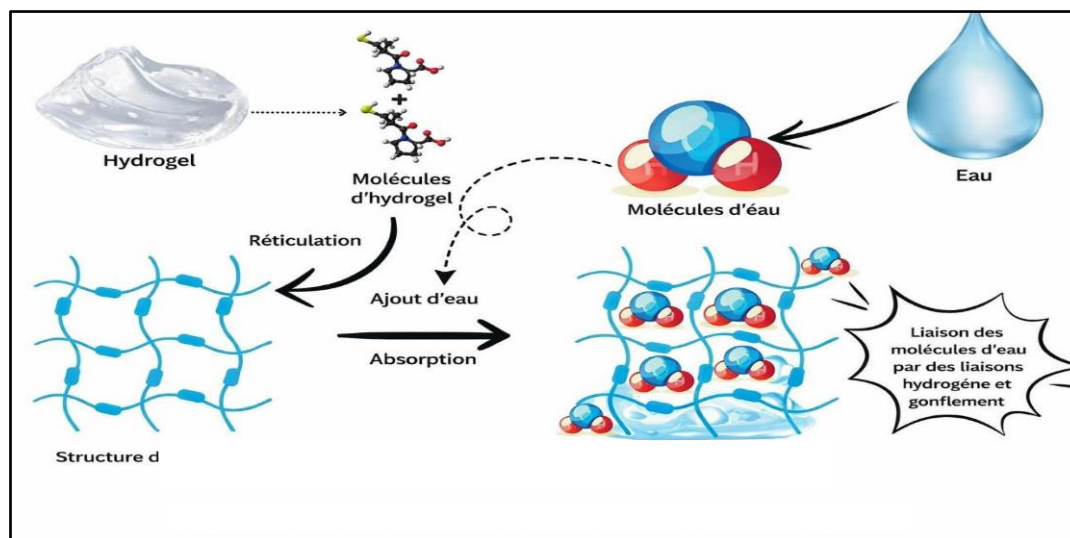


Figure2.3 : Mécanisme d'absorption, de gonflement et de rétention de l'eau dans les hydrogels. [35]

Par conséquent, l'eau est maintenue à l'intérieur de ce réseau par des interactions physiques et chimiques, incluant la formation de liaisons hydrogène et de forces osmotiques, ce qui permet de prolonger la disponibilité de l'humidité. De plus, cette eau peut être libérée progressivement en fonction des conditions environnementales, telles que la température, la pression et les besoins du sol environnant. C'est précisément cet avantage qui confère à ces matériaux leur utilité majeure dans diverses applications, notamment en agriculture, où ils améliorent la rétention d'eau des sols. [33]

2.3.3. Types de polymères hydro-rétenteurs

Les polymères hydro-rétenteurs se distinguent selon leur origine et leur mode de synthèse, ce qui conditionne leurs propriétés physico-chimiques ainsi que leurs domaines d'application. À cet égard, ils sont généralement classés en trois grandes catégories : les polymères naturels, les polymères synthétiques et les polymères semi-synthétiques [36].

➤ Polymères naturels

Les polymères naturels sont des macromolécules issues de ressources biologiques telles que les plantes, les animaux ou les micro-organismes. Ils comprennent principalement les

polysaccharides comme l'amidon, l'alginate ou la cellulose et les protéines telles que le collagène ou la gélatine. [36]

Ces polymères se caractérisent par leur biodégradabilité, leur biocompatibilité et leur faible impact environnemental, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications agricoles et environnementales, notamment pour l'amélioration de la rétention d'eau dans les sols. [33]

Cependant, malgré leurs avantages écologiques, les polymères naturels présentent certaines limites, notamment une faible résistance mécanique, une stabilité limitée et une sensibilité aux conditions environnementales, ce qui peut restreindre leur utilisation dans des conditions extrêmes. [36]

➤ **Polymères synthétiques**

Les polymères synthétiques sont produits artificiellement à partir de matières premières pétrochimiques par des réactions de polymérisation contrôlées. Parmi les exemples courants figurent le poly (acide acrylique), le polyéthylène glycol et le polyalcool vinylique [36]

Ces polymères sont largement utilisés comme hydro-rétenteurs en raison de leurs propriétés ajustables, notamment :

- Un forte capacité d'absorption d'eau,
- Une stabilité chimique et thermique élevée.
- Une résistance mécanique importante. [33]

Contrairement aux polymères naturels, leurs propriétés peuvent être conçues et optimisées selon les besoins spécifiques, ce qui explique leur utilisation dominante dans les hydrogels modernes [36]

Néanmoins, leur origine non renouvelable et leur faible biodégradabilité posent des problèmes environnementaux, notamment en termes d'accumulation dans les sols et de pollution à long terme [37]

➤ **Polymères semi-synthétiques**

Les polymères semi-synthétiques (ou artificiels) sont obtenus par modification chimique de polymères naturels afin d'améliorer leurs propriétés. Un exemple typique est celui des dérivés de la cellulose, comme l'acétate ou le nitrate de cellulose. [37]

Cette catégorie constitue un compromis entre les polymères naturels et synthétiques. En effet, elle permet de combiner :

- La biocompatibilité et la biodégradabilité des polymères naturels.
- Avec une amélioration des propriétés mécaniques et de la stabilité. [33]

Les polymères semi-synthétiques sont ainsi particulièrement intéressants pour les applications

hydro-rétentrices, car ils offrent une meilleure performance tout en réduisant l'impact environnemental par rapport aux polymères entièrement synthétiques.

Dans le cadre des hydrogels synthétiques, une catégorie particulière mérite une attention spécifique, à savoir les polymères super absorbants (SAP).

2.3.4. Les Polymères Super Absorbants (SAP)

Les polymères super absorbants (SAP) constituent une sous-classe des hydrogels synthétiques, généralement à base de polyacrylate de sodium ou de potassium. Ils se caractérisent par une capacité d'absorption exceptionnelle, pouvant atteindre plusieurs centaines de fois leur masse sèche comme illustré dans la Figure 2.4.



Figure2.4 : Morphologie granulaire d'un polymère super absorbant (SAP) à l'état sec

Dans le contexte agricole, notamment dans les zones arides comme celles du sud algérien, les SAP jouent le rôle de micro-réservoirs capables de stocker l'eau lors de l'irrigation et de la restituer progressivement selon les besoins hydriques des plantes. Cette propriété permet d'améliorer significativement l'efficacité de l'irrigation, en particulier dans les sols sableux à forte perméabilité.

Tableau 2.2 : Comparaison synthétique des différents types d'hydrogels à usage agricole[37]

Type d'Hydrogel	Origine	Avantages principaux	Limites et Défis
Polymères naturels	Ressources biologiques (Amidon, Cellulose, Alginate)	Biodégradables, biocompatibles, faible impact environnemental.	Faible résistance mécanique, stabilité limitée dans le sol.
Polymères synthétiques	Pétrochimie (Polyacrylate de potassium, PEG)	Haute capacité d'absorption, stabilité chimique et thermique élevée.	Faible biodégradabilité, risque d'accumulation de microplastiques.
Polymères semi-synthétiques	Modification chimique de polymères naturels	Compromis idéal entre performance technique et biodégradabilité	Procédés de synthèse plus complexes et coûteux

2.4. Impact des hydrogels sur les propriétés physico-chimiques des sols agricoles

Les polymères hydro-rétenteurs, et en particulier les hydrogels, ont suscité un intérêt croissant en agriculture, pour leur capacité à améliorer l'efficacité de l'eau utilisée par le sol. Leur importance vient de leur structure capable d'absorber une grande quantité d'eau, de la stocker puis de la restituer progressivement selon les besoins des plantes, permettant un sol plus stable en humidité et réduisant les pertes en eau, en particulier dans les zones stressées par le manque d'eau [38].

Mais au-delà de cet aspect, ces polymères permettent également d'améliorer les propriétés physiques du sol. En effet, la présence de ces polymères favorise une organisation des particules permettant d'augmenter la porosité, de diminuer la compacité et d'assurer ainsi la circulation de l'eau et de l'air dans le sol, conditions favorables à la fois au développement du système racinaire et à l'activité des microorganismes du sol, contribuant ensemble à améliorer la croissance et donc la productivité des cultures [39].

2.4.1. Dynamique de rétention et de libération prolongée de l'eau

La capacité de rétention d'eau est une caractéristique majeure justifiant l'usage des hydrogels en agriculture. Leur structure hydrophile peut absorber jusqu'à plusieurs centaines de fois leur masse sèche, tout en conservant l'eau au sein de leur réseau stable. Cette structure permet le stockage d'eau dans les pores du réseau polymérique, puis sa libération progressive en fonction

du gradient de potentiel hydrique et des besoins des plantes, garantissant ainsi une disponibilité optimale de l'eau dans la zone racinaire. [40]

Cette caractéristique est d'un intérêt réel dans le cadre d'un environnement stressé par la disponibilité hydrique. En effet, l'utilisation d'hydrogels dans le sol permet une meilleure efficacité de l'eau en contrôlant les pertes par drainage profond, ruissellement et également par évaporation, mais également en stabilisant le niveau de l'humidité dans le sol au profit d'une meilleure absorption par les racines tout en limitant les effets négatifs que peut avoir la déficience en eau sur les processus physiologiques de la plante [41]

En outre, l'insertion de ces polymères, particulièrement dans les sols sableux, favorise la rétention d'eau et la fonctionnalité hydro-physique, avec des impacts positifs sur la croissance et la productivité des végétaux. Les études révèlent également que les hydrogels n'assurent pas seulement le stockage de l'eau, mais également la régulation, en douceur, de sa disponibilité, conformément aux besoins des plantes, au cours de leur développement. [40]

2.4.2. Amélioration de la structure granulaire et de la porosité du sol

L'ajout de polymères hydro-rétenteurs, et notamment d'hydrogels, provoque des effets notables sur les propriétés physiques du sol, au niveau de la structure et de la porosité. En effet, ces matériaux modifient l'organisation des éléments solides du sol et favorisent de ce fait la formation d'agrégats mieux structurés, ayant pour effet une diminution de la compaction du sol et une meilleure stabilité structurale, deux facteurs essentiels au bon développement du système racinaire [42].

Sur le plan de la porosité, l'effet des hydrogels réside dans la redistribution des pores, aboutissant à la fois, et de façon concomitante, à une augmentation de la macroporosité et de la microporosité. Ce phénomène pourrait permettre de trouver un meilleur compromis relatif à l'eau en (re)distribuant les fonctions hydriques et aériennes du sol, et d'accroître ainsi l'efficacité des échanges relatifs à l'infiltration de l'eau et des gaz en rapport à la respiration racinaire et aux activités biologiques le composant [43].

La réduction de la compaction diminue la contrainte mécanique sur les racines, facilitant ainsi l'exploration du sol. Cette amélioration des propriétés hydro-physiques favorise l'absorption des nutriments, particulièrement dans les milieux sableux ou dégradés [42].

A cela s'ajoute certaines sources techniques qui soulignent le rôle des polymères superabsorbants dans l'agrégation du sol, la lutte contre l'érosion, l'optimisation des flux d'air et d'eau, et contribuent ainsi à sa qualité physique globale

Les polymères hydro-rétenteurs apparaissent ainsi comme un agent amendement efficace, capable d'améliorer structure et aération simultanément pour mieux équilibrer disponibilité hydrique et oxygénée, indissociables du bon fonctionnement des systèmes agricoles [44].

2.5. Rôle des polymères hydro-rétenteurs dans l'amélioration de l'efficacité hydrique

Dans le domaine agricole, les polymères hydro-rétenteurs, notamment les hydrogels, représentent des matériaux d'un intérêt considérable en raison de leur contribution significative à l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans le sol. Leur capacité à réguler la disponibilité de l'eau par un mécanisme de stockage et de libération progressive constitue un argument majeur en faveur de leur utilisation pour limiter la consommation régionale d'eau et optimiser la gestion des irrigations [40]. Les rôles principaux de ces polymères peuvent être synthétisés comme suit :

Ces polymères sont capables de retenir une quantité importante d'eau au sein de leur structure, puis de la restituer progressivement en fonction des besoins des plantes, assurant ainsi un approvisionnement hydrique constant et continu au niveau racinaire [42]. Cette propriété permet de limiter les pertes en eau par évaporation superficielle et par percolation profonde (drainage), grâce à la rétention de l'eau dans le réseau polymérique et à la réduction de la fraction d'eau libre exposée aux pertes [44].

En outre, les hydrogels augmentent l'efficacité de l'irrigation en optimisant l'utilisation de l'eau apportée. Leur libération progressive, ajustée au gradient de potentiel hydrique, garantit une meilleure adéquation entre l'offre en eau et les besoins réels des végétaux [40]. Ils contribuent également à stabiliser l'humidité du sol en réduisant les fluctuations de sa teneur en eau, créant ainsi un environnement hydrique stable qui limite le stress hydrique et améliore les performances physiologiques des plantes [42].

Ces dispositifs augmentent l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Water Use Efficiency, WUE) en accroissant la proportion d'eau effectivement absorbée par les plantes par rapport à l'eau apportée, ce qui améliore la rentabilité des ressources hydriques utilisées [43]. Ils contribuent également à réduire la fréquence des irrigations, offrant une meilleure gestion des ressources en eau, particulièrement dans les zones arides et semi-arides [44].

De plus, les polymères hydro-rétenteurs améliorent l'efficacité d'utilisation des engrais et des éléments nutritifs en limitant leur lessivage et en les maintenant dans la zone racinaire pour faciliter leur absorption par les plantes [43].

Ils favorisent le développement et l'élargissement du système racinaire grâce à une disponibilité prolongée de l'eau, ce qui améliore la capacité d'absorption de l'eau et des éléments nutritifs [42].

Ils optimisent le fonctionnement des relations sol-plante en assurant un milieu hydrique régulier qui soutient les processus physiologiques d'absorption et de métabolisme [41]. En activant les micro-organismes du sol grâce à l'humidité stable qu'ils procurent, ils favorisent les processus biochimiques impliqués dans la fertilité du sol [41].

Enfin, ces polymères contribuent à l'augmentation de la productivité agricole par une meilleure utilisation de l'eau, des nutriments et des ressources, ainsi que par une régulation améliorée des conditions de croissance des cultures [43]. Ils peuvent également favoriser l'adaptation aux stress environnementaux et climatiques, notamment la sécheresse, en constituant une réserve d'eau qui atténue certains effets du déficit hydrique sur les cultures [44], et renforcent la durabilité des systèmes agricoles en réduisant les pertes en eau et en optimisant sa gestion sur le long terme [41].

2.6. Applications des polymères hydro-rétenteurs en agriculture

Les polymères hydro-rétenteurs répondent à une visée spécifique d'adaptation des techniques aux conditions pédoclimatiques d'une agriculture par rapport à la disponibilité en eau. Connaître ces propriétés potentielles ne suffit pas, mais il faut moduler leur mise en œuvre en fonction de situations spécifiques, dans une logique d'optimisation des systèmes de production.

- Dans les sols sableux, caractérisés par une faible capacité de rétention d'eau, l'ajout de ces hydrogels permet d'améliorer la capacité du sol à stocker l'eau et de réduire les pertes par infiltration profonde, rendant ainsi le sol plus propice à la culture [45].
- Dans les zones arides et semi-arides, son rôle est de maintenir l'humidité pour limiter le stress hydrique et stabiliser les niveaux de production [42].
- Dans les systèmes d'irrigation, notamment en irrigation déficitaire ou localisée, le polyacrylate de potassium au sein des cultures offre l'avantage d'une utilisation optimale de l'eau et d'un espacement des arrosages [43].
- Les hydrogels sont employés dans les systèmes d'irrigation comme en irrigation déficitaire ou localisée, pour optimiser l'utilisation de l'eau et réduire les apports [44].
- Durant les opérations de semis et de plantation, ils sont appliqués dans la zone racinaire pour favoriser l'installation des plantules et améliorer la reprise des cultures [43].

- En enrobage des semences, ces produits assurent un micro-environnement humide autour de la graine, l'améliorant ainsi la germination et le développement initial des plantes [44].
- En horticulture et dans les cultures hors-sols, les hydrogels régulent l'humidité des substrats et améliorent les conditions de croissance [44].
- Les sols dégradés sont également améliorés sur le plan hydro-physique ainsi que par une reconstitution partielle de la qualité [42]
- Les programmes de reboisement ou de lutte contre la désertification favorisent la survie des plants qui se développent dans les conditions d'imperfection d'hydratation [42]
- En agriculture intensive, ils permettent une gestion raisonnée de l'utilisation de l'eau et un meilleur retour d'ensemble du système de production [43].

2.7. Limites et défis liés à l'utilisation des polymères hydro-rétenteurs

Malgré leurs avantages indéniables, l'utilisation des hydrogels en agriculture est confrontée à plusieurs défis économiques et environnementaux qui nécessitent une analyse approfondie pour garantir une application durable [44].

Un obstacle majeur réside dans le coût économique. Les polymères synthétiques, en particulier, requièrent des procédés de fabrication complexes, ce qui entraîne un prix relativement élevé. Cette contrainte est particulièrement problématique dans les systèmes agricoles à faibles ressources, où leur adoption demeure limitée [45].

Pour surmonter cet obstacle économique, l'utilisation de polymères super absorbants issus du recyclage représente une alternative innovante et durable. Cette approche permet non seulement de réduire les coûts de mise en œuvre, mais également de valoriser des déchets polymériques, s'inscrivant ainsi dans une logique d'économie circulaire.

Par ailleurs, des préoccupations environnementales significatives sont soulevées. Certains polymères synthétiques présentent une faible biodégradabilité, ce qui peut conduire à leur accumulation progressive dans le sol. Leur dégradation partielle est susceptible de générer des microplastiques ou des substances potentiellement toxiques, perturbant ainsi l'équilibre du sol et la biodiversité microbienne [46].

En outre, les performances des polymères hydro-rétenteurs peuvent être affectées par des contraintes mécaniques et environnementales. Sous l'effet de la pression du sol et des cycles répétés d'humidification et de dessiccation, leur structure peut se dégrader, entraînant une diminution de leur efficacité au fil du temps [47].

Quant aux polymères d'origine naturelle, bien que plus respectueux de l'environnement, ils présentent également certaines limites. Leur biodégradabilité rapide réduit leur durée de vie et leur capacité de rétention d'eau après plusieurs applications. De plus, leur efficacité dépend fortement des conditions pédoclimatiques, telles que la texture du sol, la salinité, la température et l'activité microbienne. Par exemple, une salinité élevée peut diminuer significativement leur capacité de gonflement [46], [48].

Un autre défi majeur concerne l'écart entre les performances observées en laboratoire et celles obtenues en conditions réelles. Dans le sol, la pression mécanique et la présence d'ions dissous limitent la capacité d'expansion et d'absorption des polymères, réduisant ainsi leur efficacité hydrique [48].

Enfin, plusieurs défis scientifiques et techniques restent à relever. Il est impératif de développer de nouveaux polymères capables de combiner une forte capacité d'absorption, une bonne résistance mécanique, une biodégradabilité contrôlée et un faible impact environnemental. Cet objectif constitue aujourd'hui un axe de recherche prioritaire dans ce domaine [45], [47].

2.8. Études antérieures

Ces dernières années, l'utilisation des polymères superabsorbants (Super Absorbent Polymers : SAP) dans le domaine agricole a suscité un intérêt croissant, notamment pour l'amélioration des propriétés physiques et hydriques des sols sableux caractérisés par une faible capacité de rétention en eau et des pertes hydriques importantes. Plusieurs recherches se sont ainsi orientées vers le développement de solutions techniques visant à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et à réduire le stress hydrique des plantes dans les régions arides et semi-arides.

Dans ce contexte, l'étude réalisée par Madiha Zekry, Ibrahim Nassar, Heba Salim et Ahmed Abdallah (2020) intitulée : "The Potential of Super Absorbent Polymers from Diaper Wastes to Enhance Water Retention Properties of the Soil" a porté sur l'évaluation du potentiel de recyclage des polymères superabsorbants extraits des couches pour bébés usagées afin d'améliorer les propriétés hydriques du sol. Cette étude est partie du double constat lié à l'accumulation des déchets de couches jetables et à la faible capacité de rétention en eau des sols sableux. Les chercheurs ont procédé à l'extraction du polymère SAP à partir des couches après des opérations de stérilisation (par autoclavage à 125°C pendant 15 min), de séchage et de broyage, puis ont étudié les propriétés d'absorption de l'eau sous différents niveaux de salinité (de 0.0 à 4.0 dS m⁻¹) et sur plusieurs durées expérimentales.

Les résultats obtenus ont montré que le polymère récupéré possède une capacité d'absorption élevée, capable de retenir jusqu'à 311 g/g (soit plusieurs centaines de fois sa masse sèche) en

eau lorsque la salinité est faible, (Comme illustré dans la figure 2.5). L'étude a également démontré que l'augmentation de la salinité réduit significativement la capacité d'absorption du polymère (chutant à 111 g/g à 3.0 dS m⁻¹) en raison de l'effet des sels sur sa structure chimique et la diminution de la pression osmotique [49]

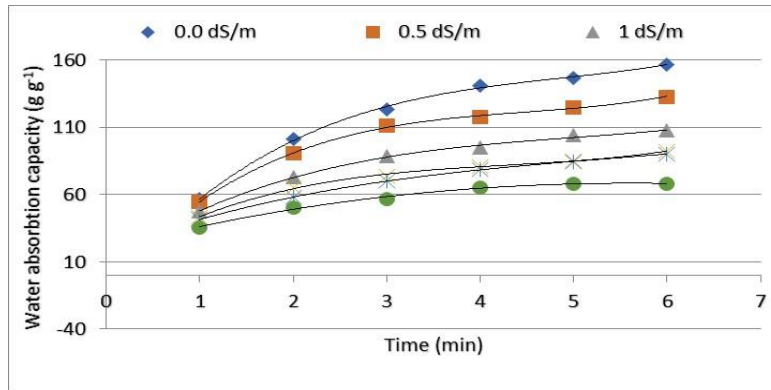


Figure2.5 : Variation de la capacité d'absorption d'eau du SAP sous différents niveaux de salinité[49]

Par ailleurs, plusieurs concentrations de SAP (0.4%, 0.6%, 0.8% et 1.6% p/p) ont été incorporées dans un sol limono-argilo-sableux afin d'évaluer leur effet sur la rétention d'eau. Les résultats ont révélé une amélioration significative de la capacité de rétention hydrique du sol (allant jusqu'à 2.6 fois celle du témoin) avec l'augmentation de la concentration du polymère, (Comme le montre la figure 2.6). L'étude a également confirmé que l'efficacité du polymère persiste après plusieurs cycles d'humidification et de séchage (5 cycles sur 6 mois), malgré une légère diminution progressive des performances (environ 14%) au fil du temps.

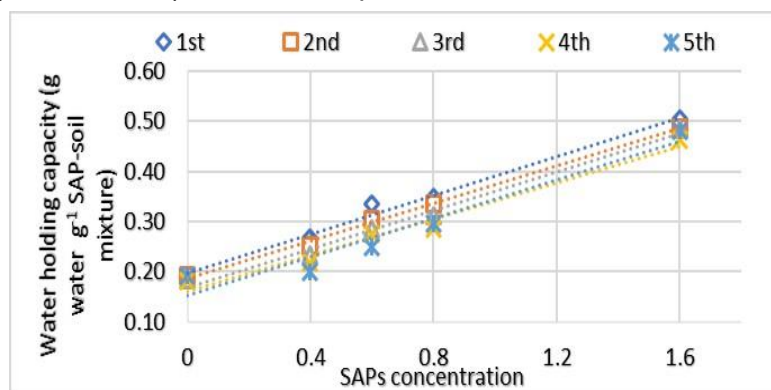


Figure2.6 : Effet de l'ajout du SAP sur la capacité de rétention hydrique du sol. [49]

Cette étude présente ainsi un intérêt particulier puisqu'elle propose une solution combinant à la fois la valorisation des déchets et l'amélioration de la gestion des ressources en eau en agriculture.[49]

Parmi les études importantes dans ce domaine figure également celle de Y. Wei et D. J. Durian (2021) intitulée : "Effect of Hydrogel Particle Additives on Water-Accessible Pore Structure of Sandy Soils"

qui s'est intéressée à l'analyse de l'effet des particules d'hydrogel sur la structure poreuse des sols sableux et sur les mécanismes de rétention de l'eau. Les chercheurs ont utilisé un dispositif expérimental à plaque de pression ainsi qu'un modèle capillaire mathématique afin d'étudier la distribution des pores accessibles à l'eau dans le sol. L'étude a été réalisée sur un sol sableux artificiel constitué de billes de verre auquel différentes concentrations d'hydrogel ont été ajoutées.

Les résultats ont montré que les particules d'hydrogel gonflées modifient directement la structure interne des pores du sol. Elles contribuent à obstruer les grands pores responsables des pertes rapides d'eau tout en favorisant la formation de pores plus petits capables de retenir l'eau pendant une durée plus longue, (Comme illustré dans la figure 2.7).

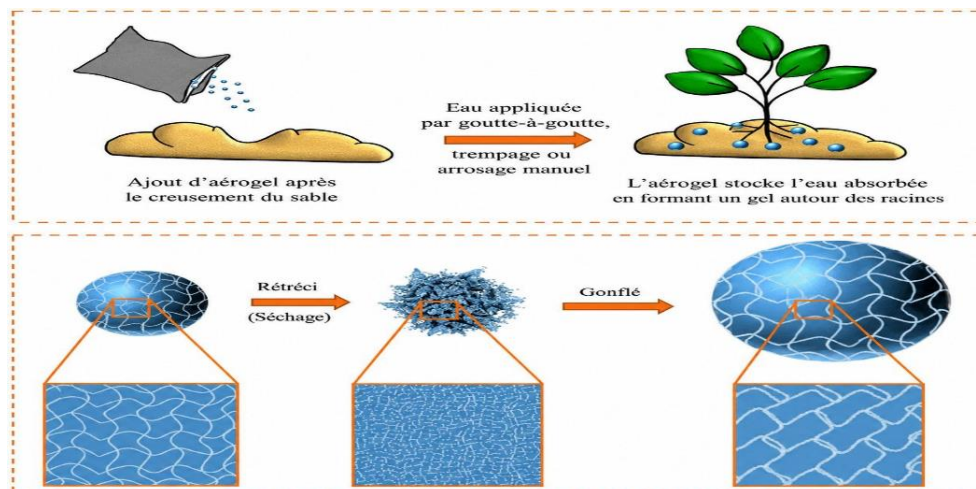


Figure2.7 : Effet de l'hydrogel sur la structure poreuse des sols sableux

Les auteurs ont également démontré que l'augmentation de la concentration en hydrogel réduit le volume des pores favorisant l'écoulement rapide de l'eau, ce qui améliore considérablement la capacité de rétention hydrique du sol. Cette étude est particulièrement importante car elle explique les mécanismes physiques responsables de l'efficacité des polymères superabsorbants dans l'amélioration des propriétés hydriques des sols sableux.

À travers l'analyse de ces travaux, il apparaît que la majorité des recherches antérieures se sont principalement concentrées sur les aspects physiques et chimiques des polymères

superabsorbants ainsi que sur leur effet direct sur le sol. En revanche, peu d'études ont intégré des systèmes intelligents de suivi en temps réel de l'humidité du sol. Ainsi, la présente étude se distingue par la combinaison de l'utilisation des polymères superabsorbants avec des techniques électroniques de mesure de l'humidité du sol, dans le but d'optimiser la gestion de l'irrigation et l'exploitation des ressources hydriques. [50]

Dans ce contexte, l'étude réalisée par Olga E. Philippova et al. (2025) publiée dans la revue Gels s'est intéressée à l'évaluation de l'efficacité des polymères superabsorbants extraits des couches pour bébés comparativement au gel agricole commercial Aquasorb pour l'amélioration de la rétention d'eau dans les sols sableux. L'objectif principal de cette étude était d'examiner la possibilité de réutiliser les polymères issus des couches comme alternative économique aux hydrogels agricoles conventionnels, particulièrement dans les sols caractérisés par une forte perméabilité et des pertes hydriques importantes.

Les chercheurs ont procédé à l'extraction des particules de SAP à partir de plusieurs types de couches commerciales, puis les ont incorporées dans le sable à une fraction volumique de 0,3 %, avec une comparaison directe avec le gel agricole Aquasorb. Plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés, notamment l'étude du degré de gonflement, du temps de gonflement, de la pression de gonflement, de la capacité de rétention d'eau ainsi que des tests de germination et de croissance des plantes.

Les résultats obtenus ont montré que les polymères extraits des couches améliorent significativement la capacité de rétention hydrique du sable par rapport à l'échantillon témoin sans gel. L'étude a également révélé que la quantité d'eau disponible pour les plantes augmente considérablement après l'ajout du SAP. De plus, les gels issus des couches présentent une vitesse de gonflement plus rapide que celle du gel agricole commercial, ce qui constitue un avantage important dans les sols sableux caractérisés par une infiltration rapide de l'eau, (Comme illustré dans la figure 2.8).

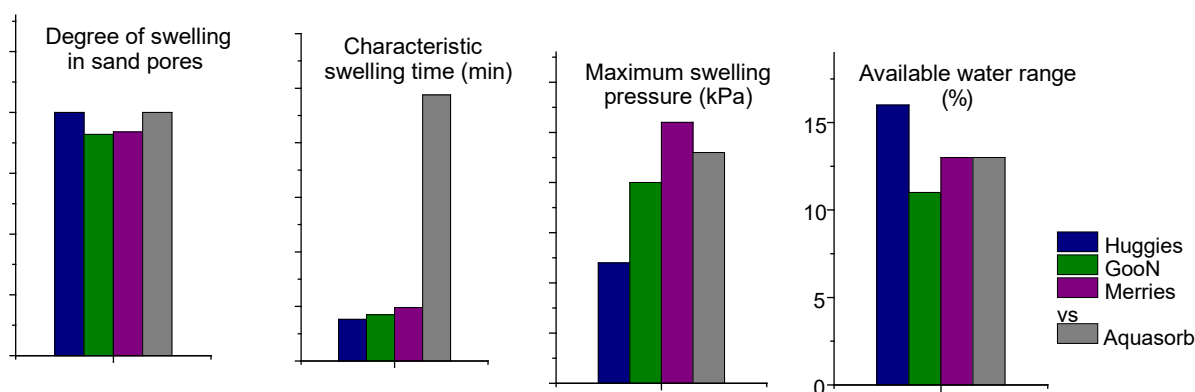


Figure2.8 : Comparaison des propriétés hydriques des gels SAP issus des couches pour bébés et du gel agricole Aquasorb dans le sable.[51]

L'étude a également montré que les polymères extraits des couches sont capables de générer une pression de gonflement adéquate à l'intérieur des pores sableux, favorisant ainsi une meilleure rétention de l'eau pendant des périodes plus longues. Par ailleurs, les essais de germination et de croissance végétale ont démontré que l'ajout du SAP améliore le taux de germination des graines ainsi que le développement des plantules par rapport au sol non traité, sans effet phytotoxique notable sur les plantes.

Les auteurs ont finalement conclu que la réutilisation des polymères superabsorbants issus des couches pour bébés représente une solution durable et efficace pour l'amélioration de la gestion de l'eau en agriculture et la réduction des déchets polymériques, avec un potentiel important comme alternative aux hydrogels agricoles commerciaux dans les sols sableux. [51]

2.9. Conclusion

En conclusion, les polymères superabsorbants (SAP) représentent une solution innovante pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les sols agricoles, particulièrement dans les régions arides et semi-arides. Grâce à leur capacité élevée d'absorption et de rétention de l'eau, ils permettent de réduire les pertes hydriques, de maintenir l'humidité du sol et d'améliorer les conditions de croissance des plantes.

Les différentes études présentées ont également montré que ces polymères contribuent à l'amélioration des propriétés physiques du sol ainsi qu'à l'optimisation de l'irrigation et de l'utilisation des ressources hydriques. Malgré certaines limites liées au coût et aux conditions d'utilisation, les SAP demeurent une technologie prometteuse pour le développement d'une agriculture plus durable et plus efficace.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance croissante des technologies intelligentes et durables dans le domaine agricole, en particulier dans les régions arides et semi-arides où la gestion rationnelle des ressources hydriques représente un défi majeur. Face aux changements climatiques, à la rareté de l'eau et à l'augmentation continue des besoins agricoles, l'intégration des énergies renouvelables et des techniques d'économie d'eau devient aujourd'hui une nécessité incontournable pour assurer un développement agricole durable.

Le présent travail a porté sur l'étude d'un système d'irrigation intelligent alimenté par énergie solaire et associé à l'utilisation d'un polymère superabsorbant (SAP) en tant qu'agent rétenteur d'eau. Cette combinaison technologique constitue une solution innovante visant à améliorer l'efficacité de l'irrigation, à réduire les pertes en eau et en énergie, ainsi qu'à optimiser les conditions de croissance des plantes dans les milieux sahariens.

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout du polymère SAP contribue de manière significative à l'augmentation de la capacité de rétention en eau du sol, à la réduction de la fréquence d'irrigation et au maintien d'un niveau d'humidité stable au niveau de la zone racinaire. Cela permet une meilleure gestion des ressources hydriques et une amélioration de l'efficacité du système agricole. L'étude a également révélé que le comportement hydrique varie selon la nature du substrat utilisé, notamment entre le sable pur et le mélange sable-compost, ce qui met en évidence l'importance des propriétés physiques du milieu poreux dans les performances du système.

Par ailleurs, l'intégration de l'énergie solaire dans le système d'irrigation permet de disposer d'une source d'énergie propre, autonome et économique, particulièrement adaptée aux régions éloignées du réseau électrique. Ce système contribue également à la réduction de la consommation énergétique conventionnelle, des coûts d'exploitation et des impacts environnementaux liés à l'utilisation des énergies fossiles.

Ainsi, cette étude confirme que l'association entre l'irrigation intelligente, l'énergie solaire et les polymères hydrorétenteurs représente une solution prometteuse pour le développement d'une agriculture durable et résiliente dans les zones arides, tout en participant à la réduction de la consommation d'eau et d'énergie ainsi qu'à l'amélioration des performances agricoles.

Cette étude ouvre également des perspectives futures importantes pour le développement de systèmes d'irrigation plus intelligents et plus performants, ainsi que pour l'évaluation, à long terme, de l'effet de différentes concentrations du polymère SAP sur divers types de cultures dans des conditions climatiques variées.

Enfin, l'adoption de ces technologies innovantes constitue une étape importante vers une gestion rationnelle des ressources hydriques et énergétiques, le renforcement de la sécurité alimentaire ainsi que l'orientation vers une agriculture intelligente et durable, répondant aux exigences environnementales et aux enjeux du développement futur.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Van Noordwijk, M., Duguma, L. A., Dewi, S., Leimona, B., Catacutan, D., Lusiana, B., Oborn, I., Hairiah, K., & Minang, P. A. (2018). SDG synergy between agriculture and forestry in the food, energy, water and income nexus: reinventing agroforestry? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 34, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.09.003>
- [2] Bibliothèque Agricole Nationale. (s.d.). Agriculture durable. Récupéré de : <https://share.google/hua6VwhwveQ01FeAs>
- [3] Benabdallah, N. (2025). Promoting Investment in Dryland Agriculture: Policies and Challenges. *Journal of Contemporary Business and Economic Studies*, 7(1), 62–73.
- [4] Hutchins, S. H. (s.d.). The Role of Technology in Sustainable Agriculture. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison & R. E. Cancelado (éds.), *Radcliffe's IPM World Textbook*. University of Minnesota. Disponible sur : <https://ipmworld.umn.edu/hutchins>
- [5] INRAE. (2023). Eau et agriculture. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Disponible sur : <https://www.inrae.fr/dossiers/gestion-ressource-eau/eau-agriculture>
- [6] OCDE. (2025). Eau et agriculture. Organisation de coopération et de développement économiques. Disponible sur : <https://www.oecd.org/fr/themes/eau-et-agriculture.html>
- [7] Agence européenne pour l'environnement. (2021). L'eau que nous mangeons – le lourd tribut de l'agriculture irriguée. Disponible sur : <https://www.eea.europa.eu/fr/articles/the-water-we-eat>
- [8] Verdesian Life Sciences. (2024). Water Conservation in Agriculture. Disponible sur : <https://vlsci.com/blog/water-conservation-in-agriculture/>
- [9] FAO. (2002). Agriculture, food and water. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Disponible sur : <https://www.fao.org/4/y3918a/y3918a09.htm>
- [10] ScienceDirect. (s.d.). Irrigation. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/irrigation>
- [11] Benabdallah, N. (2020). Principes de l'irrigation. Polycopié de cours.
- [12] FnB Tech, “FnB Tech,” [Online]. Disponible sur : <https://share.google/XwFEEHAN6xFiK25G4>

- [13] FnB Tech, “FnB Tech,” [Online]. Disponible sur : <https://share.google/8v9KwJmU2n4j0I7Hc>
- [14] Google Photos, consulté le 13 mars 2026. Disponible sur : <https://share.google/rqBJR24uvFhw8hxG6>.
- [15] Google Photos, consulté le 13 mars 2026. Disponible sur : <https://share.google/HqiaawBRbVWdfArnd>
- [16] Royal Green Biotech. (s.d.). Types de systèmes d’irrigation. Disponible sur : <https://royalgreenbiotech.com>
- [17] Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2013). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777–1790.
- [18] Himri, Y., Rehman, S., Mostafaeipour, A., Himri, S., Mellit, A., Merzouk, M., & Merzouk, N. K. (2022). Overview of the role of energy resources in Algeria’s energy transition. *Energies*, 15(13), 4731.
- [19] Alakhawin. (s.d.). Utilisation de l’énergie solaire en agriculture. Disponible sur : <https://alakhawin.net/%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D8%AE%D8%AF%D8%A7%D9%85-%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D8%B4%D9%85%D8%B3%D9%8A%D8%A9-%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%B2%D8%B1%D8%A7%D8%B9%D8%A9/>
- [20] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Solar Pumping for Irrigation: Improving Livelihoods and Sustainability*, Abu Dhabi, UAE, 2016.
- [21] Healing Waters International, “How do solar-powered water pumps work?”, Healing Waters, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://healingwaters.org/how-do-solar-powered-water-pumps-work/> [Accessed: Mar. 26, 2026].
- [22] Google Photos, consulté le 13 mars 2026. Disponible sur : <https://share.google/GTJhYOqOjXiHLjnb0>
- [23] Food and Agriculture Organization, *Solar Powered Irrigation Systems – A Guide for Agricultural Water Management*. Rome, Italy: FAO, 2018.
- [24] R. Boussekra and D. Berkane, “Les usages de l’énergie solaire et son rôle dans la réalisation du développement agricole durable : référence à l’Algérie et aux expériences de certains pays arabes,” *Revue Économie, Finance et Affaires*, Université Chahid Hamma Lakhdar – El Oued, vol. 7, no. 2, pp. 693–706, sept. 2022.
- [25] SolarIrrigations, “What is an intelligent irrigation system? Smartphone app controls water-saving irrigation,” *SolarIrrigations Blog*, Nov. 2, 2023. Available:

<http://ar.solarirrigations.com/blog/what-is-an-intelligent-irrigation-system-smartphone-app-controls-water-saving-irr>

- [26] I. Chekali and B. Bagdadi, "Technologie d'irrigation moderne pour améliorer l'efficacité de la consommation de l'eau en agriculture et renforcer le développement rural : expérience d'application des technologies d'irrigation modernes dans une exploitation type," *Ibn Khaldun Journal of Innovation and Développement*, vol. 6, no. 1, 2024.
- [27] Chapitre I : Généralités sur les polymères, University of Biskra Repository, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, disponible sur : <https://archives.univ-biskra.dz>, consulté en 2026.
- [28] Cours sur les polymères, Université Badji Mokhtar-Annaba, Annaba, Algérie, document PDF, disponible sur : <https://www.univ-annaba.dz>, consulté en 2026.
- [29] Chapitre 5 : Propriétés des polymères, Université des Sciences et de la Technologie (USTO), Faculté de Chimie, Master I GPM, 2021–2022. Disponible sur: Scribd. [En ligne]. Disponible: <https://fr.scribd.com/document/566990873/Chapitre-5-Proprietes-Des-Polymeres>
- [30] Université Batna 2, A. Derardja, "Propriétés physico-chimiques et mécaniques des polymères," Cours Master 1 Génie des matériaux, Faculté de Technologie, Département de Mécanique, 2019–2020. [Online]. Available: https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/derardja_akila/files/chapitre_1_polymeres.pdf. [Accessed: Mar. 26, 2026].
- [31] A. Aouabdi, "Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques d'un PEHD2050 concentré à 2.5% de noir de carbone," Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2018–2019. [Online]. Available: <https://share.google/w6qRb2ke3lIPgyfgG>. [Accessed: Mar. 26, 2026].
- [32] Promesse de Fleurs, "Qu'est-ce qu'un hydrorétenteur, à quoi sert-il et comment l'utiliser ?," [Online]. Available: <https://www.promessedefleurs.com/conseil-plantes-jardin/ficheconseil/retenteur-eau-hydreretenteur/>. [Accessed: Mar. 26, 2026].
- [33] Anamica and P. P. Pande, "Polymer Hydrogels and Their Applications," *International Journal of Materials Science*, vol. 12, no. 1, 2017. [Online]. Available: http://www.ripublication.com/ijoms17spl/ijomsv12n1spl_03.pdf
- [34] E. H. Schacht, "Polymer chemistry and hydrogel systems," *Journal of Physics: Conference Series*, 2004.

- [35] Google Photos, consulté le 17 mars 2026. Disponible sur : <https://share.google/nB6bMbZ6976dueBqV>
- [36] G. Satchanska, S. Davidova, and P. D. Petrov, “Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications,” *Polymers*, vol. 16, no. 8, p. 1159, 2024.
- [37] A. Al-Jabari, H. G. Al-Rawashdeh et M. Al-Majali, « Effects of Superabsorbent Polymer on Soil Water Retention under Different Soil Textures », *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2019, pp. 1–8, 2019.
- [38] K. Ali et al., “Progress and Innovations in Hydrogels for Sustainable Agriculture,” *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 2815, 2024. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/12/2815>
- [39] R. Abdelghafar et al., “Effect of super absorbent hydrogel on hydro-physical properties of soil under deficit irrigation,” *Journal of Chemistry*, 2022. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/4914836>
- [40] R. Abdelghafar, A. Abdelfattah, and H. Mostafa, “Effect of super absorbent hydrogel on hydro-physical properties of soil under deficit irrigation,” *Scientific Reports*, vol. 14, article no. 7655, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-57786-5.
- [41] Z. Tariq, D. N. Iqbal, M. Rizwan, M. Ahmad, M. Faheem, and M. Ahmed, “Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding,” *RSC Advances*, vol. 13, pp. 24731–24754, 2023, doi: 10.1039/D3RA03472K
- [42] A review of impacts of hydrogels on soil water conservation in dryland agriculture,” *ScienceDirect*, 2025.
- [43] S. A. Al-Harbi, M. A. Al-Omran, A. S. Alharbi, and M. A. Alghamdi, “Superabsorbent polymers and their application in agriculture,” *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 2815, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/12/2815>
- [44] M. I. H. Mondal, M. Yeasmin, and M. S. Rahman, “Hydrogels: synthesis, properties, and applications in agriculture,” *International Journal of Polymer Science*, vol. 2022, Article ID 4914836, 2022. doi: 10.1155/2022/4914836
- [45] “The Effect of Super Absorbent Polymer on the Soil,” *SOCO Polymer*, 2025. [Online]. Available: <https://www.socopolymer.com/effect-of-super-absorbent-polymer-on-soil.html>
- [46] A review of impacts of hydrogels on soil water conservation in dryland agriculture,” *ScienceDirect*, 2025.

- [47] Recent advances of hydrogel in agriculture: Synthesis, mechanism, properties and applications,” *European Polymer Journal*, 2024.
- [48] “Hydrogel Performance in Boosting Plant Resilience to Water Stress A Review,” MDPI, 2024.
- [49] M. Zekry, I. Nassar, H. Salim et A. Abdallah, « The Potential of Super Absorbent Polymers from Diaper Wastes to Enhance Water Retention Properties of the Soil », *Soil & Environment*, vol. 39, no. 1, pp. 27–37, 2020.
- [50] Y. Wei et D. J. Durian, « Effect of Hydrogel Particle Additives on Water-Accessible Pore Structure of Sandy Soils: A Custom Pressure Plate Apparatus and Capillary Bundle Model », *arXiv preprint arXiv:1209.1070*, 2013.
- [51] K. B. Shishkhanova, V. S. Molchanov, I. V. Prokopiv, A. R. Khokhlov et O. E. Philippova, « The Potential for Reusing Superabsorbent Polymer from Baby Diapers for Water Retention in Agriculture », *Gels*, vol. 11, no. 10, p. 795, 2025, doi: 10.3390/gels11100795.
- [52] M. Azzouzi and O. Aouich, Étude de faisabilité d’une petite station photovoltaïque pour le pompage des eaux agricoles à Ouargla, Mémoire de Licence, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algérie, 2026.

Optimisation de l'irrigation agricole durable par un système intelligent à énergie solaire intégrant des polymères hydro-rétenteurs

Résumé

Ce mémoire vise à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture durable. Des systèmes d'irrigation intelligents solaires ont été intégrés à des polymères hydro-rétenteurs (SAP) pour contrer la rareté de l'eau et la consommation énergétique. La recherche a inclus la conception, la simulation et la construction d'un prototype de système d'irrigation intelligent. Les résultats expérimentaux ont démontré que l'utilisation de polymères réduit la consommation d'eau et améliore la croissance des plantes, confirmant la faisabilité économique et environnementale de la solution pour la gestion des ressources hydriques et l'agriculture durable.

Mots-clés : Irrigation Automatique, Énergie Solaire, Polymères Superabsorbants (SAP), Milieu aride et semi-aride, Efficience de l'Eau (WUE), Agriculture Désertique.

تحسين الري الزراعي المستدام بواسطة نظام ذكي يعمل بالطاقة الشمسية ومدمج مع البوليمرات الهيدرو-محتفظة بالماء
ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى تحسين كفاءة استخدام المياه في الزراعة المستدامة. تم دمج أنظمة ري ذكية تعمل بالطاقة الشمسية مع بوليمرات احتفاظية بالماء (SAP) لمواجهة ندرة المياه واستهلاك الطاقة. البحث شمل تصميم ومحاكاة نظام ري ذكي، وبناء نموذج مصغر. أظهرت النتائج التجريبية أن استخدام البوليمرات يقلل استهلاك المياه ويحسن نمو النباتات، مؤكدة الجدوى الاقتصادية والبيئية للحل المقترح في إدارة الموارد المائية والزراعة المستدامة.

الكلمات المفتاحية: الري الأوتوماتيكي، الطاقة الشمسية، البوليمرات فائقة الامتصاص، الوسط الجاف وشبه الجاف، كفاءة استخدام المياه، الزراعة الصحراوية

Optimization of sustainable agricultural irrigation through a solar-powered intelligent system integrating hydro-retentive polymers

Abstract

This thesis aims to enhance water use efficiency in sustainable agriculture. Smart solar-powered irrigation systems were integrated with water-retaining polymers (SAP) to address water scarcity and energy consumption. The research involved designing, simulating, and building a prototype smart irrigation system. Experimental results demonstrated that polymer use reduces water consumption and improves plant growth, confirming the economic and environmental feasibility of the proposed solution for water resource management and sustainable agriculture

Keywords: Automatic Irrigation, Solar Energy, Super Absorbent Polymers (SAP), Arid and Semi-arid Medium, Water Use Efficiency (WUE), Desert Agriculture.